

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC A RIMOUSKI

**BRUIT ESTIVAL À L'EMBOUCHURE DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT ET
EXPOSITION DES POISSONS ET MAMMIFÈRES MARINS**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN OCÉANOGRAPHIE

PAR

RICHARD LEPAGE

Janvier 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier avant tout mon directeur de recherche, le Dr. Yvan Simard, pour m'avoir donné l'occasion de travailler dans un domaine tout nouveau et passionnant qu'est la physique hydroacoustique. Je lui suis très reconnaissant de l'expérience acquise dans ce domaine ainsi que de l'encadrement qui m'a permis de mieux connaître ce domaine de recherche. Je le remercie également pour sa très grande disponibilité ainsi que sa présence chaleureuse et professionnelle. Je remercie également mon président de jury pour l'évaluation du mémoire, le Dr. Jean-François Dumais et l'évaluateur externe, le Dr. Cédric Gervaise (ENSIETA, France), d'avoir aimablement accepté de lire et de commenter ce travail de recherche. Ce projet n'aurait pu aboutir sans la collaboration de plusieurs personnes, en particulier Catherine Bédard et Xavier Mouy du Laboratoire d'hydroacoustique marine, que je remercie pour la disponibilité et le professionnalisme dont ils ont fait preuve ainsi que dans le partage de leur passion dans les discussions tournant autour du traitement des signaux en hydroacoustique. Je remercie également Nathalie Roy pour sa très grande disponibilité et son aide précieuse durant ce travail de recherche en hydroacoustique. Ce projet a été financé en partie par les fonds de la Chaire de recherche de Pêches et Océans Canada en acoustique marine appliquée aux ressources et à l'écosystème à l'ISMER.

RÉSUMÉ

La présente étude a pour objectif l'estimation du bruit océanique dans la bande de 10 à 1000 Hz à la jonction de l'estuaire et du Golfe du Saint-Laurent ainsi que le suivi de sa variabilité sur une période de cinq mois pendant la saison principale de navigation et de pêche commerciale. L'exposition des poissons et des mammifères marins aux bruits à plusieurs échelles de temps est également analysée en tenant compte des audiogrammes pour les poissons et des courbes de pondération pour les mammifères marins proposées par Southall et al. (2007). De mai à septembre 2005, des enregistrements acoustiques ont été réalisés à l'aide d'un AURAL (hydrophone autonome) à 285 mètres de profondeur au large de Matane, à 8 mètres du fond sur un mouillage vertical. Le niveau de bruit moyen enregistré durant la saison estivale, dominé par le bruit de navigation, a été évalué à 112 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. L'étendue du niveau de bruit variait de 92.1 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à 136 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$; 90% du temps, il était entre 100.3 et 126.6 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Il excédait 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ 14% du temps. En comparaison de l'enveloppe de bruit mesuré dans l'est du Canada par Desharnais et Collison (2001), on enregistra, durant la saison estivale, des valeurs maximales supérieures de quelques 20 dB sur toute la bande de fréquences [10 – 1000 Hz] alors que 70% des valeurs rejoignaient l'enveloppe de bruit. Les spectres du bruit montrent des pics de forte intensité (raies

spectrales) dans les bandes de fréquences de 60 à 120 Hz et de 300 à 400 Hz, provenant des navires circulant dans la région.

Les 25 et 75 percentiles montrent que 50% du temps le bruit mesuré était de ± 5 dB comparable à la courbe de fort trafic maritime de Wenz. Les maxima des niveaux de bruit pondérés variaient entre 112 et 135 dB re $1 \mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pour le groupe des poissons à l'étude et les niveaux de bruit pondérés pour les quatre groupes de mammifères marins atteignaient 100 à 135 dB re $1 \mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. La bande de fréquences contribuant le plus à ces niveaux pour les mammifères marins ainsi que pour les poissons se situe entre 10 et 120 Hz, correspondant à la bande de fréquences du bruit de la navigation. Les Pinnipèdes et le groupe des cétacés spécialisés dans les basses fréquences sont plus sensibles à ce bruit que les autres espèces. Chez les poissons, on retrouve le hareng et l'aiglefin qui sont également plus sensibles au bruit de navigation.

Selon les niveaux pondérés pour les poissons, le temps requis pour atteindre un niveau d'exposition SEL de 215 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ pour une exposition à un bruit SPL de 112 dB re $1 \mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ correspondant à la médiane du niveau de bruit estival est plusieurs fois supérieur à la durée de vie des poissons. Pour les cétacés, le temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ proposé par Southall et al. (2007) pour une exposition à un bruit continu de 112 dB re $1 \mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ est également plusieurs fois supérieur à leur durée de vie. Le temps requis pour atteindre un SEL de 203 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$

proposé par Southall et al. (2007) pour le groupe des pinnipèdes est d'environ 50 ans.

Lors du passage d'un navire type, le niveau de bruit excède de plusieurs dB le niveau médian pendant environ 45 minutes, avec un maximum pouvant le dépasser de 30 dB au point le plus proche (CPA). Cette empreinte de bruit d'un navire est perceptible dans un rayon de 10 km autour de celui-ci. Pendant 13 minutes, autour du CPA, le niveau de bruit est supérieur à un niveau SPL de 120 dB re $1\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	X
CHAPITRE I	1
INTRODUCTION	1
1.1 - Sommaire du bruit océanique dans l'est du Canada.	1
1.2 - Résumé sur l'exposition des poissons et mammifères marins au bruit anthropique.....	11
1.2.1 – L'impact du bruit chez les mammifères marins	11
1.2.2 – L'impact du bruit chez les poissons	16
1.3 - Objectifs de la recherche	20
CHAPITRE II	21
MATÉRIEL ET MÉTHODES	21
2.1 Acquisition des données et aire d'étude.....	21
2.2 Traitement et analyse des données.....	31
CHAPITRE III	42
RÉSULTATS	42
3.1 Évaluation du bruit océanique	42
3.2 Les niveaux de bruit pondérés pour les organismes durant la saison estivale.....	50
3.3 Bruit typique lors du passage d'un navire.....	70

3.3.1 Bruit pondéré pondéré pour les poissons	77
3.3.2 Bruit pondéré pour les mammifères marins	82
3.3.3 Simulation sur l'exposition sonore des animaux au passage d'un navire opportuniste....	87
3.4 Calcul de corrélation du niveau de bruit océanique avec les vents et la marée.....	99
CHAPITRE IV	104
DISCUSSION	104
4.1 Niveau de bruit océanique durant la saison estivale.	104
4.2 Niveau de bruit détecté par les mammifères marins et les poissons.	108
4.3 Niveau de bruit détecté par les mammifères marins et les poissons à proximité d'un navire marchand type.....	112
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Niveau critique de pression sonore et d'exposition sonore pour les mammifères marins selon leur spécialisation auditive (Southall et al. 2007).....	14
Tableau 2- Fréquences de coupure des pondérations M associées à chacun des 4 groupes de mammifères marins (Southall et al. 2007).....	37
Tableau 3-Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour la morue et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.	62
Tableau 4 Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour la plie et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.	63
Tableau 5-Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour le hareng et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.	64
Tableau 6- Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour l'aiglefin et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.	64
Tableau 7- Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux basses fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$	65
Tableau 8- Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux	

moyennes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$	66
Tableau 9- Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux hautes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$	66
Tableau 10- Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux hautes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$	67
Tableau 11 Résumé de la distribution des valeurs SPL pondérés pour la série de 5 mois pour chacun des animaux	68
Tableau 12 Résumé des niveaux d'exposition sonore sur 5 mois pour différentes espèces de poissons et de mammifères marins selon les niveaux de bruit pondéré.	68
Tableau 13 Résumé du temps d'exposition que cela prendrait pour atteindre les niveaux SEL critique causant des dommages auditifs chez les poissons et les mammifères marins à différentes intensités de bruit (voir tableau 11 pour les valeurs SPL_{rms})	69
Tableau 14 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition avant d'atteindre le seuil de dommage selon la distance du navire pour les trois groupes de cétacés	91
Tableau 15 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition sonore avant d'atteindre le seuil de dommage selon la distance du navire pour le groupe des pinnipèdes	92

Tableau 16 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition sonore avant d'atteindre le seuil de dommage SEL de 215 dB selon la distance du navire pour le groupe des poissons.....	95
Tableau 17 Périodes à plus forte variance identifiés dans les séries.	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Courbes de référence du bruit dans la mer adaptées de Wenz, 1962 (source NRC, 2003).	3
Figure 2 Courbes de Knudsen de la contribution du vent sur le bruit ambiant (NRC, 2003).	4
Figure 3-Courbes de pondération M pour différents groupes de mammifères marins (Southall et al. 2007).	14
Figure 4 – Exemples de courbe de sensibilité auditive (audiogramme) de divers poissons (Thomsen et al. 2006).	18
Figure 5 – Présentation de l’AURAL (appareil autonome de détection de signaux sonores sous-marins) qui a servi lors de l’expérimentation 2005.	21
Figure 6 - Emplacement de l’AURAL près de Matane où la profondeur est de 293 mètres. L’Aural était maintenu à 285 mètres de profondeur par un système de mouillage vertical.	22
Figure 7 Plan du mouillage en « I » où l’Aural était placé à une altitude d’environ 10 mètres. La bouée supérieure était à une altitude d’environ 20 mètres.	23
Figure 8 Évolution de la profondeur de l’Aural en fonction du temps. Les données proviennent du capteur de pression de l’Aural.	24
Figure 9 Évolution de la température à l’emplacement de l’Aural à une profondeur moyenne de 286.4 mètres. Les données proviennent du capteur de température de l’Aural.	24

Figure 10 - Courbe de sensibilité (RS) relativement plate de l'hydrophone HTI-96-min utilisé pour les enregistrements dans la bande de fréquences de 100 Hz à 4 kHz.	25
Figure 11 – Le Cicéro est un porte-conteneur de 147 mètres dont la position est monitorée aux deux minutes (Lloyd's 2001,2005).	26
Figure 12 Distance horizontale en fonction du temps lors du passage du Cicéro à 598 mètres de l'Aural à son point le plus près (CPA) le 23-05-2005.....	27
Figure 13 Distance horizontale en fonction du temps lors du passage du Cicéro à 7.82 km de l'Aural au CPA le 21-05-2005.	28
Figure 14 Angle azimutal en fonction de la distance radiale lors des deux passages du Cicéro près de l'Aural, utilisés pour calculer le champ de bruit rayonné.....	28
Figure 15 Tracé des passages du Cicéro pour les 21 et 23 mai 2005.	30
Figure 16 Les étapes d'acquisition des données acoustique.....	32
Figure 17 Les étapes de prétraitement pour l'échantillonnage aléatoire d'une séquence de 5 minutes par période de 6 heures éliminant les séquence présentant du bruit de vibrations.....	32
Figure 18 Audiogramme de la morue franche et pondération dérivée (<i>Gadus morua</i>).	35
Figure 19 Audiogramme de la Plie et pondération dérivée (<i>Pleuronectes platessa</i>).	35
Figure 20 Audiogramme du Hareng et pondération dérivée (<i>Clupea harengus</i>).	36
Figure 21 Audiogramme de l'Aiglefin et pondération dérivée (<i>Melanogrammus aeglefinus</i>).	36
Figure 22 Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les basses fréquences proposée par Southall et al. (2007).....	38

Figure 23 Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les moyennes fréquences proposée par Southall et al. (2007).....	38
Figure 24 Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les hautes fréquences proposée par Southall et al. (2007).....	39
Figure 25 Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupes des pinnipèdes communiquant sous l'eau proposée par Southall et al. (2007).....	39
Figure 26 Diagramme des étapes de calcul pour le PSD, tiers d'octave et valeur rms.	41
Figure 27-Densité spectrale de puissance s'étendant de 1 à 1000 Hz pour chacun des fichiers de 5 minutes à intervalle de 6 heures durant la période estivale.....	43
Figure 28-Spectrogramme de l'évolution du bruit océanique sur toute la période s'étendant du 19 mai au 17 octobre 2005 pour des fréquences comprises entre 1 et 1000 Hz.....	43
Figure 29 Niveau de pression sonore SPL_{rms20} [17.8 Hz – 897 Hz] pour la période s'étendant du 19 mai 2005 au 17 octobre 2005 à intervalle de 6 heures.	44
Figure 30 Niveau SPL_{rms20} moyen par jour pour la période s'étendant du 18 mai 2005 au 18 octobre 2005 pour la bande de fréquence [17.8 – 897 Hz].....	45
Figure 31 Histogramme des niveaux SPL_{rms20} [17.8 Hz-897 Hz] durant la saison estivale.	45
Figure 32-Box plot des spectres en tiers d'octave présentant la distribution du bruit océanique en fonction de la fréquence pour toute la période estivale (N=602 spectres).	46

Figure 33-Enveloppe du niveau SPL_{rms} du bruit océanique par tiers d'octave pour la série de 5 mois (N=602 spectres).	47
Figure 34-Enveloppe des spectres de puissance du bruit par bande de 1Hz durant la saison estivale (N=602 spectres).....	48
Figure 35-Comparaison avec les courbes de Wenz (NRC, 2003) de l'enveloppe de la densité spectrale de puissance du bruit océanique mesuré pendant la période estivale de 5 mois, incluant la médiane, le 1 ^{er} et le 3 ^e quartile, la valeur minimale et maximale (N=602 spectres).	49
Figure 36 –Niveau de bruit en fonction de la fréquence pondéré selon les courbe de pondération de type M pour les quatre groupes de mammifères marins (N=602 spectres).	50
Figure 37 Box-plot des niveaux de bruit pondérés exprimés en tiers d'octave pour les quatre groupes de mammifères marins (N=602 spectres).....	52
Figure 38 Niveau de bruit pondéré des poissons pendant la période de 5 mois (N=602 spectres).	53
Figure 39 Niveau de bruit pondéré en tiers d'octave pour les quatre poissons durant la période estivale (N=602 spectres).....	54
Figure 40 Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de la morue franche durant la saison estivale.	55
Figure 41- Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de la plie durant la saison estivale.	55
Figure 42 Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz du hareng durant la saison estivale.	56

Figure 43 Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de l'aiglefin durant la saison estivale.	56
Figure 44 Valeur SPL-M _{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les basses fréquences durant la saison estivale.	57
Figure 45- Valeur SPL-M _{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les moyennes fréquences durant la saison estivale.	57
Figure 46 Valeur SPL-M _{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les hautes fréquences durant la saison estivale.	58
Figure 47 Valeur SPL-M _{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des pinnipèdes communiquant sous l'eau durant la saison estivale.....	59
Figure 48 Histogrammes lissés du niveau de bruit pondéré pour les quatre poissons durant la saison estivale comparés à ceux du bruit non pondéré.	60
Figure 49 Histogrammes lissés du niveau de bruit pour les quatre groupes de mammifère marin durant la saison estivale comparés à ceux du bruit non pondéré.....	61
Figure 50 Oscillogramme d'une durée de 60 minutes présentant le bruit enregistré lors du passage du Cicéro le 23 mai 2005 à 598 mètres au plus près de l'Aural. Le CPA est représenté par la droite verticale qui coupe le signal en deux parties (avant et après le CPA)	71
Figure 51- Spectrogramme correspondant à la figure 50 présentant la signature fréquentielle couvrant la bande 0 à 1000 Hz et montrant des interférences de miroirs de Lloyds ainsi que des raies spectrales associées au navire dont la fréquence baisse légèrement après le CPA par suite de l'effet Doppler. La droite verticale	

correspond au CPA, soit la distance la plus courte entre l'Aural et le navire, soit 598 mètres.....	71
Figure 52 Oscillogramme d'une durée de 60 minutes présentant le bruit enregistré lors du passage du Cicéro le 21 mai 2005 à 7.82 km de l'Aural. Le CPA est représenté par la droite verticale qui coupe le signal en deux parties (avant et après le CPA)	72
Figure 53 Spectrogramme correspondant à la figure 52 présentant la signature fréquentielle couvrant la bande 0 à 1000 Hz et montrant des interférences de miroirs de Lloyds ainsi que des raies spectrales associées au navire. La ligne verticale correspond au CPA, soit 7.82 km.	72
Figure 54 Niveau de bruit (SPL rms) du Cicéro lors de son passage à 598 mètres (23-05-2005) et à 7.82 km (21-05-2005) de l'Aural à son CPA (La courbe foncée correspond au passage à 7.82 km de l'Aural et la ligne verticale en pointillées correspond à leurs CPA).	73
Figure 55 Niveau de bruit mesuré pendant 60 min lors du passage du Cicéro à un CPA de 7.82 km le 21-05-2005 et de 598 mètres le 23-05-2005 (Min, 1 ^{er} quartile, médiane, 3 ^{er} quartile et max).....	74
Figure 56 Niveau de bruit du navire pendant les 30 minutes avant et après son passage au CPA et équation de tendance pour les deux trajets.....	75
Figure 57 Niveau SPL pondéré pour la morue lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	77
Figure 58 PSD pondéré pour la morue lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	78
Figure 59 Niveau SPL pondéré pour la plie lors des passages du Cicéro autour de leurs CPAs.	78

Figure 60 PSD pondéré pour la plie lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	79
Figure 61 Niveau SPL pondéré pour le hareng lors des passages du Cicéro autour de leurs CPAs.	79
Figure 62 PSD pondéré pour le hareng lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.....	80
Figure 63 Niveau SPL pondéré pour l'aiglefin lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	81
Figure 64 PSD pondéré pour l'aiglefin lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	81
Figure 65 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des cétacés aux basses fréquences lors des deux passages du navire pour 60 min autour de leur CPA.....	82
Figure 66 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux basses fréquences lors des deux passages du navire.....	83
Figure 67 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des cétacés aux moyennes fréquences lors des passages du navire pour 60 min autour de leurs CPAs.....	83
Figure 68 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux moyennes fréquences lors des deux passages du Cicéro.	84
Figure 69 Niveau SPL-M pour le groupe des cétacés aux hautes fréquences lors des deux passages du Cicero.....	84
Figure 70 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux hautes fréquences lors des deux passages du navire.....	85

Figure 71 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des pinnipèdes lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	86
Figure 72 PSD-M pondéré pour le groupe des pinnipèdes lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.	86
Figure 73 Niveau de bruit du Cicero SPL_{rms} [17.8 - 897 Hz] lors des deux passages avant et après les CPAs.	88
Figure 74 Niveaux SPL-M des quatre groupes de mammifères marins et médiane des quatre courbes du bruit pondéré lors du passage ayant un CPA à 7.82 km.	89
Figure 75 Niveaux SPL-M des quatre groupes de mammifères marins et médiane des quatre courbes du bruit pondéré lors du passage ayant un CPA à 598 m.	89
Figure 76 Niveau médian de bruit $SPL-M_{rms}$ [17.8 - 897 Hz] pour les mammifères marins en fonction de la distance correspondant aux figures 74 et 75, 60 min autour du CPA lors des deux passages du Cicéro.	90
Figure 77 Niveaux SPL pondéré des quatre poissons et médiane des quatre courbes du bruit lors du passage ayant un CPA à 7.82 km.	93
Figure 78 Niveaux SPL pondéré des quatre poissons et médiane des quatre courbes du bruit lors du passage ayant un CPA à 598 m.	93
Figure 79 Niveau médian de bruit pondéré pour les poissons versus la distance du navire, 60 min autour du CPA lors des deux passages du Cicéro.	94
Figure 80 Spectre de bruit perçu par la morue franche lors du passage du Cicéro le 23 mai, dont le CPA était à 598 mètres (B) relativement au spectre de bruit total (A).	96
Figure 81 Patron de directivité du Cicéro obtenu à partir des données GPS et acoustiques lors des deux passages.	98

Figure 82 Vitesse moyenne des vents par période de 6 heures pour une durée de 2.5 mois. (Station IML4, Matane, Pêches et Océan Canada)	99
Figure 83-Signal de marée du 18/05/2005 au 18/10/2005 à intervalle de 1 heures près de Matane (réf. Pêches et Océan Canada).	100
Figure 84 Périodogramme de la série SPL_{rms} représentée par les bandes de 5 minutes à intervalle de 6 heures.	101
Figure 85 Périodogramme de la série des données du vent mesurées à la station IML4.	102
Figure 86 Périodogramme de la série des données de marée aux 6 heures.	102
Figure 87 Courbe de corrélation du vent avec les niveaux SPL_{rms} par tiers d’octave pour la série acoustique de 5 mois.	103
Figure 88 Comparaison des distributions des densités spectrales de puissance par bande de 1 Hz pour la période estivale avec l’enveloppe des valeurs comparables mesurées dans l’Atlantique à l’extérieur du Golfe du Saint-Laurent par Desharnais and Collison (2001, planche 14) (enveloppe sertie de carrés blanc). À l’intérieur de l’enveloppe de Desharnais et Collisson, les courbes tracées sont représentatives des percentiles 0 (min), 25, 50 (médiane), 75 et 100 (max).	107

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 - Sommaire du bruit océanique dans l'est du Canada.

Le bruit sous-marin produit par des sources sonores anthropiques est aujourd'hui considéré comme l'une des contraintes les plus importantes à prendre en considération dans le développement des technologies marines. On connaît très peu le seuil de tolérance acoustique des divers organismes de l'écosystème marin. Des effets négatifs d'une exposition continue à des sources de bruit anthropique peuvent entraîner des pertes de sensibilité auditive chez les organismes marins pouvant affecter plusieurs fonctions métaboliques ou comportementales, contribuant à diminuer les chances de croissance, de reproduction et de survie (André et al. 1997, Southall et al. 2007, NRC 2005). On considère le bruit sous-marin comme provenant de sources naturelles et anthropiques, chacune affectant un domaine de fréquence spécifique (Wenz 1962, Fig. 1). Parmi les sources naturelles, on mentionne notamment les effets du vent et des vagues, par jets d'eau et les microbulles d'air introduites dans le milieu marin, de la pluie, des changements de pression, des séismes, de la glace et toutes sources biologiques.

Pour les sources anthropiques dominantes du bruit océanique¹, on retrouve d'abord la navigation maritime qui affecte principalement la bande de ~5 Hz à 10 kHz avec un maximum autour de 100 Hz (Fig. 1). Avec l'augmentation de la navigation au cours du dernier siècle, l'environnement acoustique des océans a changé, particulièrement dans les basses fréquences (< 500 Hz) en réponse au trafic maritime (Andrew et al. 2002; McDonald et al. 2006). Parmi les autres sources anthropiques on compte, entre autres, les activités de construction marines et côtières telles celles des quais, l'exploration sismique pour la prospection du gaz et du pétrole, les explosions, les sonars, les avions et les hélicoptères (Fig. 1). Mentionnons finalement que, pour détecter des sous-marins devenus très silencieux, les militaires ont développé des systèmes de sonars à très basses fréquences (Low Frequency Active sonar systems ou LFA) dont les puissants faisceaux sonores (230 dB re 1 μ Pa à 1 m) se propagent sur des centaines de kilomètres et qui préoccupent à cause de leurs effets sur les mammifères marins (NRC 2003).

¹ NRC 2003 intégrant le bruit de toutes sources, voir p.4.

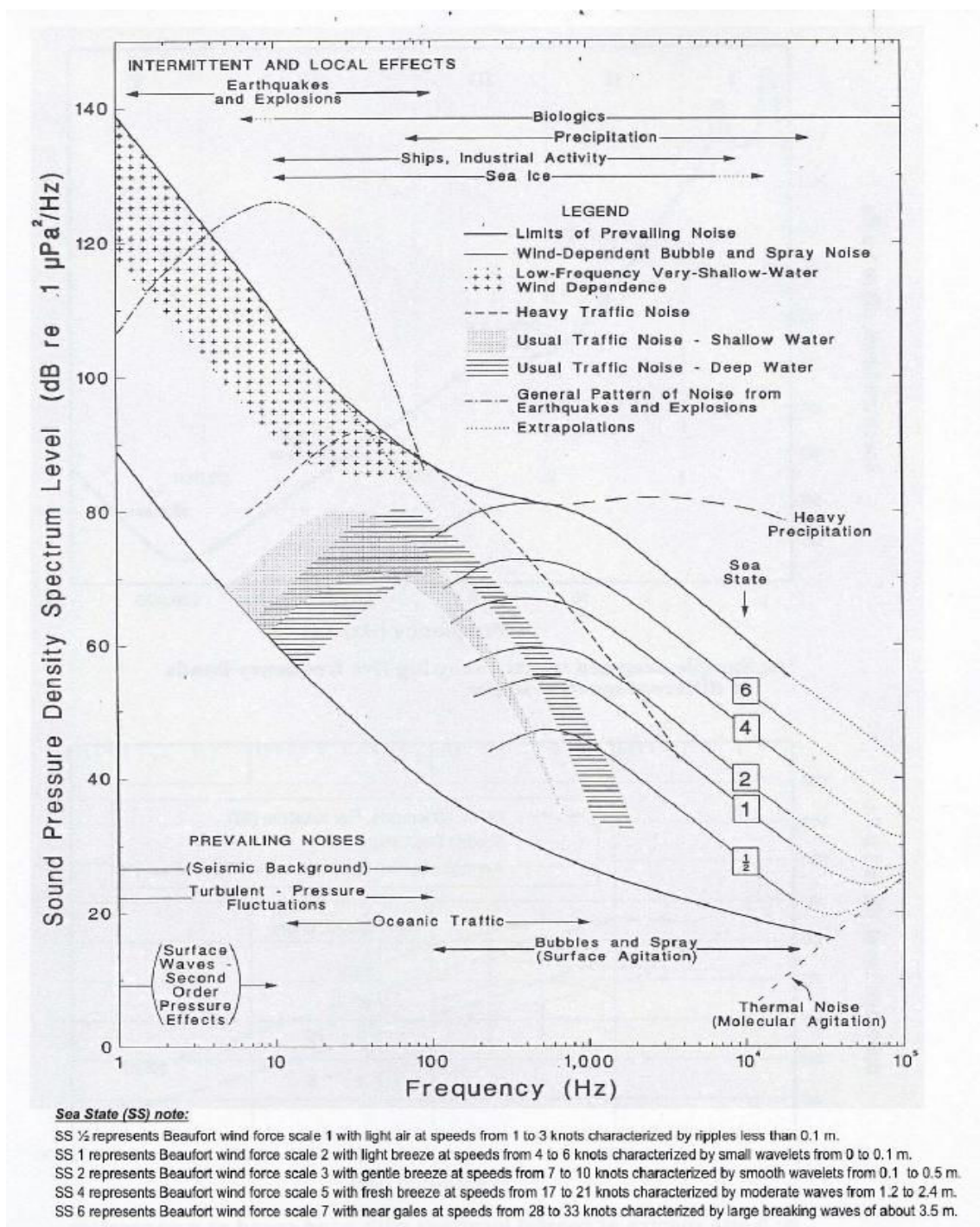


Figure 1 Courbes de référence du bruit dans la mer adaptées de Wenz, 1962 (source NRC, 2003).

La quantification de la contribution de chacune de ces sources dans un environnement donné nécessite donc un effort de recherche considérable (NRC 2003). La diversité des caractéristiques des différents environnements se traduira par une diversité de conditions sonores, que seules des mesures permettront de documenter adéquatement.

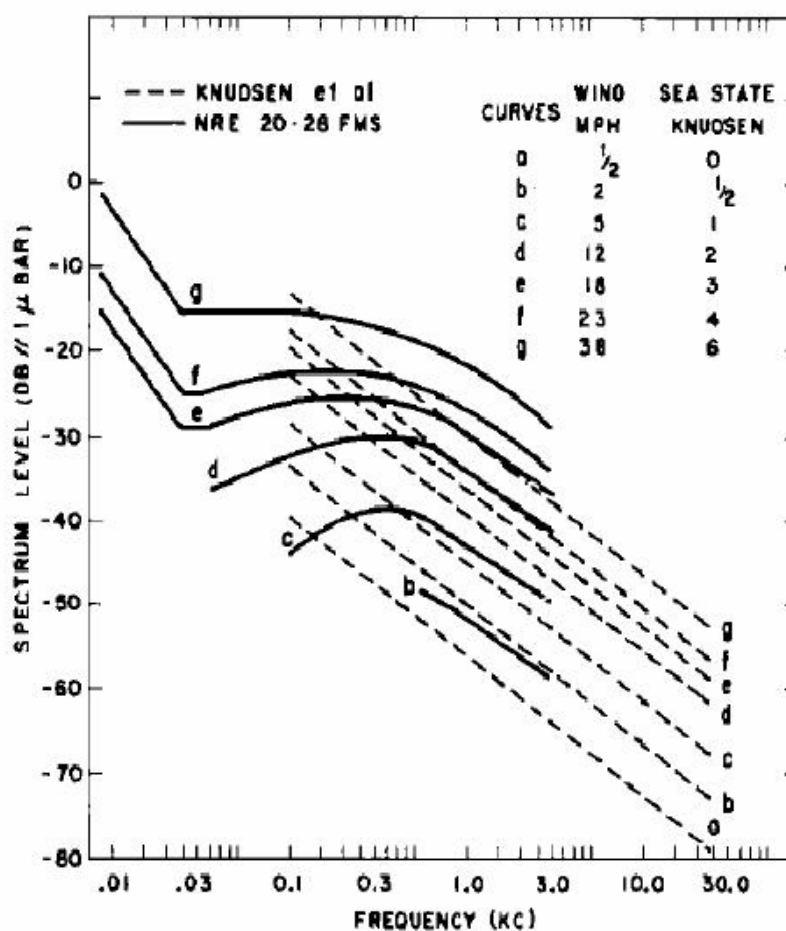


Figure 2 - Courbes de Knudsen de la contribution du vent sur le bruit ambiant (NRC, 2003).

D'une manière générale, on s'accorde pour dire que le bruit de la navigation domine entre 10 et 100 Hz, bien qu'il soit notable à des fréquences plus élevées, et que le bruit dû à l'effet du vent sur l'état de la mer affecte plus les fréquences supérieures, de quelques 200 Hz à 10 kHz (Fig. 1). Or, l'estuaire du Saint-Laurent est une voie maritime continentale majeure. En plus des flottes de pêche, des traversiers et des bateaux d'excursions, environ 6000 navires marchands empruntent l'estuaire durant l'année dont 64 % durant la période estivale (Anonymous 2000). Tous ces bateaux représentent des sources importantes de bruit qui se propagent dans l'environnement sous-marin. Un signal qui se propage dans un médium subit également des pertes par propagation. Dans un milieu bruyant, la distance de détection d'un signal par un instrument ou un organisme biologique sera réduite quelle que soit son intensité à la source (Urlick 1983). Le bruit généré par les navires peut alors masquer les signaux émis par les organismes pour communiquer entre eux, tels ceux des mammifères marins et des poissons, et ainsi perturber leur comportement dans l'écosystème marin. Cela réduit d'autant la possibilité de détection de ces sons par l'acoustique passive avec des hydrophones déployés dans l'environnement (Simard et al. 2008a).

On définit de manière générale le bruit océanique et le bruit ambiant (Simmonds et al. 2004). Le **bruit océanique** est le bruit provenant de toutes les sources, anthropiques et naturelles, incluant le bruit de sources spécifiques identifiables ainsi que le bruit ambiant. C'est ce bruit qui fournit le contexte

sonore de l'environnement auquel les organismes qui y vivent sont soumis. Le ***bruit ambiant*** est le bruit associé au bruit de fond émanant d'une myriade de sources non identifiées, et où aucune d'entre elles ne domine dans le champ d'observation. Par exemple, le bruit de fond du trafic maritime distant fait partie du bruit ambiant alors que le bruit d'un navire passant dans le champ d'observation fait partie du bruit océanique. La mesure du bruit ambiant dans une voie de navigation achalandée telle que le Saint-Laurent en été est difficile à réaliser parce qu'il est rare qu'aucune source identifiable ne soit présente dans le champ d'observation. Les mesures de bruit présentées dans ce travail sont celles du bruit océanique auquel sont exposés les organismes dans l'aire d'étude.

Les premières mesures de bruit sous-marin effectuées dans l'est du Canada remontent à Piggott (1964). Cet auteur a montré, à partir d'enregistrements d'un an à 40 et 56 m de profondeur, à 3 milles au large de la côte sur le plateau Néo-Écossais, que les niveaux de bruit sur la bande de 8 à 3100 Hz étaient corrélés avec le logarithme de la vitesse du vent. Piggott a noté une différence de 3 dB entre l'hiver et l'été, qu'il explique notamment par les effets de propagation dus au changement saisonnier de température de l'eau. En effet, la profondeur où la thermocline évolue varie en fonction de la saison et représente une couche de transition thermique rapide entre les eaux superficielles et les eaux profondes. Piggott conclut également que ses observations sont en accord avec les courbes de Wenz (Fig. 1), mais avec des

niveaux de quelques 3 dB supérieurs dus à la faible profondeur de son environnement par rapport aux conditions océaniques. Piggott observa également que les pentes d'atténuation de l'effet du vent aux fréquences plus élevées sont en accord avec les courbes de Knudsen (Fig. 2).

Perrone (1973) a réalisé des mesures en continu à 1230 m de profondeur pendant 8 jours au large des Grands Bancs de Terre-Neuve, sur une bande de fréquences de 1 Hz à 250 Hz. Il montre que le bruit ambiant entre 1 Hz et 4 Hz est fortement lié à la vitesse du vent mais qu'aux plus hautes fréquences, c'est le bruit des gros navires de pêche qui est la source dominante.

Zakarauskas et al. (1990) font une revue des mesures de bruit effectuées par le DREA (Defence Research Establishment of Atlantic) au cours de 14 missions de 1972 à 1985 dans la bande de 30 à 900 Hz, sur 5 zones de l'Atlantique canadien: deux zones du plateau Néo-Écossais, le Chenal Laurentien, les Grands Bancs, et le Bonnet Flamand. Ils concluent que le bruit ambiant est plus fort en hiver qu'en été, suite à de meilleures conditions de propagation, qu'il est plus fort sur le plateau Néo-Écossais que sur le reste du plateau continental, vraisemblablement en raison d'un trafic maritime plus élevé et de meilleures conditions de propagation.

Hazen et Desharnais (1997) ont répété des mesures mensuelles d'une heure pendant 1 an à 4 sites afin d'étudier les variations spatiales et temporelles du bruit ambiant dans la bande de 10 Hz à 2000 Hz : deux sur le plateau Néo-

Écossais, un au sud de Terre-Neuve près de l'embouchure du Chenal Laurentien et l'autre sur les Grands Bancs. Ils concluent que la contribution du trafic maritime, qui est la source majeure du bruit entre 10 et 100 Hz, est plus importante aux deux sites du plateau Néo-Écossais et que les variations saisonnières du profil de température favorisent une plus grande perte par propagation pendant l'été, où les rayons acoustiques sont réfractés vers le fond, tel que le montraient les niveaux plus faibles mesurés aux sites de l'embouchure du Chenal Laurentien et des Grands Bancs en été. Les contributions du vent au bruit au-delà de 100 Hz montraient aussi une forte saisonnalité, avec des valeurs de 20 à 30 dB plus faibles en juillet. Le modèle de Merlinger-Stockhausen de prédiction du bruit en fonction de la vitesse du vent s'ajustait bien aux observations pour les vitesses supérieures à 10 nœuds. Il a également été trouvé, qu'à la fréquence de 20 Hz correspondant à des vocalisations typiques de rorqual commun, un cycle annuel où les niveaux étaient plus forts pendant la saison de présence des baleines en automne et en hiver qui a été observé à tous les sites. Les résultats n'ont pu mettre en évidence de différences claires entre les sites, suite à la nature différente du fond, à cause des contributions dominantes du vent et du trafic maritime sur les niveaux de bruit.

Desharnais et Collison (2001) ont mesuré le bruit près de l'île de Sable et dans le Gully, sur le plateau Néo-Écossais, ainsi qu'à l'entrée du Chenal Laurentien en mai et décembre 1998. Leurs résultats confirment leurs

observations antérieures, à savoir que les variations spatiales et temporelles du bruit du trafic maritime, du vent et de l'occurrence de vocalisations de rorquals communs, notamment le long de la marge du plateau continental, contribuent à expliquer les variations spatiales dans les mesures de bruit aux différents sites. Ils ajoutent ces données à celles récoltées par l'équipe du DREA auparavant pour produire une enveloppe du bruit ambiant entre 10 et 1000 Hz mesuré à ce jour sur le plateau continental du sud-est du Canada. Cette enveloppe est large de quelques 25-30 dB sur toute cette bande de fréquences et présente un maximum autour de 100 Hz.

Des mesures fournies pour le détroit de Cabot à quelques 106 m sous la glace du 23 février au 16 avril 1971 (Collier 1973), indiquent que le couvert de glace, de 10% à 100% de couverture, a un effet modérateur sur l'effet du vent comparé aux mesures en eau libre.

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, quelques travaux acoustiques dédiés au comportement du béluga ont été réalisés dans les années 1980 et 1990 (Faucher 1988, Lesage 1993, Lesage et al. 1999), mais aucun niveau de bruit n'a été mesuré en valeurs absolues, bien que les spectres d'un zodiac et d'un traversier sont fournis en valeurs relatives. Scheifele (1997) est le premier à mentionner des valeurs de bruits mesurés à l'entrée du Saguenay en juillet 1994, qu'il estime être de 140 à 158 dB re 1 μ Pa dans la bande de 0.1 Hz à 10 kHz, ce qui détonne considérablement par rapport à Desharnais et Collison

(2001). Il observe que les niveaux de bruit sont inférieurs à tous les sites le matin à 07:00, que les différences entre ces mêmes sites sont importantes, particulièrement aux « basses » fréquences de 500 Hz, 1 kHz et 10 kHz, et coïncident avec le niveau de trafic maritime, et que les niveaux les plus élevés surviennent en mi-journée au site d'activité de la flottille d'observation des baleines à la tête du Chenal.

Scheifele et Darre (2005) reprennent ces résultats pour une comparaison avec le sanctuaire marin de Stellwagen Bank au Massachusetts. Dans une étude de l'effet du bruit sur l'intensité des vocalisations de bélugas, Scheifele et al. (2005) présentent des valeurs de bruit intégrées sur la bande inférieure à 5 kHz qui varient de 60 à environ 130 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. Ces valeurs sont difficiles à comparer à d'autres parce que les détails requis pour leur estimation ne sont pas fournis ainsi que les unités utilisées.

Simard et al. (2006a,b, 2008a) présentent l'enveloppe du bruit océanique mesuré à la tête du Chenal laurentien à l'été 2003 et les statistiques du bruit aux fréquences de vocalisation du rorqual bleu (36–90 Hz) et des rorquals commun (18–23 Hz) correspondant à plus de 15900 heures de mesures en 2004 et 2005. Les niveaux de bruit sont élevés et peuvent excéder 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ dans ces étroites bande de fréquence de vocalisation. L'enveloppe, large de quelque 25 dB, présente un maximum autour de 50 Hz.

1.2 - Résumé sur l'exposition des poissons et mammifères marins au bruit anthropique

1.2.1 – L'impact du bruit chez les mammifères marins

Contrairement au milieu terrestre, l'environnement aquatique n'est pas propice à la propagation des ondes lumineuses qui s'atténuent très rapidement. Par contre, les ondes sonores se propagent environ cinq fois plus rapidement que dans l'air (1500 m/s comparativement à environ 340 m/s dans l'air) et sur des distances beaucoup plus grandes si la longueur d'onde est grande. Cette particularité du milieu marin a mené un grand nombre de mammifères marins et de poissons à s'adapter morphologiquement, anatomiquement et physiologiquement (Richardson et al. 1995, Amoser et al. 2005). Pour les cétacés (odontocètes et mysticètes), les échanges de signaux dans leur environnement se font principalement par contact visuel, par voie acoustique et tactile. Cependant, pour des individus séparés par de grandes distances, l'acoustique est le moyen de communication privilégié comparativement à la vue ou le touché. La fréquence acoustique des vocalisations tonales émises par les odontocètes et les mysticètes est inversement proportionnelle à la longueur de l'animal (Matthews et al. 1999). Les odontocètes produisent des sifflements couvrant une très large bande de fréquence (de ~5 Hz à 20 kHz) et certaines espèces ont développé un système d'écholocation au moyen de clics couvrant les hautes et très hautes fréquences dépassant 120 kHz. Les mysticètes utilisent

plutôt les basses fréquences (de ~5 Hz à 8 kHz) et ne posséderaient pas de système d'écholocation (Richardson et al. 1995).

La production de sons permet aux cétacés d'obtenir de l'information sur leur environnement comme la présence de danger ou de nourriture, plus particulièrement chez les odontocètes grâce à l'écholocation (NRC, 2003). Les sons leur permettent également de signaler leur identité, leur position géographique ou leur statut reproducteur (Richardson et al. 1995). Les mammifères marins comprennent les pinnipèdes, dont les représentants sont les otaries, les lions de mer, les éléphants de mer et diverses espèces de phoques. Ceux-ci communiquent autant dans l'air que dans l'eau et leur système auditif s'étend sur une bande de fréquence de 1 kHz à 20 kHz s'approchant du système auditif humain. Ils ont une gamme optimale de réception très variable dont le seuil auditif est typiquement de 50 dB re 1 μ Pa (Richardson et al. 1995).

Dans la littérature, il y a très peu d'informations concernant les seuils de gêne et de douleur chez les cétacés conduisant à des modifications de comportement, ainsi qu'à des pertes d'audition temporaires (*TTS : temporary threshold shift*) ou permanentes (*PTS : permanent threshold shift*). Pour des raisons d'éthique, les éléments disponibles dans la littérature sont plutôt basés sur des analogies avec les mammifères terrestres ainsi que sur des extrapolations d'après des mesures en milieu artificiel.

Finneran et al. (2002) ont effectué des travaux plus spécifiques qui ont porté sur le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) et le béluga (*Delphinapterus leucas*) pour étudier leur tolérance à des signaux sismiques. Ils ont observé que pour des niveaux de 228 dB re 1 μ Pa à la réception, on ne retrouvait aucune baisse significative d'audition chez le dauphin tandis qu'un niveau de 226 dB re 1 μ Pa à la réception provoquait un léger TTS chez le béluga qui était d'environ 6 dB avec un retour à la normale après 4 minutes.

D'autres expériences effectuées par Schlundt et al. (2000) sur les mêmes espèces ont mis en évidence l'apparition de TTS pour des niveaux compris entre 191 et 201 dB re 1 μ Pa pour des durées de signaux monochromatiques de 1 s à des fréquences de 0.4 ; 3 ; 10 ; 20 et 75 kHz.

Dans leur revue des effets du bruit sur les mammifères marins, Southall et al. (2007) proposent des niveaux d'exposition sonore à ne pas dépasser pour différents groupes de mammifères marins exposés à un évènement sonore discret afin de minimiser le risque de dommages physiques à l'oreille interne (tableau 1). On désigne par le terme SEL (Sound Exposure Level) la somme de toutes les énergies acoustiques contenu à l'intérieur d'un évènement temporel. Les unités sont exprimées en dB re μ Pa²-s.

Groupe des mammifères marin	Types de bruit		
	Impulsion simple	Impulsions multiples	Continue
Cétacés basses fréquences			
Niveau de pression sonore	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa
Niveau d'exposition sonore	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{lf})	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{lf})	215 dB re 1 uPa ² .s (M _{lf})
Cétacés moyennes fréquences			
Niveau de pression sonore	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa
Niveau d'exposition sonore	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{mf})	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{mf})	215 dB re 1 uPa ² .s (M _{mf})
Cétacés hautes fréquences			
Niveau de pression sonore	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa
Niveau d'exposition sonore	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{hf})	198 dB re 1 uPa ² .s (M _{hf})	215 dB re 1 uPa ² .s (M _{hf})
Pinnipèdes dans l'eau			
Niveau de pression sonore	218 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa	230 dB re 1 uPa
Niveau d'exposition sonore	186 dB re 1 uPa ² .s (M _{pw})	186 dB re 1 uPa ² .s (M _{pw})	203 dB re 1 uPa ² .s (M _{pw})

Tableau 1 Niveau critique de pression sonore et d'exposition sonore pour les mammifères marins selon leur spécialisation auditive (Southall et al. 2007).

On retrouve également dans le même document des courbes de pondération de type M proposées pour différents groupes de mammifères marins (fig. 3) par analogie aux courbes de pondération de type C utilisées pour l'audition humaine, pour estimer les niveaux d'exposition sonore.

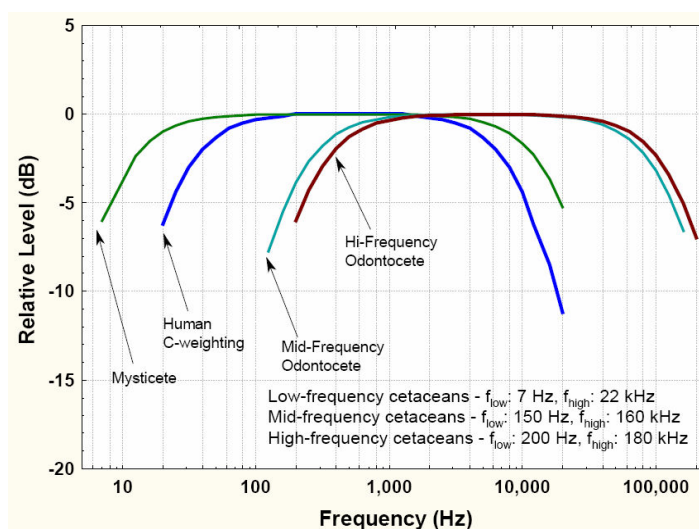


Figure 3-Courbes de pondération M pour différents groupes de mammifères marins (Southall et al. 2007).

Les différences entre les types de courbe se situent dans les valeurs des fréquences de coupure dans les basses et hautes fréquences. Seuls les dommages physiques sont considérés dans les critères du tableau 1. Cependant, l'impact du bruit anthropique passe d'abord par un comportement d'évitement lorsque le niveau de bruit est élevé. L'impact du bruit sur les populations de mammifères marins est d'abord relié aux effets sur leur comportement à court, moyen et long termes (Southall et al. 2007).

Dans le présent travail, nous utilisons ces mêmes courbes de pondération de type M pour évaluer le niveau d'exposition pour les différents types de mammifères marins. Les niveaux d'exposition critiques pour des bruits continus du tableau 1 sont utilisés pour évaluer les temps d'exposition nécessaires pour les atteindre dans la région d'étude.

1.2.2 – L'impact du bruit chez les poissons

Pour connaître l'impact du bruit chez les poissons, il est nécessaire de se rappeler les organes de réception qui peuvent être affectés par le bruit. Un organe que l'on retrouve chez certains poissons est la vessie natatoire, qui régule la flottabilité et qui joue aussi un rôle d'organe vibratoire permettant la production de sons (Sand 1973). Les poissons n'ayant pas de vessie natatoire sont les Sélaciens dont les représentants sont les requins et les raies, les Pleuronectidés où on retrouve les poissons plats et les scombridés (thon, maquereau...); les poissons vivant sur le fond ou qui doivent constamment nager pour éviter de couler au fond. La vessie natatoire, remplie de gaz, (oxygène, gaz carbonique et azote) fournit un avantage auditif dû à la haute compressibilité du gaz comparé à l'eau. Lorsque le volume de gaz est exposé à un changement de pression provoqué par une perturbation sonore, la fluctuation sur le volume de gaz est plus élevée comparativement à la fluctuation sur un volume d'eau comparable et les mouvements amplifiés à la surface de la vessie sont transmis à l'oreille interne (Sand 1973).

On retrouve également chez le poisson des organes du système de la ligne latérale qui offrent une structure grossièrement comparable à celle de l'oreille interne chez l'humain. « La ligne latérale est formée de cellules sensorielles disposées dans des canaux longitudinaux qui s'étendent sur les flancs de l'animal et se ramifient pour entourer la tête. Les canaux sont situés

juste sous la peau, qui est criblée de pores ou recouverte d'écailles modifiées, perforées. Tout mouvement de l'eau dans le voisinage du poisson crée une onde de pression qui se répercute sur l'animal et anime le mucus contenu dans les pores et les canaux de la ligne. Le mucus excite alors les cils des neuromastes qui stimulent les nerfs et déclenchent des impulsions électriques, qui se transmettent au cerveau. Chez tous les poissons osseux, on retrouve aussi l'oreille interne qui est constituée de trois paires d'otolithes formés de carbonate de calcium d'une densité de masse voisine de 3, qui sont en contact très étroits avec l'épithélium sensoriel. Celui-ci est constitué d'une couche de cellules ciliées qui sont stimulées par le déplacement des otolithes. Les otolithes sont très sensibles aux particules accélérées tandis que la vessie natatoire sensibilise le poisson à la pression sonore » (<http://encyclopeche.com>).

Chez les poissons, à la perception des variations d'amplitude du champ de pression que l'on retrouve chez les cétacés, s'ajoute également la sensibilité au déplacement des particules lors du passage de l'onde acoustique (Sand 2000).

Lors d'expériences physiologiques et de comportement, des chercheurs ont été en mesure de tracer les audiogrammes de différentes espèces de poissons (fig. 4). Il en est ressorti que les poissons étaient sensibles aux basses fréquences (30 Hz à 5 kHz) incluant des infrasons de fréquences plus petites que 50 Hz, et que certains étaient aussi sensibles aux ultrasons à des

fréquences avoisinant les 150 kHz (Collin et al. 2003, Thomsen et al. 2006). Les courbes de sensibilité doivent être prises en compte pour déterminer l'effet du bruit sur les poissons.

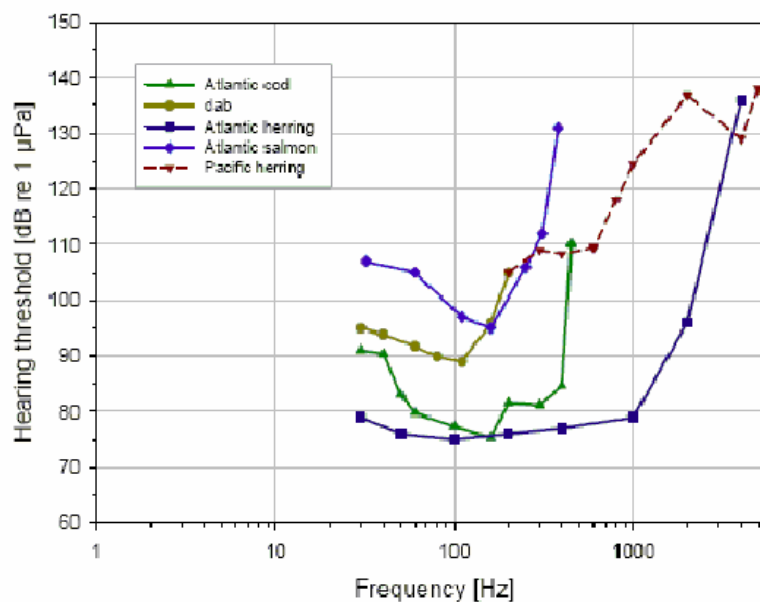


Figure 4 – Exemples de courbe de sensibilité auditive (audiogramme) de divers poissons (Thomsen et al. 2006).

Lors de travaux pour déterminer les dommages physiques causés par un bruit continu, Enger (1981) a démontré que lorsque la morue était exposée à un niveau sonore de 180 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pendant une période s'étendant de 1 heure à 5 heures (donnant un niveau SEL respectif de 215 à 222 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$) sur une gamme de fréquence s'étalant de 50 à 400 Hz, que des paquets ciliés se trouvant dans l'oreille interne étaient irrémédiablement endommagés.

Un poisson de l'espèce de la famille des cichlidés (poissons clown, poissons perroquet) fut soumis à une exposition sonore d'une durée d'une heure à un son de niveau SPL (Sound Pressure Level) de 180 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à une fréquence de 300 Hz (donnant un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$) et on nota une perte de cellules ciliées qui occasionna une perte auditive permanente (Hasting et al. 1996). Selon une autre étude effectuée par McCauley et al. (2003) portant sur l'exposition de la dorade (*Pagrus auratus*) à une source sonore sismique produit par un canon à air « air-gun », il fut observé le même type de détérioration chez les cellules ciliées. D'autres études démontrent également que certaines espèces de poissons auraient la faculté de régénérer des cellules ciliées durant leur vie (Popper et al. 1984, Lombarte et al. 1993).

Dans la littérature, on retrouve très peu d'études quant au seuil critique à ne pas dépasser pour éviter des dommages physiques permanents (PTS) ou temporaire (TTS) chez les poissons. Certains auteurs proposent des niveaux SPL de 120 dB re 1 μPa (Richardson et al. 1995) tandis que d'autres proposent un niveau SPL de 180 dB re 1 μPa (Enger, 1981) pour une exposition d'une heure. Nous utilisons dans cette recherche un niveau SEL critique de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ associé au niveau SPL de 180 dB (Enger, 1981) pendant 1 h, tout comme pour les mammifères marins (Southall et al. 2007).

1.3 - Objectifs de la recherche

La présente étude a comme objectif principal l'estimation du bruit océanique auxquels les poissons et mammifères marins sont exposés à l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent, à la frontière de la zone de pêche intensive, pendant la saison de navigation estivale. Aucune étude n'ayant été réalisée sur le bruit océanique à l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent, un examen approfondi des conditions de l'environnement sonore dans cette région est requis pour mesurer le niveau moyen de bruit, sa variabilité et estimer l'exposition des poissons et mammifères marins pendant la période estivale.

L'objectif secondaire est l'estimation des niveaux d'exposition sonore pondérée des quatre groupes de mammifères marins selon les courbes de pondération de type M de Southall et al. (2007) et pour les poissons selon leurs audiogrammes publiés. On déterminera également quel est le niveau de bruit à l'embouchure de l'Estuaire du Saint-Laurent durant la période estivale (niveau moyen, niveau par bande de fréquence et leurs variabilités temporelle, variabilité à petite échelle lors du passage d'un navire).

Cet objectif nous permettra également de répondre aux questions suivantes: Quels sont les niveaux de bruit auxquels sont exposés les poissons et les différentes catégories de mammifères marins au site de mesures?

Quels sont les temps d'exposition requis pour atteindre les niveaux critiques?

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Acquisition des données et aire d'étude

Pour prélever les enregistrements sonores ayant servi dans cette recherche, nous avons utilisé un appareil autonome AURAL (Multi Électronique, Rimouski, Qc, Canada) muni d'un hydrophone omnidirectionnel HTI 96 MIN (High Tech Inc., Gulfport, Ms, USA), d'un capteur de pression donnant, après conversion, une mesure de profondeur avec une précision de ± 0.1 mètre ainsi que d'un capteur de température précis à ± 0.1 degré Celsius (fig. 5). Le signal capté par l'hydrophone est amplifié, filtré pour le repliement et numérisé par un convertisseur analogique/numérique (CAN) avant d'être sauvegardé en format *.wav sur le disque dur.

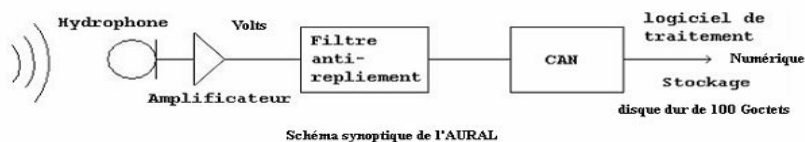
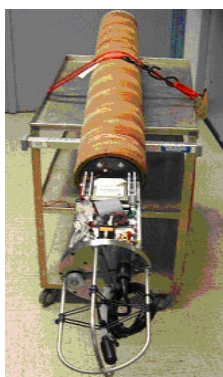


Figure 5 - Présentation de l'AURAL (appareil autonome de détection de signaux sonores sous-marins) qui a servi lors de l'expérimentation 2005.

L'appareil a été configuré pour permettre l'enregistrement sur une bande acoustique s'échelonnant de 1 Hz à 1000 Hz en continu sur une période de cinq mois à une fréquence d'échantillonnage de 2000 éch.s⁻¹ et une quantification binaire de 16 bits sur l'amplitude du signal sur ± 2 Volts. L'Aural était positionné à environ 15 km au large de la côte de Matane près du centre du Chenal Laurentien (fig. 6) aux coordonnées de latitude 48.9802 N et de longitude 67.7417 W.

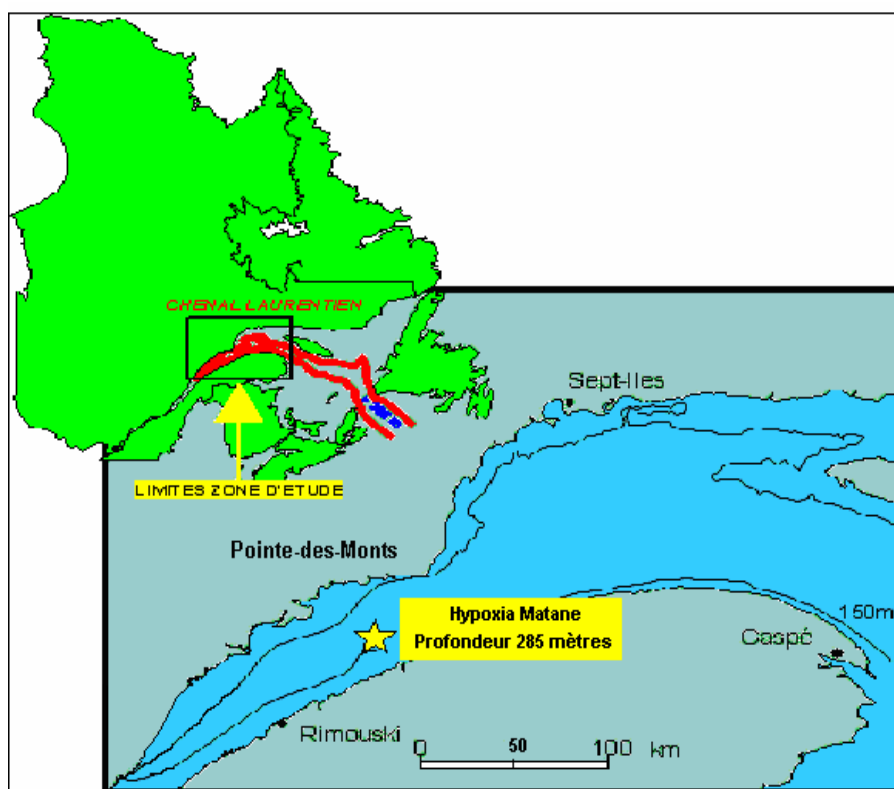


Figure 6 - Emplacement de l'AURAL près de Matane où la profondeur est de 293 mètres. L'Aural était maintenu à 285 mètres de profondeur par un système de mouillage vertical.

L'appareil était maintenu par le fond selon le plan d'un mouillage océanographique typique en « I » (fig. 7). L'Aural a été placé à une altitude d'environ 8 mètres. D'autres équipements associés à la mission Hypoxia 2005 faisaient partie du mouillage.

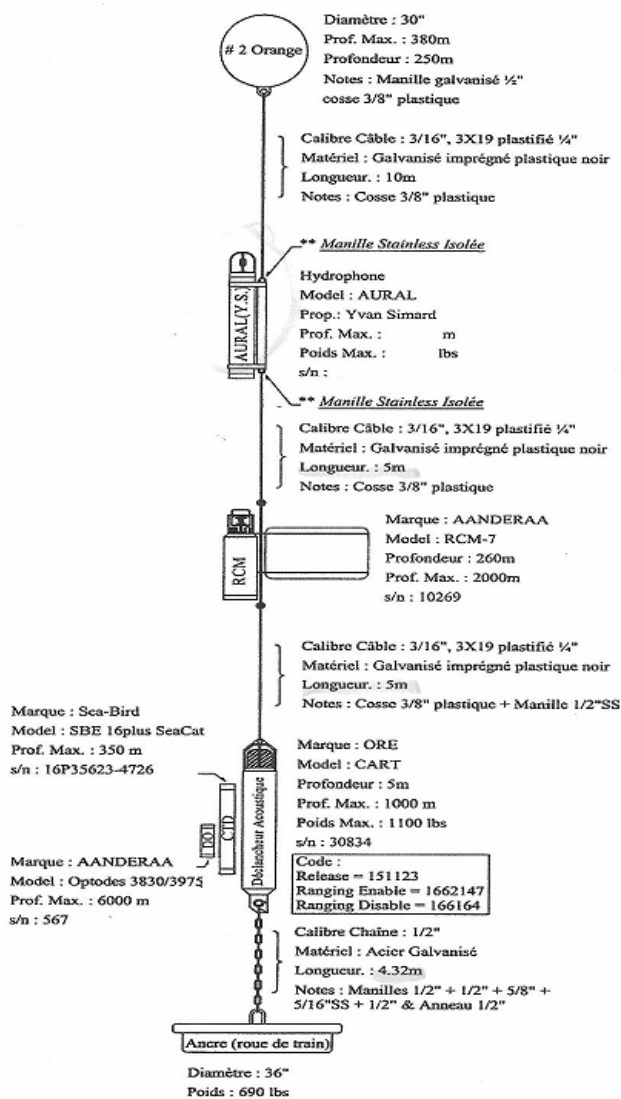


Figure 7 -Plan du mouillage en « I » où l'Aural était placé à une altitude d'environ 10 mètres. La bouée supérieure était à une altitude d'environ 20 mètres.

En plus des données acoustiques, on disposait également des données de profondeur (fig. 8) et de température de l'eau (fig. 9). La profondeur de l'Aural variait entre 284.5 et 288.3 mètres selon les marées et sa moyenne était de 286.4 ± 1.9 mètres.

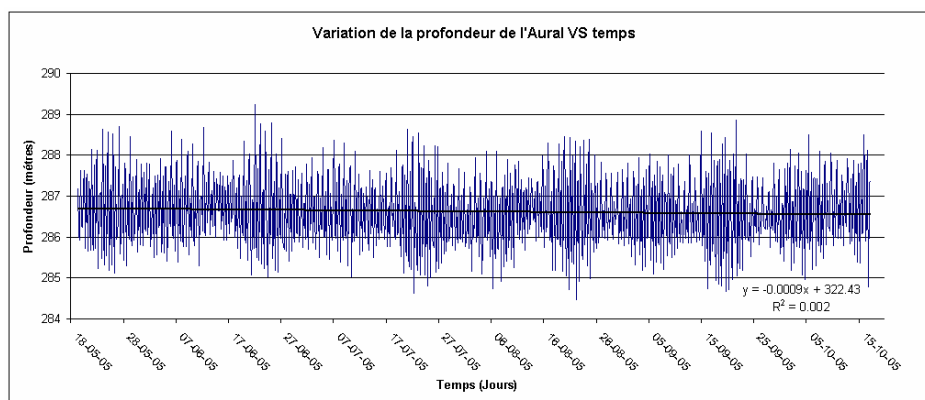


Figure 8 - Évolution de la profondeur de l'Aural en fonction du temps. Les données proviennent du capteur de pression de l'Aural.

La température à cette profondeur était pratiquement stable entre 4.8 et 5.3 degrés Celsius pour une moyenne de 5.05 ± 0.25 degré Celsius.

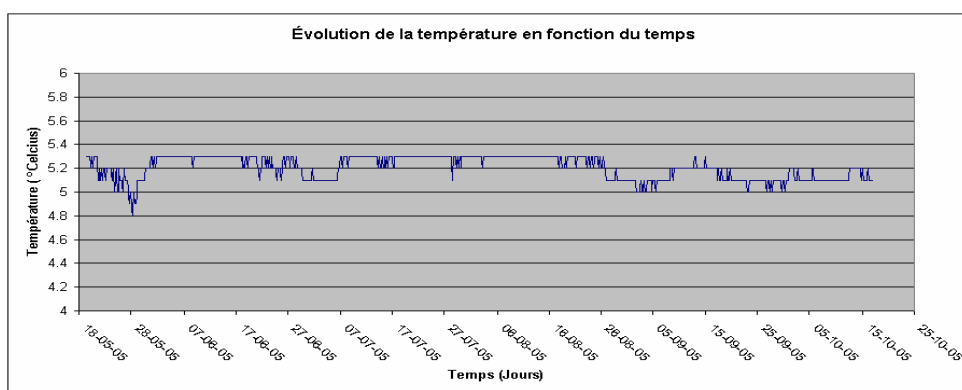


Figure 9 - Évolution de la température à l'emplacement de l'Aural à une profondeur moyenne de 286.4 mètres. Les données proviennent du capteur de température de l'Aural.

La période des enregistrements acoustiques s'étend du 19 mai 2005 au 17 octobre 2005, soit durant la période estivale de navigation et de pêche. La conversion de la tension à la sortie de l'hydrophone en unités acoustiques absolues (Pa) fait appel à la calibration de l'hydrophone en fonction de la fréquence. Celle-ci a été mesurée dans la bande de fréquence s'étalant de 100 Hz à 4000 Hz avec une résolution de 10 Hz par le groupe de calibration du DRDC (Defence Research and Development Canada, Dartmouth, NS). La sensibilité de l'hydrophone est optimale dans les fréquences inférieures à 3000 Hz et relativement plate (fig. 10) avec une moyenne de -164.4 ± 1.8 dB re 1 V/ μ Pa. Le signal était par la suite amplifié par un facteur de 17 dB. L'Aural stockait les données sonores sur un disque dur de 60 gigaoctets dans le format standard de fichier *.wav. La taille de chacun des fichiers était de 64 mégaoctets formant un ensemble de 815 fichiers sonores d'une durée de 4 heures 26 minutes et 47 secondes pour un total de 54 gigaoctets.

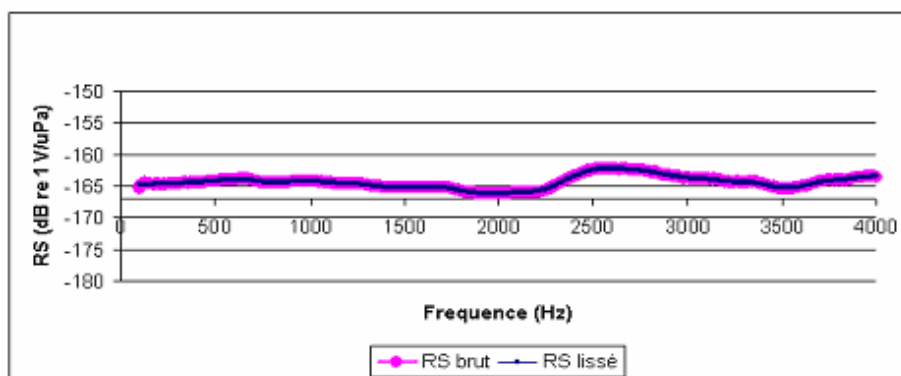


Figure 10 - Courbe de sensibilité (RS) relativement plate de l'hydrophone HTI-96-min utilisé pour les enregistrements dans la bande de fréquences de 100 Hz à 4 kHz.

Pour étudier l'exposition au bruit des poissons et mammifères marins lors du passage d'un navire marchand typique, nous disposons d'un navire dont la position a été suivie par un système d'enregistrement. Le Cicéro (fig. 11) est l'un de ces navires qui communique ses données GPS et la température de l'eau à une station terrestre située à l'Institut Maurice-Lamontagne. Il est ainsi possible de connaître la distance exacte entre le navire en transit et l'hydrophone, et de tracer le graphique du niveau sonore reçu en fonction de la distance de la source. Ce graphique peut ensuite être utilisé pour estimer le champ sonore rayonné par un navire type et calculer par extrapolation le niveau sonore à 1 m (SL en dB re 1 μ Pa @ 1 m) de la source.

Trajet: Montréal à Saint-Jean (Terre-neuve)	
Longueur:	147,10 mètres
Largeur:	22,52 mètres
Jauge brute:	10 919 tonnes
Capacité	440 EVP
Vitesse:	18 nœuds




Figure 11 - Le Cicéro est un porte-conteneur de 147 mètres dont la position est monitorée aux deux minutes (Lloyd's 2001,2005).

Pour tracer le patron de directivité sonore du navire, on mesure la distance horizontale en fonction de l'azimuth calculé entre le navire et l'Aural à partir des données GPS. L'azimuth donnera une bonne approximation du patron de directivité du bruit autour du navire. À l'aide de ces mesures, on calculera la distance radiale entre le navire et l'Aural qui est situé à une profondeur de ~285 m (fig. 14).

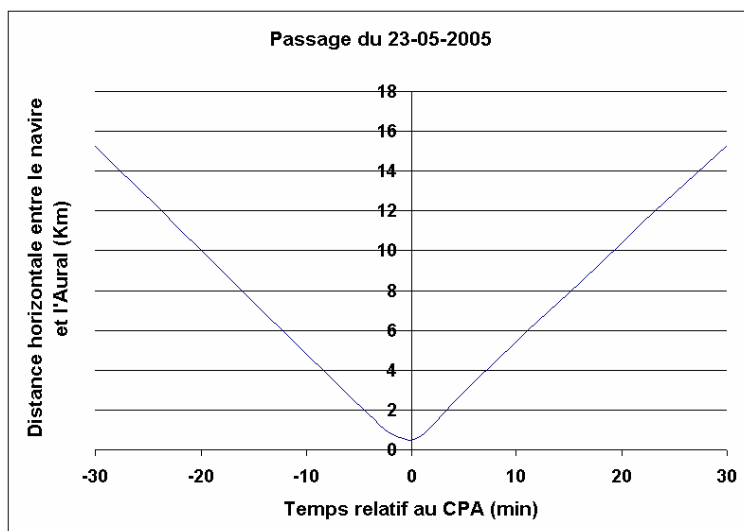


Figure 12 - Distance horizontale en fonction du temps lors du passage du Cicéro à 598 mètres de l'Aural à son point le plus près (CPA) le 23-05-2005.

Pour déterminer le champ de bruit autour du navire, on produit un graphique présentant la mesure de bruit reçu à l'Aural selon la distance et l'azimuth en utilisant les deux passages disponibles. Ensuite, on interpole pour déterminer les courbes de niveau sonore dans notre champ d'observation autour du navire et on émet l'hypothèse que le patron de directivité est symétrique par rapport à l'axe longitudinal du navire.

Les figures 12 et 13 représentent la distance horizontale en fonction du temps. Les données de ces deux figures vont permettre de calculer la vitesse moyenne du navire lors des deux passages. Les données de la figure 14 sont utilisées pour calculer le champ de bruit rayonné.

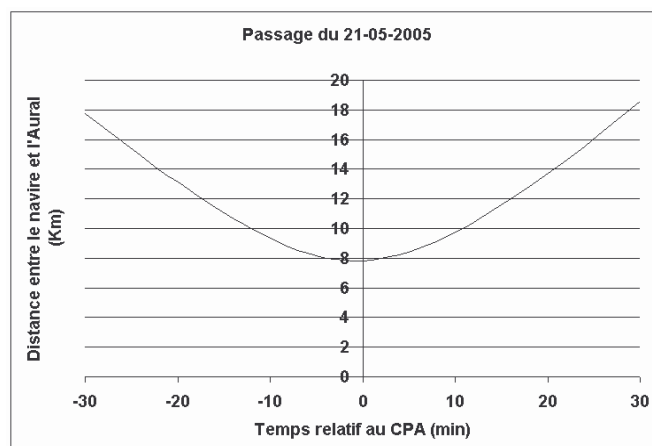


Figure 13 - Distance horizontale en fonction du temps lors du passage du Cicéro à 7.82 km de l'Aural au CPA le 21-05-2005.

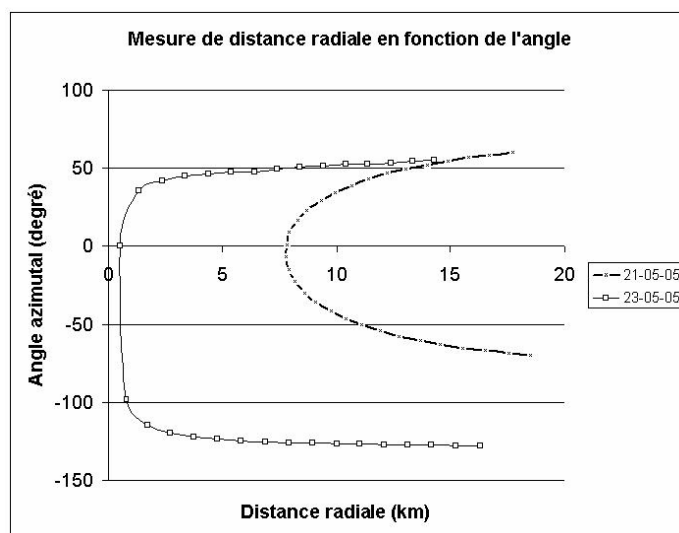


Figure 14 - Angle azimutal en fonction de la distance radiale lors des deux passages du Cicéro près de l'Aural, utilisés pour calculer le champ de bruit rayonné.

Pour estimer le niveau de bruit (SL) à 1 mètre du navire, on peut utiliser une équation permettant de calculer la perte approximative par transmission que nous ajoutons ensuite au niveau de bruit reçu (RL) à une distance connue. L'équation 1 permet de calculer la perte par transmission (TL) selon un mode de dispersion sphérique.

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad (1)$$

Dans l'équation 1, R_0 représente la distance de référence égale à 1 mètre. Cette équation est valable pour une distance maximale (R) équivalente à la profondeur du canal sonore de propagation, soit ~ 300 m dans cette étude, cela signifie que TL se calculera pour $R < 300$ m. L'équation 2 donne la relation permettant de calculer la perte par transmission avec le mode de dispersion sphérique-cylindrique utilisé pour une propagation sur de plus longues distances que la profondeur du canal sonore.

$$TL = 10 \log_{10}(R_1) + 10 \log_{10}(R), \quad R > R_1 \quad (2)$$

Dans ce mode, R_1 correspond à la distance où s'arrête le mode de dispersion sphérique (distance totale = $R + R_1$). Connaissant TL, nous utilisons l'équation $SL = RL + TL$ pour trouver le niveau sonore du navire à 1 mètre. La méthode utilisée dans cette étude pour estimer le niveau sonore à 1 mètre du Cicéro (estimation de la valeur SL) est de tracer la droite de tendance du niveau mesuré en fonction du \log_{10} de la distance et de l'extrapoler à 1 m.

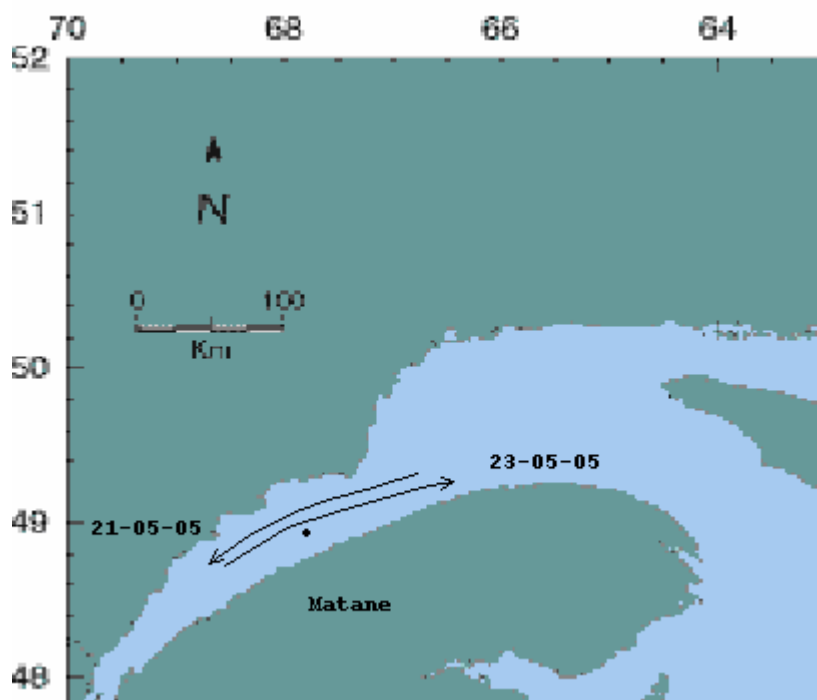


Figure 15 Tracé des passages du Cicéro pour les 21 et 23 mai 2005.

Pour détailler le bruit lors du passage du Cicéro, nous avons isolé une fenêtre acoustique représentant un passage d'une heure du Cicéro devant l'Aural, soit 30 minutes avant et après le CPA; le CPA correspond au creux du patron d'interférence du miroir de Lloyds dans le spectrogramme (e.g. Simard et al. 2006b). Le signal de 60 minutes est échantillonné systématiquement à intervalle de 15 secondes pendant une durée de 1 seconde et leurs PSD (Densité Spectrale de Puissance) ont été calculés et les résultats présentés sous forme de spectrogrammes.

2.2 Traitement et analyse des données

L'ensemble des données acoustiques a été traité à l'aide de programmes écrits en Matlab qui ont été conçus à des fins spécifiques (programmés par l'équipe du Laboratoire d'hydroacoustique de l'ISMER) pour échantillonner de manière aléatoire la série temporelle des données acoustiques pour extraire un segment de 5 minutes par période de 6 heures produisant ainsi 602 fichiers. Les séquences qui présentaient du bruit indésirable de vibrations (« strumming ») ont été détectées par le suivi d'un seuil de la valeur rms du signal dans la bande des fréquences inférieures à 30 Hz où ces effets sont maximaux. Les bandes de fréquences de tiers d'octave dans lesquelles l'énergie du signal était sommée suivaient le standard ANSI (c.f. Acoustical Society of America; Standard; fréquences centrales f_c [10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800]). Les valeurs de densité spectrale de puissance par Hz (PSD, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et en tiers d'octave (en dB re 1 μPa dans la bande de tiers octave, largeur de bande calculée par $f_c(2^{-1/6})$ à $f_c(2^{+1/6})$) ainsi que les histogrammes du niveau SPL_{rms} large bande (10 – 1000 Hz) des segments de 5 min ont été calculés. On présente à la figure 16 les étapes qui ont été nécessaires pour l'acquisition des données acoustiques.

Ainsi, une série complète de 602 fichiers de 5 minutes par période de 6 heures ne contenant pas de bruit du système de déploiement fut obtenue.

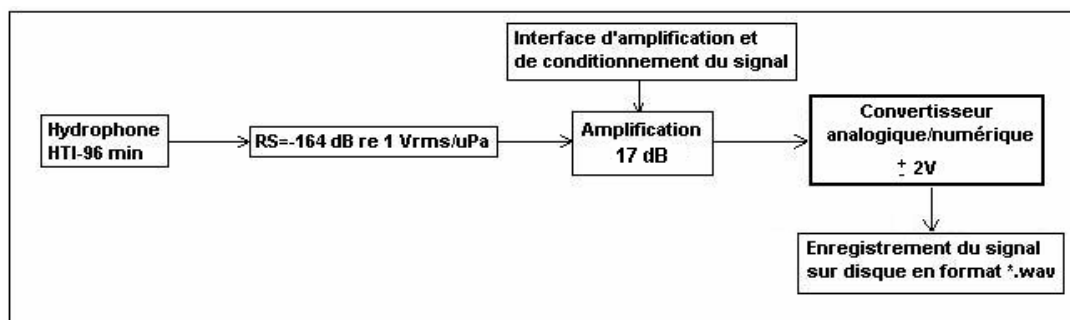


Figure 16 Les étapes d'acquisition des données acoustiques.

On présente, à la figure 17, l'organigramme des traitements nécessaires pour obtenir un échantillonnage aléatoire par période de 6 heures. Chaque période contient une séquence de 5 minutes qui est exempte de tout bruit provenant de vibrations.

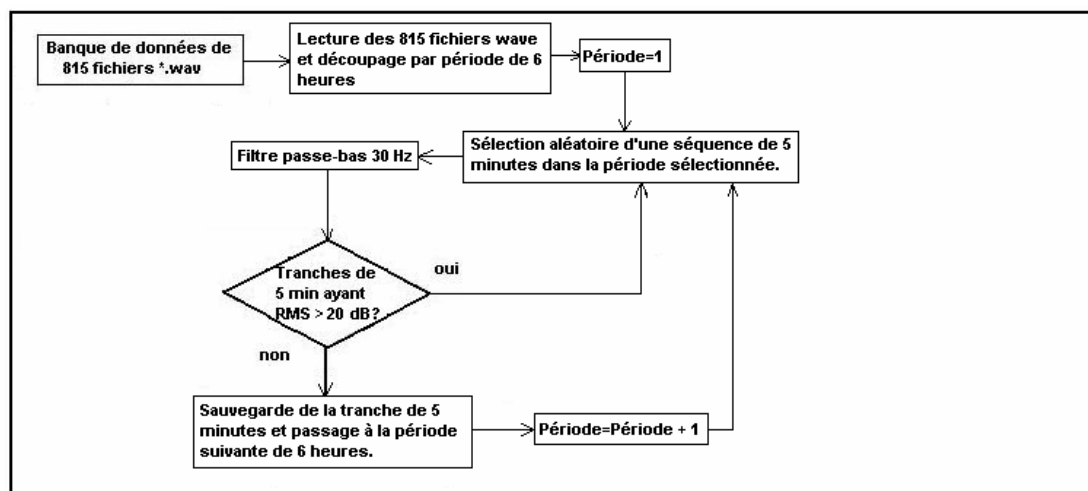


Figure 17 Les étapes de prétraitement pour l'échantillonnage aléatoire d'une séquence de 5 minutes par période de 6 heures éliminant les séquences présentant du bruit de vibrations.

Pour chacune des périodes de 6 heures, on choisit aléatoirement une séquence de 5 minutes à laquelle on applique un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 8 pour ne conserver que les fréquences plus basses que 30 Hz. La séquence de 5 minutes est alors analysée dans cette bande de fréquences où on peut retrouver du bruit provenant de vibrations (« strumming »). Le niveau de bruit est alors comparé avec une valeur seuil de 20 dB_{rms}. S'il y a dépassement de cette valeur seuil, la séquence est alors rejetée et une nouvelle séquence est choisie aléatoirement dans la période sélectionnée. Si la séquence de 5 minutes ne présente pas de bruit de vibrations, celle-ci est conservée en mémoire et on passe à la période suivante en recommençant le même processus. À la fin de l'opération, on se retrouve avec 602 séquences de 5 minutes, une pour chaque période de 6 heures.

Pour obtenir la valeur SPL_{rms} large bande (en dB re 1 µPa_{rms}) pour chacun des signaux de 5 minutes, les énergies rms par tiers d'octave sont sommées dans le domaine linéaire dans la bande [8.9 Hz à 897 Hz] et converties en dB_{rms} par l'équation 3.

$$SPL_{dB_{RMS}} = 10 \log_{10} \left[\sum_{n=1}^{20} 10^{\frac{x_n}{10}} \right] \quad (3)$$

où x_n est la valeur en tiers d'octave, $n=1$, correspond à $f_c=10$ Hz et $n=20$ correspond à $f_c=800$. On obtient ainsi des valeurs rms large bande qui forment

alors une série temporelle dont chacun des échantillons représente un segment de 6 heures d'intervalle.

Dans ce travail, la décomposition spectrale de la séquence a été effectuée avec les paramètres suivants : taux d'échantillonnage de 2000 éch s⁻¹, fenêtre FFT (Fast Fourier Transform) de 2048 pt, 50% de chevauchement, fenêtre de Hanning, résolution de 512 ms et largeur de bande à 3 dB : 1.58 Hz. La valeur spectrale à une fréquence donnée est dépendante de la largeur de la fenêtre d'analyse. Pour obtenir un spectre par bande de 1 Hz, on applique un facteur multiplicatif tenant compte de cette fenêtre, ramenant la largeur de bande à 1 Hz en soustrayant $10\log_{10}(1.58 \text{ Hz})$ des valeurs PSD obtenues. Pour des spectres rms et non crête à crête, on effectue une autre conversion en multipliant chaque raie spectrale par le facteur $1/\sqrt{2}$. Pour les spectres en tiers d'octave (Couvreur 2000), la valeur rms est calculée pour une largeur de bande s'étalant entre 8.9 Hz et 897 Hz pour la série rms8 et entre 17.8 Hz et 897 Hz pour la série rms20.

Pour obtenir les audiogrammes des poissons, nous avons numérisé les courbes provenant d'un graphique publié par Mitson (1995, p.35). On présente aux figures 18 à 21 les audiogrammes de quatre poissons ainsi que leur audiogramme pondéré correspondant. Les audiogrammes pondérés ont été tracés tel que le niveau maximum de sensibilité reçoive une pondération de 1

(i.e. 0 dB) et les autres fréquences une pondération égale à la différence de sensibilité par rapport à cette fréquence.

Lors du traitement, les courbes pondérées (pondération-P) sont extrapolées pour pouvoir couvrir toute la bande de fréquences de 1 Hz à 1000 Hz (voir fig. 26). Pour produire les niveaux de densité spectrale pondérés pour les poissons, on additionne, pour chacune des courbes pondérées (en dB) les densités spectrales par Hz du signal.

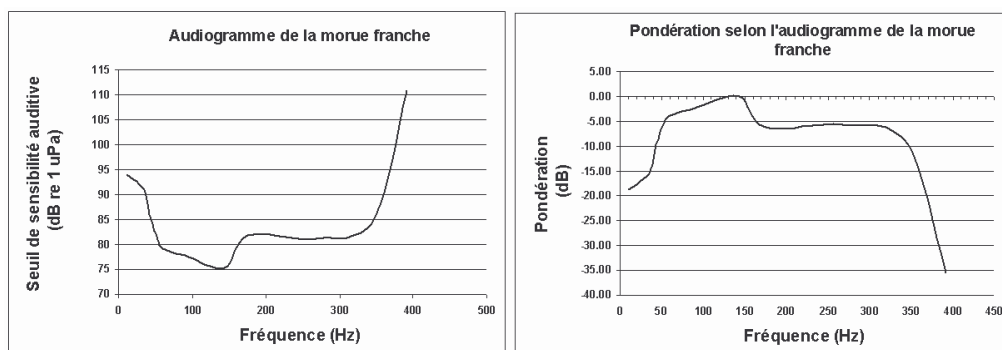


Figure 18 - Audiogramme de la morue franche et pondération dérivée (*Gadus morua*).

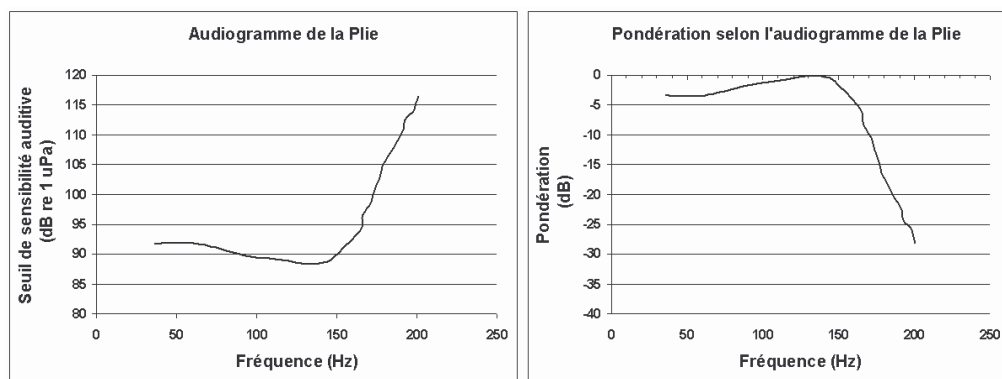


Figure 19 - Audiogramme et pondération dérivée de la plie (*Pleuronectes platessa*).

Nous obtenons ainsi un spectre de puissance du bruit pondéré pour chacun des poissons par bande de 1 Hz et par tiers d'octave. Ces «PSD-pondérés P» sont alors analysés similairement à ceux des mammifères marins.

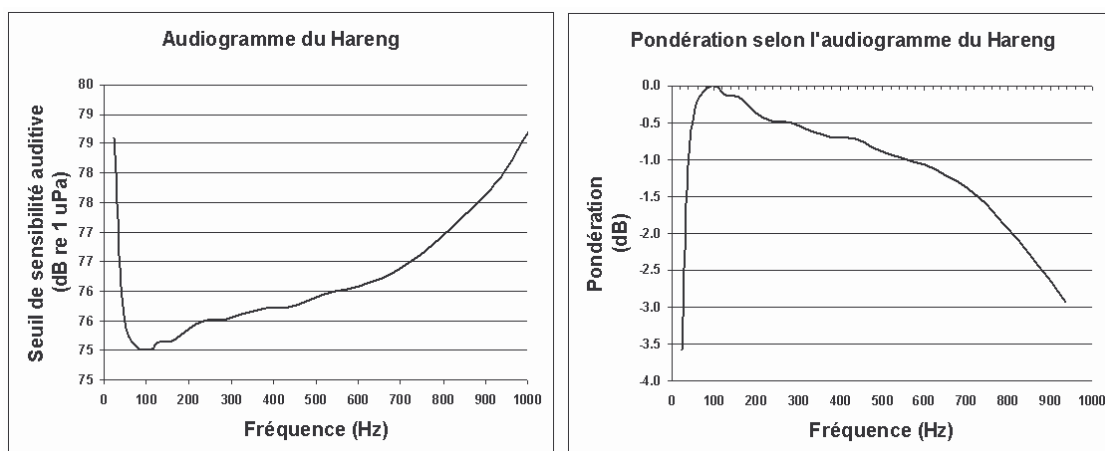


Figure 20 - Audiogramme du Hareng et pondération dérivée (*Clupea harengus*).

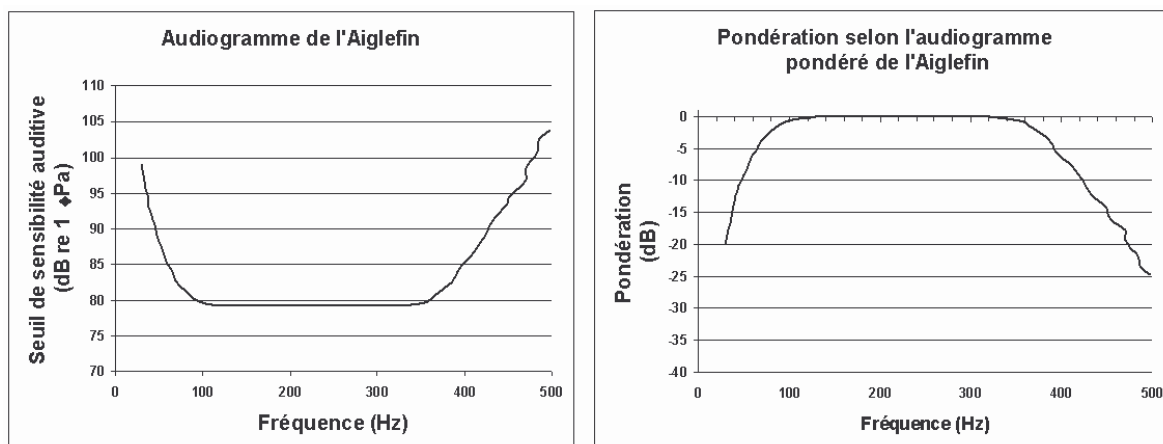


Figure 21 - Audiogramme de l'Aiglefin et pondération dérivée (*Melanogrammus aeglefinus*).

Pour obtenir les courbes de pondération pour les quatre groupes de mammifères marins présentés aux figures 22 à 25, on utilise les équations 4 et 5 proposées par Southall et al. (2007)

$$R(f) = \frac{f^2_{high} f^2}{(f^2 + f^2_{high})(f^2 + f^2_{low})} \quad (4)$$

$$M(f) = 20 \log_{10} \frac{R(f)}{\max\{R(f)\}} \quad (5)$$

où f_{high} et f_{low} correspondent respectivement aux fréquences de coupure en haute et basse fréquences pour chacun des quatre groupes de mammifères marins (voir tableau 2) et $M(f)$ est la courbe de pondération-M en fonction de la fréquence f s'étalant de 1 Hz à 1000 Hz.

Groupe	Largeur de bande F_{low} - F_{high}	Représentants (Nb espèces/sous-espèces)
Cétacés basse fréquence	7 Hz à 22 kHz	Rorqual bleu, rorqual commun, à bosse (13 espèces/sous-espèces)
Cétacés moyenne fréquence	150 Hz à 160 kHz	Béluga, dauphin commun, orque, globicéphale... (57 espèces/sous-espèces)
Cétacés haute fréquence	200 Hz à 180 kHz	Marsouins (20 espèces/sous-espèces)
Pinnipèdes	75 Hz à 75 kHz	Otaries, phoques (41 espèces/sous-espèces)

Tableau 2- Fréquences de coupure des pondérations M associées à chacun des 4 groupes de mammifères marins (Southall et al. 2007).

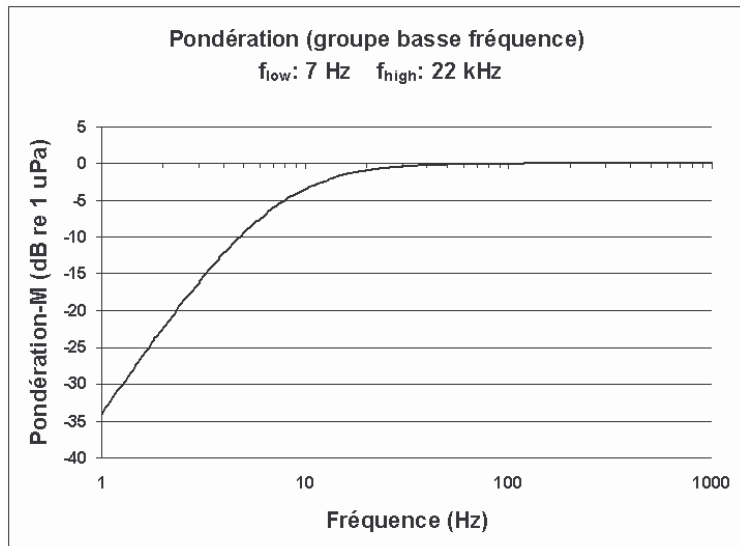


Figure 22 - Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les basses fréquences proposée par Southall et al. (2007).

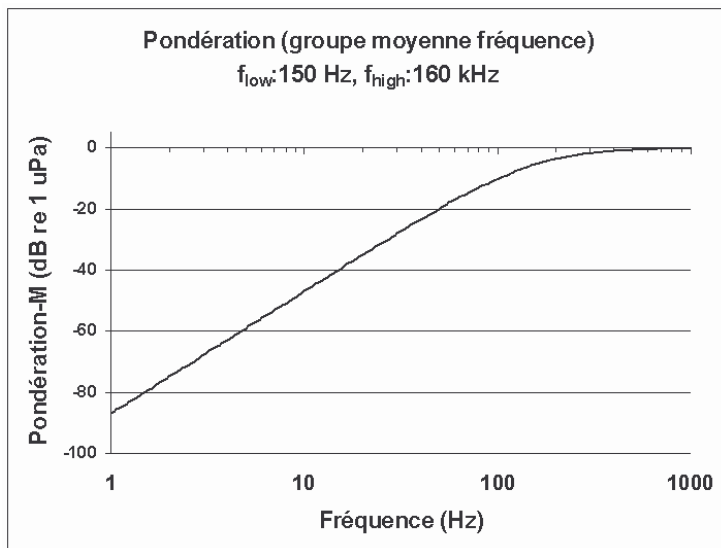


Figure 23 - Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les moyennes fréquences proposée par Southall et al. (2007).

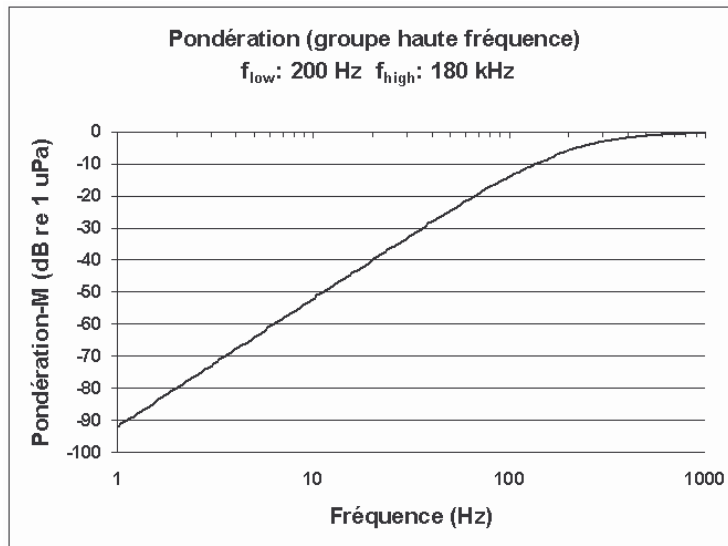


Figure 24 - Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupe des cétacés spécialisés dans les hautes fréquences proposée par Southall et al. (2007).

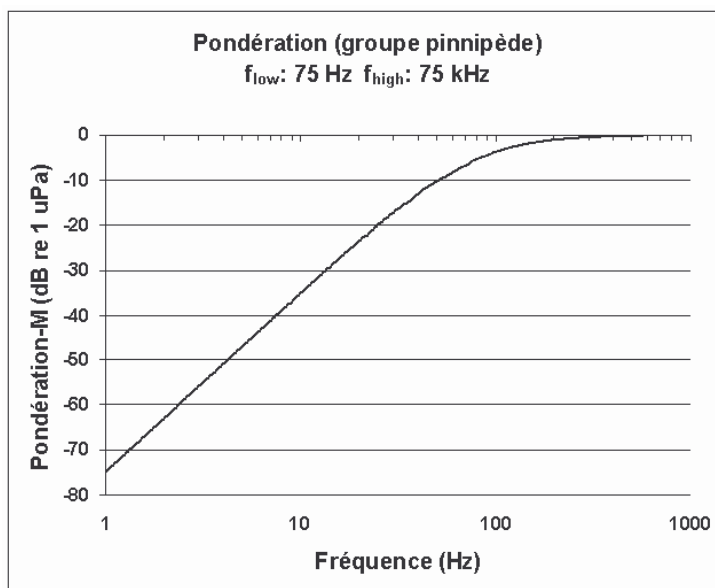


Figure 25 - Courbe de pondération de type M dans la bande [1-1000 Hz] pour le groupes des pinnipèdes communiquant sous l'eau proposée par Southall et al. (2007).

Pour évaluer la valeur du niveau d'exposition sonore, nous utilisons l'équation 6 qui calcule le niveau d'exposition sonore SEL en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Le SEL peut se calculer à partir d'une valeur SPL_{rms} et une variable T qui représente le temps d'exposition en seconde auquel l'animal est exposé au bruit.

$$SEL = \text{SPL}_{\text{RMS}} + 10 \log_{10}(T) \quad (6)$$

Pour différentes valeurs de temps et de niveaux SPL_{rms} provenant du signal reçu, on peut calculer l'évolution du SEL pour les poissons ainsi que les mammifères marins. Ces droites ont été calculées pour cinq niveaux SPL_{rms} correspondant à la valeur minimale, le 1^{er}, deuxième et troisième quartile ainsi que la valeur maximale de la série SPL_{rms} de 5 mois.

Pour l'analyse de corrélation sur la variabilité des niveaux de bruit avec la vitesse des vents et les cycles de marée, nous avons effectué deux types d'analyse, soit le calcul de la matrice de covariance sur toute la séquence de 5 mois et une analyse par la méthode FFT pour chacune des séries de 5 mois (acoustique, vents et cycles de marée). Les séries de vitesse des vents et de niveau de la marée proviennent respectivement de la station IML4 de Pêches et Océans Canada et des prédictions du service hydrographique canadien pour l'année 2005 pour Matane.

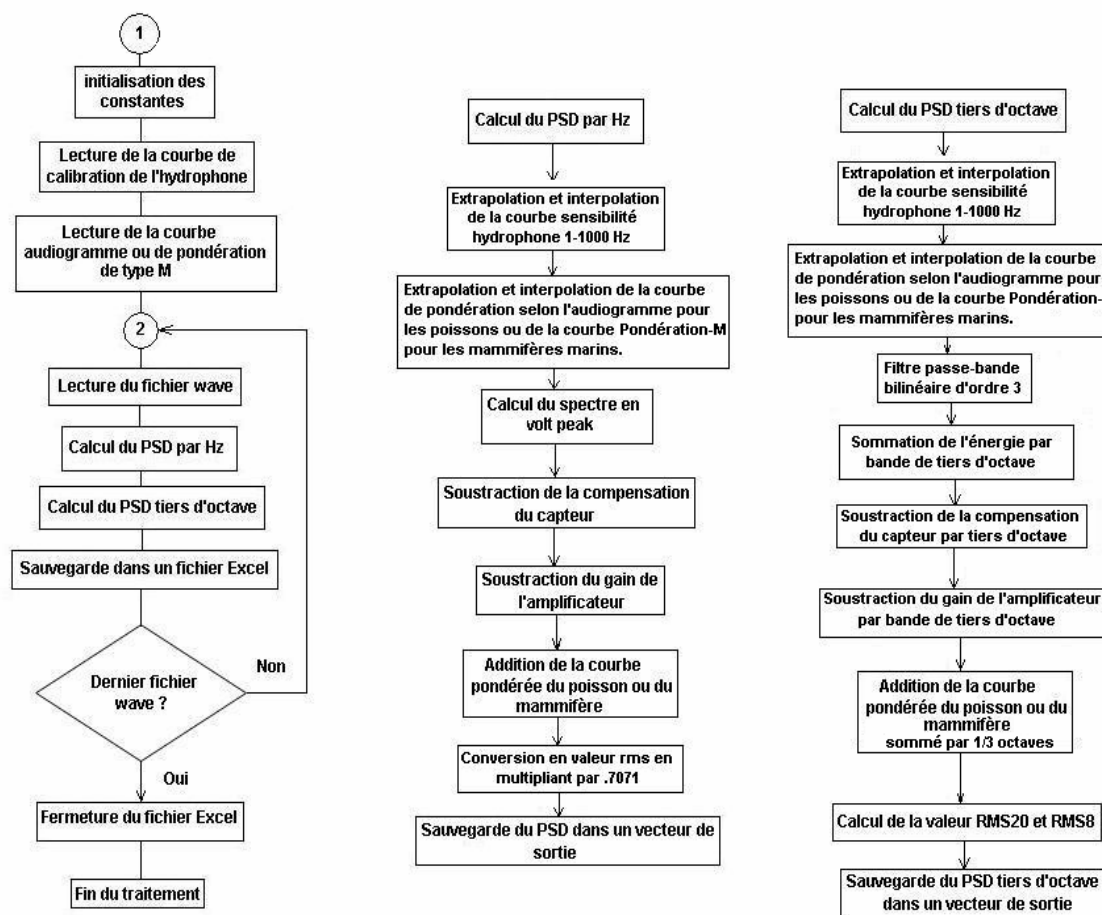


Figure 26 - Diagramme des étapes de calcul pour le PSD, tiers d'octave et valeur rms.

La figure 26 résume les grandes lignes des étapes de traitement qui ont été effectuées en vue d'obtenir les spectres par Hz et par tiers d'octave. Ce schéma n'est qu'à titre indicatif pour montrer la séquence des étapes lors du traitement.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Évaluation du bruit océanique

Après prétraitement des données et extraction des spectrogrammes des signaux d'une durée de 5 minutes par période de 6 heures de la série complète, il en est résulté un graphique en trois dimensions (temps-fréquence-puissance sonore) que nous présentons à la figure 27. Celui-ci représente l'évolution du bruit océanique durant la période estivale en termes de puissance rms par Hz. On remarque qu'une bonne partie de l'énergie est concentrée dans la bande inférieure à 100 Hz ainsi que la présence de pics excédant de plus de 10 dB le niveau moyen, notamment dans la bande 300 à 900 Hz, correspondant à des fréquences particulières du bruit de certains navires, appelées raies spectrales.

La figure 28 est une autre représentation sous forme de spectrogramme présentant les mêmes données, qui montre clairement la dominance du bruit dans la bande inférieure à 100 Hz, où l'intensité se situe entre 100 et 120 dB re $1 \mu\text{Pa}^2_{\text{rms}}/\text{Hz}$.

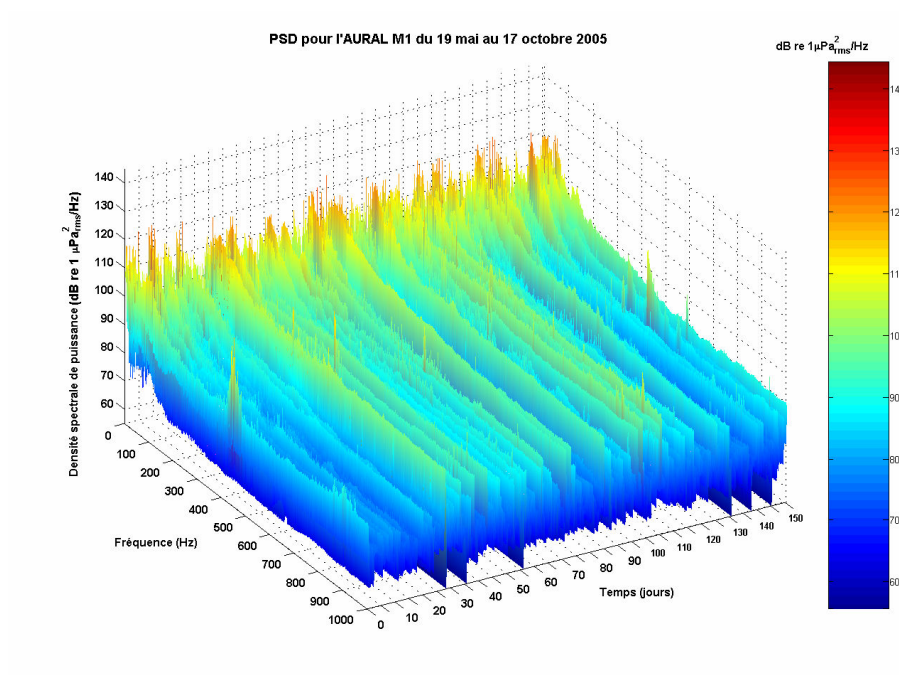


Figure 27 - Densité spectrale de puissance s'étendant de 1 à 1000 Hz pour chacun des fichiers de 5 minutes à intervalle de 6 heures durant la période estivale.

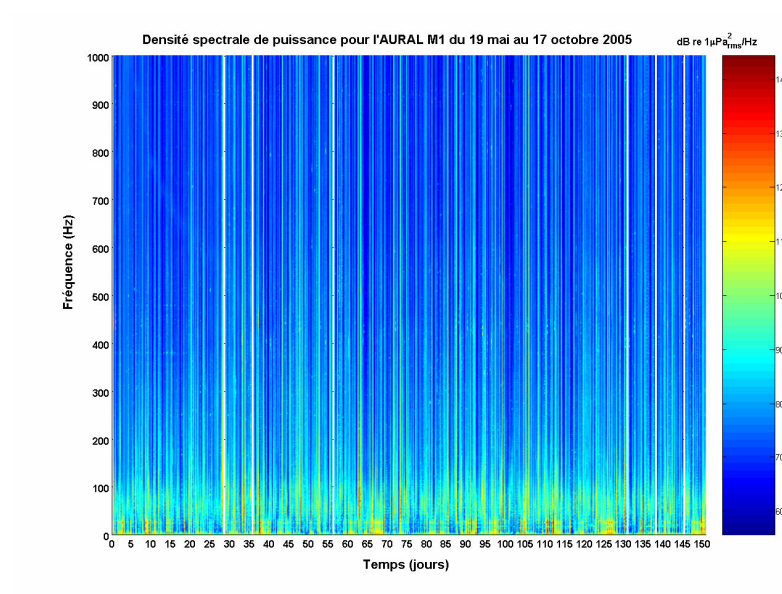


Figure 28 - Spectrogramme de l'évolution du bruit océanique sur toute la période s'étendant du 19 mai au 17 octobre 2005 pour des fréquences comprises entre 1 et 1000 Hz.

La figure 29 présente les niveaux de pression sonore en valeur rms pour chaque segment de 5 minutes à intervalle de 6 heures provenant de la séquence de données tandis que la figure 30 présente le même graphe correspondant à la moyenne journalière. Le niveau SPL_{rms20} [de 17.8 Hz à 897 Hz] a oscillé entre 93 et 136 dB re 1 μPa_{rms} autour d'une valeur médiane de 112 dB re 1 μPa_{rms} (fig. 29). Aucune période ne se distingue par un niveau moyen ou une variance différente de l'ensemble de la série. On ne retrouve aucune tendance significative ($R^2=0,0012$) apparaissant dans le signal temporel. En effectuant une moyenne journalière de la série (fig. 30), on retrouve un niveau SPL_{rms} s'étalant de 102 à 122 dB re 1 μPa_{rms} .

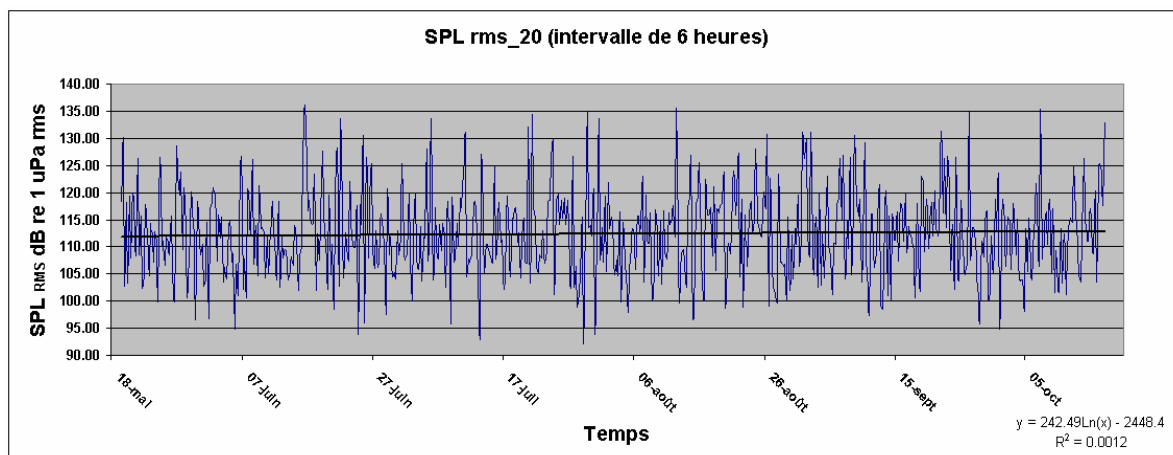


Figure 29 Niveau de pression sonore SPL_{rms20} [17.8 Hz – 897 Hz] pour la période s'étendant du 19 mai 2005 au 17 octobre 2005 à intervalle de 6 heures.

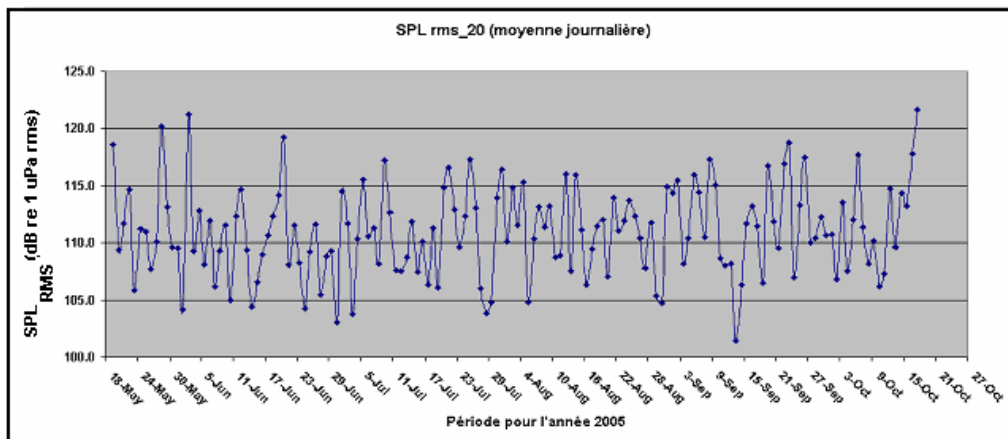


Figure 30 - Niveau SPL_{rms20} moyen par jour pour la période s'étendant du 18 mai 2005 au 18 octobre 2005 pour la bande de fréquence [17.8 – 897 Hz].

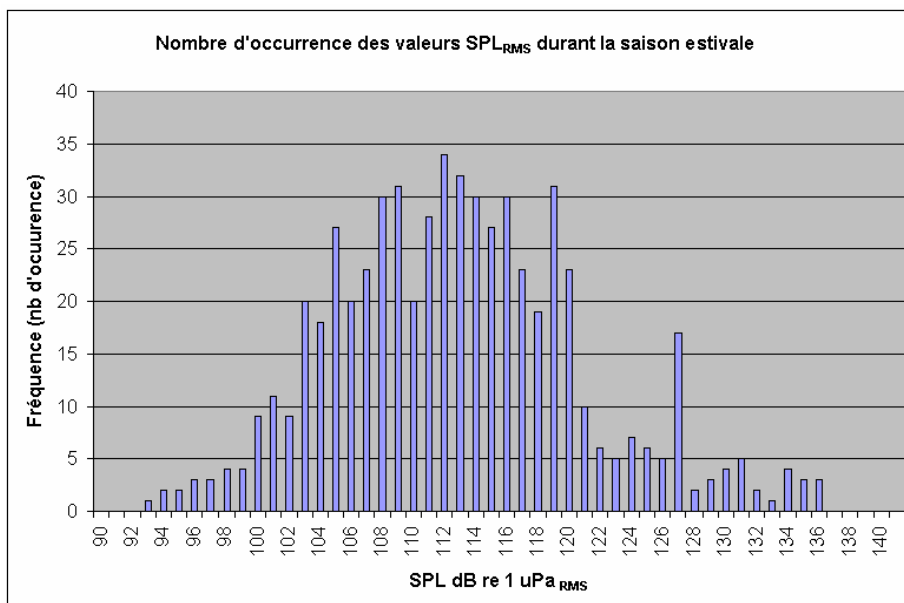


Figure 31 - Histogramme des niveaux SPL_{rms20} [17.8 Hz-897 Hz] durant la saison estivale.

L'histogramme des niveaux SPL_{rms20} , présenté à la figure 31, indique que le niveau de bruit le plus fréquemment mesuré est de 112 dB re 1 μPa_{rms} et que l'étalement est de 92.1 à 136 dB re 1 μPa_{rms} .

La figure 32 montre que la bande de tiers d'octave centrée à 63 Hz est celle présentant la plus forte intensité qui est représentative du trafic maritime dans la région. Le niveau de bruit médian par tiers d'octave varie de 90 dB re 1 μPa_{rms} dans la bande de 10 Hz à 100 dB re 1 μPa_{rms} dans la bande de 63 Hz pour décroître rapidement à ~ 93 dB re 1 μPa_{rms} dans la bande supérieure à 160 Hz.

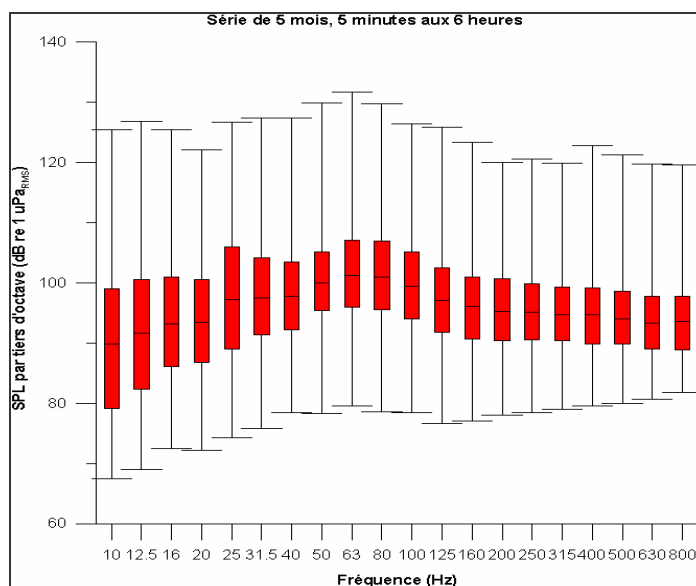


Figure 32 - Box plot des spectres en tiers d'octave présentant la distribution du bruit océanique en fonction de la fréquence pour toute la période estivale (N=602 spectres).

Les valeurs minimales, médianes et maximales en tiers d'octave sont présentées isolément en fonction de la fréquence à la figure 33, auxquelles sont

associées les droites de tendance. On remarque qu'il n'y a pas de tendance significative sur la médiane comparativement à une tendance à la diminution pour la courbe de valeurs maximales et une tendance à l'augmentation pour la courbe de valeurs minimales.

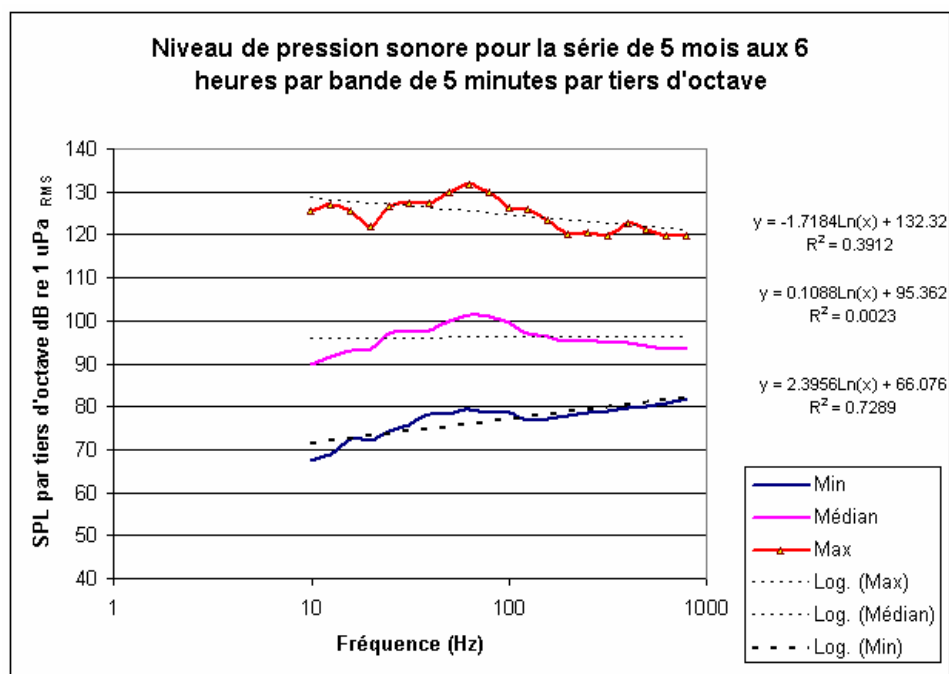


Figure 33-Enveloppe du niveau SPL_{rms} du bruit océanique par tiers d'octave pour la série de 5 mois (N=602 spectres).

Tel qu'attendu, l'enveloppe détaillée du spectre par Hz (fig. 34) montre encore plus clairement la bande de bruit maximal correspondant à la navigation ainsi que les nombreuses raies spectrales dans la bande de 100 à 1000 Hz. Un maximum secondaire est présent autour de 4 Hz, possiblement issu de la vitesse de rotation des axes des hélices. Le bruit minimal tend vers 60 dB re 1 $\mu Pa^2/Hz$ aux fréquences supérieures à 100 Hz et autour de 68 dB dans la bande

de navigation inférieure à 100 Hz. Les raies spectrales entre 10 et 100 Hz atteignent presque 130 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, et celles aux plus hautes fréquences dépassent de 10-30 dB le niveau du spectre moyen dans leurs bandes.

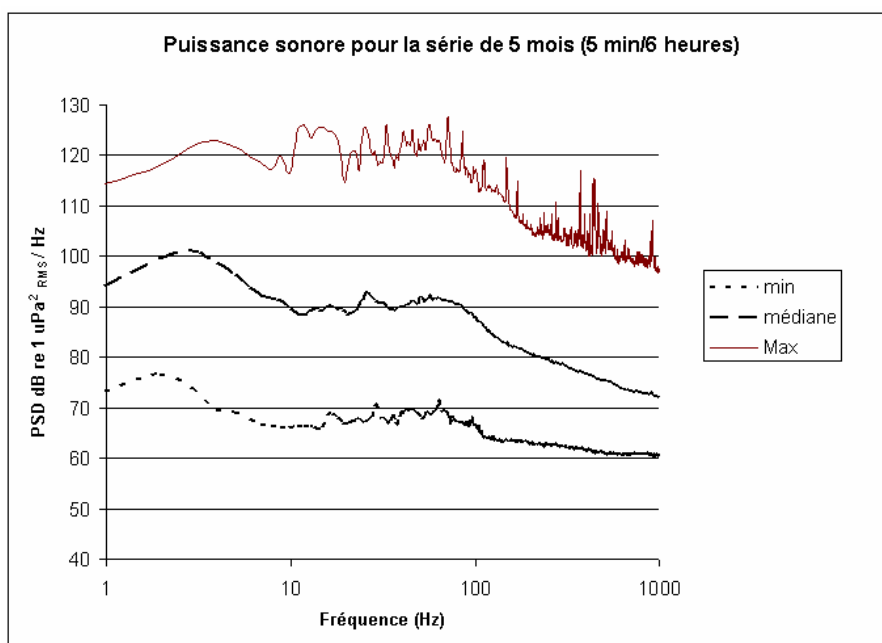


Figure 34-Enveloppe des spectres de puissance du bruit par bande de 1Hz durant la saison estivale (N=602 spectres).

Les valeurs minimales et maximales ainsi que celles du 1^{er} et 3^e quartile sont superposées aux courbes de Wenz à la figure 35. La médiane suit approximativement la valeur proposée pour les régions de trafic maritime élevé dans les océans dans la bande de 10 – 300 Hz, et le niveau maximum excède cette courbe de quelques 30 dB. Les 25 et 75 percentiles montrent que 50% du temps le bruit mesuré était de ± 5 dB comparable à la courbe de fort trafic maritime.

Dans la bande 300-1000 Hz, nous remarquons une légère élévation du niveau de bruit relativement à la courbe pour le trafic maritime élevé, possiblement en partie dû à une contribution de l'effet du vent (voir plus loin).

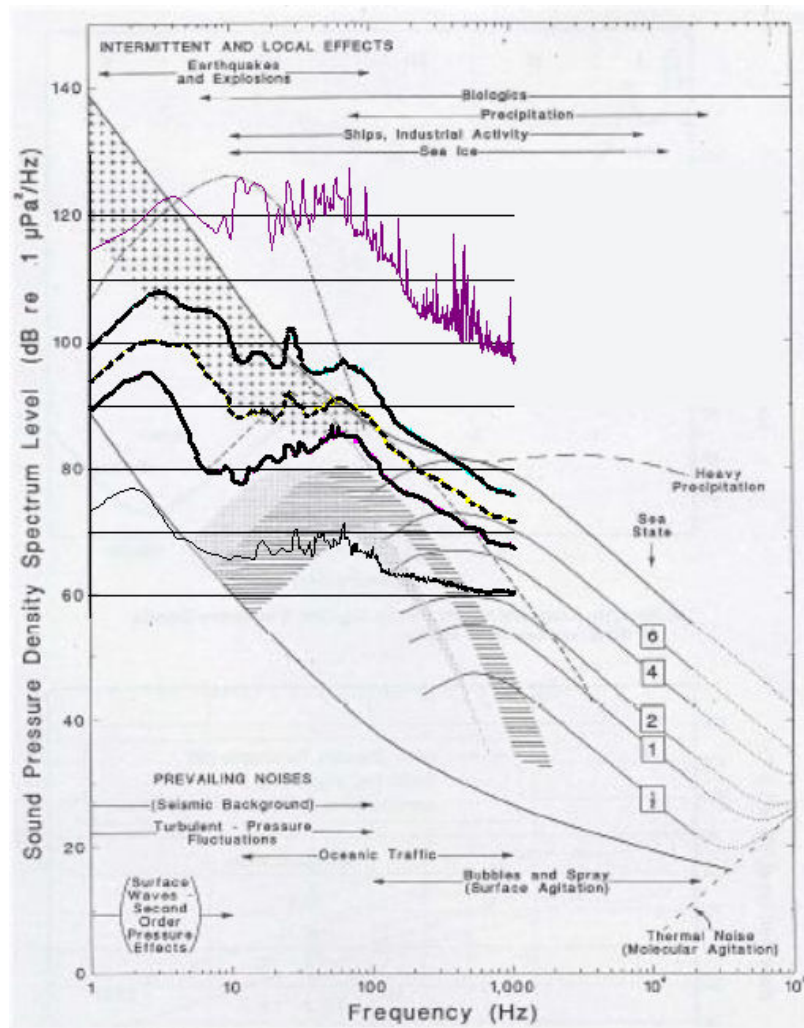


Figure 35-Comparaison avec les courbes de Wenz (NRC, 2003) de l'enveloppe de la densité spectrale de puissance du bruit océanique mesuré pendant la période estivale de 5 mois, incluant la médiane, le 1^{er} et le 3^e quartile, la valeur minimale et maximale (N=602 spectres).

3.2 Les niveaux de bruit pondérés pour les organismes durant la saison estivale

Les niveaux de bruit pondérés selon Southall et al. (2007) pour les cétacés et les pinnipèdes dans la bande 1-1000 Hz sont présentés à la figure 36.

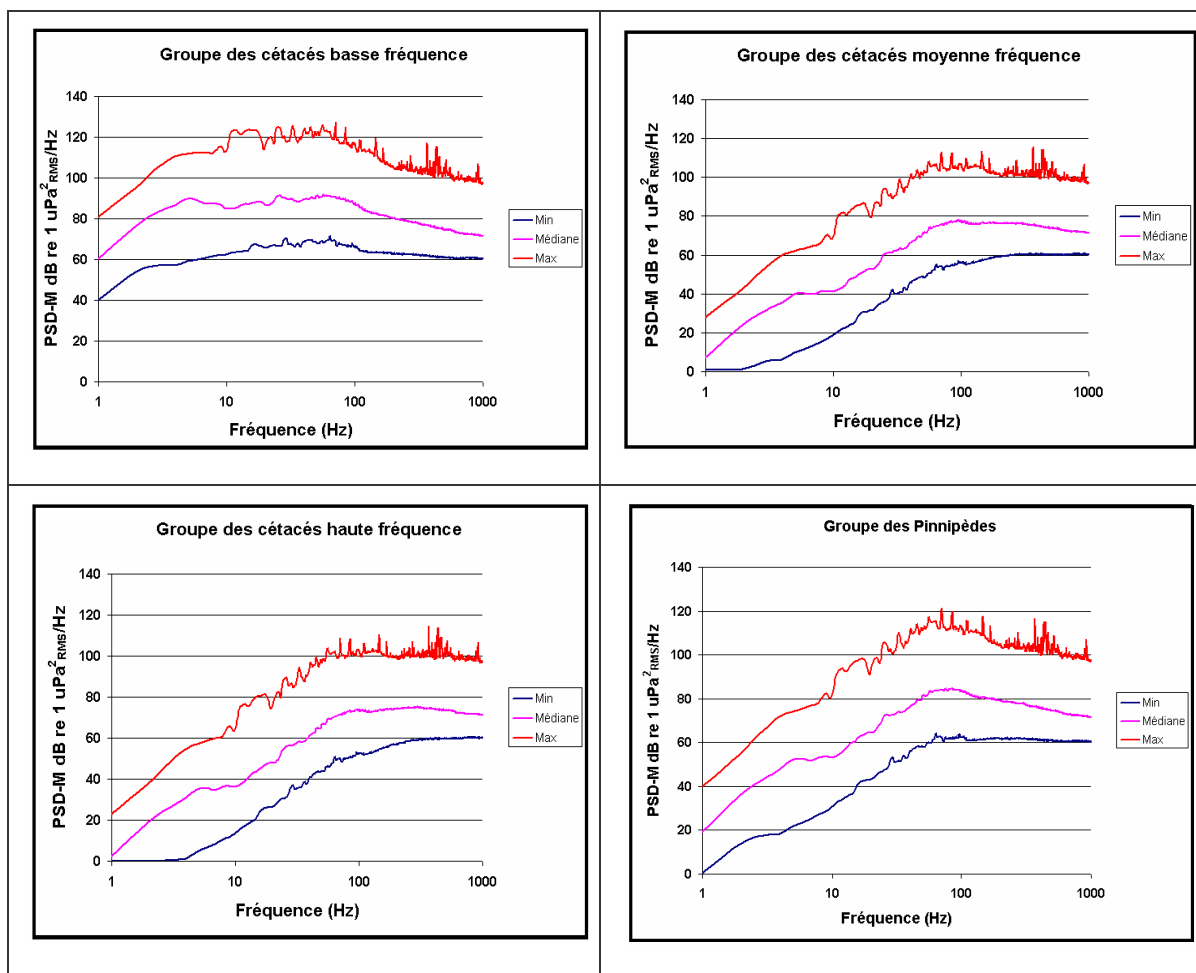


Figure 36 - Niveau de bruit en fonction de la fréquence pondéré selon les courbe de pondération de type M pour les quatre groupes de mammifères marins (N=602 spectres).

Tel qu'attendu, c'est surtout aux basses fréquences que l'effet des pondérations sur le spectre non pondéré (fig. 34) se fait sentir. Pour le groupe des cétacés aux basses fréquences, la pondération a peu d'effet; c'est toujours la bande de navigation [10 à 100 Hz] qui domine le bruit. La pondération pour les pinnipèdes fait ressortir l'importance des fréquences du bruit de navigation sur ces animaux. Pour les autres cétacés, la pondération a pour effet de diminuer de 10 à 20 dB les niveaux dans la bande de navigation. Pour le groupe des cétacés spécialisés en haute fréquence, une part de la distribution du bruit est tronquée aux basses fréquences avec la pondération M.

Les box-plots des mêmes niveaux de bruit pondérés pour les cétacés et les pinnipèdes sont présentés en tiers d'octave à la figure 37. Le spectre en tiers d'octave élève le niveau de bruit aux fréquences supérieures dû au fait que la largeur de la bande de fréquences augmente avec la fréquence et que l'intensité du bruit est intégrée sur toute la largeur de la bande. Dans 50% du temps (1^{er} à 3^{ème} quartile), les niveaux de bruit par tiers d'octave sont entre ~76 à 105 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ dans la bande 10 à 80 Hz pour le groupe des cétacés aux basses fréquences et les pinnipèdes. Pour les deux autres groupes de mammifères, la médiane indique que 50% du temps, les niveaux de bruit sont inférieurs à 80 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ dans les mêmes bandes de fréquences et diminuent faiblement. Au delà de 80 Hz les niveaux atteignent un plateau à ~90 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. On remarque également que la bande principale de navigation se trouvant dans la bande de 63 Hz représente une part non négligeable du bruit pondéré auquel

sont exposés les quatre groupes de mammifères marins. Pour les quatre espèces, le niveau de bruit maximal s'étend de 112 à 130 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$.

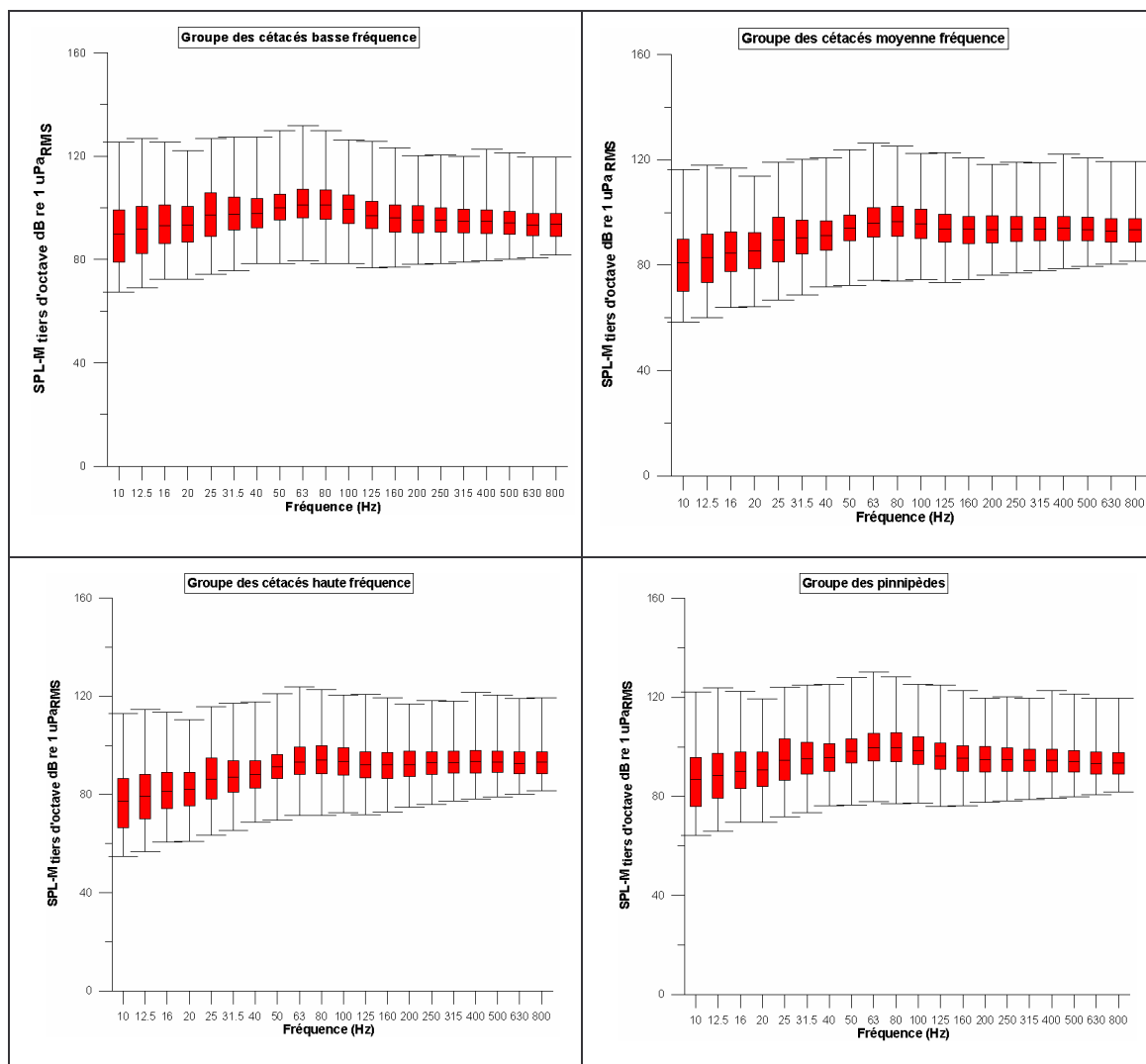


Figure 37 Box-plot des niveaux de bruit pondérés exprimés en tiers d'octave pour les quatre groupes de mammifères marins (N=602 spectres).

Aux figures 38 et 39, on présente les niveaux de bruit pondéré P pour les quatre espèces de poissons. En général, les niveaux de bruit maximum excèdent le niveau de 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 / \text{Hz}$ entre 60 et 120 Hz. La plie, ayant un niveau de sensibilité plus élevé dans les basses fréquences, son niveau de

bruit maximal pondéré voisine 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ dans la bande 10-200 Hz.

L'aiglefin, par contre, ne perçoit aucun bruit dans la bande inférieure à 15 Hz pendant l'été, 50% du temps.

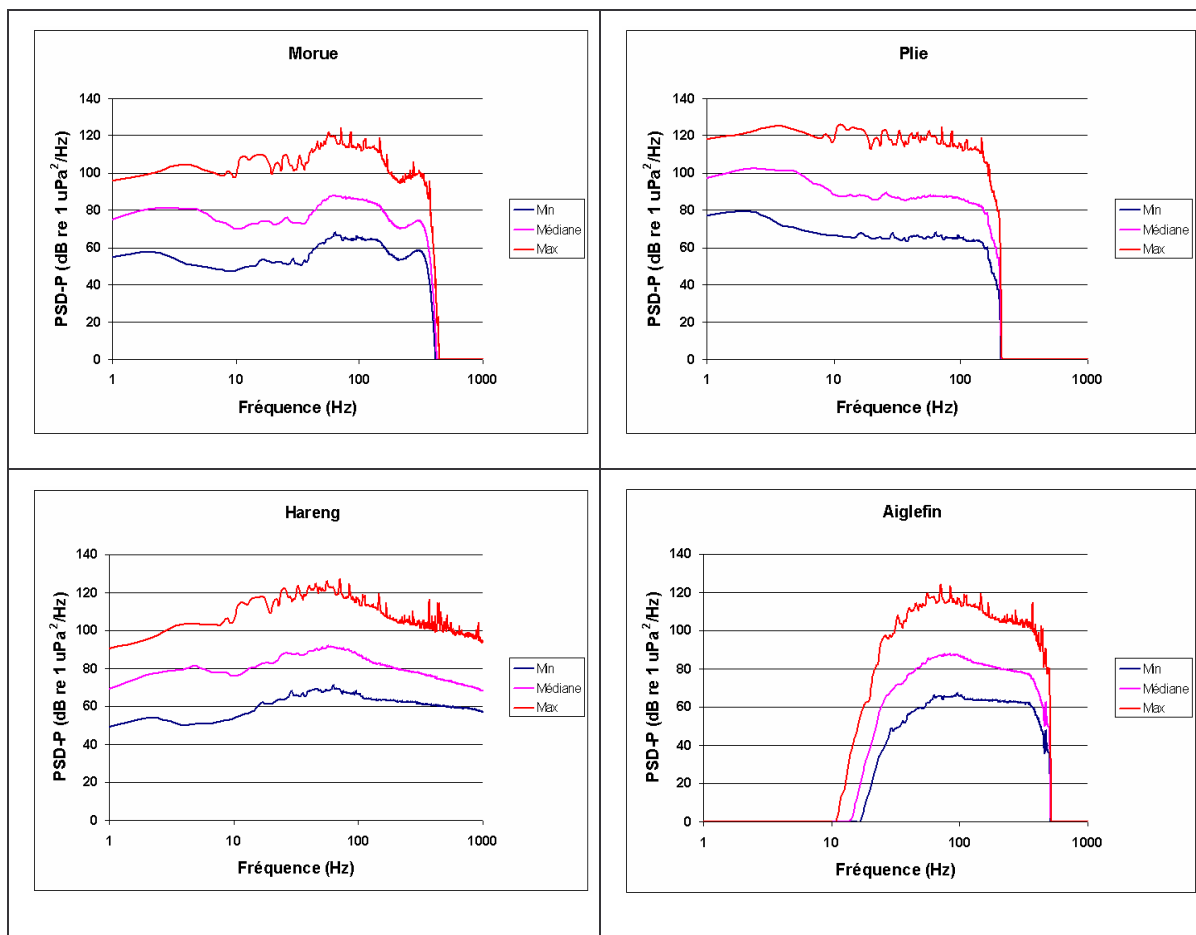


Figure 38 Niveau de bruit pondéré des poissons pendant la période de 5 mois (N=602 spectres).

En tiers d'octave (fig. 39), la capacité d'entendre du poisson ne doit pas changer et doit donc rester la même peu importe notre façon de calculer. L'intégration de l'énergie pour chaque bande de tiers d'octave fait ressortir le bruit sur une bande de fréquence éloigné.

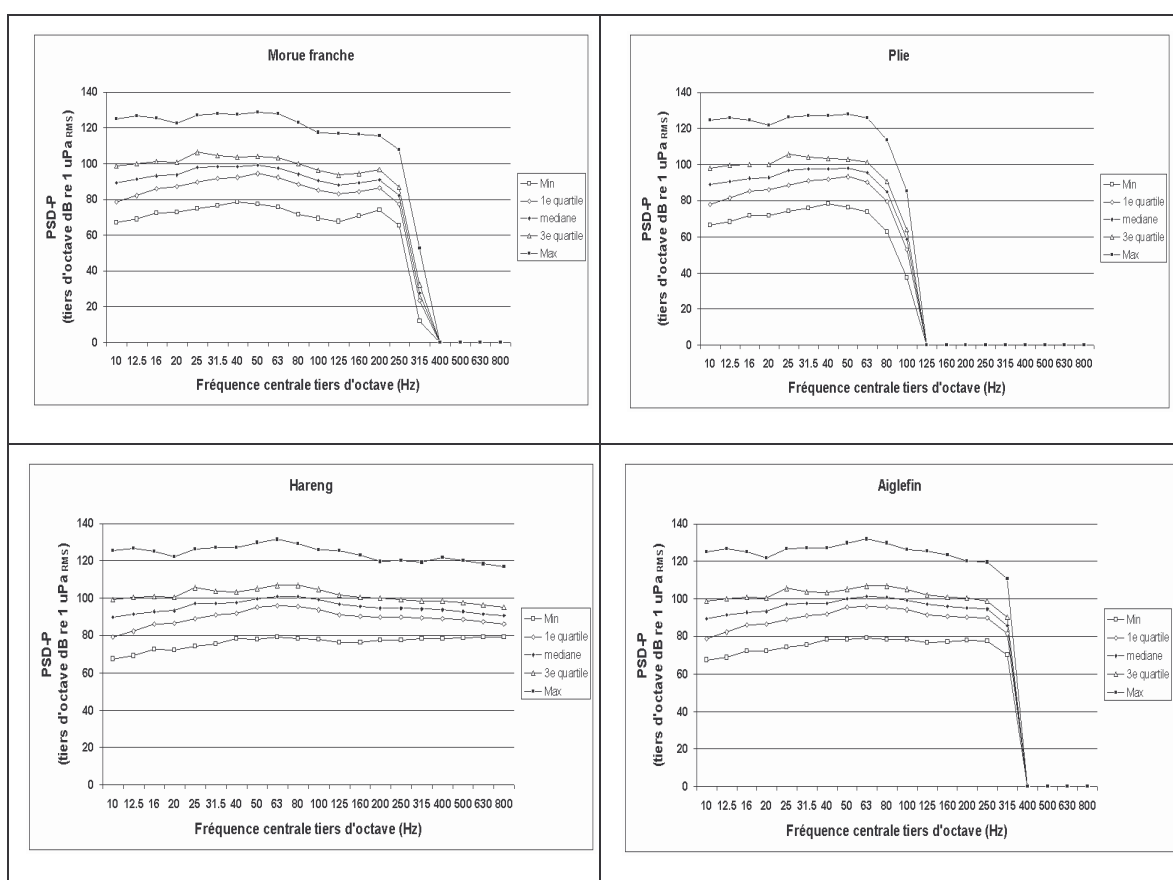


Figure 39 - Niveau de bruit pondéré en tiers d'octave pour les quatre poissons durant la période estivale (N=602 spectres).

On présente les séries des niveaux de bruit pondéré large bande pour les quatre espèces de poissons aux figures 40 à 43. Sur la figure 40, l'enveloppe de ce niveau large bande pour la morue varie de 87 à 134 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ et est d'environ 108 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ en moyenne.

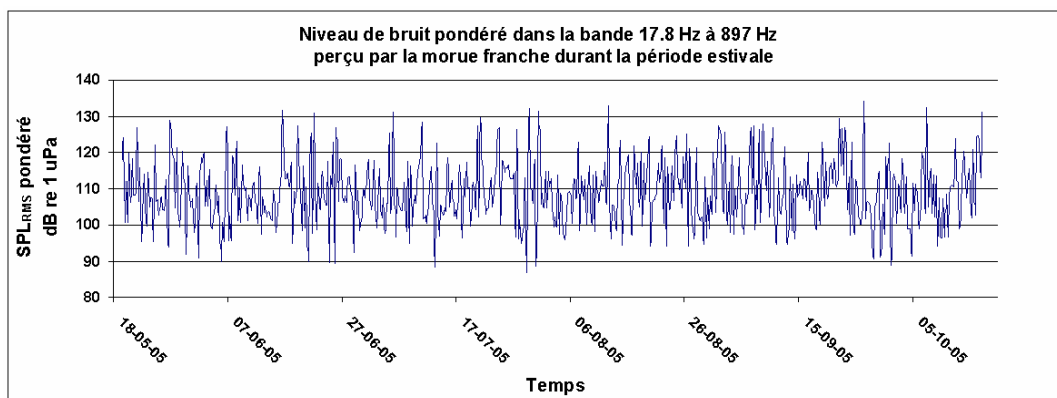


Figure 40 - Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de la morue franche durant la saison estivale.

Pour la plie (fig. 41), il s'étend de 85 dB à 133 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ et est en moyenne d'environ 106 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$.

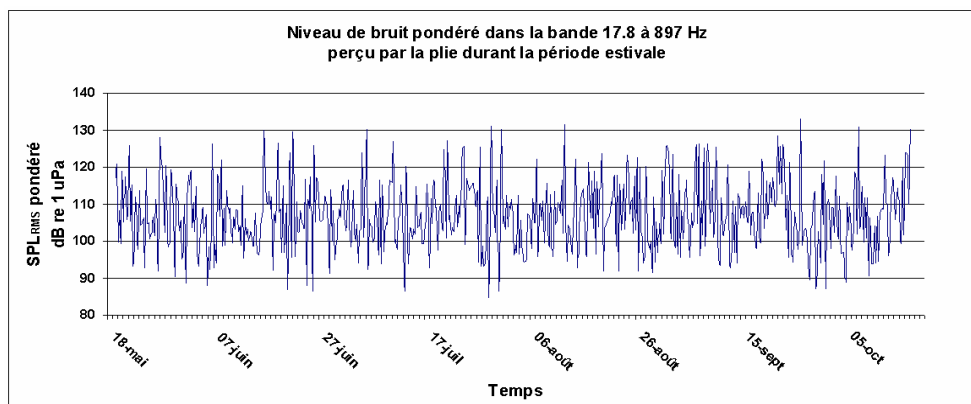


Figure 41 - Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de la plie durant la saison estivale.

Les variations du niveau pondéré pour le hareng (fig. 42) et l'aiglefin (fig. 43) sont presque identiques. Chez le hareng, l'enveloppe évolue entre 91 dB et 135 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ avec une moyenne d'environ 111 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Chez l'aiglefin, il est d'environ 111 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ en moyenne avec une variation entre 90 dB et 135 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$.

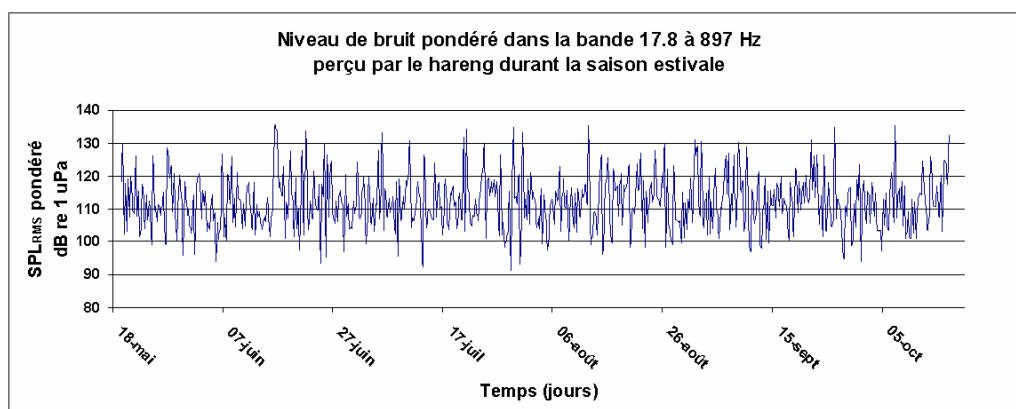


Figure 42 - Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz du hareng durant la saison estivale.

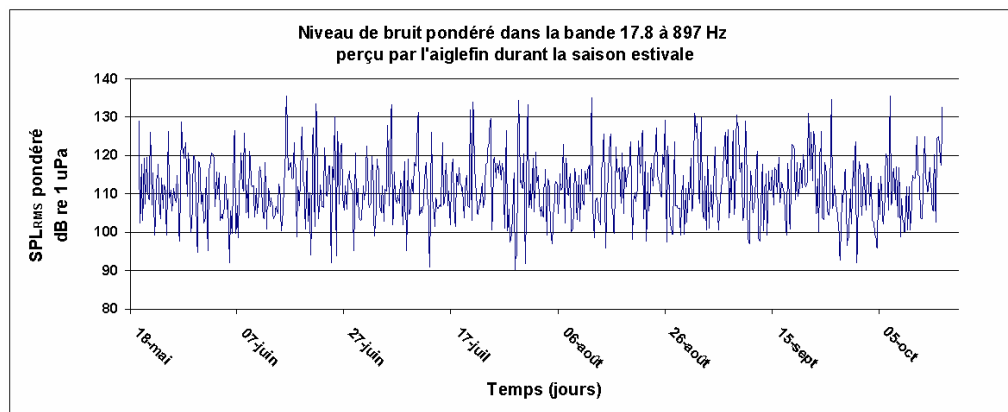


Figure 43 - Niveau de bruit pondéré dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz de l'aiglefin durant la saison estivale.

Similairement, les séries des niveaux pondérés (SPL-M) pour les divers groupes de mammifères marins sont présentés aux figures 44 à 47. Pour le groupe des cétacés spécialisés aux basses fréquences (fig. 44), la variation du bruit pondéré s'étend de 92 dB à 136 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ avec une valeur moyenne de 112 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$, qui correspond entre autre à la même moyenne du bruit non pondéré.

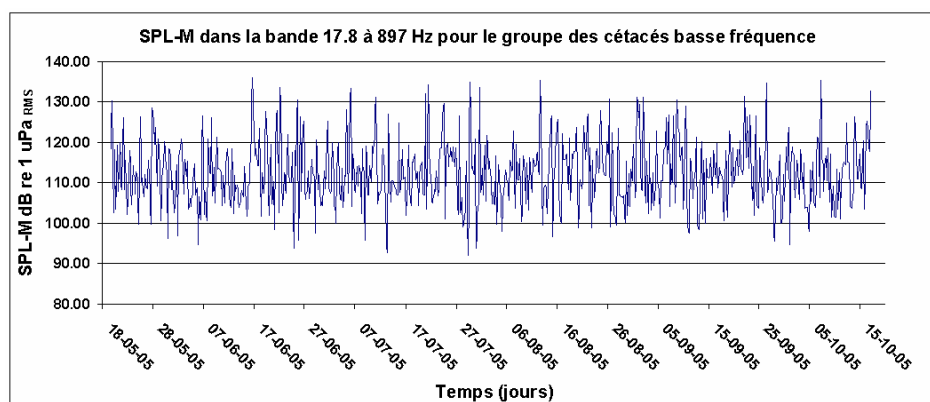


Figure 44 - Valeur SPL-M_{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les basses fréquences durant la saison estivale.

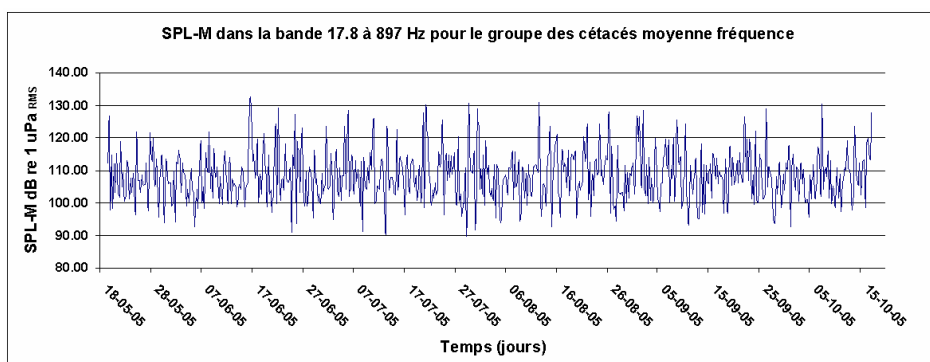


Figure 45 - Valeur SPL-M_{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les moyennes fréquences durant la saison estivale.

Pour le groupe des cétacés spécialisés aux moyennes fréquences (fig. 45), la variation du bruit pondéré évolue entre 90 et 132 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ avec une moyenne de 108 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Pour le groupe des cétacés spécialisés aux hautes fréquences (fig. 46), on retrouve une moyenne de bruit pondéré de 106 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ évoluant entre 88 et 131 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$.

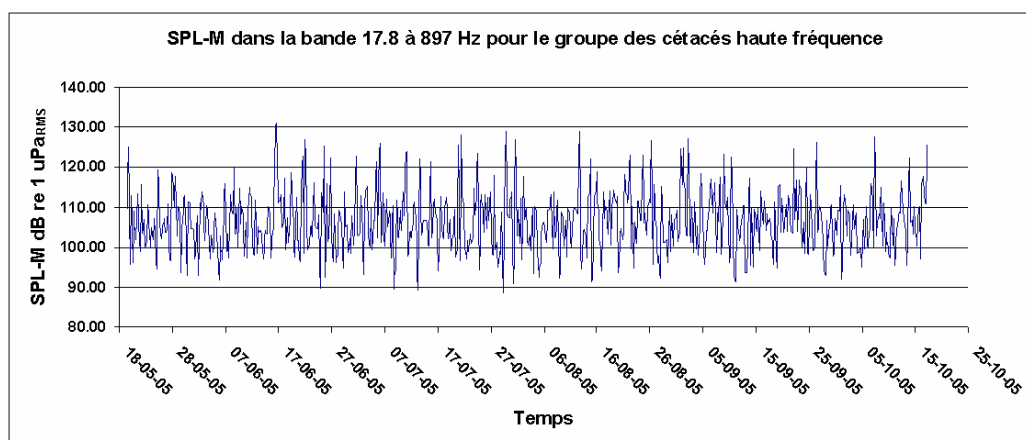


Figure 46 - Valeur SPL-M_{rms} du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des cétacés spécialisés dans les hautes fréquences durant la saison estivale.

Finalement, pour les pinnipèdes (fig. 47), on retrouve une moyenne de bruit pondéré de 111 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ évoluant entre 91 et 135 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Ici encore, la moyenne de bruit pondéré correspond presque à la médiane du bruit océanique mesuré durant la saison estivale.

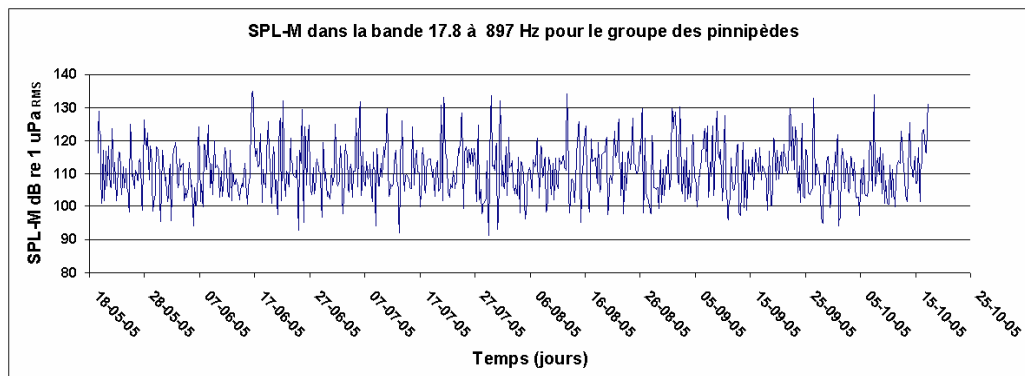


Figure 47 - Valeur $SPL-M_{rms}$ du bruit dans la bande 17.8 Hz à 897 Hz selon la pondération M du groupe des pinnipèdes communiquant sous l'eau durant la saison estivale.

On présente à la figure 48 les histogrammes du niveau de bruit pondéré pour les poissons pour la série de 5 mois comparés avec ceux du signal non pondéré. Les niveaux de bruit chez les poissons s'étalent entre 84 et 137 dB_{rms} avec des modes de 107 dB_{rms} pour la morue, de 109 dB pour la plie, de 111 dB pour le hareng, qui a un audiogramme plus étendu, et de 112 dB pour l'aiglefin. Le mode de la série non pondéré est d'environ 112 dB. La distribution de bruit pondéré durant la période estivale pour le hareng et l'aiglefin suit de très près celle du bruit non pondéré. La morue et la plie sont exposées à un niveau de bruit pondéré presque semblable. La plie présente l'audiogramme le moins étendu comparativement aux autres poissons et conséquemment un histogramme de bruit pondéré décalé vers des niveaux plus bas en général, suite à sa perception limitée du bruit aux fréquences >200 Hz contrairement aux autres espèces de poissons (fig. 18 à 21)

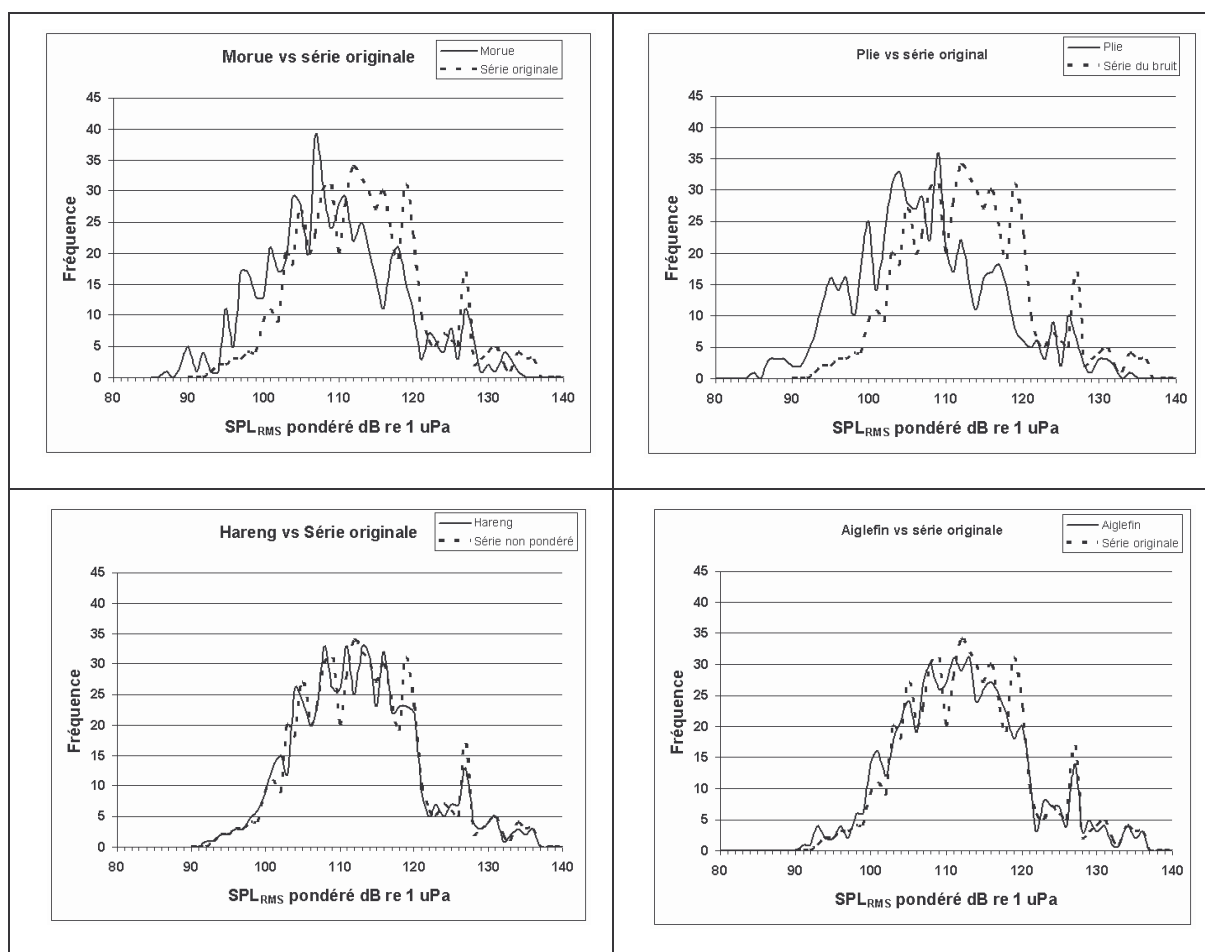


Figure 48 Histogrammes lissés du niveau de bruit pondéré pour les quatre poissons durant la saison estivale comparés à ceux du bruit non pondéré.

On présente à la figure 49 les histogrammes du niveau de bruit pondéré pour les mammifères marins. La distribution du bruit pondéré pour les mammifères marins s'étale de 85 dB à 140 dB avec des modes d'environ 110 dB pour le groupe des cétacés spécialisés en hautes et moyennes fréquences et de 115 dB pour le groupe des pinnipèdes et des cétacés spécialisés en basses fréquences. L'étendue est presque similaire pour les quatre groupes de

mammifères marins (entre 87 et 137 dB). La pondération-M a peu d'effet sur le bruit pondéré pour les cétacés spécialisés dans les basses fréquences, dont l'histogramme est presque identique à celui du bruit océanique présent à la station d'observation. Elle a un léger effet pour les pinnipèdes, et un effet notable pour les cétacés spécialisés aux moyennes et hautes fréquences, qui sont moins sensibles au bruit dans la bande de navigation.

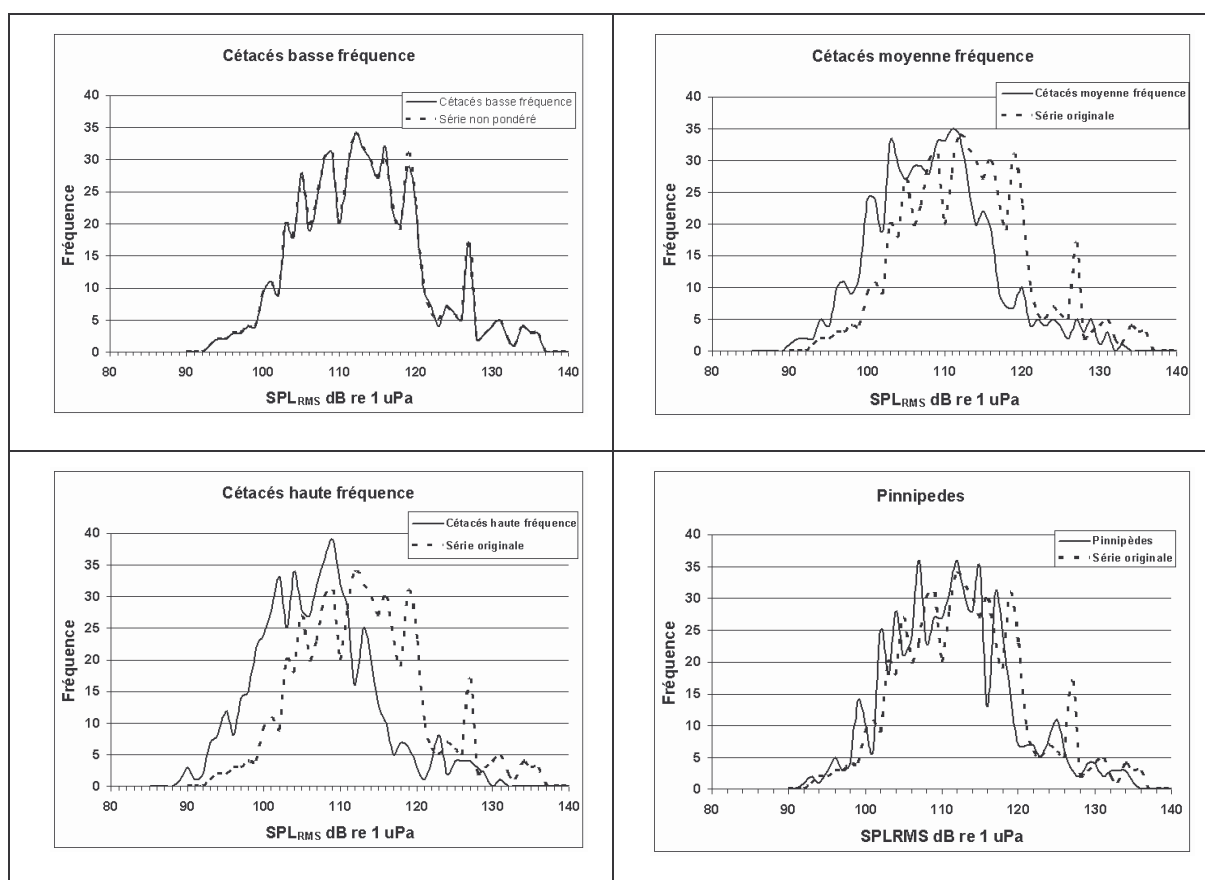


Figure 49 Histogrammes lissés du niveau de bruit pour les quatre groupes de mammifère marin durant la saison estivale comparés à ceux du bruit non pondéré.

Pour chaque espèce de poissons et groupe de mammifères marins (tableaux 3 à 10), nous avons évalué le niveau d'exposition sonore (SEL) durant la saison estivale et calculé la durée que cela prendrait pour atteindre une valeur critique, soit un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ correspondant à une exposition de 1 heure à un SPL de 180 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ (Enger 1981). Cette valeur est utilisée comme niveau limite au-dessus duquel il y aurait des risques de dommages temporaires ou permanents à la structure auditive des poissons dépendant du temps d'exposition (Ward 1997, Enger 1981). Pour les cétacés, nous utilisons la valeur critique SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ ainsi que 203 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ pour les pinnipèdes tel que proposé par Southall et al. (2007) pour un bruit de nature continue. Pour tous les animaux, on utilise la distribution des valeurs SPL_{rms} large bande (minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximum) provenant de la courbe de bruit pondéré pour chacun des poissons et groupes de mammifères marins durant l'été.

Exposition sonore de la morue selon la distribution du bruit durant l'été					
temps (jours)	SEL de la morue franche (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)				
	Min	1er quartile	médiane	3e quartile	Max
	SPL 86.84 dB _{RMS}	SPL 103.06 dB _{RMS}	SPL 108.18 dB _{RMS}	SPL 114.34 dB _{RMS}	SPL 133.95 dB _{RMS}
0.04	122.4	138.6	143.7	149.9	169.5
0.25	130.2	146.4	151.5	157.7	177.3
1.00	136.2	152.4	157.5	163.7	183.3
7.00	144.7	160.9	166.0	172.2	191.8
30.00	151.0	167.2	172.3	178.5	198.1
150.00	158.0	174.2	179.3	185.5	205.1
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
temps - 215 dB (année)	207660.12	4953.18	1524.52	369.03	4.04

Tableau 3 - Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour la morue et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.

Le tableau 3 présente le niveau SEL pondéré pour la morue après une durée d'exposition déterminée pour différentes valeurs de la distribution du bruit pondéré.

Le niveau maximal d'exposition possible pendant la période d'observation de 5 mois ne dépasse pas 205 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ pour un bruit pondéré maximum d'environ 134 dB re $1\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pour la morue. Pour atteindre la valeur critique de 215 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$, à ce niveau SPL, il faudrait 4,04 années. Pour une exposition au niveau de bruit pondéré médian (108 dB re $1\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$), cela prendrait 1525 ans. Les valeurs similaires pour les autres espèces de poissons (tableaux 4 à 6) conduisent aux mêmes conclusions que pour atteindre le niveau SEL critique de 215 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ il faudrait plusieurs années, même pour une exposition au bruit pondéré maximum rencontré.

Exposition sonore de la plie selon la distribution du bruit durant l'été					
temps (jours)	SEL de la plie (dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)				
	Min	1er quartile	médiane	3e quartile	Max
	SPL 84.75 dBrms	SPL 100.93 dBrms	SPL 106.24 dBrms	SPL 112.46 dB rms	SPL 133.06 dB rms
0.04	120.3	136.5	141.8	148.0	168.6
0.25	128.1	144.3	149.6	155.8	176.4
1.00	134.1	150.3	155.6	161.8	182.4
7.00	142.6	158.7	164.1	170.3	190.9
30.00	148.9	165.1	170.4	176.6	197.2
150.00	155.9	172.1	177.4	183.6	204.2
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
temps - 215 dB (année)	336160.08	8087.66	2381.02	569.31	4.96

Tableau 4 - Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour la plie et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.

Exposition sonore du hareng selon la distribution du bruit durant l'été					
temps (jours)	SEL du hareng (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$)				
	minimum	1 ^{er} quartile	médiane	3 ^e quartile	maximum
	SPL 91.42 dB _{RMS}	SPL 106.32 dB _{RMS}	SPL 111.57 dB _{RMS}	SPL 116.84 dB _{RMS}	SPL 135.47 dB _{RMS}
0.04	127.0	141.9	147.1	152.4	171.0
0.25	134.8	149.7	154.9	160.2	178.8
1.00	140.8	155.7	160.9	166.2	184.8
7.00	149.2	164.1	169.4	174.7	193.3
30.00	155.6	170.5	175.7	181.0	199.6
150.00	162.5	177.4	182.7	188.0	206.6
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
temps - 215 dB (année)	72352.88	2340.13	698.24	207.61	2.85

Tableau 5 - Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour le hareng et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.

Avec la pondération selon l'audiogramme, on observe que la médiane du bruit pondéré pour les quatre poissons est presque identique, ne variant que de quelques dB.

Exposition sonore de l'aiglefin selon la distribution du bruit durant l'été					
temps (jours)	SEL de l'aiglefin (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$)				
	minimum	1 ^{er} quartile	médiane	3 ^e quartile	maximum
	SPL 90.27 dB _{RMS}	SPL 105.90 dB _{RMS}	SPL 111.10 dB _{RMS}	SPL 116.76 dB _{RMS}	SPL 135.36 dB _{RMS}
0.04	125.8	141.5	146.7	152.3	170.9
0.25	133.6	149.2	154.4	160.1	178.7
1.00	139.6	155.3	160.5	166.1	184.7
7.00	148.1	163.7	168.9	174.6	193.2
30.00	154.4	170.0	175.2	180.9	199.5
150.00	161.4	177.0	182.2	187.9	206.5
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
temps - 215 dB (année)	94202.48	2577.49	777.69	211.65	2.92

Tableau 6 - Niveau SEL pour différents temps d'exposition (1 h à 5 mois) aux valeurs extrêmes et quartiles de la distribution du bruit pondéré pour l'aiglefin et temps requis pour atteindre un niveau de 215 dB.

Le tableau 7 présente les mesures d'exposition au bruit selon la courbe pondéré-M pour le groupe des cétacés spécialisés aux basses fréquences. Le niveau maximum de bruit pondéré de 135.87 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ est semblable à celui mesuré pour les poissons. Pour une durée d'exposition de 5 mois à ce niveau de bruit maximum, le SEL sera de 207 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$.

Ce niveau cumulé de bruit est en dessous de la valeur d'exposition critique de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$, qui serait atteinte après une exposition de 2,6 ans au niveau de bruit maximum mesuré à la station et plus de 600 ans pour une exposition à des niveaux inférieurs au niveau médian.

Exposition sonore du groupe des cétacés basse fréquence					
selon la distribution du bruit pondéré durant l'été					
temps (jours)	SEL du groupe des cétacés basse fréquence (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)				
	min	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	max
	SPL 92.09 dB _{RMS}	SPL 106.79 dB _{RMS}	SPL 111.98 dB _{RMS}	SPL 117.25 dB _{RMS}	SPL 135.87 dB _{RMS}
0.04	127.65	142.36	147.54	152.81	171.43
0.25	135.43	150.14	155.32	160.60	179.21
1.00	141.45	156.16	161.34	166.62	185.23
7.00	149.90	164.61	169.79	175.07	193.69
30.00	156.23	170.93	176.11	181.39	200.01
150.00	163.21	177.92	183.10	188.38	207.00
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
temps - 215 dB (année)	61988.1	2098.6	635.9	188.8	2.6

Tableau 7- Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux basses fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$.

Pour le groupe des cétacés spécialisés aux moyennes et hautes fréquences (tableaux 8 et 9), les SEL maximum pour une durée d'exposition de 5 mois sont de 4 à 5 dB inférieurs et les temps requis pour atteindre la valeur critique de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ sont supérieurs à 5,9 ans.

Exposition sonore du groupe des cétacés moyenne fréquence					
selon la distribution du bruit pondéré durant l'été					
temps (jours)	SEL du groupe des cétacés moyenne fréquence (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)				
	Min	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	Max
	SPL 89.62 dB _{RMS}	SPL 102.84 dB _{RMS}	SPL 107.98 dB _{RMS}	SPL 112.51 dB _{RMS}	SPL 132.31 dB _{RMS}
0.04	125.19	138.40	143.54	148.07	167.87
0.25	132.97	146.18	151.32	155.86	175.66
1.00	138.99	152.21	157.34	161.88	181.68
7.00	147.44	160.66	165.79	170.33	190.13
30.00	153.76	166.98	172.11	176.65	196.45
150.00	160.75	173.97	179.10	183.64	203.44
SEL=SPL+10Log ₁₀ (T)					
215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ (Année)	109322.7	5213.9	1597.1	562.5	5.9

Tableau 8 - Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux moyennes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ rms.

On présente au tableau 9 l'exposition sonore du groupe des cétacés spécialisés aux hautes fréquences. Le niveau de bruit maximum pondéré pour cse mammifères est de 130.77 dB re 1 μPa _{rms}. Pour une durée d'exposition de 5 mois à ce niveau, le SEL est de 201.9 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$. Pour les représentants de ce groupe, la durée d'exposition critique à ce niveau de bruit serait de 8.4 ans.

Exposition sonore du groupe des cétacés haute fréquence					
selon la distribution du bruit pondéré durant l'été					
temps (jours)	SEL du groupe des cétacés haute fréquence (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)				
	minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	maximum
	SPL 88.61 dB _{RMS}	SPL 101.06 dB _{RMS}	SPL 106.31 dB _{RMS}	SPL 110.36 dB _{RMS}	SPL 130.78 dB _{RMS}
0.04	124.18	136.63	141.88	145.93	166.34
0.25	131.96	144.41	149.66	153.71	174.12
1.00	137.98	150.43	155.68	159.73	180.14
7.00	146.43	158.88	164.13	168.18	188.59
30.00	152.75	165.20	170.45	174.50	194.91
150.00	159.74	172.19	177.44	181.49	201.90
215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ (Année)					
temps - 215 dB (année)	137956.7	7852.1	2342.8	922.5	8.4

Tableau 9 - Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux hautes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ rms.

Pour les pinnipèdes (tableau 10), l'exposition SEL n'est que légèrement inférieure à celle des cétacés spécialisés aux basses fréquences, mais le temps requis pour atteindre leur valeur critique de 203 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$ n'est que de 0.2 ans pour une exposition continue au bruit pondéré maximum mesuré. Pour une exposition au bruit pondéré médian, ce temps est supérieur à la longévité des animaux.

Exposition sonore du groupe des pinnipèdes					
selon la distribution du bruit pondéré durant l'été					
SEL du groupe des pinnipèdes (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$)					
temps (jours)	minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	maximum
	SPL 91.23 dB _{RMS}	SPL 105.43 dB _{RMS}	SPL 110.83 dB _{RMS}	SPL 115.74 dB _{RMS}	SPL 134.68 dB _{RMS}
0.04	126.79	141.00	146.39	151.30	170.24
0.25	134.57	148.78	154.17	159.09	178.03
1.00	140.59	154.80	160.19	165.11	184.05
7.00	149.04	163.25	168.64	173.56	192.50
30.00	155.36	169.57	174.96	179.88	198.82
150.00	162.35	176.56	181.95	186.87	205.81
203 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ (Année)					
temps - (année)	4769.0	181.1	52.3	16.9	0.2

Tableau 10 - Exposition sonore (SEL) en fonction de la durée d'exposition à différentes valeurs de l'histogramme de bruit pondéré pour les cétacés spécialisés aux hautes fréquences et temps requis pour atteindre un SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$.

Le tableau 11 résume la distribution des valeurs SPL pondérées du bruit pondéré pour chacun des animaux durant l'été.

Distribution des valeurs SPLrms (dB re 1 uPa) de la série de 5 mois provenant des courbes de pondérations pour chacun des animaux.					
Espèces	Min	1er quartile	Médiane	3e quartile	Max
Poissons					
Morue franche	86.84	103.06	108.18	114.34	133.95
Plie	84.75	100.93	106.24	112.46	133.06
Hareng	91.42	106.32	111.57	116.84	135.47
Aiglefin	90.27	105.9	111.1	116.76	135.36
Mammifères					
Cétacés basse fréquence	92.09	106.79	111.98	117.25	135.87
Cétacés moyenne fréquence	89.62	102.84	107.98	112.51	132.31
Cétacés haute fréquence	88.61	101.06	106.31	110.36	130.78
Pinnipèdes	91.23	105.43	110.83	115.74	134.68

Tableau 11 Résumé de la distribution des valeurs SPL pondérés pour la série de 5 mois pour chacun des animaux.

Le tableau 12 résume les niveaux d'exposition sonore pour toute la durée de 5 mois tant pour les poissons que les mammifères marins. L'exposition à un bruit continu pendant toute la saison estivale n'atteint jamais les seuils critiques proposés pour les dommages à l'oreille interne pour aucune valeur de l'histogramme de bruit rencontré dans la région. Les pinnipèdes qui seraient exposés en permanence au bruit maximal, cas improbable, font exception.

Résumé des expositions sonores durant 5 mois (SEL dB re 1 uPa²-s) (voir les valeurs SPL_{RMS} correspondant à chacun des animaux durant l'été)					
Espèces	Min	1er quartile	Médiane	3e quartile	Max
Poissons					
Morue franche	157.96	174.19	179.31	185.47	205.07
Plie	155.87	172.06	177.37	183.58	204.18
Hareng	162.54	177.45	182.70	187.97	206.59
Aiglefin	161.40	177.03	182.23	187.88	206.49
Mammifères marins					
Cétacés basse fréquence	163.21	177.92	183.10	188.38	207.00
Cétacés moyenne fréquence	160.75	173.97	179.10	183.64	203.44
Cétacés haute fréquence	159.74	172.19	177.44	181.49	201.90
Pinnipèdes	162.35	176.56	181.95	186.87	205.81

Tableau 12 Résumé des niveaux d'exposition sonore sur 5 mois pour différentes espèces de poissons et de mammifères marins selon les niveaux de bruit pondéré.

On présente au tableau 13 le temps que cela prendrait avant d'atteindre le seuil critique causant un dommage physique au système auditif selon les niveaux de bruit pondérés pour chacun des animaux.

Espèces	Temps nécessaire (années) avant d'atteindre le seuil critique				
<i>Poissons</i>	exposé aux valeurs SPL_{RMS} pour chacun des animaux durant l'été				
SEL max: 215 dB re 1 uPa ² -s	Min	1er quartile	Médiane	3e quartile	Max
Morue franche	207660.12	4953.18	1524.52	369.03	4.04
Plie	336160.08	8087.66	2381.02	569.31	4.96
Hareng	72352.88	2340.13	698.24	207.61	2.85
Aiglefin	94202.48	2577.49	777.69	211.65	2.92
<i>Mammifères marins</i>					
SEL max: 215 dB re 1 uPa ² -s	Min	1er quartile	Médiane	3e quartile	Max
Cétacés basse fréquence	61988.11	2098.64	635.87	188.84	2.60
Cétacés moyenne fréquence	109322.69	5213.92	1597.12	562.47	5.89
Cétacés haute fréquence	137956.68	7852.14	2342.75	922.50	8.39
SEL max: 203 dB re 1 uPa ² -s					
Pinnipèdes	4768.96	181.06	52.31	16.87	0.22

Tableau 13 Résumé du temps d'exposition que cela prendrait pour atteindre les niveaux SEL critique causant des dommages auditifs chez les poissons et les mammifères marins à différentes intensités de bruit (voir tableau 11 pour les valeurs SPL_{rms}).

3.3 Bruit typique lors du passage d'un navire.

Lors du passage d'un navire marchand à sa vitesse de croisière (~ 12 à 15 nœuds) le niveau de bruit est modifié pendant environ 30 à 45 minutes (fig. 50). Dans le domaine temps-fréquence (fig. 51) le spectrogramme du signal montre la signature du bruit associée au navire, ses raies spectrales correspondant à des bruits qu'il émet à des fréquences particulières, ainsi qu'un patron d'interférences, appelé miroir de Lloyds, généré par l'interférence du trajet direct et du trajet réfléchi par la surface du signal acoustique provenant du navire (c.f. Wales et Heitmeyer 2002).

Le 23 mai 2005, le Cicéro est passé à 598 mètres de l'Aural à son point le plus proche (CPA) et le 21 mai, il est passé plus au large dans le chenal, à 7.82 km à son CPA. Lors des deux passages, on enregistra une vitesse moyenne d'environ 16 nœuds. On peut voir aux figures 52 et 53 que le signal est très faible, bien qu'on distingue encore le passage du navire et son point le plus près par le patron d'interférence du miroir de Lloyds. On retrouve deux raies spectrales caractéristiques du Cicéro à ~ 220 Hz et 380 Hz (fig. 51 et 53).

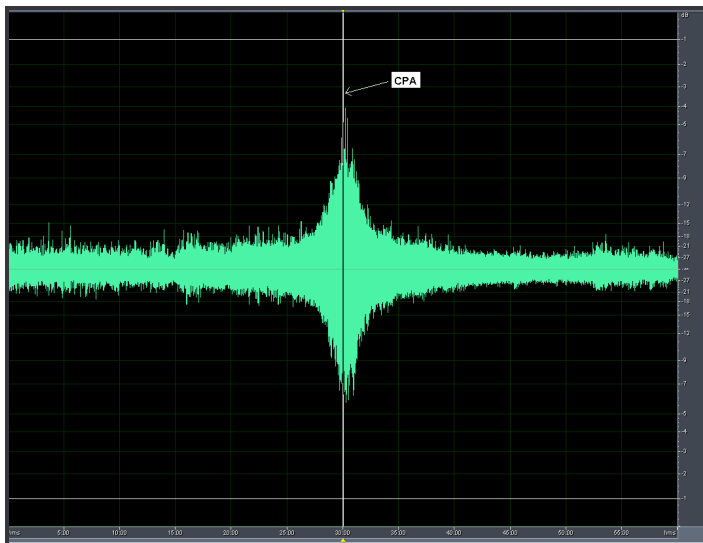


Figure 50 - Oscillogramme d'une durée de 60 minutes présentant le bruit enregistré lors du passage du Cicéro le 23 mai 2005 à 598 mètres au plus près de l'Aural. Le CPA est représenté par la droite verticale qui coupe le signal en deux parties (avant et après le CPA)

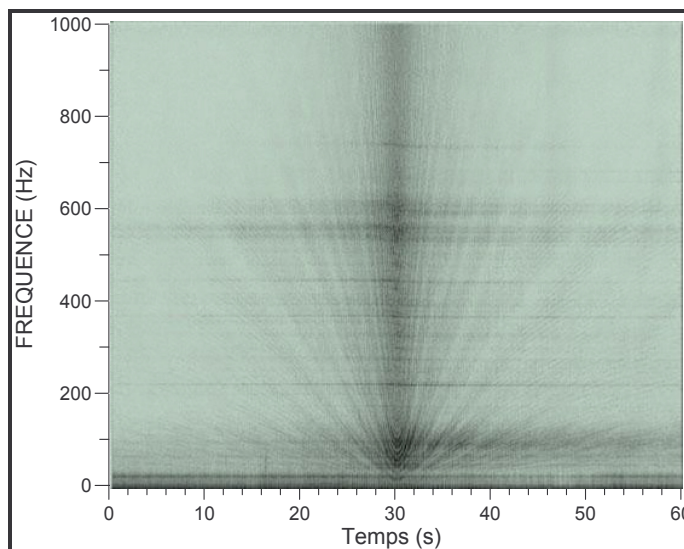


Figure 51 - Spectrogramme correspondant à la figure 50 présentant la signature fréquentielle couvrant la bande 0 à 1000 Hz et montrant des interférences de miroirs de Lloyds ainsi que des raies spectrales associées au navire dont la fréquence baisse légèrement après le CPA par suite de l'effet Doppler. La droite verticale correspond au CPA, soit la distance la plus courte entre l'Aural et le navire, soit 598 mètres.

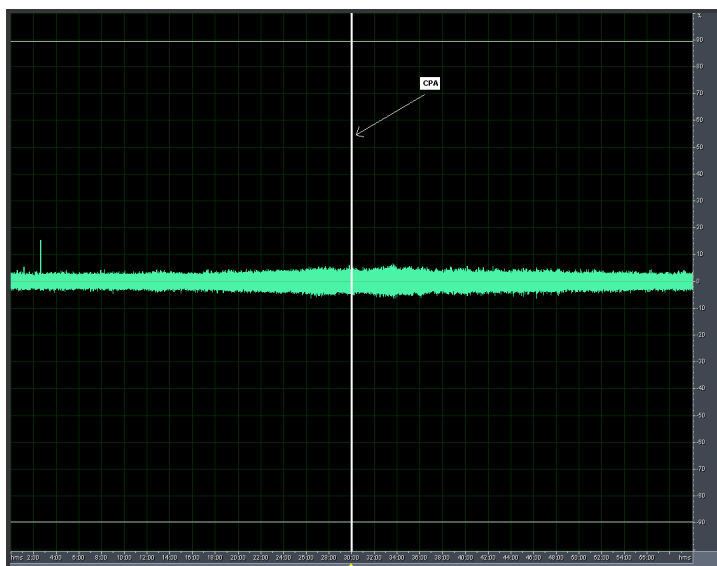


Figure 52 - Oscillogramme d'une durée de 60 minutes présentant le bruit enregistré lors du passage du Cicéro le 21 mai 2005 à 7.82 km de l'Aural. Le CPA est représenté par la droite verticale coupant le signal en deux parties (avant et après le CPA)

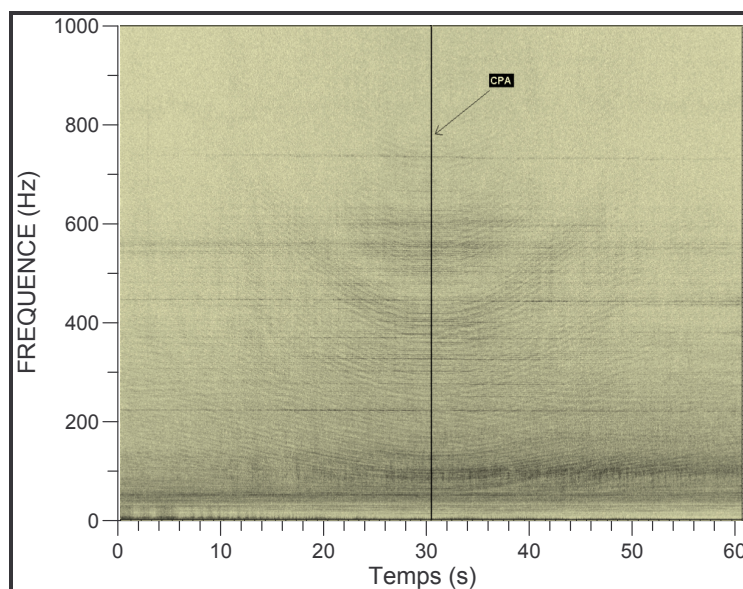


Figure 53 - Spectrogramme correspondant à la figure 52 présentant la signature fréquentielle couvrant la bande 0 à 1000 Hz et montrant des interférences de miroirs de Lloyds ainsi que des raies spectrales associées au navire. La ligne verticale correspond au CPA, soit 7.82 km.

Les niveaux large bande (SPL_{rms} [17.8 - 897 Hz]) correspondant aux deux passages sont indiqués à la figure 54. On voit que le niveau excède 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pendant environ 13 minutes lors du passage au plus près du CPA à 598 mètres de l'Aural, ce qui correspond à des distances de 2.82 km à 3.98 km selon les mesures de distance radiale fournies par les coordonnées GPS. Le niveau de bruit du navire est inférieur à 120 dB à 7.82 km de l'Aural au CPA.

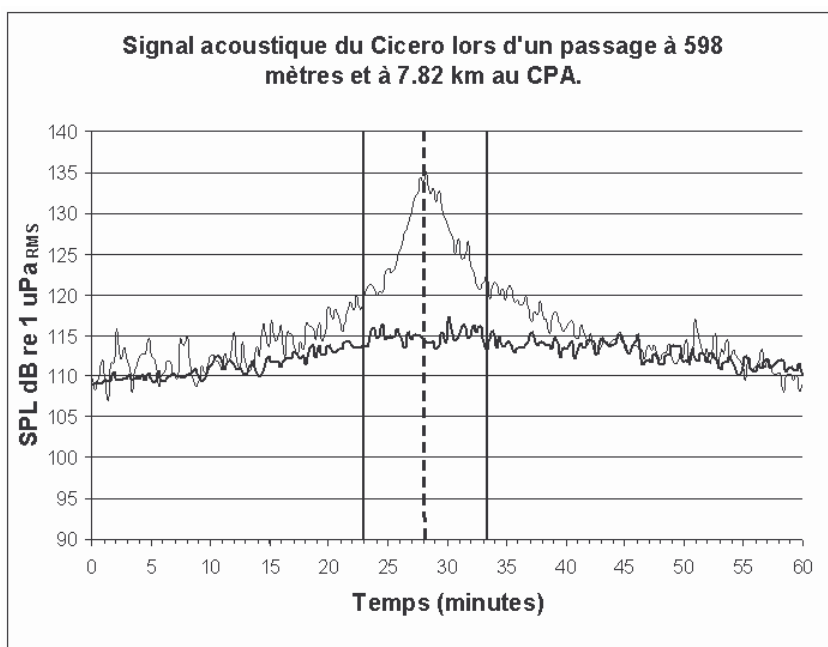


Figure 54 - Niveau de bruit (SPL rms) du Cicéro lors de son passage à 598 mètres (23-05-2005) et à 7.82 km (21-05-2005) de l'Aural à son CPA (La courbe foncée correspond au passage à 7.82 km de l'Aural et la ligne verticale en pointillés correspond à leurs CPA).

Lors du passage du navire à 7.82 km au CPA, on remarque que le niveau de bruit est légèrement plus élevé après le CPA qu'avant le CPA. Cela correspond au fait que le bateau s'éloigne et que le patron de bruit est plus fort

dû au bruit des hélices qui se présentent vers l'Aural. On peut voir ce même phénomène d'asymétrie avant/après CPA lors du passage à 598 mètres.

On présente à la figure 55 les enveloppes des spectres de bruit par bande de 1 Hz correspondant à la figure 54 lors des deux passages du Cicéro pour une période de 60 minutes autour du CPA. On observe une différence d'environ 20 dB dans la bande de fréquence inférieure à 100 Hz entre le passage du navire à 7.82 km comparativement au passage à 598 mètres. On voit dans les deux cas que le niveau de bruit du Cicéro est maximal dans la bande 60 à 120 Hz.

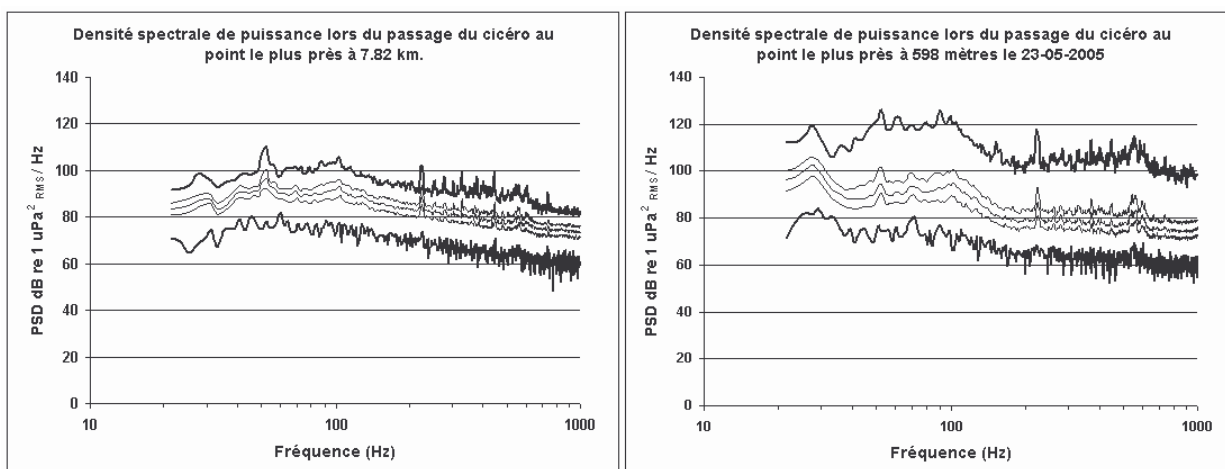


Figure 55 - Niveau de bruit mesuré pendant 60 min lors du passage du Cicéro à un CPA de 7.82 km le 21-05-2005 et de 598 mètres le 23-05-2005 (Min, 1^{er} quartile, médiane, 3^{er} quartile et max).

Au delà de 300 Hz, on retrouve pratiquement les mêmes raies spectrales. Aux fréquences >100 Hz le bruit diminue de 15 à 20 dB/décade pour le trajet à 7.82 km à son CPA. On retrouve pour les deux spectres une raie principale à

224 Hz et une autre à 544 Hz correspondant à des raies caractéristiques du Cicéro sur les figures 51 et 53.

On présente, à la figure 56, le niveau de bruit (SPL_{RMS} [17.8 - 898 Hz]) du navire en fonction de sa distance lorsqu'il approche l'Aural pour le bruit rayonné par l'avant et lorsqu'il s'en éloigne, pour le bruit rayonné par l'arrière. Des droites sont ajustées aux valeurs et une estimation de l'ordonnée à 1 m, permet d'estimer la valeur à la source (SL) du navire en dB re 1 μ Pa @ 1 m.

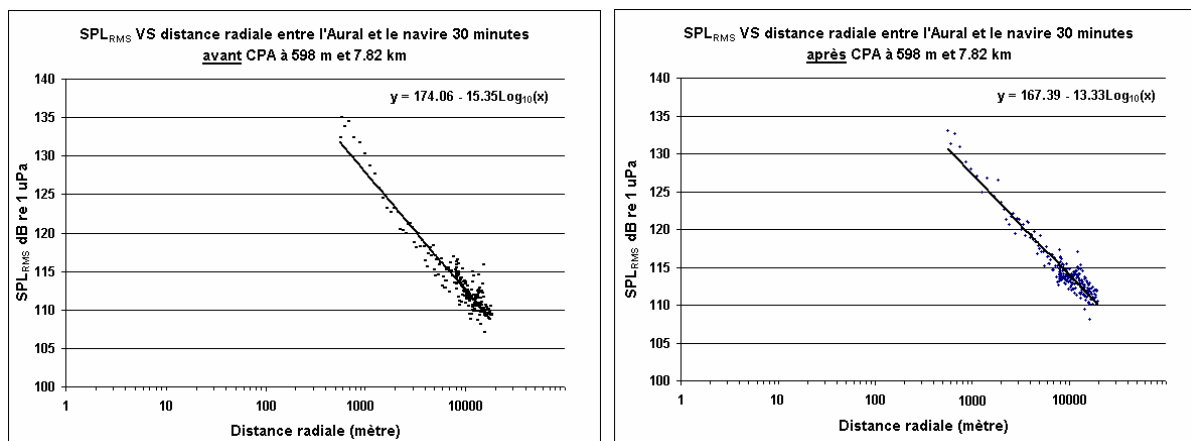


Figure 56 - Niveau de bruit du navire pendant les 30 minutes avant et après son passage au CPA et équation de tendance pour les deux trajets.

Les différences de pente des deux droites de tendance démontrent l'asymétrie avant/arrière du patron de bruit du navire. Les estimés de SL sont de 174 dB re 1 μ Pa @ 1 m (avant CPA) et de 167 dB re 1 μ Pa @ 1 m (après CPA). Les valeurs des pentes, situées entre -13.33 et -15.35, donnant une valeur moyenne de dispersion du bruit de -14.34 selon une fonction $\log_{10}(R)$, suggère un type d'atténuation combinant la dispersion sphérique et cylindrique ; une

valeur de pente de $-10\log_{10}(R)$ correspond à une dispersion cylindrique et la fonction $-20\log_{10}(R)$ correspond à une dispersion sphérique. En faisant référence à l'équation 2 de la page 30, nous avons calculé une atténuation théorique de 89.4 dB pour une distance à la source de 10 km en considérant R_1 égal à 300 m et R égal à 9700 m. Pour un SL d'environ 174 dB re 1 μ Pa @ 1 m, cela donne un bruit reçu de 89.4 dB re 1 μ Pa comparativement à la valeur expérimentale d'environ 112 dB re 1 μ Pa, soit une différence d'environ 22.6 dB qui est due aux caractéristiques du milieu de propagation et de la morphologie du canal estuarien, qui sont mal prises en compte par l'approximation de l'équation 2 .

3.3.1 Bruit pondéré pour les poissons

Lors du passage d'un navire type, les niveaux SPL pondérés P pour la morue (fig. 57) indiquent une nette perception du navire environ 15 min (distance=3 à 4 km) autour du CPA lors du passage le plus près, soit à 598 m, mais à peine perceptible (S/B ~5 dB) par rapport au bruit existant au préalable lors du passage à 7.82 km au CPA.

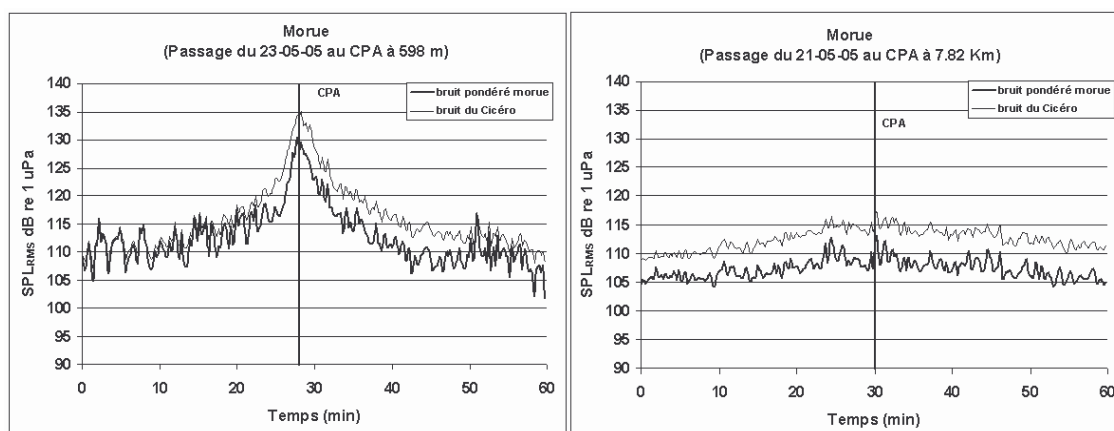


Figure 57 - Niveau SPL pondéré pour la morue lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

La pondération pour la morue diminue d'environ 5 dB pour le bruit large bande émis par le navire. Cette différence est moindre avant l'arrivée du navire lors du passage au CPA à 598 mètres qu'après. À 100 Hz, on note une différence maximale atteignant 5 dB lors du passage à 598 m et de 3 dB lors du passage à 7.82 km (fig. 58). Les raies spectrales du navire à ~54 Hz et ~220 Hz sont bien perçues par la morue.

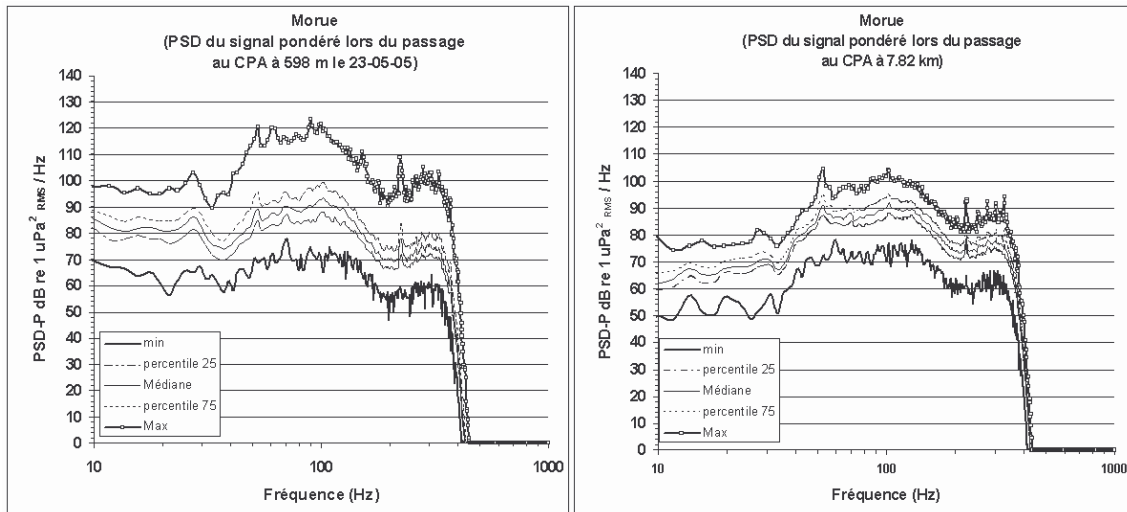


Figure 58 PSD pondéré pour la morue lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

Les mêmes mesures pour la plie, aussi sensible aux basses fréquences du bruit de navigation, sont presque semblables à ceux de la morue (fig. 59-60).

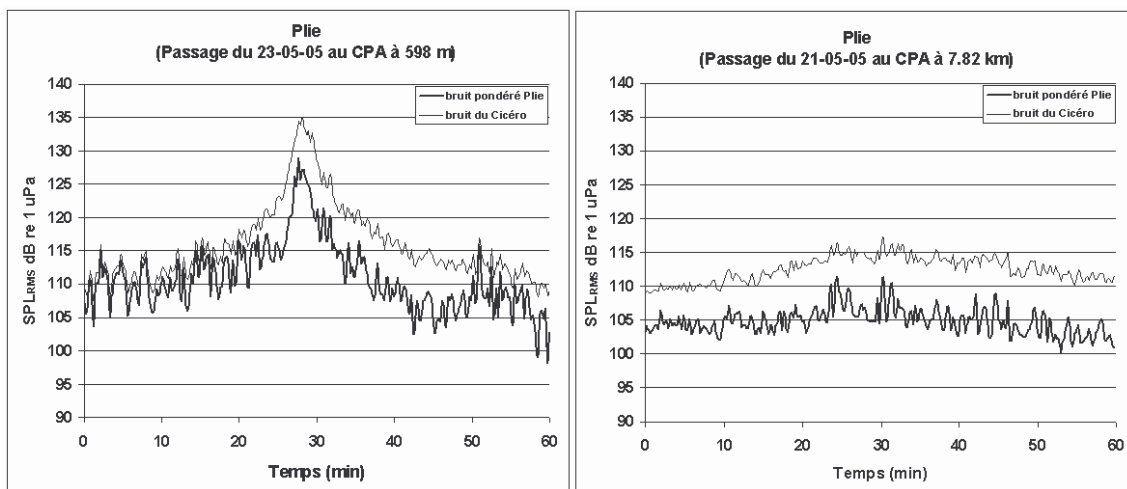


Figure 59 Niveau SPL pondéré pour la plie lors des passages du Cicéro autour de leurs CPAs.

Pour le hareng, dont la sensibilité couvre toute la bande de fréquences (fig. 62), il y a peu de différence entre le bruit pondéré et le bruit observé (fig. 61).

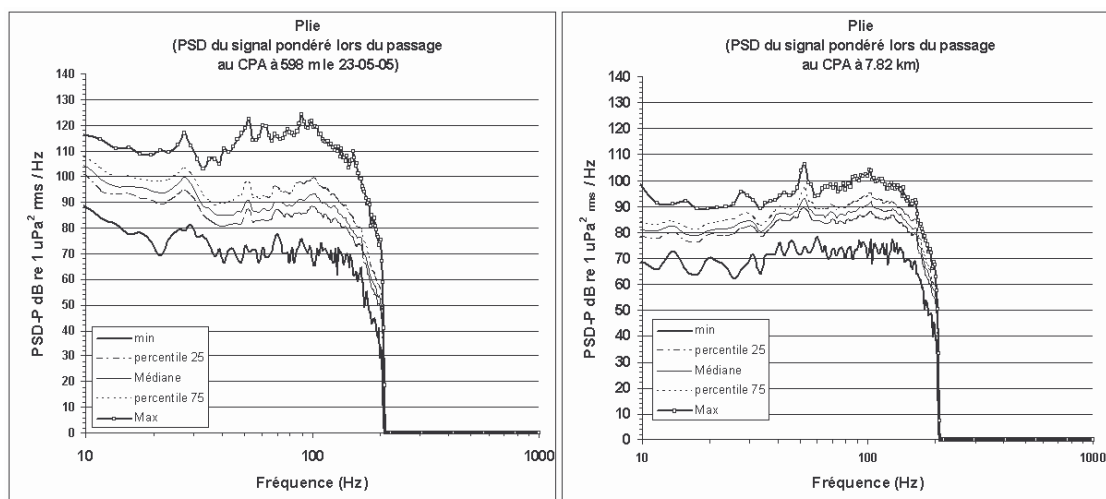


Figure 60 PSD pondéré pour la plie lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

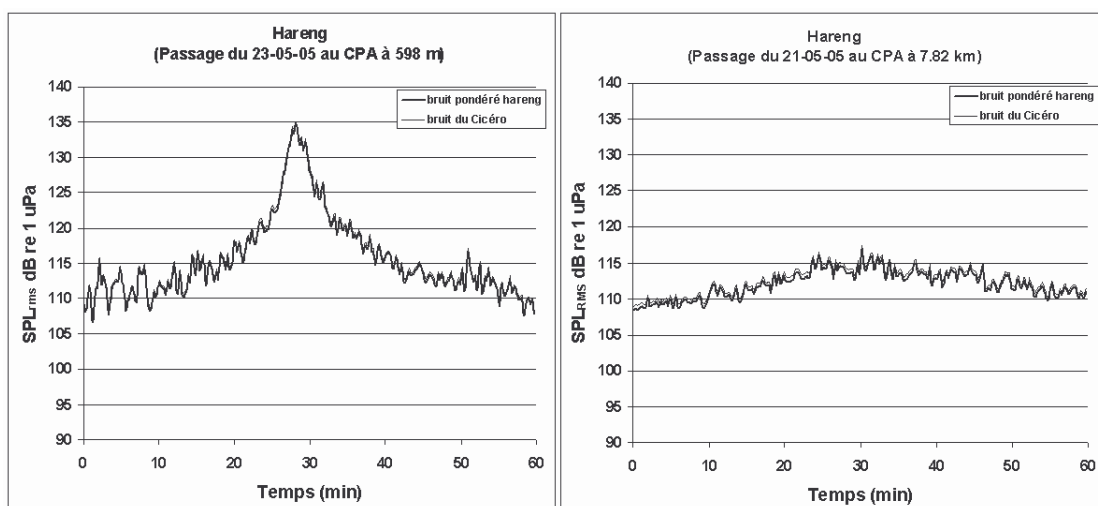


Figure 61 Niveau SPL pondéré pour le hareng lors des passages du Cicéro autour de leurs CPAs.

Le niveau SPL pondéré augmente jusqu'à 25 dB lors du passage du navire à 598 m et de quelque 5 dB lors du passage à 7.8 km. Dans la bande de fréquence 50 à 100 Hz, les augmentations maximales sont respectivement de 55 et de 25 dB lors des deux passages du navire (fig. 62).

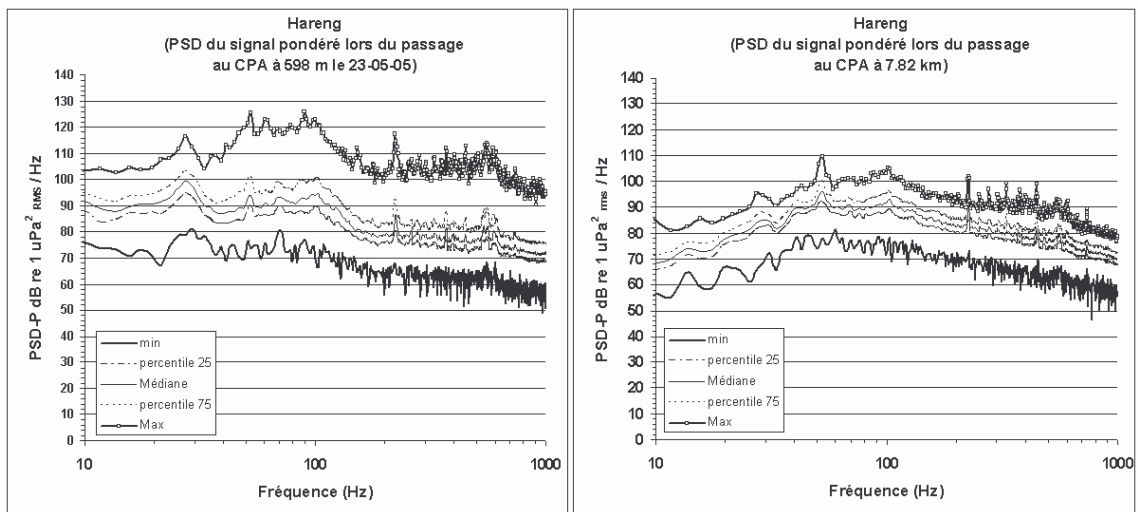


Figure 62 PSD pondéré pour le hareng lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

L'aiglefin ayant une sensibilité couvrant la bande de bruit maximum de navigation (fig. 64), les mesures sont semblables à celles obtenues pour le hareng (fig. 62). On ne retrouve pratiquement pas de différence entre le bruit du navire et celui pondéré pour l'aiglefin lors des deux passages du Cicéro (fig.63).

La courbe de pondération chez l'aiglefin montre que cette espèce est moins sensible au bruit de basse fréquence émis par le navire sauf dans la bande de 60 à 120 Hz correspondant au bruit de navigation.

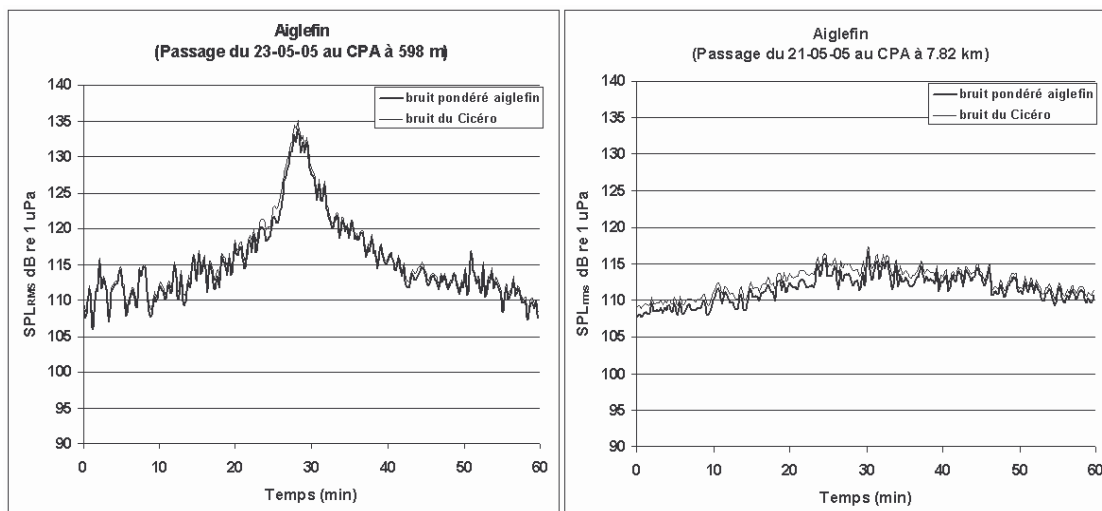


Figure 63 Niveau SPL pondéré pour l'aiglefin lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

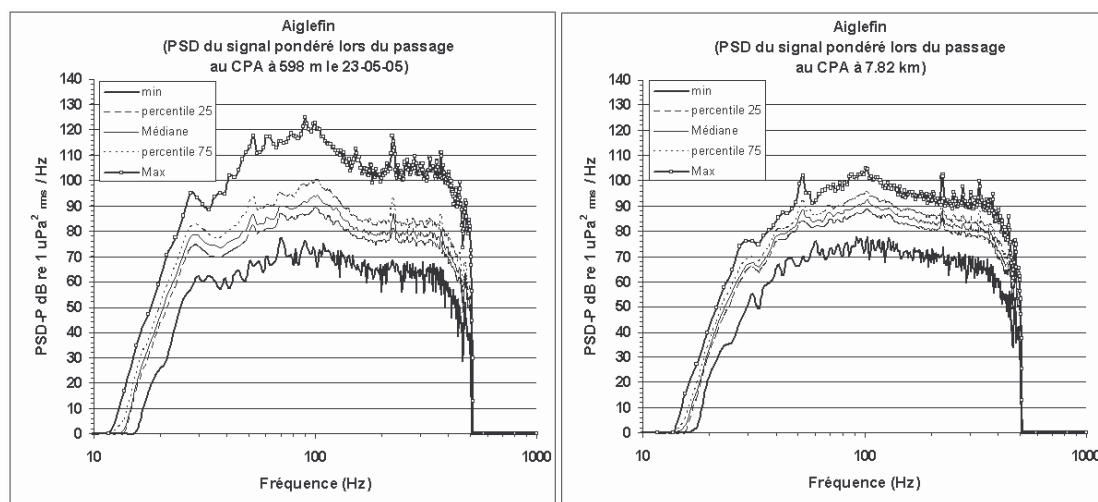


Figure 64 PSD pondéré pour l'aiglefin lors des passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

3.3.2 Bruit pondéré pour les mammifères marins

Des observations semblables pour les mammifères marins sont présentées aux figures 65 à 72. Pour le groupe des cétacés spécialisés aux basses fréquences, les plus sensibles au bruit de navigation, le niveau large bande augmente de 25 dB lors du passage à 598 m et d'environ 5 dB lors du passage à 7.8 km (fig. 65). Le changement maximal peut atteindre 54 et 28 dB respectivement pour les deux passages (fig. 66).

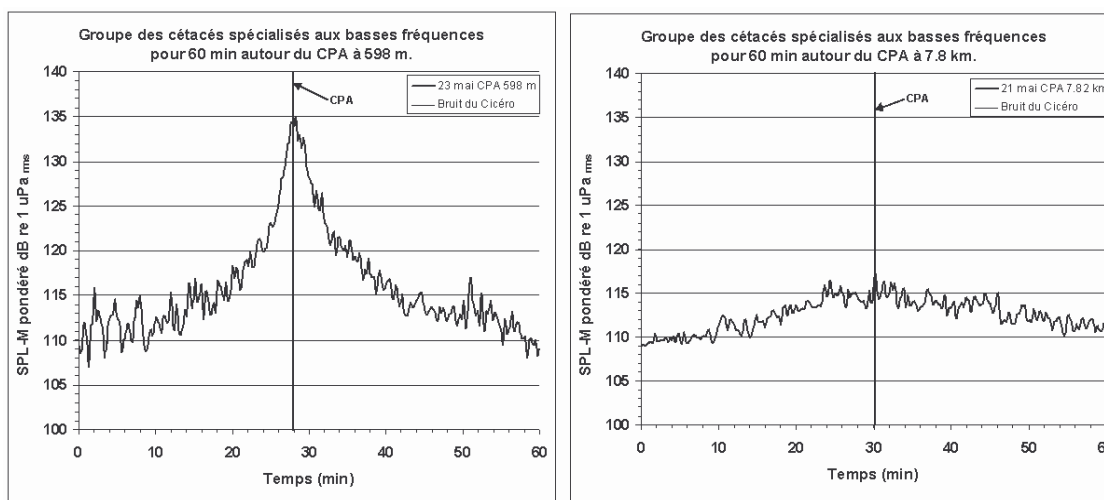


Figure 65 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des cétacés aux basses fréquences lors des deux passages du navire pour 60 min autour de leur CPA.

Lors des deux passages, il n'y a pas de différences significatives entre le niveau de bruit du Cicéro et le niveau du bruit pondéré pour les cétacés spécialisés en basses fréquences.

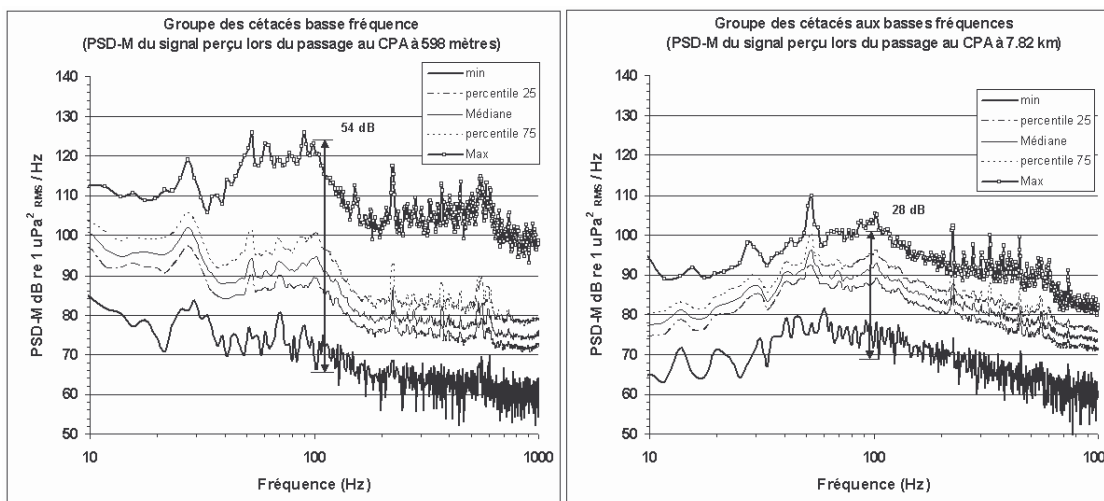


Figure 66 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux basses fréquences lors des deux passages du navire.

Le bruit pondéré pour les deux autres groupes de cétacés change aussi nettement lors des deux passages du navire, avec une amplitude moindre (fig. 67 et 69), suite à leur plus faible sensibilité au bruit de basse fréquence (fig. 68 et 70).

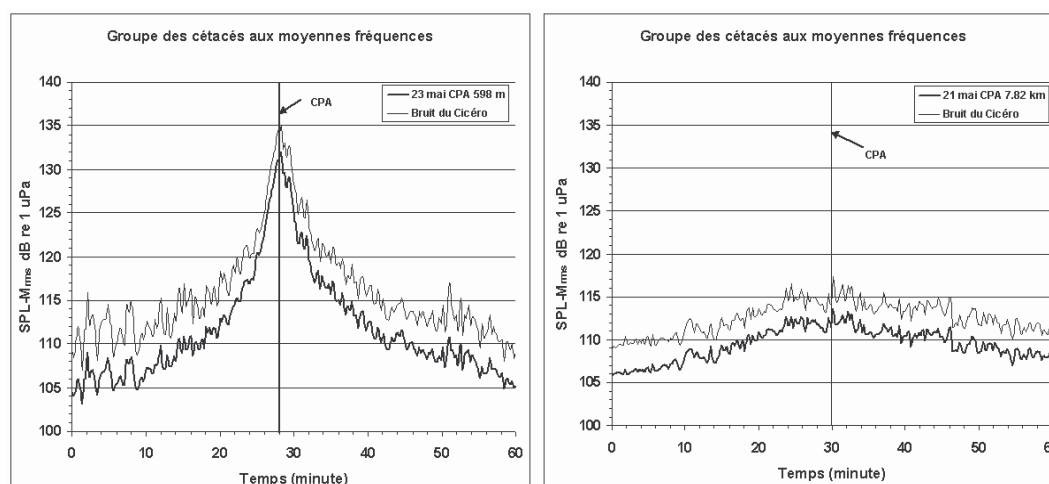


Figure 67 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des cétacés aux moyennes fréquences lors des passages du navire pour 60 min autour de leurs CPAs.

Pour les cétacés spécialisés aux hautes fréquences, la figure 70 montre que les niveaux de bruit pondérés sont faibles dans les basses fréquences.

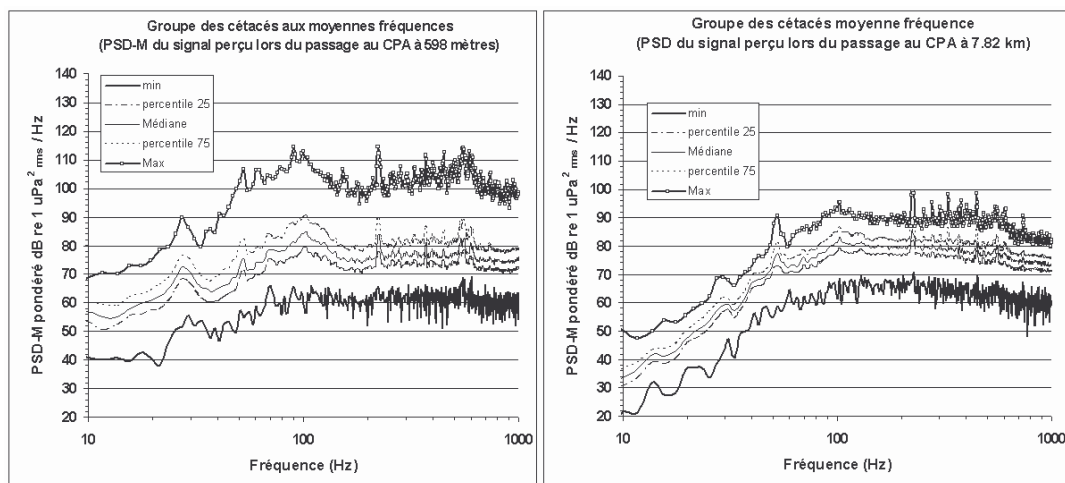


Figure 68 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux moyennes fréquences lors des deux passages du Cicéro.

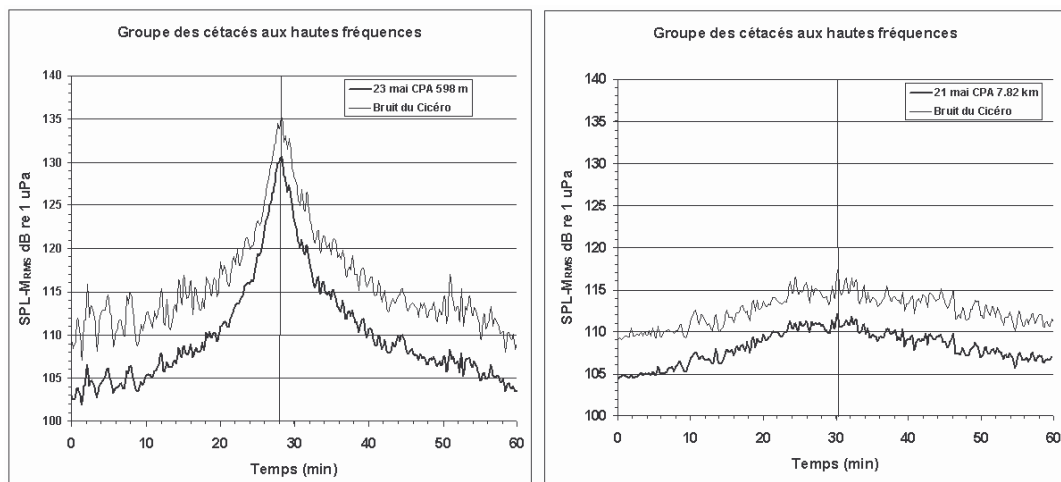


Figure 69 Niveau SPL-M pour le groupe des cétacés aux hautes fréquences lors des deux passages du Cicéro.

Les niveaux sont presque semblables à ceux reliés aux cétacés spécialisés aux moyennes fréquences.

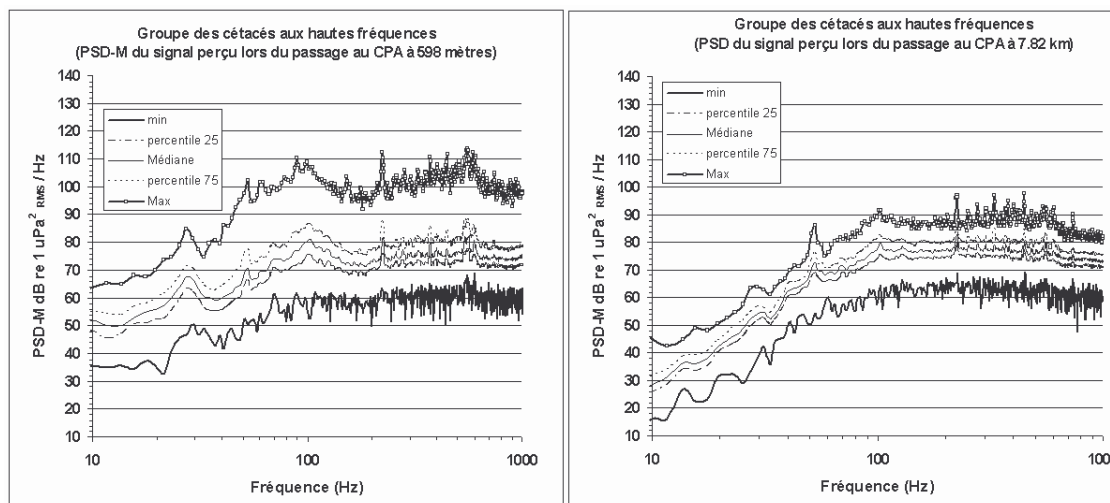


Figure 70 PSD-M pondéré pour le groupe des cétacés aux hautes fréquences lors des deux passages du navire.

Le groupe des pinnipèdes présente une réponse semblable au groupe des cétacés spécialisés aux basses fréquences, avec une sensibilité moindre aux infrasons.

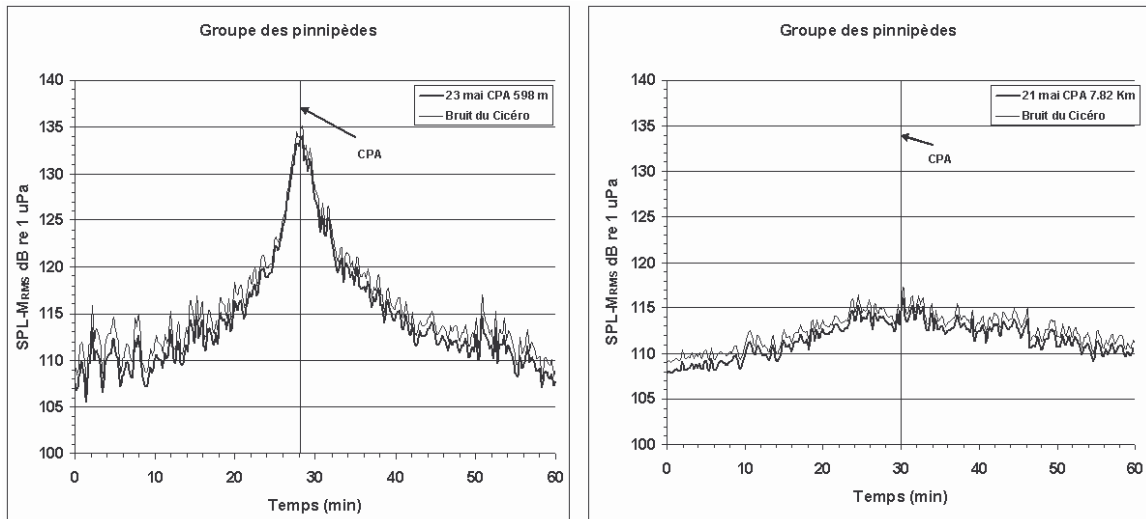


Figure 71 Niveau SPL-M pondéré pour le groupe des pinnipèdes lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

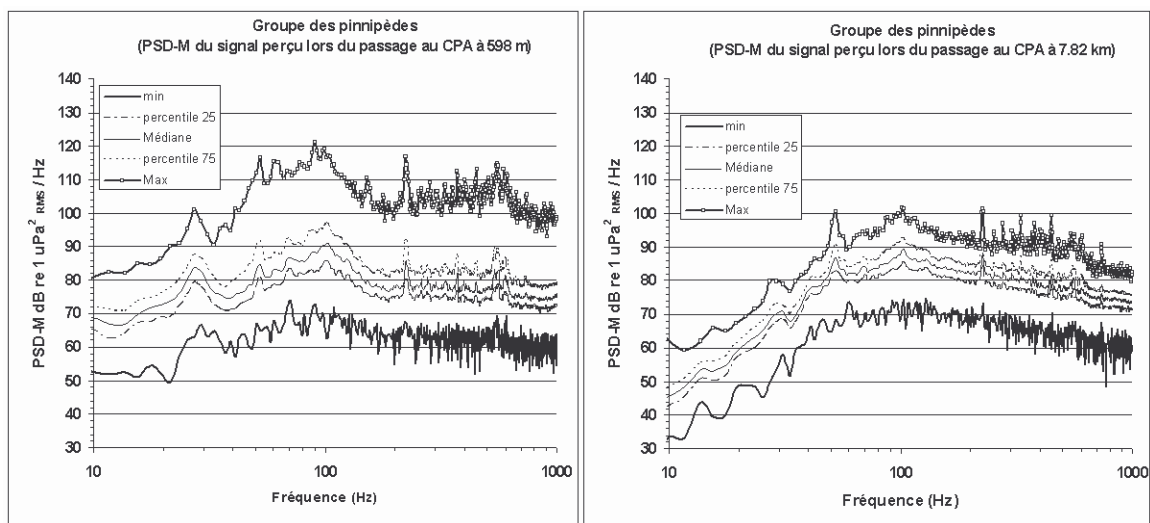


Figure 72 PSD-M pondéré pour le groupe des pinnipèdes lors des deux passages du Cicéro pour 60 min autour de leurs CPAs.

3.3.3 Simulation sur l'exposition sonore des animaux au passage d'un navire opportuniste.

Pour simuler l'exposition sonore des animaux au passage d'un navire opportuniste tel le Cicéro, nous avons modélisé le bruit pondéré maximum en fonction de la distance à la source, comme à la figure 56 et utilisé ce modèle pour prédire le niveau de bruit auquel sont exposés les poissons et les mammifères marins en fonction de la distance du navire. Nous avons ensuite estimé les niveaux SEL en fonction de la distance du navire et calculé le temps d'exposition nécessaire pour atteindre les niveaux causant des dommages physiques selon les critères du tableau 1 pour un bruit de type continu pour les cétacés et les pinnipèdes ainsi que pour le critère établi pour les poissons.

Le niveau sonore à 1 mètre du navire a été estimé comme précédemment (fig. 56) en utilisant les niveaux mesurés lors des deux passages du navire ainsi que les estimations des niveaux de bruit pondéré pour les animaux lors de ces passages. Le graphe des niveaux reçus lors des deux passages et la droite de régression est présenté à la figure 73.

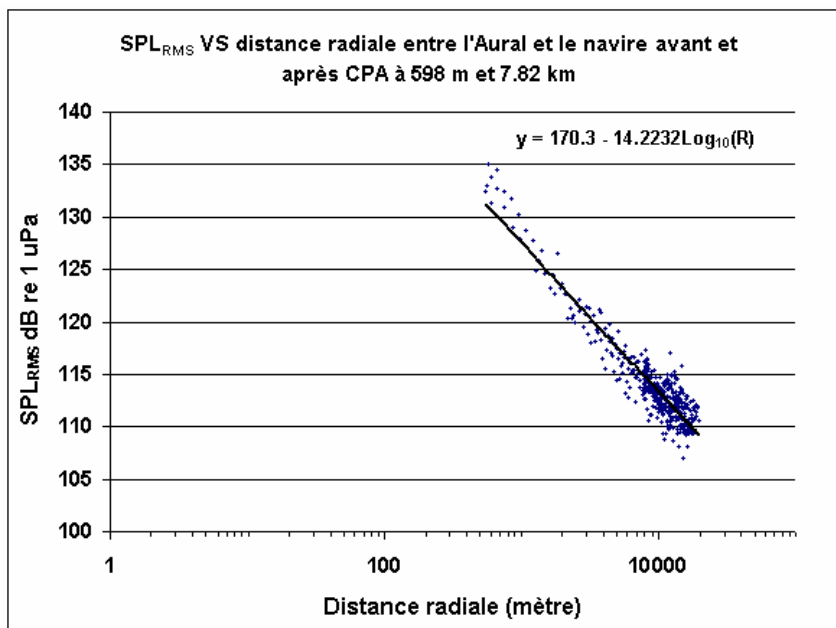


Figure 73 Niveau de bruit du Cicero SPL_{rms} [17.8 - 898 Hz] lors des deux passages avant et après les CPAs.

Nous avons utilisé la droite de tendance de la figure 73 dont l'équation est donnée par :

$$SPL_{rms} = 170.3 - 14.2232 \log_{10}(R) \quad (7)$$

Selon cette droite de tendance, le niveau sonore du navire serait estimé à environ 170 dB re $1\mu\text{Pa}_{rms}$ à 1 mètre. On doit prendre cette valeur comme une valeur moyenne correspondant aux deux passages autour des CPA à 598 m et 7.82 km.

Pour notre simulation, nous avons utilisé la médiane des niveaux SPL pondérés maximum pour l'ensemble des mammifères marins et des poissons. Les figures 74 et 75 présentent les quatre courbes ainsi que la médiane des

niveaux SPL-M du bruit pondéré pour l'ensemble des quatre mammifères marins. Une enveloppe de ± 3 dB autour de la médiane inclut tous les quatre groupes; le maximum correspondant aux cétacés spécialisés aux basses fréquences et aux pinnipèdes, le minimum aux deux autres groupes.

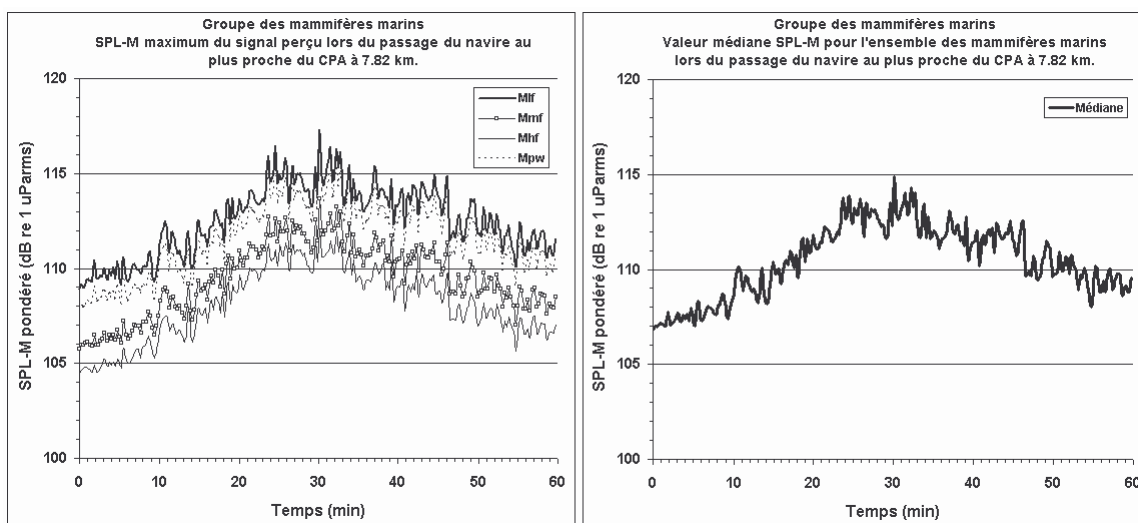


Figure 74 Niveaux SPL-M des quatre groupes de mammifères marins et médiane des quatre courbes du bruit pondéré lors du passage ayant un CPA à 7.82 km.

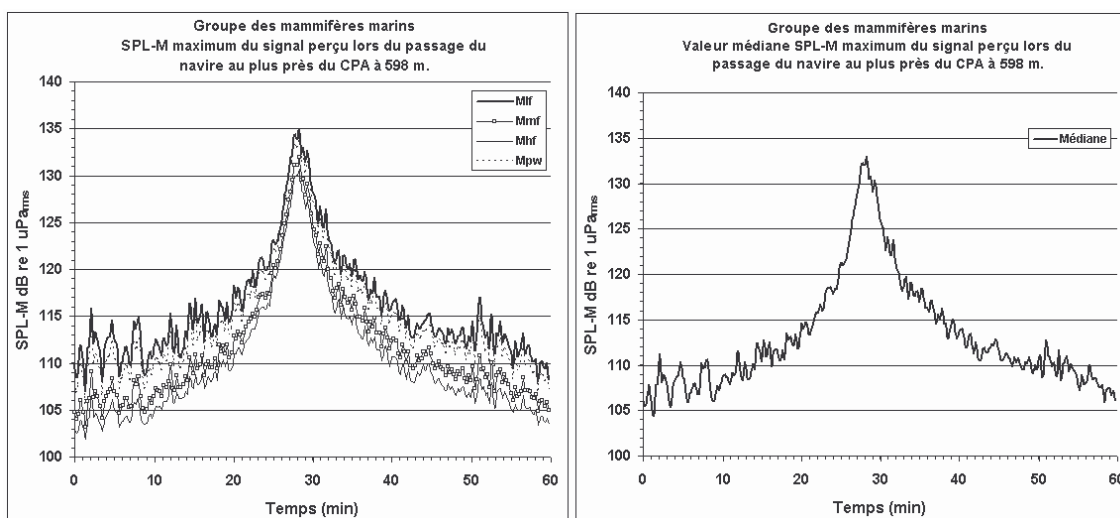


Figure 75 Niveaux SPL-M des quatre groupes de mammifères marins et médiane des quatre courbes du bruit pondéré lors du passage ayant un CPA à 598 m.

Le niveau maximum pondéré de bruit médian à 1 mètre du navire dans la bande de navigation sera d'environ 167.3 dB re $1\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pour un navire émettant un niveau de bruit d'environ 170 dB re $1\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à 1 mètre (fig. 76).

L'équation de la droite de tendance est donnée par l'équation 8.

$$SPL - M_{rms} = 167.3 - 14.08 \log_{10}(R) \quad (8)$$

où R est la distance en mètre. Cette équation mesure le niveau de bruit médian pondéré pour l'ensemble des mammifères marins.

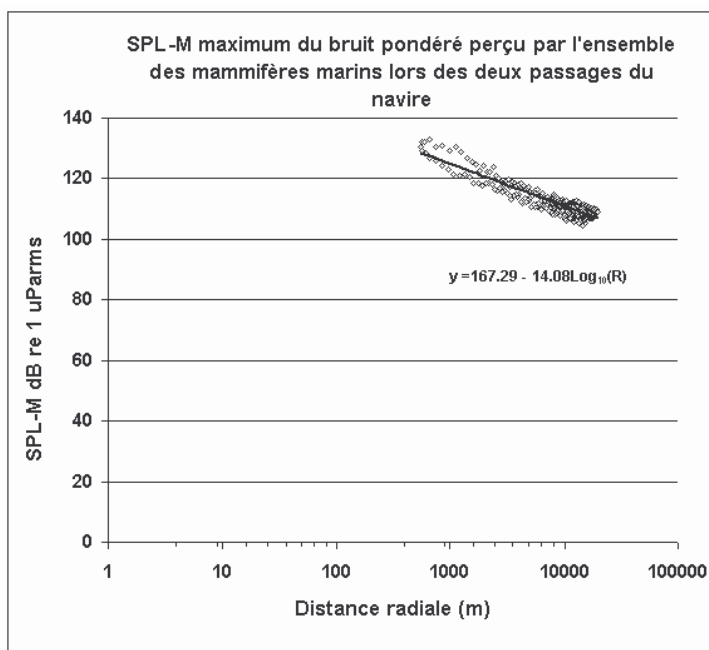


Figure 76 Niveau médian de bruit SPL-M_{rms} [17.8 - 898 Hz] pour les mammifères marins en fonction de la distance correspondant aux figures 74 et 75, 60 min autour du CPA lors des deux passages du Cicéro.

Avec cette équation, on produit un tableau qui donnera, selon la distance, le niveau d'exposition sonore selon diverses valeurs de temps. Au bas du

tableau, on retrouve la durée maximale d'exposition calculée selon la distance au navire avant d'atteindre le seuil critique de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{\text{rms}}$.

Le tableau 14 montre que le niveau de bruit large bande pondéré n'est pas suffisant pour endommager temporairement ou de manière permanente l'appareil auditif des trois groupes de cétacés, lors du passage d'un navire près des mammifères marins. Selon le niveau SEL, il apparaît que le système auditif des cétacés n'est pas affecté, même à court terme, par le passage proche d'un navire. Dans la zone démersale, à 285 mètres de profondeur, il semblerait que les cétacés ne subissent pas de dommage à l'oreille interne lors du passage d'un navire.

Cétacés	Valeurs SPL-M pondéré selon la courbe de tendance				
SPL=167.29 -14.08log ₁₀ (d)	159.83 dB	143.66 dB	131.00 dB	127.49 dB	111.32 dB
Temps(jours)/Distance(m)	10	100	285	1000	10000
0.041666667	188.78	174.70	168.30	160.62	142.64
1	202.59	188.51	182.10	174.43	156.45
7	211.04	196.96	190.55	182.88	164.90
30	217.36	203.28	196.87	189.20	171.22
150	224.35	210.27	203.86	196.19	178.21
Temps / 215 dB (année)	0.05	1.22	5.34	31.27	1964.23
Jours	17.44				

Tableau 14 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition avant d'atteindre le seuil de dommage selon la distance du navire pour les trois groupes de cétacés.

On retrouve des résultats différents chez les pinnipèdes. Ceux-ci peuvent être affectés par le bruit du navire à 10 mètre s'il s'y maintiennent pendant 26.4 h, ce qui est peu réaliste. Pour une distance de 100 m, il faudrait une exposition continue pendant un mois.

Pinnipèdes	Valeurs SPL-M pondéré selon la courbe de tendance				
SPL=167.29 -14.08log ₁₀ (d)	159.83 dB	143.66 dB	131.00 dB	127.49 dB	111.32 dB
Temps(jours)/Distance(m)	10	100	285	1000	10000
0.041666667	188.78	174.70	168.30	160.62	142.64
1	202.59	188.51	182.10	174.43	156.45
7	211.04	196.96	190.55	182.88	164.90
30	217.36	203.28	196.87	189.20	171.22
150	224.35	210.27	203.86	196.19	178.21
Temps / 203 dB (année)	0.00	0.08	0.34	1.97	123.93
Jours		28.15	123.00		
Heures	26.41				

Tableau 15 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition sonore avant d'atteindre le seuil de dommage selon la distance du navire pour le groupe des pinnipèdes.

Pour les poissons, Les figures 77 et 78 présentent les niveaux SPL pondérés maximum pour le groupe des poissons lors des deux passages du navire. Pour chacune des figures, on présente également la médiane du bruit pondéré pour l'ensemble des poissons. En analysant les figures 77 et 78, nous obtenons une moyenne de bruit pondéré de 131.76 dB re 1 μ Pa_{rms} à 598 mètres et de 114.91 dB re 1 μ Pa_{rms} à 7.8 km. En utilisant la médiane du bruit pondéré pour les deux passages du navire, nous avons produit un graphique (fig. 79) donnant le niveau de bruit pondéré selon la distance du navire.

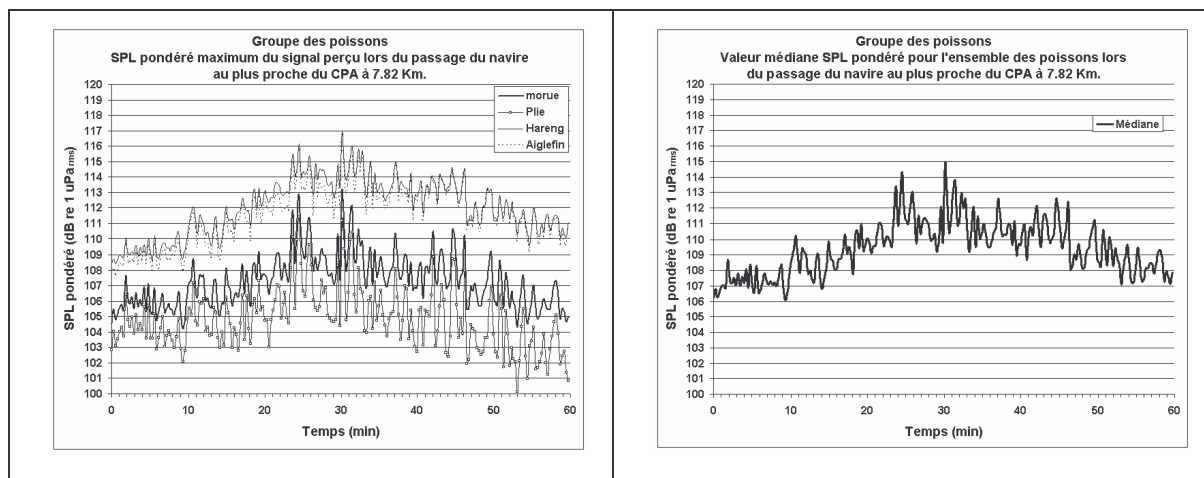


Figure 77 Niveaux SPL pondéré des quatre poissons et médiane des quatre courbes du bruit lors du passage ayant un CPA à 7.82 km.

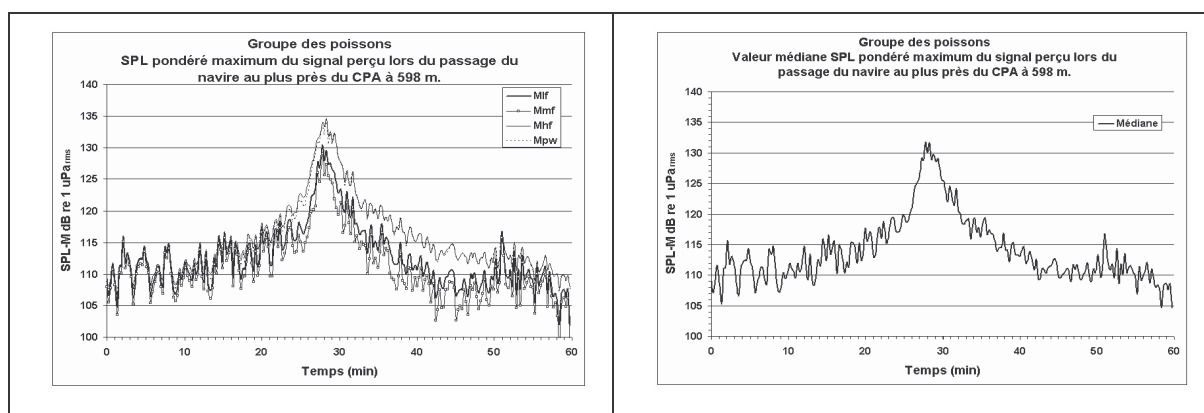


Figure 78 Niveaux SPL pondéré des quatre poissons et médiane des quatre courbes du bruit lors du passage ayant un CPA à 598 m.

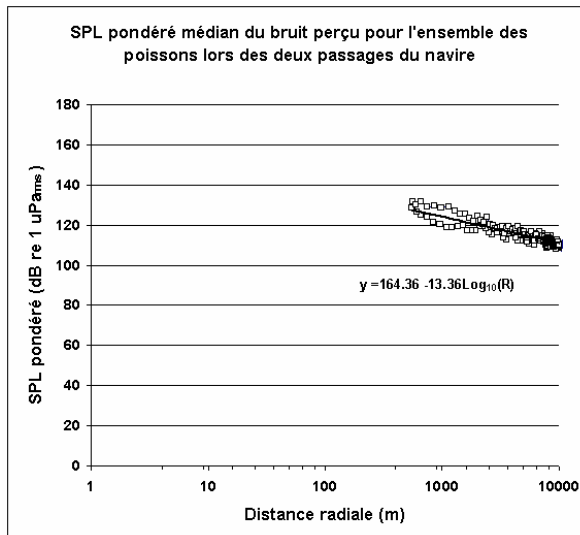


Figure 79 Niveau médian de bruit pondéré pour les poissons versus la distance du navire, 60 min autour du CPA lors des deux passages du Cicéro.

On utilise l'équation de la droite de tendance (équation 9) provenant de la figure 79 qui combine les deux trajets, soit

$$SPL - P_{rms} = 164.36 - 13.36 \log_{10}(R) \quad (9)$$

Cette équation permet d'estimer le niveau de bruit selon les distances apparaissant dans le tableau 16 pour un seuil critique SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{rms}$. En prenant le seuil de dommage SEL de 215 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}_{rms}$, tel qu'établi par Enger (1981) pour un niveau SPL de 180 dB re 1 μPa pour une exposition d'une heure, il faudrait qu'un poisson se maintienne à une distance de 10 m du navire en continu pendant 29 jours.

Poissons	Valeurs SPL pondéré selon la courbe de tendance				
SPL=164.36-13.36log ₁₀ (R)	151.00 dB	137.64 dB	131.56 dB	124.28 dB	110.92 dB
Temps(jours)/Distance(m)	10	100	285	1000	10000
0.041666667	186.56	173.20	167.13	159.84	146.48
1	200.37	187.01	180.93	173.65	160.29
7	208.82	195.46	189.38	182.10	168.74
30	215.14	201.78	195.70	188.42	175.06
150	222.13	208.77	202.69	195.41	182.05
Temps / 215 dB (année)	0.08	1.73	7.00	37.43	811.32
Jours	29.07				
Heures					

Tableau 16 Valeurs SEL en fonction du temps et de la distance du navire et durée maximale d'exposition sonore avant d'atteindre le seuil de dommage SEL de 215 dB selon la distance du navire pour le groupe des poissons.

On peut voir que le niveau de bruit dans la zone démersale n'endommagera pas l'appareil auditif des poissons, toujours en se référant au niveau SEL établi par Enger (1981).

Les poissons sont donc à l'abri de dommages auditifs tout comme les mammifères marins selon les critères utilisés. On présente, à la figure 80, le spectre entendu par la morue franche lors du passage du Cicéro ayant un CPA à 598 mètres. Nous avons utilisé le niveau de bruit excédant le seuil auditif.

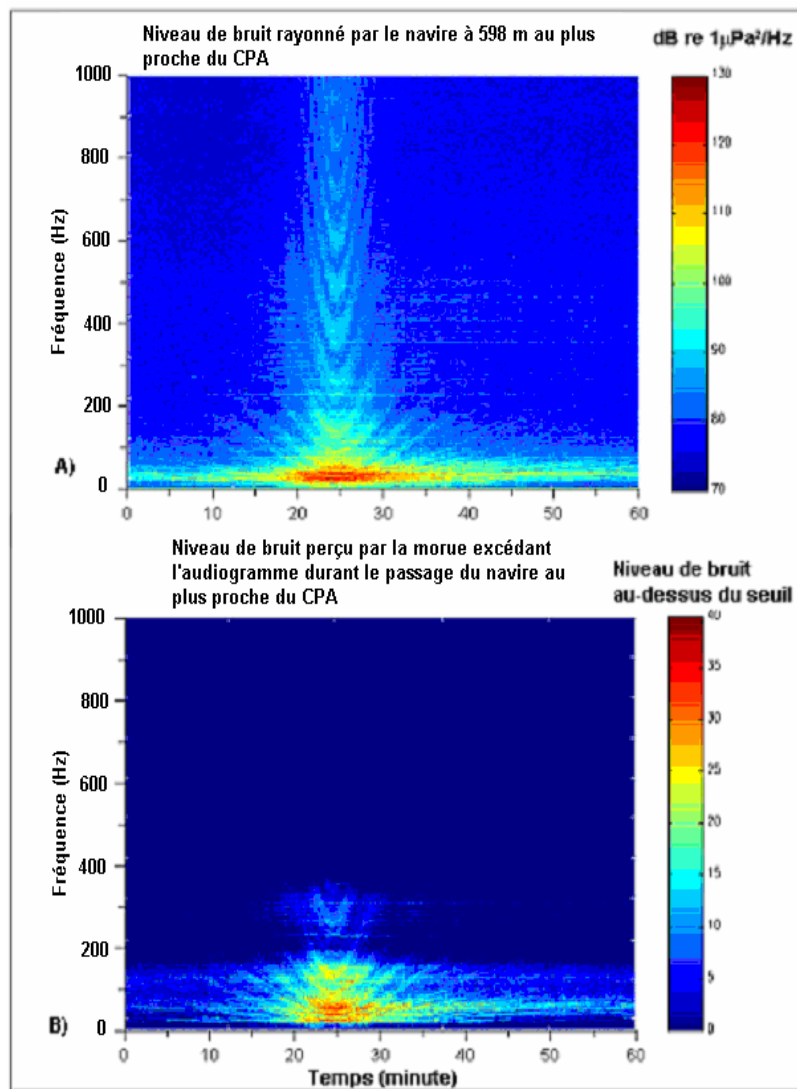


Figure 80 Spectre de bruit perçu par la morue franche lors du passage du Cicéro le 23 mai, dont le CPA était à 598 mètres (B) relativement au spectre de bruit total (A).

On remarque que le filtre auditif de la morue élimine les fréquences supérieures à 300 Hz, ce que l'on peut voir clairement sur le spectre ainsi que des raies plus prononcées provenant du bruit de l'arrière du navire.

Disposant de deux passages du même navire, il a été possible de générer un diagramme de directivité du bruit permettant de tracer les iso-niveaux SPL_{rms}

présentés à la figure 81 pour le navire marchand Cicéro. En extrapolant les droites de tendance, le niveau de bruit du navire à 1 mètre donne une valeur située entre 167 et 174 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ @ 1 mètre et, si nous incluons tous les points (avant et après CPA à 598 m et 7.82 km), nous obtenons un SL de 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ @ 1 mètre. Le navire rayonne un niveau de bruit >115 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ sur une distance de quelques 16 km dans l'axe proue-poupe et d'environ 14 km dans l'axe babord-tribord. On retrouve donc ce patron de bruit sous forme d'ellipse, qui se distingue par 3 dB du bruit moyen dans cet environnement et qui se déplace à une vitesse d'environ 15 nœuds. Ce niveau de bruit est aussi plus étendu par l'arrière ce qui est confirmé par la figure 80 qui présente des raies plus prononcées après le CPA.

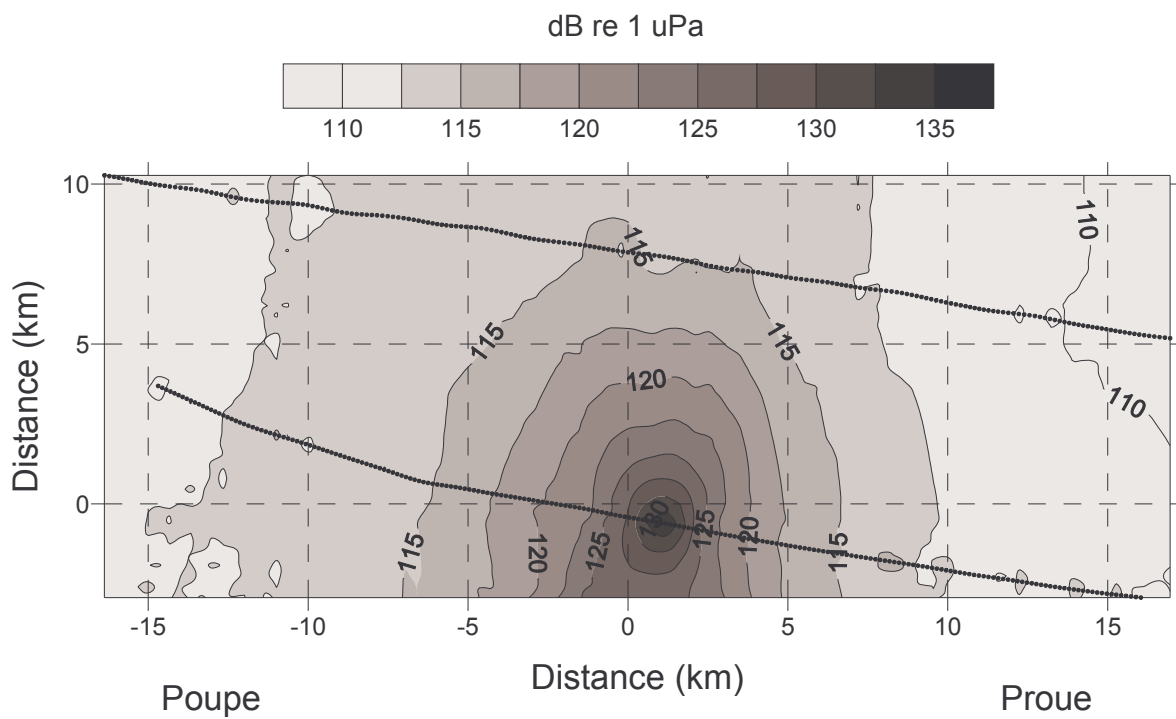


Figure 81 Patron de directivité du Cicéro obtenu à partir des données GPS et acoustiques lors des deux passages.

3.4 Calcul de corrélation du niveau de bruit océanique avec les vents et la marée.

Pour le calcul de corrélation du signal acoustique avec les vents et la marée, nous utilisons les séries temporelles des figures 82 et 83. Nous avons utilisé un programme codé en Matlab pour le calcul des coefficients de corrélation pour la période d'acquisition. Ces coefficients de corrélation servent à démontrer si la variabilité du signal acoustique est associée à celle de l'autre série, soit la série de la vitesse des vents ou de la série des marées. La série de vitesse des vents mesurés à la surface de l'eau par une bouée instrumentée s'étend sur 2.5 mois au lieu de 5 mois, ce qui pourrait affaiblir la validation des résultats de corrélation. On obtient malgré tout des résultats intéressants.

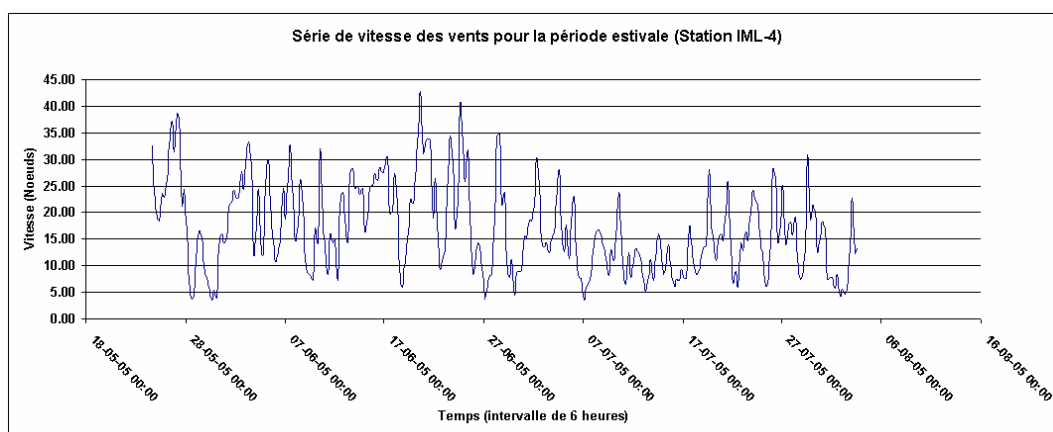


Figure 82 Vitesse moyenne des vents par période de 6 heures pour une durée de 2.5 mois. (Station IML4, Matane, Pêches et Océan Canada)

La série représentée par la figure 82 a été analysée par FFT pour identifier les périodes récurrentes dans la série et leur importance.

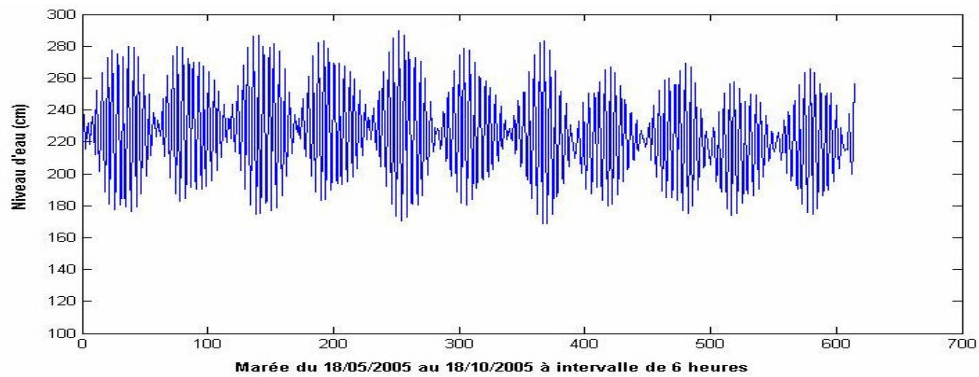


Figure 83-Signal de marée du 18/05/2005 au 18/10/2005 à intervalle de 1 heures près de Matane (réf. Pêches et Océan Canada).

Nous avons utilisé la même procédure avec la série représentée à la figure 83 représentant les cycles de marées pour la période estivale.

À la figure 84, nous présentons le périodogramme de la série SPL_{rms} à intervalle de 6 heures. On remarque plusieurs pics dont un à plus forte intensité dont la période est de 4.7 jours ainsi que trois autres pics relativement élevés aux périodes de .6 jours (14 heures) environ, un autre dont la période est de 2.8 jours et un autre de période 6.5 jours. On retrouve aussi quelques pics plus faibles à 8.9 jours et un autre à 17.8 jours.

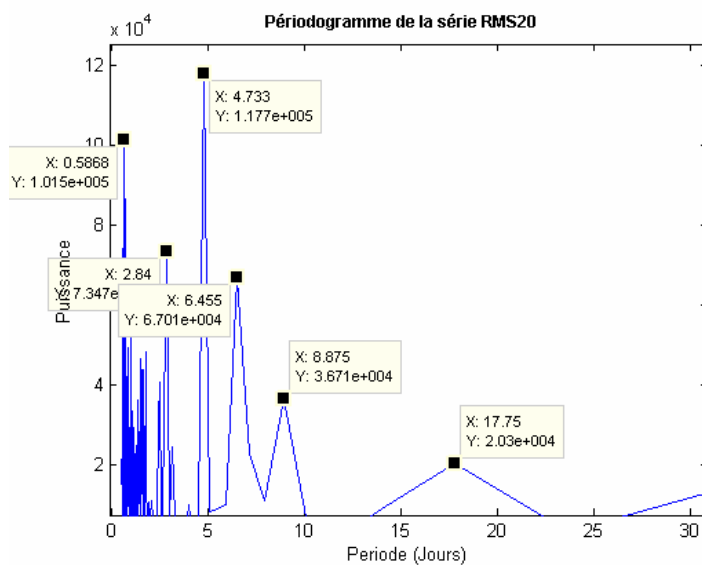


Figure 84 Périodogramme de la série SPL_{rms} représentée par les bandes de 5 minutes à intervalle de 6 heures.

Pour le vent (fig. 85) les périodes sont de 3.6 jours, 6.4 jours, 8.9 jours et enfin, pour un pic plus faible à 17.8 jours. Pour la série de marée (fig. 86), on retrouve un pic très intense à 3.1 jours et deux autres plus faibles à 6 jours et 6.4 jours. Les périodes sont résumées dans le tableau 17.

SPLrms	Vent	Marée
14 h		
2.8 j		
	3.6 j	3.1 j
4.7 j		
		6 j
6.5 j	6.5 j	6.5 j
8.9 j	8.9 j	
17.8 j	17.8 j	

Tableau 17 Périodes à plus forte variance identifiées dans les séries.

Un cycle de 6.5 j est commun aux séries SPL_{rms} et de marée. Il est donc possible qu'une composante des fluctuations du bruit soit reliée aux composantes de marées de basse fréquence. La série SPL_{rms} partage 3 périodes de fluctuation avec le vent, il est donc possible que les fluctuations à moyen terme dans la série de bruit soient en partie due au vent.

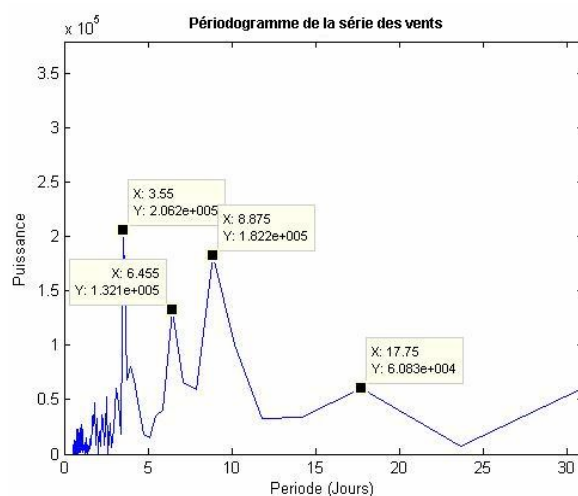


Figure 85 Périodogramme de la série des données du vent mesurées à la station IML4.

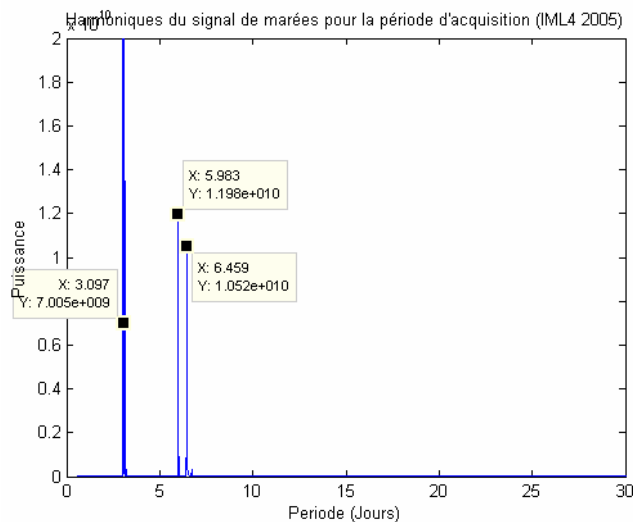


Figure 86 Périodogramme de la série des données de marée aux 6 heures.

Un calcul a été fait sur le pourcentage de la variance du bruit océanique associé avec la série de la vitesse des vents en fonction des bandes de fréquences en tiers d'octave et nous avons obtenu la courbe présentée à la figure 87. On peut voir que la corrélation, sans retard, explique un pourcentage de variance très faible ($< 1\%$) et qui diffère d'une bande à l'autre. On observe une corrélation R^2 de 0.7% entre le vent et la série acoustique pour les bandes situées entre 12.5 et 40 Hz et une corrélation moyenne (0.25%) entre 350 et 800 Hz. Pour les bandes de fréquences plus basses que 40 Hz, il est possible que la corrélation liée au vent provoque un bruit de basse fréquence associé aux vagues et à la houle.

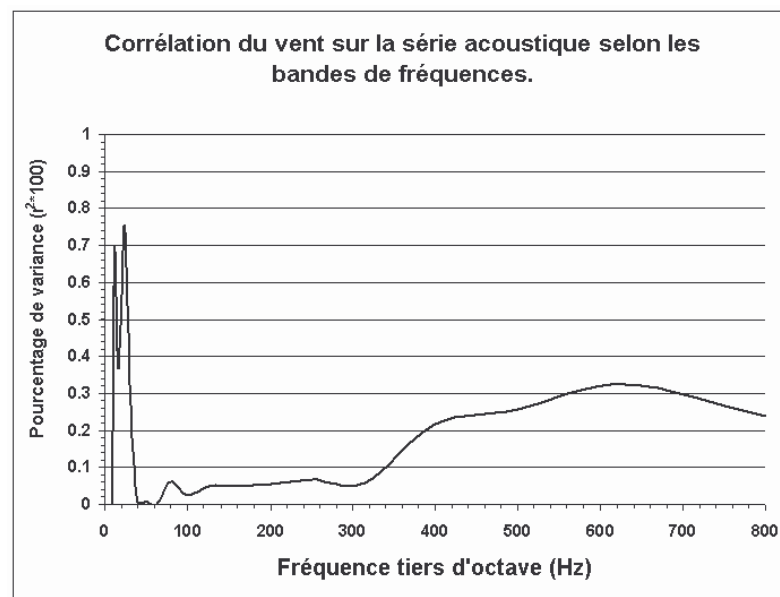


Figure 87 Courbe de corrélation du vent avec les niveaux SPL_{rms} par tiers d'octave pour la série acoustique de 5 mois.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1 Niveau de bruit océanique durant la saison estivale.

La médiane du niveau de bruit large bande [17.8 – 898 Hz] enregistré durant la période estivale dans le chenal, à 285 mètres de profondeur, à l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent a été évaluée à 112 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$, le bruit variant de $\pm \sim 20$ dB autour de cette valeur. Le bruit est stable car nous n'avons relevé aucune tendance positive ou négative du niveau médian ou de la variance du bruit durant cette période. La droite de tendance sur toute la période de 5 mois, ne présentait qu'une pente d'à peine 1 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ pour toute la période d'acquisition, qui n'était pas significativement différente de zéro ($R^2 = 0.0007$).

Donc, de mai à octobre, le bruit large bande [17.8-898 Hz] dans la région est stable à un niveau relativement élevé, qui excède souvent 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$, soit 14% du temps. Le niveau minimal était de 92.1 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Le niveau du 5^e percentile était de 100.3 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ et celui du 95^{ième} percentile était de 126.6 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$. Donc, 90% du temps, le niveau de bruit dans la région était compris entre ces deux valeurs.

Le spectre de ce bruit montre clairement qu'il est dû à la navigation dans la voie maritime du Saint-Laurent, avec un maximum dans la bande de 10 à 120 Hz correspondant au bruit de propulsion des navires (Wenz 1962). Le fait qu'il soit stable pendant les 5 mois d'observations tend à supporter le fait que la contribution principale provient du trafic marchand et non des petits chalutiers opérant dans la région. L'effort de pêche de ces derniers est maximal en mai et juin et décroît par la suite (données Pêches et Océan Canada). Aucune tendance de ce type n'a été observée dans les niveaux de bruit.

Une certaine contribution du vent a été relevée dans la série acoustique large bande. La corrélation directe (sans retard) donnait cependant une valeur très faible (0.65% de la variance était corrélée avec la vitesse du vent) et identifiait les infrasons et les fréquences supérieures à 300 Hz. La pente des spectres décroît linéairement après 120 Hz d'environ 10 dB par décade, cependant on constate une légère élévation dans la bande 200-800 Hz. Une contribution du vent en est peut-être responsable en partie, mais la présence d'importantes raies spectrales des navires dans cette bande, domine vraisemblablement. La courbe de corrélation aux fréquences > 300 Hz confirme l'importance du vent sur le bruit dans cette bande identifiée par Wenz (1962).

La médiane des spectres du bruit mesuré correspond au niveau de référence de Wenz (1962) pour un trafic maritime très élevé (c.f. fig. 34). Des travaux réalisés à la tête du Chenal Laurentien, à ~ 30 km plus en amont dans

l'estuaire montrent également cette caractéristique du bruit dans la voie maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2006a). Donc, comme dans cette étude, le bruit à l'embouchure de l'estuaire en été excède le bruit de référence pour un trafic maritime élevé 50% du temps. Le 3^e quartile de la distribution excède ce niveau de référence de 10 dB et les valeurs maximales l'excèdent de 25 à 35 dB. On observe des pics prononcés aux fréquences supérieures à 100 Hz correspondant aux raies spectrales des navires circulant dans le Chenal Laurentien.

La comparaison du niveau de bruit de la série de 5 mois avec l'enveloppe des niveaux de bruit mesurés dans l'Atlantique à l'extérieure du Golfe du Saint-Laurent par Desharnais and Collison (fig 88), montre qu'environ 70% du temps, le niveau de bruit enregistré dans le Chenal Laurentien est concordant avec cette enveloppe de bruit. Nous obtenons également une bonne concordance sur la pente de diminution du bruit aux fréquences supérieures à 120 Hz; celle-ci étant d'environ 10 dB par décade.

Nous avons également noté, lors de la décomposition par FFT de la série de bruit large bande de 5 mois, un pic distinctif correspondant à une période de 4.7 jours approximativement. Cela signifie qu'à ce cycle, nous avons un maximum ou creux d'intensité du bruit dans le Chenal Laurentien qui ne coïncidait pas avec un pic correspondant dans les séries de vent ou de marée. Comme cela ne correspond à aucun cycle associé aux vents et à la marée, c'est

peut-être lié au rythme hebdomadaire de l'agenda de travail d'une partie de la flotte échantillonnée, telle la flottille de pêche ou de transport régional.

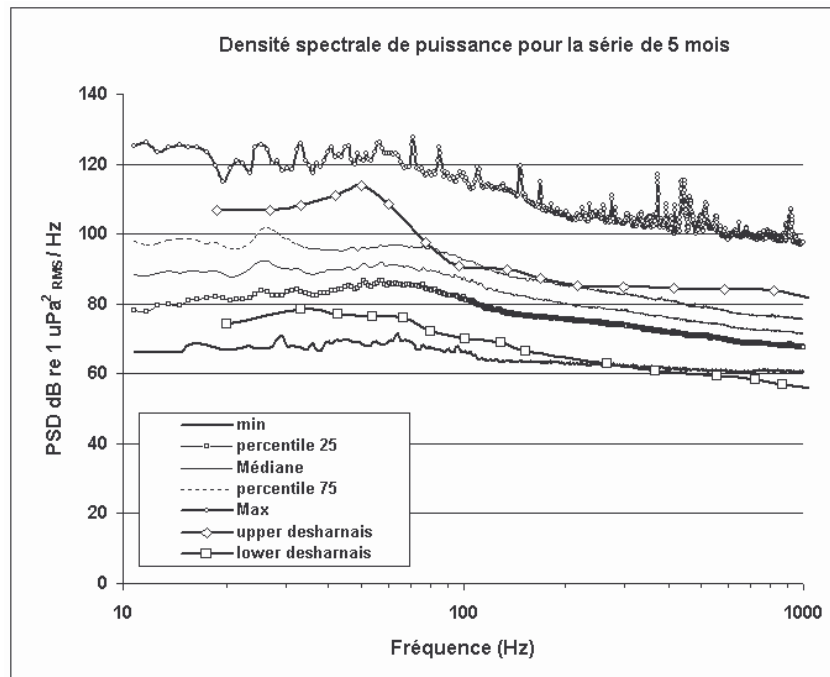


Figure 88 Comparaison des distributions des densités spectrales de puissance par bande de 1 Hz pour la période estivale avec l'enveloppe des valeurs comparables mesurées dans l'Atlantique à l'extérieur du Golfe du Saint-Laurent par Desharnais and Collison (2001, planche 14) (enveloppe sortie de carrés blanc). À l'intérieur de l'enveloppe de Desharnais et Collison, les courbes tracées sont représentatives des percentiles 0 (min), 25, 50 (médiane), 75 et 100 (max).

Un cycle d'environ 6.5 j était présent dans le niveau de bruit et la série de marée et de vent. L'interprétation de cette interaction avec les composantes de longue période de la marée ou de vent n'est pas claire et nécessiterait une analyse plus détaillée des habitudes hebdomadaires de la navigation locale pour en vérifier la véracité.

4.2 Niveau de bruit détecté par les mammifères marins et les poissons.

La réponse acoustique des animaux au bruit mesuré dans la bande 0-1 kHz, dépend du spectre de ce bruit et de la sensibilité respective des divers groupes et espèces considérés. Étant donné que le bruit est dominé par celui de la navigation, situé entre 10 et 120 Hz, les groupes dont la sensibilité auditive est significative dans cette bande, tels les grands cétacés spécialisés dans les basses fréquences, comme le rorqual bleu et le rorqual commun, les pinnipèdes, ainsi que les poissons, dont notamment le hareng, sont ceux pour lesquels les niveaux de bruit pondéré sont les plus élevés. Les autres groupes de cétacés spécialisés dans les moyennes et hautes fréquences, n'ont qu'une légère diminution du niveau de bruit de 8 à 12 dB seulement lorsqu'on applique la pondération de type M qui leur a été associée par Southall et al. (2007).

Les différences marquées de niveau entre les deux groupes d'animaux sont dues à la diversité de largeur de bande de leur sensibilité au bruit, celle des poissons étant beaucoup plus étroite. L'exposition sonore, pendant 5 mois, au niveau de bruit médian indique, qu'en moyenne, les poissons atteindraient des niveaux SEL de 181 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ alors que les mammifères marins atteindraient des SEL de 182 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$. Les valeurs SEL minimales atteintes après 5 mois (i.e. pour des organismes fuyant le bruit) seraient, en

moyenne, de 159 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ pour les poissons et de 161 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ pour les mammifères.

Ces niveaux établis dans cette étude pourraient servir de référence pour des études comparables pour d'autres milieux océaniques.

Southall et al. (2007) proposent un SEL de 215 dB-M re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ comme niveau pouvant occasionner des dommages physiques (e.g. surdité permanente) à l'oreille interne des cétacés et 203 dB-M re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{-s}$ pour les pinnipèdes. Sur la base du bruit médian, correspondant aux conditions d'exposition qui sont les plus vraisemblables, il faudrait plus de 635 ans pour atteindre ces niveaux pour les cétacés et plus de 52 ans pour les pinnipèdes. Même en considérant les niveaux de bruit maximaux enregistrés, tels ceux d'un animal invraisemblable suivant perpétuellement un navire à quelques km, il faudrait plus de 2.6 ans pour les cétacés et 0.2 ans pour les pinnipèdes pour accumuler ce niveau SEL d'exposition. Il paraît douteux que des animaux ayant ce comportement aberrant n'en soient affectés auditivement qu'après un tel laps de temps. Des travaux de recherches supplémentaires sont requis pour revoir les hypothèses et des approximations ayant conduit à ce niveau SEL de référence pour les bruits continus, sans quoi ce niveau de référence n'aura aucune utilité pour la gestion éventuelle du bruit.

Pour les poissons, il n'y a pas de tels niveaux SEL de référence proposés présentement dans la littérature à notre connaissance. Par conséquent, il n'est

pas possible de faire les mêmes estimations. Par contre, un niveau SPL de 120 dB re 1 μ Pa a déjà été proposé comme niveau de bruit continu pouvant affecter la faune marine (c.f. Richardson et al. 1995) mais rien n'est dit sur la durée d'exposition à ce niveau de bruit avant un dommage auditif quelconque.

Le niveau SEL chez les poissons a été calculé d'après une étude effectuée par Enger (1981). Selon ce niveau de référence, nous avons estimé, en considérant le bruit médian de la période, qu'il faudrait entre 700 ans et 2400 ans respectivement pour l'aiglefin et la plie pour atteindre cette valeur de SEL. Sur la base de ce niveau SEL de référence, purement hypothétique et supporté par seulement un article, il n'y aurait pas d'effet notable du bruit de la navigation à l'appareil auditif des poissons dans la région.

La présente étude permet d'établir le niveau de bruit de référence à l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent à l'été 2005. Ce niveau pourra être réévalué dans une décennie pour estimer la tendance à la croissance du bruit. Si le Chenal Laurentien était assujetti à une augmentation du bruit anthropique de 5 dB par décennie (Ross, 2005; Urick, 1981; Mcdonald et al. 2006), cela prendrait environ 60 ans à partir de l'année 2005 avant d'atteindre un niveau médian de bruit pondéré pour les animaux approchant 135 dB re 1 μ Pa_{rms} qui mettrait en péril leur appareil auditif dans l'estuaire du Saint-Laurent à ce niveau. Selon les tableaux 11 et 13, cela prendrait environ .22 à 6 ans avant que les animaux ne soient affectés irrémédiablement par ce niveau de bruit. S'il y a une

augmentation du niveau de bruit océanique, les mammifères qui seront les plus touchés seront le groupe des pinnipèdes et des cétacés à pondération basse fréquences, soit les mysticètes.

4.3 Niveau de bruit détecté par les mammifères marins et les poissons à proximité d'un navire marchand type.

Les données GPS de positionnement de la source opportuniste ont permis de mesurer la distance réelle entre le navire et l'Aural et d'estimer ce que pourrait entendre un poisson ou un mammifère marin circulant dans les environs ou dans la zone démersale à 285 mètres de profondeur.

Le niveau de bruit à la source (SL) du Cicéro a été estimé à environ 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à 1 mètre (fig. 73), ce qui est de l'ordre de grandeur du bruit d'un navire de ce tonnage (NRC 2003). Le niveau de bruit large bande pondéré selon une pondération de type M moyennée pour les mammifères marins a été estimé à environ 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à une distance de 1 mètre du navire tandis que chez les poissons, le niveau de bruit pondéré selon un audiogramme moyen a été estimé également à environ 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à 1 mètre du navire. Selon les seuils critiques associés aux poissons, il appert qu'un poisson moyen dans la zone démersale ne souffrira d'aucun dommage physique de son appareil auditif lors du passage d'un navire en surface.

Lors du passage d'un navire à 598 mètres à environ 18 nœuds, le niveau de bruit excédant 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ à 285 m de profondeur se produit durant environ 13 minutes et plus longtemps si la vitesse de croisière du navire est

moins élevée. Le bruit d'un navire est consistant d'un passage à l'autre. Les navires s'éloignant sont plus bruyants plus longtemps que lorsqu'ils arrivent. Autour d'un navire typique (le Cicéro), le bruit excède 120 dB dans un rayon d'environ 2.4 km avant CPA et 4 km après CPA. On retrouve donc un patron de bruit rayonné >120 dB d'environ 6 km de diamètre autour du navire. Si nous prenons la mesure de bruit médian de 112 dB enregistré dans le Chenal Laurentien, le champ de bruit que le navire émet a alors un rayon de 10 km, formant un nuage de bruit de 20 km de diamètre, nettement distinguable du bruit moyen présent (i.e. bruit ambiant, voir introduction). Comme l'histogramme de la mesure de bruit durant la période estivale donne une médiane de 112 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$, alors 50% du temps dans la région d'étude, on retrouve un navire transitant dans un rayon de 20 km.

Le niveau SPL_{rms} des vocalises de baleines enregistrées dans le Chenal laurentien varie de 80 dB à environ 110 dB re 1 μPa dans la bande de fréquences 15-25 Hz selon des mesures prises par Simard et al, 2006a. Pour le groupe de cétacés spécialisé dans les basses fréquences, le bruit rayonné par un navire ne serait pas suffisant pour couvrir les vocalises de manière à devenir inaudible.

L'effet du bruit sur le masquage des vocalises des cétacés spécialisés dans les basses fréquences a été traité par Simard et al. (2006b, 2008a,b).

Finalement, selon la droite de tendance du niveau de bruit en fonction de la distance (fig. 73), on retrouve une perte par transmission qui s'apparente plus à une combinaison des modes de propagation sphérique et cylindrique. On peut se servir de ces droites pour modéliser le bruit dans une région en fonction de la densité et la répartition d'une flotte dans le Chenal Laurentien. Ces observations à haute résolution au passage d'un navire type font ressortir que les niveaux de bruit excédant 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}_{\text{rms}}$ observés dans la série de bruit sur 5 mois (figure 29) correspondent en grande partie à des navires marchands situés dans un rayon d'environ 3 à 4 km (fig. 56) de l'Aural. Ce sont également ces passages de navires près de l'Aural qui sont responsables des niveaux de bruit excédant les niveaux publiés pour les régions de navigation intense (Courbes de Wenz, fig. 1).

En conclusion, cette étude a permis d'établir les niveaux rayonnés par les navires et pondérés selon la sensibilité des types de mammifères marins et des poissons, leurs histogrammes, à l'échelle de l'été ainsi que celle d'une heure autour d'un navire type. Le bruit est dominé par la navigation de la voie maritime du Saint-Laurent et celui-ci est plus élevé que les niveaux de Wenz pour un trafic élevé. Malgré ces niveaux élevés, les temps requis pour atteindre les valeurs critiques d'exposition de Southall et al. (2007) pour les mammifères marins sont tous très longs, ce qui remet en question les valeurs critiques proposées pour créer des dommages physiques permanents à l'oreille interne pour un bruit de nature continue.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amoser S., Ladish F., 2005. **Are Hearing sensitivities of freshwater fish adapted to the ambient noise in their habitat?** J. Exp. Biol. 208, 3533-3542.
- André M., 2005. **Présentation sur les progrès de l'acoustique passive dans l'étude du bruit affectant les mammifères marins.** Laboratoire d'Applications Bioacoustiques, Université Polytechnique de Catalogne, ENSIETA, BREST2005, <http://www.ensieta.fr/e3i2/images/E3I2/seminaires/LAB.pdf>.
- André M., Terada M., Watanabe Y., 1997. **Sperm whale (*Physeter macrocephalus*) behavioural response after the playback of artificial sounds.** IWC, Rep.Int.Whal.Comm. SC/48/NA13. 47:499-504.
- André M., Kamminga C. and Ketten D. 1997. **Are low frequency sounds a marine hearing hazard: a case study in the Canary Islands.** Proc. I.O.A. 19 (9):77-84.
- Andrew R.K, Howe B.M. and Mercer J.A., 2002. **Ocean ambient sound: Comparing de 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast.** J. Acoust. Soc. Am. Volume 3, Issue 2: 65-70
- Anonymous, 2000. **Etude socioéconomique d'un secteur retenu pour l'identification d'une zone de protection marine pilote: Estuaire du Saint-Laurent.** Tecsalt Environment Inc. Rapport final. Pêche et Océans Canada, Région Laurentienne.

- Arveson P.T., Vendittis D.J., 2000. **Radiated noise characteristics of a modern cargo ship**. J. Acoust. Soc. Am. 107: 118-129.
- Collier, A.J., 1973. **The effect of ice cover on shallow water ambient noise**, J. Acoust. Soc. Am. 53, p.353.
- Collin S.P. and Marshall N.J., 2003. **Sensory processing in aquatic environment**. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 3-38.
- C. Couvreur. Octave, 1997. **Matlab toolbox**, available at MathWorks File Exchange central <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>
- Desharnais F. and Collison, 2001. **Background noise in the area of the Gully, Laurentien Channel and Sable Bank**. Proc. IEEE Oceans 2001. pp. 1348-1455.
- Enger P.S., 1981. **Frequency discrimination in teleosts-central or peripheral?** In: Tavolga WN, Popper AN, Fay RR (eds) Hearing and sound communication in fishes. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 243–253
- Finneran J.J., Dear R., Carder D.A. and Ridgway S.H., 2002. **Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun**. J. Acoust. Soc. Am. 111(6):2929-2940.
- Hastings, M.C., Popper, A.N., Finneran, J.J. and Lanford, P.J., 1996. **Effects of low-frequency underwater sound on hair cells of the inner ear and lateral line of the teleost fish *Astronotus ocellatus***. J. Acoust. Soc. Am. 99(3): 1759-1766.
- Hazen, M.G., and Desharnais F., 1997. **The eastern Canada shallow water ambient noise experiment**. Proc. IEEE Oceans 97, Vol. 1, pp. 471-476.

- Lesage, V., 1993. **Effet de la circulation plaisancière et d'un traversier sur le comportement vocal et social du beluga (*Delphinapterus leucas*) du Saint-Laurent.** M.Sc. Thesis. Dépt. de biologie, Université Laval. Québec. 141 pp.
- Lesage, V. , Barette, C., Kingsley, M. and Sjare B., 1999. **The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence river estuary, Canada.** Mar. Mammal Sci. 15: 65-84.
- Lloyd's, 2001. **Lloyd's register of shipping, 2001.** London, U.K. (www.lr.org)
- Lloyd's, 2005. **World shipping directory 2005-2006.** Lloyd's Register Fairplay Ltd. Surrey UK (www.lrfairplay.com).
- Lombarte, A., Yan, H.Y., Popper, A.N., Chang, J.C., and Platt, C., 1993. **Damage and regeneration of hair cell ciliary bundles in a fish ear following treatment with gentamicin.** Hearing Research 66: 166-174.
- MATTHEWS, J.N., L.E. RENDELL, J.C.D. GORDON AND D.W. MACDONALD., 1999. **A review of frequency and time parameters of cetacean tonal calls.** Bioacoustics 10:47-71
- McCauley, R.D., Fewtrell, J. and Popper, A.N., 2003. **High intensity anthropogenic sound damages fish ears.** J. Acoust. Soc. Am. 113(1): 638-642.
- Mitson. R. B., 1995. **Underwater Noise of Research Vessels. Review and Recommendations.** I.C.E.S. Coop. Res. Rep., No. 209.
- NRC, 2003. **Ocean noise and marine mammals.** The National Academies Press, Washington D.C., USA. 192 p.

- Ona E., Godo O.R., Handegard N.O., Hjellvik V., Patel R. and Pedersen G., 2007. **Silent research vessels are not quiet.** J. Acoust. Soc. Am. 121: pp. 145-150
- Perrone, A.J., 1974. **Infrasonic and low-frequency ambient noise measurements on the Grand Banks.** J. Acoust. Soc. Am. 55: pp. 754-758.
- Piggott, C.L., 1964. **Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian shelf.** J. Acoust. Soc. Am. 36: 2152-2163.
- Popper, A.N., and Hoxter, B., 1984. **Growth of a fish ear: 1. Quantitative analysis of sensory hair cell and ganglion cell proliferation.** Hearing Res. 15: 133-142.
- Richardson, W.J., Greene, C.R., Malme, C. I., and Thomson, D.H., 1995. **Marine mammals and noise.** Academic Press, N.Y., USA. 576 p.
- Ross, D., 2005. **Ship sources of ambient noise.** IEEE J. Ocean. Eng. 30(2): 257 - 261
- Sand, O. and Karlsen H.E., 2000. **Detection of infrasound and linear acceleration in fishes.** Phil. Trans. R. Soc. Lond. B., 355, 1295-1298.
- Sand, O. and Hawkins A.D., 1973. **Acoustic properties of the cod swimbladder.** J. Exp. Biol., 58: 797-820.

- Scheifele, P.M., 1997. **Impact of low-frequency anthropogenic noise on the auditory system of the beluga (*Delphinapterus leucas*) in the Saint Lawrence river estuary.** M.Sc. Thesis National Undersea Research Center, Univ. of Connecticut, Groton, Connecticut. 130 pp.
- Scheifele P.M. and Darre M., 2005. **Noise levels and sources in the Stellwagen bank national Marine Sanctuary and the St.Lawrence river estuary. Marine Conservation Series, MSD-05-1.** U.S. Dept. of Commerce, NOAA Marine Sanctuaries Division, Silver Spring, MD. 26 pp. (copie disponible à www.santuaries.nos.noaa.gov).
- Scheifele, P.M, Andrew, S., Cooper, R.A., and Darre, M., 2005. **Indication of the Lombard vocal response in the St.Lawrence River beluga.** J. Acoust. Soc. Am. 117: 1486-1492.
- Schlundt, C. E., Finneran, J. J., Carder, D. A., and Ridgway, S. H., 2000. **Temporary shift in masked hearing thresholds (MTTS) of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, and white whales, *Delphinapterus leucas*, after exposure to intense tones.** J. Acoust. Soc. Am. 107(6), 3496–3508.
- Simard Y., Roy N. and Gervaise C., 2006b. **Shipping noise and whales : world tallest ocean liner vs largest animal on earth.** MTS-IEEE OCEANS'06 – Boston. IEEE, Piscataway, NJ, USA. DOI : 10.1109/OCEANS.2006.307053 p. 1-6.
- Simard Y., Roy N. and Gervaise C., 2008a. **Passive acoustic detection and localisation of whales: Effects of shipping noise in Saguenay-St.Laurence marine park.** J. Acoust. Soc. Am. 123: 4109-4117

- Simard, Y., Roy, N., and Gervaise, C. 2008b. **Masking of blue and fin whales low-frequency vocalizations by shipping noise in the Saguenay—St. Lawrence Marine Park.** *Bioacoustics* 17: 183-185.
- Simard Y., Roy N., Bédard C., Nayel M. et Lepage R., 2006a. **Bruit de la navigation dans la ZPM de l'estuaire du Saint-Laurent à la tête du Chenal Laurentien à l'été 2003.** Rapport interne, Institut Maurice-Lamontagne, MPO, Mont-Joli, Qc
- Simmonds M, Dolman S., and Weilgart L., 2004. **Oceans of noise.** WDCS Science Report. 164 p. (copie disponible à www.wdcs.org)
- Southall B.L., Bowles A.E., Ellison W.T., and Finneran J.J., 2007. **Marine Mammals Noise Exposure Criteria,** *Aquatic Mammals* 2007, 33(4).
- Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R. and Piper, W., 2006. **Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish,** biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd. , offshorewindfarms.co.uk
- Urick, R.J., 1983. **Principles of underwater sound** 3rd ed. McGraw-Hill, New York. 423 p.
- Wales, S.C., and Heitmeyer R.M., 2002. **An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise.** *J. Acoust. Soc. Am.* 111: 1212-1231.
- Ward, W.D., 1997. **Effect of high intensity sound.** Pp. 1497-1507 in *Encyclopedia of Acoustics.* M.J. Crocker, ed. New-York: J.Wiley and Sons, Inc.
- Wenz, G.M., 1962. **Acoustic ambient noise in the Ocean: Spectra and sources.** *J. Acoust. Soc. Am.* 34: 1936-1956.

Zakarauskas, P., Chapman, D.M.F., and Staal, P.R., 1990. **Underwater acoustic ambient noise levels on the eastern Canadian continental shelf.** J. Acoust. Soc. Am. 87: 2064-2071.