

**TERMINAL MÉTHANIER D'ÉNERGIE CACOUNA :
ÉVALUATION DES IMPACTS SUR
LE NIVEAU SONORE SOUS-MARIN**

Par



Scott A. Carr

Marjo H. Laurinolli

Cristina D. S. Tollefsen

Stephen P. Turner

JASCO Research Ltd.

Suite 432 – 1496 Lower Water Street, Halifax, NS B3J 1R9

Tél. : (902) 405-3336

Courriel : halifax@jasco.com

Pour

Golder Associés Ltée

9200, boul. de l'Acadie, Bureau 10

Montréal, QC, Canada H4N 2T2

8 février 2006

**TRADUCTION FRANÇAISE
VERSION NON OFFICIELLE**

TERMINAL MÉTHANIER D'ÉNERGIE CACOUNA : ÉVALUATION DES IMPACTS SUR LE NIVEAU SONORE SOUS-MARIN

Par



Scott A. Carr

Marjo H. Laurinolli

Cristina D. S. Tollefsen

Stephen P. Turner

JASCO Research Ltd.

Suite 432 – 1496 Lower Water Street, Halifax, NS B3J 1R9

Tél. : (902) 405-3336

Courriel : halifax@jasco.com

Pour

Golder Associés Ltée

9200, boul. de l'Acadie, Bureau 10

Montréal, QC, Canada H4N 2T2

8 février 2006

AVERTISSEMENT :

Ce document a été produit pour permettre au public de consulter une version française du rapport d'acoustique sous-marine. Il s'agit d'une traduction réalisée par Énergie Cacouna du rapport « Cacouna Energy LNG terminal : assessment of underwater noise impacts » rédigé en anglais par JASCO Research Ltd. Cette traduction française est une version non-officielle. La seule version officielle du rapport est celle initialement rédigée par JASCO Research Ltd.

Table des matières

1	INTRODUCTION	6
2	RELEVÉS ACOUSTIQUES.....	7
2.1	BRUIT AMBIANT.....	7
2.1.1	Acquisition des données.....	7
2.1.2	Analyse des données.....	10
2.1.3	Variabilité temporelle.....	11
2.1.4	Variabilité spatiale.....	16
2.2	PERTE SONORE PAR PROPAGATION.....	17
2.2.1	Acquisition des données.....	17
2.2.2	Analyse des données.....	19
2.3	DONNÉES DE NIVEAUX SONORES À LA SOURCE – LE PETER R. CRESSWELL.....	20
3	MODÉLISATION ACOUSTIQUE.....	22
3.1	CONCEPTS ACOUSTIQUES DE BASE RELIÉS À LA MODÉLISATION.....	22
3.2	MÉTHODOLOGIE.....	24
3.2.1	Modèle <i>MONM</i> (<i>Marine Operations Noise Model</i>).....	24
3.3	TYPES DE BRUIT ASSOCIÉS AU PROJET DE TERMINAL MÉTHANIER D'ÉNERGIE CACOUNA ET CRITÈRES D'IMPACT ACOUSTIQUE PERTINENTS.....	26
3.3.1	<i>Bruit continu</i>	26
3.3.2	<i>Bruit d'impact</i>	27
3.3.3	<i>Bruit intermittent</i>	28
3.3.4	<i>Gamme de fréquences</i>	28
3.4	ENVIRONNEMENT GÉOACOUSTIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE.....	29
3.4.1	<i>Propriétés géoacoustiques</i>	30
3.4.2	<i>Vitesse du son</i>	30
3.4.3	<i>Bathymétrie</i>	32
3.5	COMPARAISON AVEC LES MESURES DE PERTE SONORE PAR PROPAGATION.....	32
3.6	RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION – SCÉNARIOS DE TRANSPORT MARITIME.....	33
3.6.1	<i>Scénario de transit du méthanier</i>	33
3.6.2	<i>Scénario d'amarrage du méthanier</i>	36
3.7	RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION – SCÉNARIOS DE CONSTRUCTION.....	37
3.7.1	<i>Scénario d'enfoncement des palplanches par vibrofonçage</i>	38
3.7.2	<i>Scénario d'enfoncement des palplanches par battage</i>	39
4	RÉSUMÉ.....	40
5	BIBLIOGRAPHIE.....	41

Liste des tableaux

Tableau 1: Détail sur les déploiements du système d'enregistrement acoustique autonome	10
Tableau 2: Symbole des sources de bruit (adapté de Richardson, 1995).....	11
Tableau 3: Moyenne et écart type du niveau sonore (<i>SPL</i> : <i>sound pressure level</i> ; dB re 1 μ Pa) calculés pour l'heure la moins bruyante de chaque déploiement.....	16
Tableau 4: Emplacements des émissions de tonalités pour les mesures de perte sonore par propagation.	18
Tableau 5: Dates, état de la marée et emplacements des profils de CTP effectués pendant l'étude sur le terrain. L'état de la marée est indiqué comme suit : M (marée montante); H (marée haute); B (marée basse).....	18
Tableau 6: Fréquence centrale et niveau sonore des tonalités employées pour mesurer la perte sonore par propagation.....	19
Tableau 7: Sommaire des propriétés environnementales utilisées dans la modélisation de la propagation	29
Tableau 8: Niveaux d'émission sonores de large bande, profondeurs des sources sonores et niveaux d'émission sonores par bande de $1/3$ d'octave utilisés dans le scénario de transit du méthanier	35
Tableau 9: Sommaire des résultats du scénario de transit du méthanier.....	36
Tableau 10: Sommaire des résultats du scénario d'amarrage des méthaniers	37
Tableau 11 : Niveaux d'émission sonores de large bande, profondeurs des sources sonores et niveaux d'émission sonores par bande de $1/3$ d'octave utilisés dans les scénarios de construction.....	38
Tableau 12 : Sommaire des résultats du scénario de vibrofonçage.....	39
Tableau 13 : Sommaire des résultats du scénario de battage	39

Liste des figures

Figure 1: Schéma du système d'enregistrement acoustique autonome utilisé pour les mesures de niveau sonore du bruit ambiant. Ce schéma illustre entre autre le contenant pressurisé (<i>pressure case</i>) ainsi que les raccords où sont attachées les bouées (<i>floats</i>) et les ancres (<i>anchor</i>).	8
Figure 2: Carte de la région (<i>map of study area</i>) à proximité du port de Gros Cacouna, Québec, montrant l'emplacement futur du terminal méthanier (<i>LNG port location</i>) et la localisation des déploiements du système d'enregistrement acoustique autonome (<i>station location</i>). On retrouve également sur cette figure le parc marin du Saguenay-Saint-Laurent (<i>Marine Park</i>) et les routes de navigation (<i>shipping lane</i>).....	9
Figure 3: Représentations des domaines temporel et fréquentiel (<i>frequency</i>) d'un sifflement.....	13
Figure 4: Représentations des domaines temporel et fréquentiel du passage d'un navire.....	14
Figure 5: Niveaux sonores moyens de large bande (dB re 1 μ Pa) pendant l'heure la moins bruyante pour chaque emplacement de déploiement.....	17
Figure 6: Le Peter R. Cresswell amarré au port de Cacouna	20
Figure 7: Pression acoustique enregistrée (<i>recorded level at boat</i> ; dB re 1 μ Pa) et calculée (<i>source level at 1 m, using MONM</i> ; dB re 1 μ Pa à 1 m) par bande de $1/3$ d'octave pour le Peter R. Cresswell.....	21
Figure 8: Exemple de comparaison entre les niveaux sonores prévus et mesurés	25
Figure 9: (a) Vitesse du son (<i>sound speed</i>) en fonction de la profondeur (<i>depth</i>) provenant de quatre profils CTP, (b) Moyenne des profils de vitesse du son présenté en (a) (<i>average profile</i>), et profil approximatif utilisé comme donnée d'entrée dans le modèle (<i>model profile</i>).	31
Figure 10 : Vitesse du son (<i>sound speed</i>) en fonction de la profondeur (<i>depth</i>) calculée d'après les données CTP du SDMM. Les points gris sont les données utilisées pour représenter la vitesse du son dans le MONM au cours de l'été.....	32
Figure 11: Niveau sonore à la source (<i>source level</i>) en fonction de la fréquence (<i>frequency</i>) pour le transducteur utilisé dans les expériences de perte par propagation.....	33

Annexe A

Annexe A page

Figure A- 1: Déploiement 1, CB-1B, 15 septembre 2005.....	1
Figure A- 2: Déploiement 2, CB-2B, 16 septembre 2005.....	2
Figure A- 3: Déploiement 3, CB5, 16 septembre 2005.....	3
Figure A- 4: Déploiement 4, Île Verte, 17 septembre 2005.....	4
Figure A- 5: Déploiement 5, CB3, 19 septembre 2005.....	5
Figure A- 6: Déploiement 6, DFO3 - Île Rouge, 21 septembre 2005.....	6
Figure A- 7: Déploiement 7, DFO3 - Île Rouge Ouest, 22 septembre 2005.....	7

Annexe B *Annexe B page*

Figure B - 1: Déploiement 1, CB-1B, 15 septembre 2005.....	1
Figure B - 2: Déploiement 2, CB-2B, 16 septembre 2005.....	2
Figure B - 3: Déploiement 3, CB5, 16 septembre 2005.....	3
Figure B - 4: Déploiement 4, Île Verte, 17 septembre 2005.....	4
Figure B - 5: Déploiement 5, CB3, 19 septembre 2005.....	5
Figure B - 6: Déploiement 6, DFO3 - Île Rouge, 21 septembre 2005.....	6
Figure B - 7: Déploiement 7, DFO3 - Île Rouge Ouest, 22 septembre 2005.....	7

Annexe C *Annexe C page*

Figure C - 1: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 1.	1
Figure C - 2: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 2.	2
Figure C - 3: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 3.	3
Figure C - 4: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 4.	4
Figure C - 5: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 5.	5
Figure C - 6: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 6.	6
Figure C - 7: Perte sonore par propagation par large bande en fonction de la distance par bande large.	7

Annexe D *Annexe D page*

Figure D - 1: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (<i>received level</i>) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de transit du méthanier (<i>LNG transit</i>).....	1
Figure D - 2: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (<i>received level</i>) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario d'amarrage du méthanier (<i>LNG docking</i>).	2

Figure D - 3: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (<i>received level</i>) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de vibrofonçage (<i>vibro hammer</i>).	3
Figure D - 4: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (<i>received level</i>) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de battage des palplanches (<i>pile driving</i>).	4

1 Introduction

Du 15 au 23 septembre 2005, JASCO Research a entrepris une étude sur le terrain pour mesurer les niveaux sonores du bruit ambiant sous-marin et la perte sonore par propagation en des points précis du fleuve Saint-Laurent, aux alentours du site proposé pour le terminal méthanier d'Énergie Cacouna. Une étude de modélisation acoustique a été réalisée pour prédire les niveaux sonores sous-marins générés par une sélection d'activités qui auront lieu durant les phases de construction et d'exploitation du terminal méthanier prévu à Gros Cacouna, Québec. Ce rapport expose les résultats de l'étude sur le terrain et de la modélisation acoustique qui permettent d'évaluer les impacts potentiels du bruit sur les mammifères marins, impacts dus à la construction et à l'exploitation du terminal méthanier proposé.

2 Relevés acoustiques

2.1 Bruit ambiant

2.1.1 Acquisition des données

Pour déterminer les niveaux sonores du bruit ambiant dans le Saint Laurent, le bruit ambiant sous-marin a été enregistré avec un système d'enregistrement autonome de fond à sept stations d'échantillonnage (déploiement; *deployment*). Les niveaux de bruit ambiant ont été mesurés à cinq stations à proximité du site proposé pour le terminal méthanier à Gros Cacouna et à deux stations près de l'île Rouge. Le plan d'échantillonnage initial prévoyait des enregistrements à une huitième station, soit au cap de Bon-Désir : ces enregistrements n'ont pas pu être réalisés à cause des contraintes de temps et des conditions météorologiques. Chaque déploiement s'est vu attribué un numéro pour faciliter la compréhension du texte. La figure 2 montre un total de sept déploiements qui sont résumés au tableau 1, avec emplacement et horaire.

Le système d'enregistrement acoustique autonome, illustré de façon schématique à la figure 1, se compose d'un hydrophone Reson TC4032 calibré dont la sensibilité de réception est de $-170 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa} \pm 1 \text{ dB}$ et la réponse en fréquence est linéaire entre 15 Hz et 100 kHz, connecté à un enregistreur audionumérique (*digital recorder*) Marantz PMD660. Entre 8 et 12 heures d'enregistrement ont été effectuées à chaque station à un taux d'échantillonnage de 44,1 kHz et une résolution de 16 bits. Le système d'enregistrement acoustique était ancré au lit du fleuve par des poids en béton. Suite à chaque déploiement, un largueur acoustique était déclenché à partir de la surface pour libérer le système d'enregistrement des poids afin qu'il puisse remonter à la surface pour y être récupéré. On s'est servi d'un zodiac exploité par PESCA Environnement de Maria, Québec, pour déployer et récupérer le système d'enregistrement. Pour les déploiements sur la rive sud, le zodiac a été mis à l'eau à Cacouna, et pour les deux à proximité de l'île Rouge, à Bergeronnes.

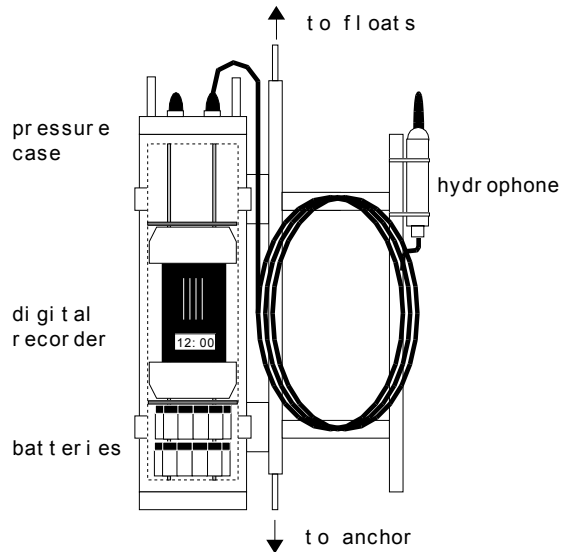


Figure 1: Schéma du système d'enregistrement acoustique autonome utilisé pour les mesures de niveau sonore du bruit ambiant. Ce schéma illustre entre autre le contenant pressurisé (*pressure case*) ainsi que les raccords où sont attachées les bouées (*floats*) et les ancrés (*anchors*).

Les données acoustiques prélevées par le système d'enregistrement ont été téléchargées sur un ordinateur afin d'être ultérieurement analysées. Les signaux enregistrés ont été traités dans le but de déterminer le niveau sonore équivalent horaire (Leq horaire) et les niveaux sonores moyens par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave. Les sections suivantes du présent rapport présentent les résultats de l'analyse des données du bruit ambiant.

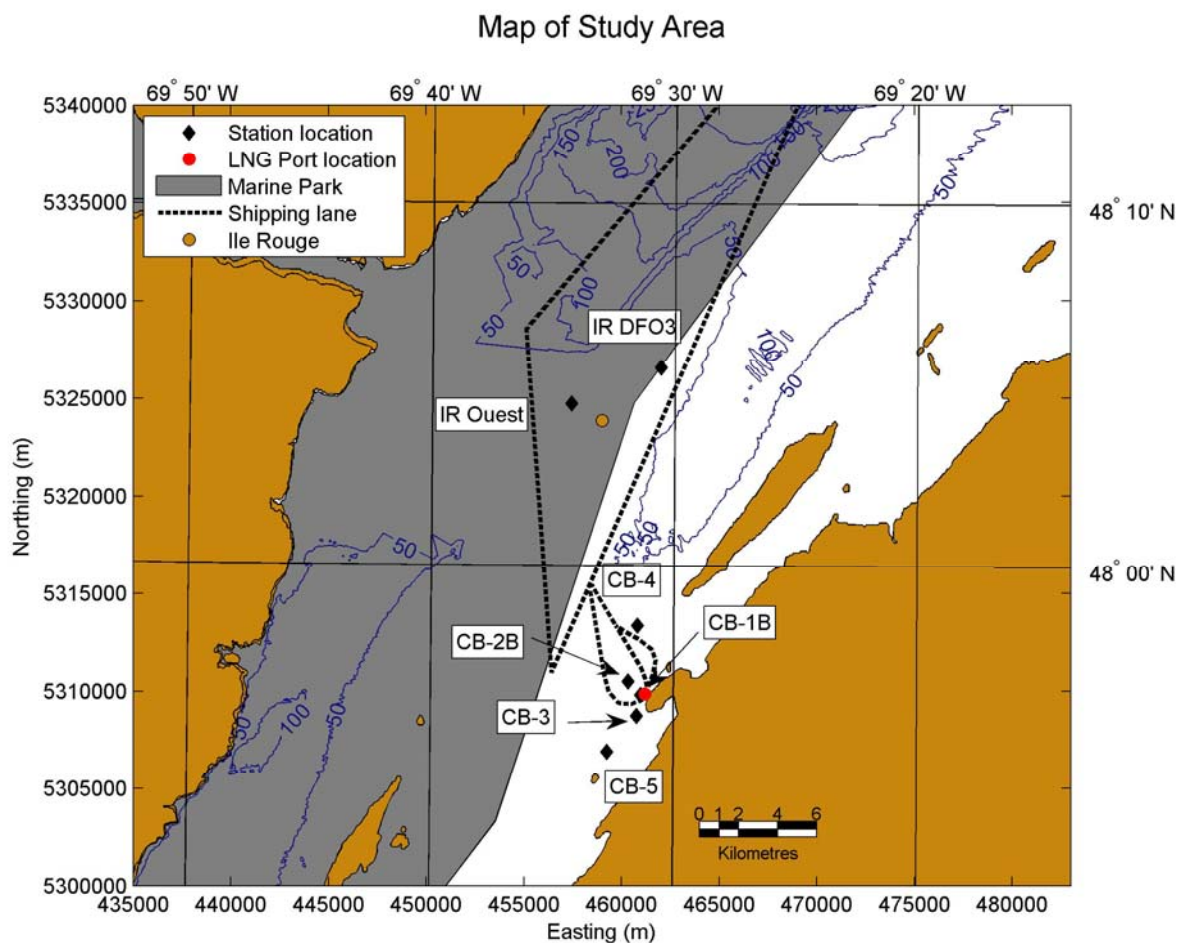


Figure 2: Carte de la région (*map of study area*) à proximité du port de Gros Cacouna, Québec, montrant l'emplacement futur du terminal méthanier (*LNG port location*) et la localisation des déploiements du système d'enregistrement acoustique autonome (*station location*). On retrouve également sur cette figure le parc marin du Saguenay-Saint-Laurent (*Marine Park*) et les routes de navigation (*shipping lane*).

Tableau 1: Détail sur les déploiements du système d'enregistrement acoustique autonome

Numéro du déploiement	Zone	Emplacement du déploiement	Date et heure d'activation du système	Date et heure de désactivation du système	Durée totale d'enregistrement	Latitude	Longitude	Profondeur de l'eau (m)
1	Cacouna	CB-1B (200 m au large du terminal méthanier)	15 sep.2005 08:28:56	15 sep. 2005 16:39:02	8:10:06	47° 56,425'	69° 31,335'	20
2	Cacouna	CB-2B (1km au large du déploiement CB-1B)	16 sep. 2005 07:12:02	16 sep. 2005 16:15:02	9:03:00	47° 56,796'	69° 31,87'	28
3	Cacouna	CB-5 (Rocher Percé)	16 sep. 2005 19:08:57	17 sep. 2005 07:12:57	11:56:00	47° 54,840'	69° 32,722'	8
4	Cacouna	CB-4 (île Verte)	17 sep. 2005 11:41:02	18 sep. 2005 00:03:02	12:22:00	47° 58,327'	69° 31,488'	21
5	Cacouna	CB-3 (Entrée du port)	19 sep. 2005 08:50:26	19 sep. 2005 17:36:26	8:46:00	47° 55,844'	69° 31,503'	14
6	île Rouge	IR-DFO-3 (Est de l'île Rouge)	21 sep. 2005 16:32:00	22 sep. 2005 04:30:00	09:58:00	48° 05,483'	69° 30,569'	27
7	île Rouge	IR-W (Ouest de l'île Rouge)	22 sep. 2005 10:53:01	23 sep. 2005 22:42:58	11:49:57	48° 04,464'	69° 34,262'	19

2.1.2 Analyse des données

Les données sur la vitesse du vent proviennent du site Web d'Environnement Canada (http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_e.html) pour la station météorologique de l'île Rouge. Les données sur la hauteur des marées ont été prélevées sur le site Web du Service hydrographique canadien (<http://www.lau.chs-shc.dfo-mpo.gc.ca/english/Canada.shtml>) pour la station marégraphique de Cacouna. L'état de la mer et les conditions météorologiques ont également été notés pendant l'étude sur le terrain.

Pour produire des niveaux sonores par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave pour les enregistrements du bruit ambiant, le spectre de puissance pour chaque minute (60 s) d'enregistrement a été calculé au moyen de l'algorithme de transformation rapide de Fourier. Les spectres d'énergie en résultant ont été intégrés à travers la gamme de fréquences de chacune des bandes de $\frac{1}{3}$ d'octave, entre 10 Hz et 20 kHz. Les figures A-1 à A-7 de l'annexe A présentent des graphiques de la vitesse du vent, de la hauteur des marées et des niveaux de bruit ambiant par large bande en fonction de l'heure de la journée pour chaque déploiement ainsi que des spectrogrammes en couleur des

niveaux sonores par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave. Les périodes de temps durant lesquelles la perte sonore par propagation a été mesurée ont été éliminés des images. L'annexe B présente les niveaux sonores par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave pour chaque déploiement, calculés au moment où le niveau de l'eau est à son maximum et à son minimum, ainsi qu'à mi-chemin entre les deux.

Les spectrogrammes comprennent aussi des annotations sur l'origine probable des bruits, annotations montrées au tableau 2. Chaque source d'émission fait l'objet d'une explication plus détaillée à la section 2.1.3.

Tableau 2: Symbole des sources de bruit (adapté de Richardson, 1995)

Annotation	Source de bruit	Niveau sonore sous-marin typique par large bande (dB re 1 μ Pa à 1 m)	Gamme de fréquences typique
S	navire (<i>Ship</i>)	170-185	5 Hz – 1 kHz
E	bruit électronique (<i>Electronic noise</i>)	s/o	1 Hz – 20 kHz
H	aéroglesseur (<i>Hovercraft</i>)	130-140	50 Hz – 2 000 Hz
D	ancrage raclant le fond (<i>mooring Dragging along bottom</i>)	s/o	1 Hz – 20 kHz
B	bateau avec moteur hors-bord (<i>Boat</i>)	155-175	100 Hz – 10 kHz

2.1.3 Variabilité temporelle

Les niveaux sonores enregistrés aux sept stations d'échantillonnage varient considérablement en fonction de l'heure, comme le montrent les figures A-1 à A-7 à l'annexe A. La section 2.1.4 donne des détails sur le mode de sélection et de traitement des niveaux de bruit ambiant pour chaque emplacement. La variabilité des niveaux sonores sous-marins, évidente sur les spectrogrammes de l'annexe A, peut être causée par un certain nombre de facteurs, notamment des facteurs biologiques, le trafic maritime à distance, le passage rapproché des navires, l'état de la mer, le vent, la pluie ainsi que les variations du courant associées au cycle des marées. Les caractéristiques acoustiques de chacun de ces types de source sont traitées ci-dessous.

2.1.3.1 Bruit des instruments

Dans ces déploiements, l'élément qui affecte la variabilité temporelle de façon plus perceptible est peut-être le bruit causé par l'eau qui passe près de l'hydrophone (*flow noise*; ressemblant au vent qui passe près d'un microphone). Les enregistrements font également entendre de façon évidente les vibrations de l'équipement d'ancrage ainsi que, dans une section isolée, des enregistrements de bruit électronique.

Le bruit causé par l'eau s'écoulant près de l'hydrophone se manifeste de façon évidente dans les enregistrements sous forme d'une hausse des bruits dont la fréquence est inférieure à 50 Hz. Il apparaît dans certains des déploiements lors des changements de marée; ce à quoi il faut s'attendre puisque la vitesse du courant est en général plus élevée à ce moment. Il est à prévoir, en règle générale, que des courants plus rapides produiront des bruits d'écoulement de

l'eau sur l'hydrophone plus élevés. Cette hausse sonore des basses fréquences n'a pas affecté tous les déploiements au moment du changement de marée. Il fallait s'y attendre car ces bruits dépendent des conditions locales de courant qui sont différentes d'un emplacement de déploiement à un autre.

Le système d'ancrage lui-même produit des bruits intermittents résultant de la flexion des raccords entre les ancrs, le largueur acoustique et le système de bouées. Il semble également que les ancrs ont raclé le lit du fleuve en période de fort courant, produisant de façon significative du bruit à large bande. Les bruits d'ancrage sont évidents sur les spectrogrammes sous forme de signaux à bande large d'une durée allant jusqu'à deux minutes. Le signal étiqueté D au déploiement 2 en est un exemple.

On a observé une brève période d'interférences électroniques au cours du déploiement 1. C'est le seul exemple d'un son semblable à de la statique et il est marqué d'un E sur le spectrogramme illustré en figure A-1.

2.1.3.2 Bruit biologique

Les cétacés présents en automne dans le fleuve Saint-Laurent et qui participent à l'éventail de bruits biologiques comprennent des bélugas, des petits rorquals, des rorquals communs, des marsouins communs, des rorquals bleus et des phoques. On peut aussi observer, mais en de rares occasions, des rorquals à bosse, des cachalots macrocéphales, des dauphins à flancs blancs de l'Atlantique, des dauphins à nez blanc, des globicéphales noirs, des baleines à bec communes et des épaulards. Le 22 septembre 2005, le Whale News Network (<http://www.whales-online.net/eng/FSC.html>) a signalé la présence de bélugas, de petits rorquals et de rorquals communs dans le fleuve Saint-Laurent entre Rivière-du-Loup et Les Escoumins.

Les bélugas sont les plus nombreux et résident à l'année dans le fleuve Saint-Laurent dans le secteur proposé pour le terminal. Les vocalisations des bélugas du St-Laurent ont été enregistrées et ont une fréquence moyenne de 3,6 kHz (Lesage et *al.* 1999). Richardson et *al.* (1995) rapporte que les sifflements des bélugas ont des fréquences dominantes de l'ordre de 2 à 5,9 kHz, ainsi que d'autres types de vocalisations entre 1 et 8 kHz. Les clics d'écholocation des bélugas vont de 40 à 60 kHz et de 100 à 120 kHz (Richardson et *al.* 1995).

Des sifflements, vraisemblablement émis par les bélugas, ont été observés et entendus dans les données de bruit ambiant dans la gamme de 2 à 3 kHz, comme le montre la figure 3. Il se peut aussi que les données incluent des bruits de phoques et d'autres cétacés tels que les rorquals communs et les rorquals bleus qu'on sait se trouver dans la région. Les espèces de phoques de la région incluent : des phoques communs, des phoques du Groenland, des phoques à capuchon et des phoques gris. En général, les émissions sonores biologiques étaient intermittentes et souvent très faibles, ne contribuant donc probablement pas de façon significative à l'ensemble du niveau sonore.

Les invertébrés comme les crevettes et les crabes peuvent émettre des bruits sur une large gamme de fréquences par le frottement de parties de leur corps ou la production de bulles de cavitation. Certains poissons peuvent émettre des sons, essentiellement de basse fréquence (<3 kHz). Il existe peu de données sur la production ou l'audibilité des sons par les invertébrés et les poissons. On ne s'attend pas à ce que ces bruits contribuent de façon significative aux niveaux de bruit ambiant dans le Saint-Laurent.

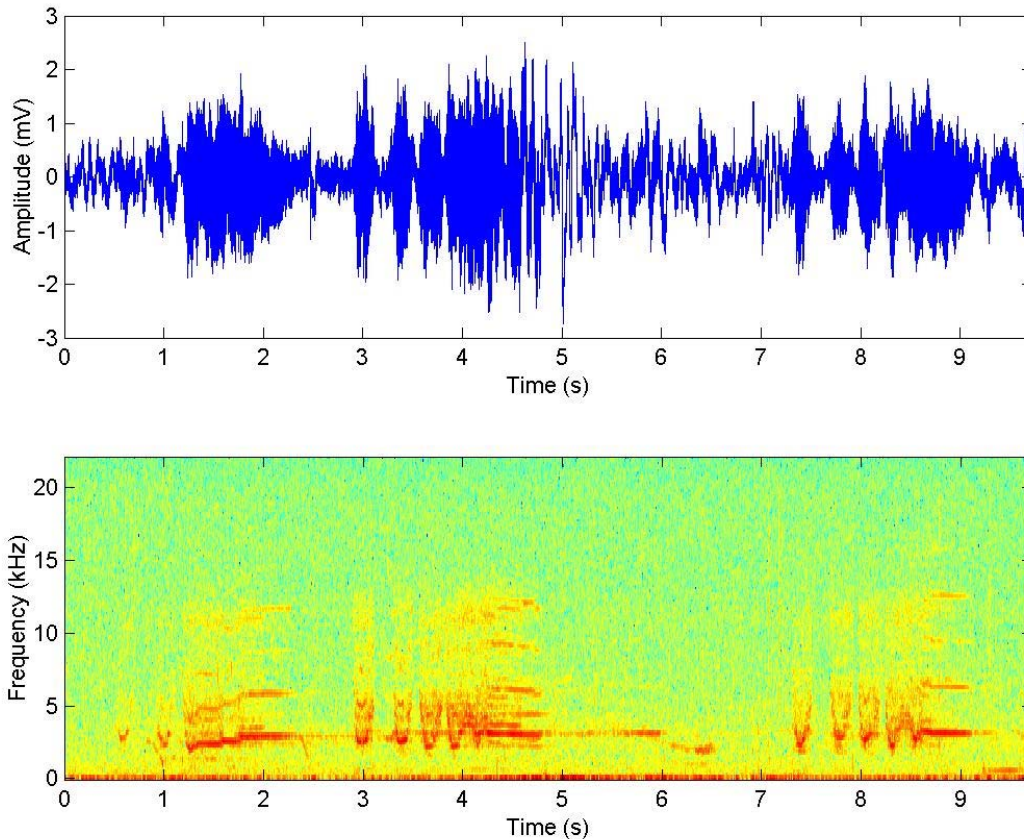


Figure 3: Représentations des domaines temporel et fréquentiel (*frequency*) d'un sifflement.

2.1.3.3 Trafic maritime et bruits d'origine anthropique

Le bruit des navires se divise en deux catégories : le « bruit d'un navire » que l'on observe lorsque celui-ci passe à proximité de l'instrument et le « bruit du trafic maritime », c'est-à-dire le bruit cumulatif que laisse le trafic maritime distant (Wenz, 1962). Le bruit d'un navire est intermittent et caractérisé par des composantes à bande étroite à des fréquences inférieures à 1 kHz, combiné aux bruits de cavitation des hélices qui peuvent aller jusqu'à des fréquences de plusieurs kHz. Le bruit du trafic maritime dépend de la concentration des navires et des propriétés de propagation sonore de l'océan dans la région. Dans une région à faible perte sonore par propagation, les navires éloignés vont contribuer au bruit ambiant observé tandis que dans les régions à perte élevée, seuls les navires qui sont dans le secteur avoisinant les instruments de mesure contribueront au bruit ambiant.

Comme le montre la figure 4, on remarque de toute évidence le bruit d'un navire sur le spectrogramme de bruit ambiant, bruit qui apparaît comme une augmentation de courte durée (30 minutes ou moins) de l'énergie acoustique de 100 Hz à 1 kHz. De temps à autre, on pense que des navires plus éloignés contribuent à la hausse des niveaux sonores inférieurs à 50 Hz. Les navires apparaissent sur les spectrogrammes sous la lettre S (*Ship*). Les niveaux sonores des

navires n'indiquent pas de valeur significative au-dessous d'environ 100 Hz. On attribue ceci à la perte sélective des basses fréquences, dû à la propagation du son dans des eaux relativement peu profondes.

Parmi les autres bruits d'origine anthropique, on remarque notamment les avions, les aéroglisseurs et les activités industrielles. Le passage d'un aéroglisseur à proximité du système d'enregistrement au déploiement 1 est évident dans les enregistrements, comme l'indique le H sur le spectrogramme de la figure A-1.

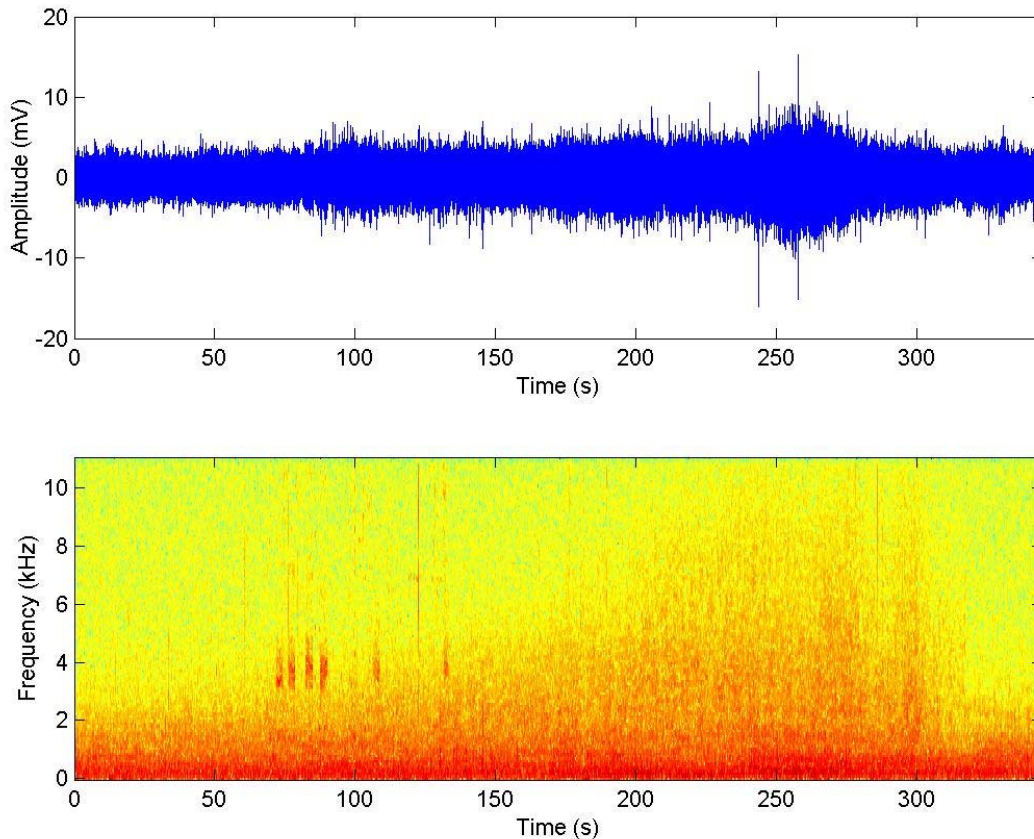


Figure 4: Représentations des domaines temporel et fréquentiel du passage d'un navire

2.1.3.4 Bruit produit par le vent et les vagues

Le vent et l'état de la mer ont pour effet d'élever de façon uniforme les niveaux sonores dans la gamme de fréquences entre 100 Hz et 10 kHz (Wenz, 1962). La hausse du bruit est due à l'augmentation de l'agitation en surface qui n'est pas nécessairement reliée directement à la vitesse du vent mais plutôt à d'autres variables comme la durée, le fetch et la direction du vent en fonction de la houle locale, des courants et de la topographie. Les vagues en surface peuvent aussi engendrer des variations de pression ayant un impact sur un transducteur ou un hydrophone; cependant, la fréquence maximale de ces variations est beaucoup plus basse (0,1 Hz) que ce qui a été étudié dans le cadre de cette étude (Wenz, 1962).

Il est difficile d'identifier dans les données des bruits qui auraient pu être émis par le vent ou des vagues. La gamme de fréquences émises par les navires chevauche directement la gamme des fréquences émises par le vent, et le passage des navires coïncide souvent avec des périodes de vents plus forts (supérieurs à 20 km/h). Il faudrait une période prolongée de vents forts pour engendrer des brisants qui pourraient hausser les niveaux sonores. Les 16 et 17 septembre, le vent était soutenu et d'environ 20 km/h. Ces dates correspondent à la seconde moitié du déploiement 3 et à tout le déploiement 4. On n'a toutefois remarqué aucune hausse sonore constante entre 100 Hz et 10 kHz. Exception faite de ce qui a été susmentionné, l'état de la mer pendant les relevés acoustiques a varié entre 0 et 3, correspondant à des vitesses du vent de 0 à 10 nœuds.

2.1.3.5 Bruit découlant du cycle des marées

La littérature n'indique nulle part que les niveaux sonores du bruit ambiant dépendent du cycle des marées. Des travaux antérieurs laissent entendre que la source des hausses sonores observées en corrélation avec la vitesse du courant de marée n'est en fait que le bruit de l'écoulement de l'eau sur le récepteur (Willis et Dietz, 1961). La turbulence augmente avec la force de cisaillement à proximité d'une barrière telle que le fond océanique de sorte que les variations de pression dues aux turbulences peuvent affecter directement les mesures prises par un hydrophone (Wenz, 1962). On peut donc en déduire que les turbulences relevant de la vitesse des courants de marée et des effets de barrière peuvent contribuer au bruit produit par l'écoulement de l'eau près de l'hydrophone.

Les résultats obtenus suite aux déploiements semblent indiquer qu'il n'y a pas de hausse constante du niveau sonore ambiant pendant le cycle des marées. À l'occasion, une augmentation des bruits de fréquence inférieure à 50 Hz se manifeste entre les marées hautes et basses, mais cela n'a pas été observé dans tous les déploiements. On remarque en particulier au déploiement 6 une hausse des bruits de fréquence inférieure à 50 Hz au cours du cycle complet des marées alors que les déploiements 1 et 7 n'affichent pratiquement aucun bruit de fréquence inférieure à 50 Hz. Les autres déploiements (2, 3, 4 et 5) montrent des indications d'augmentation dans les basses fréquences au milieu du cycle des marées; cependant, une partie de ce bruit est redevable au mouvement de l'instrument tandis que le reste est, selon toute vraisemblance, dû à l'écoulement de l'eau près de l'hydrophone et aux variations de pression relevant de la turbulence.

2.1.4 Variabilité spatiale

On a calculé la moyenne et l'écart type du bruit ambiant pour l'heure la moins bruyante de chaque déploiement (tableau 1) à partir des niveaux de bruit ambiant de large bande par minute. L'heure la moins bruyante est celle durant laquelle le spectrogramme n'affiche la présence d'aucun navire ou autre source évidente de bruit. Les niveaux de bruit ambiant sont énumérés au tableau 3 et indiqués sur la carte de la figure 5.

Aux points les plus proches du port (déploiements 1, 2, 3 et 5), ces niveaux sonores varient entre 89 et 102 dB tandis qu'aux points les plus éloignés du port (déploiements 4, 6 et 7) ces niveaux sont légèrement supérieurs, de l'ordre de 101 à 109 dB.

Tableau 3: Moyenne et écart type du niveau sonore (*SPL* : *sound pressure level*; dB re 1 μ Pa) calculés pour l'heure la moins bruyante de chaque déploiement

Numéro du déploiement	Niveau sonore pendant l'heure la moins bruyante	
	Moyenne (dB re 1 μ Pa)	Écart type (dB re 1 μ Pa)
1	89,6	1,8
2	96,5	4,2
3	93,7	4,3
4	101,6	2,2
5	101,5	4,5
6	108,7	5,8
7	104,0	3,5

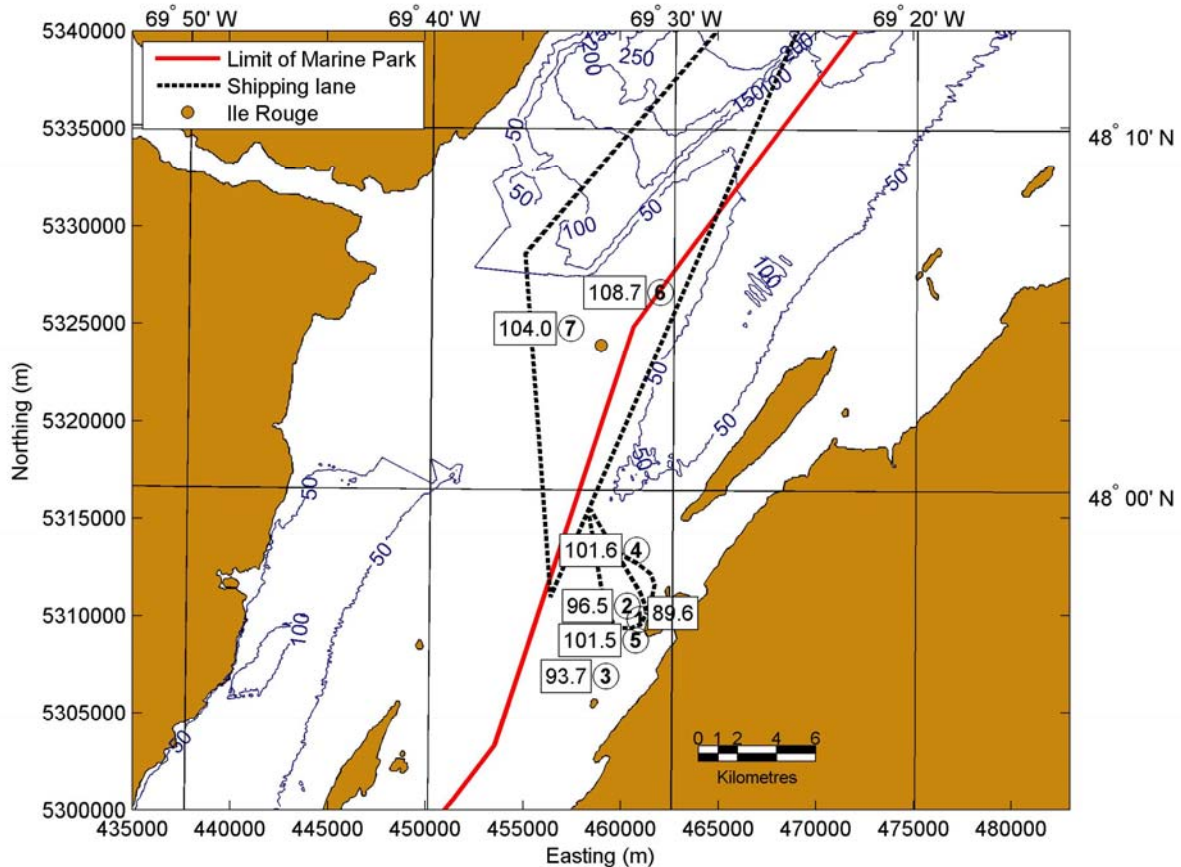


Figure 5: Niveaux sonores moyens de large bande (dB re 1 μ Pa) pendant l'heure la moins bruyante pour chaque emplacement de déploiement

2.2 Perte sonore par propagation

Des mesures de la perte de signal sonore par propagation ont été réalisées pendant un certain nombre de déploiements. Celles réalisées le 19 septembre, lors du déploiement 5, contenaient le jeu de données le plus complet avec des données de perte par propagation en fonction de la distance sur une ligne entre Gros Cacouna et l'île Verte. Les résultats du déploiement 5 ont été comparés à la perte sonore par propagation modélisée sur une ligne entre Gros Cacouna et l'île Verte, avec la source sonore localisée à divers emplacements d'émission de tonalités, tel que décrit ci-dessous.

2.2.1 Acquisition des données

Le système d'enregistrement a été déployé à 08h 40m 25s le 19 septembre 2005 à 47° 55' 50,640" N, 69° 31' 30,180" O. Une série de tonalités de bande étroite d'une durée de cinq secondes, avec fréquences au centre des bandes de $\frac{1}{3}$ d'octave comprises entre 200 Hz et 2 kHz, a été émise dans l'eau au moyen d'un transducteur acoustique sous-marin Lubell Labs LL-9162. Le niveau de pression acoustique a été enregistré par le système d'enregistrement autonome. Le

transducteur émetteur a été installé à 5 m de profondeur, avec émission des tonalités à partir de six points différents tout au long de la journée, comme le détaille le tableau 4.

Tableau 4: Emplacements des émissions de tonalités pour les mesures de perte sonore par propagation.

Émission de tonalité	Heure d'initialisation de l'émission	Latitude (degrés N)	Longitude (degrés O)	Distance du système d'enregistrement autonome (m)
1	10:24:20	47° 56' 17,280"	69° 31' 23,520"	834
2	16:18:00	47° 56' 07,860"	69° 31' 30,270"	532
3	16:32:53	47° 56' 23,910"	69° 31' 24,180"	1035
4	16:45:35	47° 56' 42,900"	69° 31' 16,080"	1640
5	16:59:04	47° 57' 09,060"	69° 31' 11,640"	2452
6	17:20:40	47° 57' 34,110"	69° 31' 01,770"	3248

Des profils de CTP (mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur) ont été effectués tout au long des relevés acoustiques à divers endroits, y compris les emplacements d'émission de tonalités du 19 septembre, tel que résumé au tableau 5. L'analyse des données de CTP est décrite à la section 3.4.2.

Tableau 5: Dates, état de la marée et emplacements des profils de CTP effectués pendant l'étude sur le terrain.

L'état de la marée est indiqué comme suit : M (marée montante); H (marée haute); B (marée basse)

Profil	Date	Heure	État de la marée	Station	Latitude (N)	Longitude (O)
1	17 sept. 2005	11:34:45	M	CB-4	47° 58' 09,960"	69° 31' 31,020"
2	17 sept. 2005	11:45:25	M	CB-3	47° 57' 07,380"	69° 31' 48,600"
3	17 sept. 2005	11:52:28	M	CB-1B	47° 56' 24,240"	69° 31' 23,220"
4	17 sept. 2005	12:01:37	M	CB-5	47° 54' 47,100"	69° 32' 47,160"
5	17 sept. 2005	12:13:15	M	Ouest de CB-5	47° 55' 22,620"	69° 35' 27,600"
6	19 sept. 2005	08:45:01	B	CB-3	47° 55' 56,820"	69° 31' 27,960"
7	19 sept. 2005	09:13:24	B	Ouest de CB-5	47° 55' 30,720"	69° 35' 10,800"
8	19 sept. 2005	10:29:35	B	CB-1B	47° 56' 17,640"	69° 31' 24,360"
9	19 sept. 2005	16:22:09	H	CB-3	47° 56' 07,380"	69° 31' 30,720"
10	19 sept. 2005	16:48:53	H	CB-1B	47° 56' 41,520"	69° 31' 20,160"
11	19 sept. 2005	17:02:53	H	CB-3	47° 56' 05,760"	69° 31' 14,580"
12	19 sept. 2005	17:14:35	H	CB-4	47° 57' 30,480"	69° 31' 04,020"
13	21 sept. 2005	16:21:44	H	IR DFO3	48° 05' 19,980"	69° 30' 32,340"
14	21 sept. 2005	16:45:18	H	IR Ouest	48° 04' 04,200"	69° 34' 30,840"

2.2.2 Analyse des données

Les émissions sonores étaient composées de tonalités d'une durée de 5 secondes pour chacune des fréquences mentionnées au tableau 6. Ce tableau indique également les niveaux sonores à la source, pour une distance de référence d'un mètre de la source et pour chacune des fréquences centrales utilisées. Le cycle complet d'émissions sonores a été répété 5 fois à chaque emplacement. On a ensuite calculé les pressions acoustiques efficaces reçues (*rms received sound pressure level*) pour chaque tonalité de 5 secondes, puis on a calculé la moyenne de ces pressions pour les cinq répétitions d'une même tonalité à chacun des emplacements. Le résultat, soit le niveau sonore reçu en fonction de la fréquence, a permis d'établir une comparaison avec les résultats du modèle. Les mesures de perte sonore par propagation et la comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs modélisées sont discutées à la section 3.5.

Tableau 6: Fréquence centrale et niveau sonore des tonalités employées pour mesurer la perte sonore par propagation.

Fréquence (Hz)	Niveau sonore à la source (dB re 1 μ Pa à 1 m)
200	131,4
251	136,3
316	141,5
398	146,2
501	151,8
631	157,4
794	163,4
1000	167,0
1259	163,8
1584	158,9
1995	158,4

2.3 Données de niveaux sonores à la source – le Peter R. Cresswell

Le 15 septembre 2005, nous avons eu l'occasion de mesurer les niveaux sonores émis par un navire de transport de gravier de grande taille, le Peter R. Cresswell, alors qu'il était amarré dans le port de Cacouna. Les niveaux sonores mesurés sont représentatifs de ceux d'un grand navire à quai.

Le Peter R. Cresswell (illustré à la figure 6) mesure 219,21 m de longueur, 23,16 m de largeur, 11,88 m de profondeur, et présente un tirant d'eau de 8,68 m, un tonnage brut de 19 853 tonnes, une puissance au frein de 9 464 CV et une vitesse maximale de 15 nœuds. La distance jusqu'au milieu du navire lors de la mesure des niveaux sonores était de 134 m.



Figure 6: Le Peter R. Cresswell amarré au port de Cacouna

Un hydrophone Reson TC4043 a été installé à 3,9 m de profondeur; sa sortie a été transmise par un amplificateur Ithaco vers un enregistreur à disque dur Marantz PMD690. La durée totale de l'enregistrement était d'environ 35 minutes; cependant, seules les 7 premières minutes ont fait l'objet d'une analyse en vue de déterminer le niveau sonore à la source, puisque la distance au bateau était mesurée avec exactitude et qu'aucun autre navire ou autre activité ne produisaient de bruit additionnel. Le spectre d'émission sonore a été calculé en appliquant

l'algorithme de transformation rapide de Fourier aux données par incrément de 1 s, puis en établissant la moyenne du spectre sur toute la durée de l'enregistrement de 7 minutes. Ce spectre acoustique a ensuite servi à calculer les niveaux sonores par bande de $1/3$ d'octave indiqués à la figure 7.

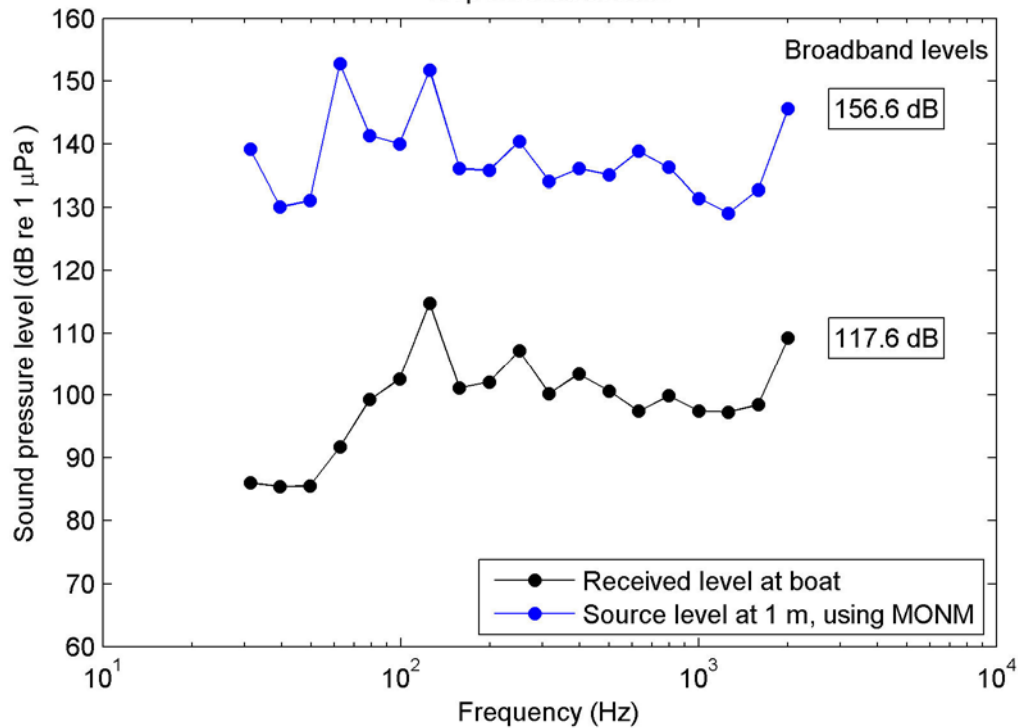


Figure 7: Pression acoustique enregistrée (*recorded level at boat*; dB re 1 µPa) et calculée (*source level at 1 m, using MONM*; dB re 1 µPa à 1 m) par bande de $1/3$ d'octave pour le Peter R. Cresswell.

Les niveaux sonores à la source correspondent aux niveaux de pression acoustique mesurés à une distance de référence de 1 mètre de la source d'émission; il était donc nécessaire de corriger les niveaux sonores reçus pour tenir compte de la distance entre la source d'émission et l'emplacement de mesure. La propagation sonore en eaux peu profondes est un phénomène complexe car le son peut être réfléchi plusieurs fois par la surface et le fond de l'eau dans son déplacement entre la source d'émission et le récepteur. En outre, la perte sonore par propagation varie habituellement en fonction de la fréquence. Le modèle MONM, qui intègre un modèle d'équation parabolique, a permis de calculer la correction pour la rétro-propagation.

Les données disponibles pour le port de Cacouna (Transports Canada, 2005) indiquent une profondeur minimale au quai de 10,1 m. En tenant compte de cette profondeur et du tirant d'eau de 8,68 m du Peter R. Cresswell, il est raisonnable de supposer une profondeur de 10,1 m à l'endroit où le Peter R. Cresswell était amarré et à proximité. On a exécuté le modèle MONM sur une zone d'une profondeur uniforme de 10,1 m caractérisée par les paramètres environnementaux décrits à la section 3.4 et en indiquant une distance de 134 m entre la source d'émission et le récepteur.

La figure 7 présente les niveaux sonores enregistrés par bande de $1/3$ d'octave ainsi que les niveaux sonores à la source calculés selon les corrections du modèle MONM, en fonction de la

fréquence. Les niveaux sonores à large bande de 117,6 dB (brut) et de 156,6 dB (niveau d'émission à 1 m) sont également indiqués sur le graphique.

3 Modélisation acoustique

Nous avons eu recours à la modélisation acoustique afin de cartographier les champs acoustiques sous-marins provoqués par le bruit des activités de construction et d'exploitation prévues pour le terminal méthanier d'Énergie Cacouna. Quatre scénarios ont été modélisés à l'aide du modèle MONM (Marine Operations Noise Model):

- le passage d'un méthanier accompagné d'un remorqueur d'escorte;
- l'accostage d'un méthanier aidé par quatre remorqueurs;
- l'utilisation d'un vibrofonceur, incluant les navires de soutien;
- l'utilisation d'un marteau de battage, incluant les navires de soutien.

Les résultats de la modélisation sont reproduits aux sections 3.6 et 3.7.

3.1 Concepts acoustiques de base reliés à la modélisation

Les ondes sonores sont des ondes de pression longitudinales, c'est-à-dire qu'elles provoquent le déplacement de la matière le long de la trajectoire de propagation. L'amplitude d'une onde sonore est mesurée en micropascals (μPa); on l'appelle souvent le niveau de pression acoustique (*SPL*, *sound pressure level*). La relation entre la fréquence f , la longueur d'onde λ et la vitesse du son c dans un milieu est exprimée par l'équation suivante :

$$c = f\lambda \quad (1)$$

L'intensité d'une onde correspond à la puissance se déplaçant au travers d'une unité de surface. L'énergie ou intensité acoustique transmise par les ondes sonores est rarement mesurée directement, mais elle est souvent mentionnée. Elle est importante car il s'agit d'une mesure fondamentale de la propagation du son. L'intensité acoustique est définie comme la puissance acoustique transmise par unité de surface dans la direction de propagation; les unités de mesure sont des watts/m^2 . L'intensité, la puissance et l'énergie d'une onde sonore sont proportionnelles à la moyenne du carré de la pression. Les chercheurs dans le domaine de l'acoustique réfèrent souvent à l'intensité ou la puissance, mais celles-ci sont obtenues à partir du carré de la pression. Pour une onde sonore dont la pression acoustique efficace est P_{rms} et qui se déplace dans un milieu de densité ρ_A à une vitesse c , l'intensité moyenne dans le temps I est exprimée par l'équation suivante :

$$I = \frac{P_{\text{rms}}^2}{\rho_A c} \quad (2)$$

Puisque l'intensité du son peut varier de plusieurs ordres de grandeur; une échelle logarithmique a été développée pour faciliter l'expression des intensités sonores. L'intensité d'une onde sonore est mesurée en décibels et s'exprime par l'équation suivante :

$$I_{dB} = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \quad (3)$$

où I_{ref} est une intensité de référence. Selon l'équation (2), l'intensité est proportionnelle au carré de la pression; l'intensité peut donc aussi s'exprimer ainsi :

$$\begin{aligned} I_{dB} &= 10 \log \frac{P^2}{P_{ref}^2} \\ &= 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \end{aligned} \quad (4)$$

Le choix de la pression de référence P_{ref} a été la source de beaucoup de confusion en acoustique. La pression de référence standard actuellement utilisée dans le domaine de l'acoustique sous-marine est $P_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$. Pour plus de clarté, la pression de référence employée pour l'expression d'une intensité devrait *toujours* être indiquée avec la mesure elle-même. Par exemple, on pourra exprimer un niveau de pression acoustique sous la forme « 160 dB re 1 μPa » où 1 μPa est la pression de référence. Il faut noter que la pression de référence pour la mesure des niveaux sonores dans un milieu sous-marin n'est pas la même que pour la mesure des sons dans l'air. La pression de référence pour la mesure de la pression acoustique dans l'air est de 20 μPa , ce qui s'exprime par une différence de $20 \log 20 = 26$ dB entre les mesures acoustiques dans l'air et dans l'eau.

On peut simplifier la quantification de la propagation des sons en la scindant en trois éléments : le niveau à la source (SL), le niveau de réception (RL) et la perte sonore par propagation (TL). Le niveau sonore à la source équivaut au niveau de pression acoustique près de la source d'émission du son, avant que le signal ne subisse de perte par la propagation. Les niveaux sonores à la source exprimés en décibels doivent mentionner la distance de référence employée lors de la mesure, car le niveau de pression acoustique est fonction de la distance avec la source d'émission. La distance de référence pour les niveaux sonores à la source est de 1 m. La mesure des niveaux sonores d'émission doit donc mentionner tant la distance de référence que la pression de référence, par exemple sous la forme « 180 dB re 1 μPa à 1 m ».

Le niveau de réception est la pression acoustique mesurée à un emplacement particulier. Si le niveau sonore de réception est exprimé en décibels, il doit toujours inclure la pression de référence, par exemple : « 160 dB re 1 μPa ». La perte sonore par propagation correspond au ratio entre le niveau sonore de réception et le niveau d'émission. Lorsque les niveaux d'émission et de réception sont mesurés en décibels, la perte par propagation est également mesurée en décibels et il s'agit de la différence entre le niveau d'émission et le niveau de réception :

$$TL_{dB} = SL_{dB} - RL_{dB} \quad (5)$$

Il est à noter que la perte par propagation est une mesure sans dimension car elle quantifie la différence entre la pression acoustique à la source et la pression reçue. La perte sonore par propagation est un phénomène complexe qui dépend de la bathymétrie locale, de la vitesse du son, de la distance, de la signature en fréquences de la source d'émission, de l'absorption et de la

diffraction (Medwin et Clay, 1998). Toutefois, lorsqu'il est possible de mesurer à la fois la pression acoustique d'émission et de réception, l'équation (5) permet de calculer la perte par propagation.

En acoustique sous-marine, il est souvent nécessaire de connaître la signature en fréquences d'un signal acoustique. Des bandes de fréquences d'un octave ou de $1/3$ d'octave sont fréquemment employées pour décrire le spectre des fréquences d'un signal. Un octave représente une augmentation ou une réduction de fréquence par un facteur de 2, alors que les centres des bandes de $1/3$ d'octave adjacentes présentent un rapport de $2^{1/3}$. Les centres des bandes de tiers d'octave typiques sont 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400 et 500 Hz. Pour calculer la puissance sonore (en dB re 1 μ Pa) dans un octave ou une bande de tiers d'octave, on établira d'abord le spectre de densité de la puissance – la distribution de la puissance sonore en fonction de la fréquence – puis on additionnera ces niveaux pour chacune des fréquences dans la bande étudiée. Pour les bandes d'un octave, l'étendue de fréquences pour la fréquence centrale f_0 va de $f_0(2^{-1/2})$ à $f_0(2^{1/2})$; pour les bandes de $1/3$ d'octave, l'étendue de fréquences pour la fréquence centrale f_0 va de $f_0(2^{-1/6})$ à $f_0(2^{1/6})$. Lorsque le niveau de pression acoustique est additionné pour toutes les fréquences présentes dans un signal, la puissance résultante est appelée le niveau de pression acoustique par large bande.

3.2 Méthodologie

La cartographie des champs acoustiques sous-marins a été générée par l'entremise du modèle MONM (Marine Operations Noise Model) de JASCO. Le MONM est un modèle acoustique à la fine pointe de la technologie intégrant une équation parabolique en fonction de la distance avec une fonction de calcul des ondes équivolumentiques. L'algorithme employé a été mis à l'essai avec des ensembles de données provenant de publications de recherche; il est conforme aux normes acceptées dans le domaine de la modélisation acoustique sous-marine. Ce modèle a été utilisé pour des contrats requérant l'évaluation précise du bruit découlant de travaux de construction sous-marins, de l'exploitation d'installations marines ainsi que de l'exploration sismique, et ce en divers endroits, notamment dans la région du Gully au large de la Nouvelle-Écosse, la mer de Beaufort, le bassin de la Reine-Charlotte en Colombie-Britannique et l'île de Sakhaline dans l'est de la Russie.

3.2.1 Modèle MONM (Marine Operations Noise Model)

L'algorithme principal du modèle MONM calcule des paramètres de perte sonore par propagation en fonction de la fréquence le long de sections coniques irradiant de diverses sources. La perte par propagation indique à quel point les niveaux sonores diminuent avec la distance à partir l'emplacement des sources sonores. La modélisation est effectuée par bande de tiers d'octave individuelle couvrant des fréquences de 10 Hz à 2 kHz, ce qui couvre à la fois la gamme de fréquences audibles par les mammifères marins et la partie du spectre sonore qui se propage de façon significative hors du voisinage immédiat de la source.

Le logiciel du modèle MONM extrait automatiquement, à partir de bases de données géoréférencées, les paramètres bathymétriques et acoustiques caractérisant le milieu dans chaque direction de propagation et intègre un algorithme de tessellation exclusif qui augmente la densité des pavés de modélisation loin de la source afin de permettre un calcul plus efficace pour la zone couverte. La grille des valeurs de perte par propagation produite par le modèle pour chaque

emplacement d'une source sonore est employée pour atténuer les valeurs du spectre sonore de la source de bruit correspondante, afin de calculer les niveaux sonores reçus à chaque point de la grille. Les valeurs pour toutes les fréquences sont ensuite additionnées pour calculer les niveaux sonores à large bande. Dans une étape suivante, le rééchantillonnage et l'addition des niveaux sonores générés par toutes les sources d'un scénario de modélisation permet de calculer le niveau de bruit global d'un scénario en divers points d'une grille régulière, ce qui permet ensuite de représenter les contours de propagation sur une carte de système d'information géographique (SIG). Le modèle peut soit générer ces contours à des intervalles réguliers, soit tracer les limites de niveaux sonores significatifs pour l'environnement biologique.

Le modèle MONM a été rigoureusement éprouvé par comparaison avec des mesures sur le terrain lors d'activités de construction sous-marines complexes. La figure 8 illustre un exemple démontrant l'exactitude du modèle lors de la prédiction de niveaux de bruit globaux découlant des activités de dragage et de pose de conduites par quatre navires dans une zone déterminée. Les spectres sonores d'émission de chacun des navires, qui avaient été mesurés individuellement et dans des endroits différents, ont été utilisés comme intrant dans le modèle MONM, en plus de mesures prises localement, soit de la colonne d'eau et de paramètres acoustiques du fond marin. Les niveaux sonores enregistrés, mesurés par une série de bouées acoustiques, ont permis de confirmer la validité des résultats fournis par le modèle, avec une marge d'erreur d'environ 2 dB.

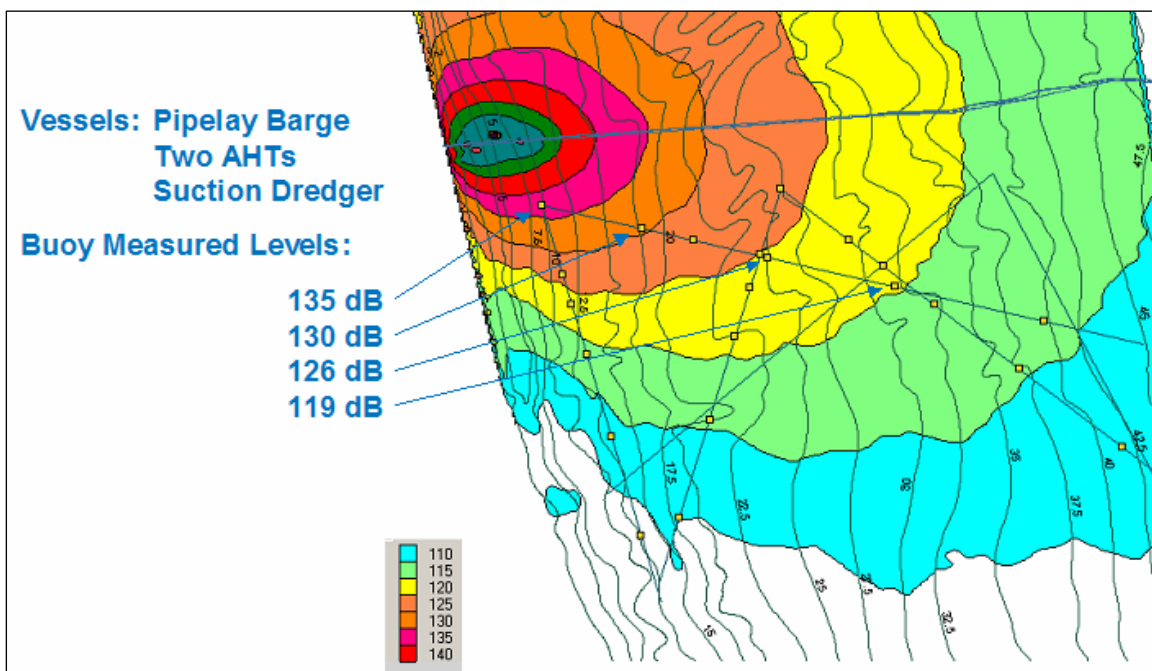


Figure 8: Exemple de comparaison entre les niveaux sonores prévus et mesurés

3.3 Types de bruit associés au projet de terminal méthanier d'Énergie Cacouna et critères d'impact acoustique pertinents

Les bruits sous-marins produits au cours de la construction et de l'exploitation du terminal méthanier d'Énergie Cacouna peuvent être classés en deux grandes catégories. Les bruits « d'impact », soit les sons de courte durée produits de façon intermittente ou à intervalles réguliers, par exemple le bruit du battage de palplanches. Les bruits « continus », soit les sons produits pendant de longues périodes, par exemple le bruit d'une génératrice. Les bruits de sources mobiles, par exemple les navires, peuvent être continus, mais pour un animal stationnaire, ces sons sont « transitoires », c'est-à-dire que leur niveau sonore augmente avec l'approche du navire, puis diminue avec son éloignement. Des études ont démontré que les animaux marins réagissent différemment à ces deux catégories de bruits. On prévoit que les effets de masquage seront moins marqués pour les sons d'impact ou transitoires que pour les sons continus.

La mesure des sons pour l'évaluation d'impacts potentiels sur les organismes marins est normalement indiquée en terme de pression acoustique efficace. La taille de la fenêtre affecte grandement le niveau sonore efficace mesuré, c'est-à-dire de 2 à 12 dB (Madsen 2005). Certains considèrent que les mesures de crête à crête et de densité du flux d'énergie sont mieux adaptées aux sons transitoires ou d'impact, puisque les pressions acoustiques élevées peuvent avoir un impact sur les animaux, et que la mesure de la densité du flux d'énergie équivaut à l'énergie reçue par l'animal par unité de surface (Madsen 2005). Madsen (2005) a démontré que divers sons ayant les mêmes mesures de crête à crête pouvaient présenter des valeurs de flux d'énergie et de niveau sonore efficace très différentes. Les critères d'impact relatifs aux perturbations et aux dommages potentiels pour les mammifères marins sont inconnus actuellement pour ce qui est des mesures de crête à crête et de flux d'énergie des sons. Les critères relatifs aux niveaux de pression acoustique efficace ont été estimés par le National Marine Fisheries Service (NMFS) des États-Unis. Par conséquent, en l'absence de critères canadiens reconnus, les critères d'impact du NMFS exprimés sous forme de pression acoustique efficace seront employés pour l'évaluation des résultats de la modélisation pour le terminal méthanier d'Énergie Cacouna, tant pour les bruits d'impact que pour les bruits continus.

3.3.1 Bruit continu

Les bruits continus se produisent pendant de longues périodes. Les bruits continus provenant de sources fixes sont associés aux pompes sous-marines, aux génératrices et aux activités de forage. L'utilisation d'un vibrofonneur pour la construction des assemblages de caissons au terminal méthanier d'Énergie Cacouna produira des bruits continus, bien qu'intermittents et de courte durée. Le remplissage des caissons avec de la roche concassée et l'installation des dispositifs de protection contre l'affouillement autour des caissons pourront aussi produire des bruits continus à des emplacements fixes pendant une période donnée. On prévoit que la source principale de bruits continus à un emplacement fixe pour la construction des caissons sera l'enfoncement des pieux à vis et des palplanches dans le fond marin au moyen du vibrofonneur.

Les bruits transitoires continus sont produits par des sources sonores en mouvement, tel que les navires. Les niveaux acoustiques de ces sons augmentent habituellement lorsque la

source approche d'un emplacement de réception, puis diminuent à mesure qu'elle s'en éloigne. Le passage d'un méthanier est considéré comme une source de bruit transitoire continu.

Selon les normes NMFS en vigueur, les cétacés peuvent être perturbés par des bruits continus d'un niveau dépassant le critère de 120 dB re 1 μ Pa (niveau efficace). On a pu observer une réaction de la part des cétacés à fanons en présence de bruits d'un niveau égal ou supérieur à 120 dB provenant de navires de forage (Richardson *et al.* 1990). Les mêmes critères sont actuellement utilisés pour les pinnipèdes. Selon la littérature consultée par Richardson *et al.* (1995), la plupart des cétacés à dents de petite et de moyenne taille, lorsqu'ils sont exposés à des bruits sous-marins prolongés ou répétés, sont peu susceptibles de quitter la zone si le niveau sonore global reçu est inférieur à 140 dB re 1 μ Pa. Le critère de 120 dB re 1 μ Pa (niveau efficace) a été adopté pour la présente analyse.

3.3.2 Bruit d'impact

Les bruits d'impact sont de courte durée et se produisent de façon intermittente ou à intervalles réguliers. L'enfoncement de palplanches à l'aide d'un marteau de battage et les chocs de canon à air utilisés pour la prospection sismique sont des exemples de bruits sous-marins définis comme des sons d'impact. Il s'agit de sons brefs, dont les niveaux de crête sont beaucoup plus élevés que ceux de la plupart des bruits continus ou intermittents. Les bruits générés par le projet de terminal méthanier d'Énergie Cacouna seront, pour la plupart, des bruits continus. Cependant, le projet pourra exiger l'utilisation d'un marteau de battage, en guise de mesure de contingence, pour l'enfoncement des palplanches dans les derniers mètres d'argile. L'utilisation du marteau de battage sera réservée comme mesure de contingence dans le cas peu probable où il sera requis pour achever l'enfoncement des palplanches.

Pour les bruits d'impact, un niveau sonore de large bande égal ou supérieur à 180 dB re 1 μ Pa (niveau efficace) sera employé comme critère de préoccupation potentielle pour la perte d'ouïe temporaire ou permanente (harcèlement de niveau A) chez les cétacés (Madsen 2005; NMFS 2003). Le harcèlement de niveau A est défini comme suit : « tout acte de poursuite, de tourment ou de gêne qui comporte un potentiel de blessure à un mammifère marin ou à une population de mammifères marins dans l'environnement naturel. » (NRC 2003). Le critère de réduction du potentiel de harcèlement de niveau A découlant de bruits d'impact pour les pinnipèdes est l'exposition à des niveaux sonores égaux ou supérieurs à 190 dB re 1 μ Pa (niveau efficace).

Un niveau sonore à large bande égal ou supérieur à 160 dB re 1 μ Pa (niveau efficace) est actuellement le meilleur estimé disponible pour l'indication d'une perturbation potentielle des comportements (harcèlement de niveau B) chez les mammifères marins. Le harcèlement de niveau B est défini comme suit : « tout acte de poursuite, de tourment ou de gêne qui comporte un potentiel de perturbation pour un mammifère marin ou une population de mammifères marins dans l'environnement naturel en provoquant une dégradation des modèles comportementaux, notamment la migration, la respiration, l'allaitement, la reproduction, l'alimentation et la mise à l'abri, mais qui ne pose pas de potentiel de blessure pour un mammifère marin ou une population de mammifères marins. » (NRC 2003).

3.3.3 Bruit intermittent

Le bruit intermittent est un son discontinu ou de niveau très variable, mais qui n'est pas un bruit d'impact. Le critère de 120 dB re 1 μ Pa (niveau efficace) sélectionné pour l'évaluation des sons continus sera employé pour évaluer l'impact des bruits sous-marins intermittents. Toutefois, on considère que l'impact potentiel de ces sons sur les mammifères marins est réduit en raison de la nature discontinue du bruit.

3.3.4 Gamme de fréquences

Pour les bélugas, les fréquences audibles varient entre environ 40 Hz et 150 kHz, leur sensibilité maximale se situant de 5 à 100 kHz (Richardson et al. 1995). Il est à noter que les critères d'impact ne mentionnent pas de bande de fréquences mais imposent plutôt une limite relative aux niveaux sonores à *large bande*. Il est donc raisonnable de considérer la gamme de fréquences des bruits qui pourront être générés par les activités de construction et d'exploitation du terminal méthanier d'Énergie Cacouna dans le contexte de la capacité auditive des bélugas. Aucun audiogramme n'existe pour les autres espèces de cétacés que l'on retrouve habituellement dans le Saint-Laurent. On suppose que les rorquals communs sont capables d'entendre des sons de 14 Hz à 1 kHz, bien que la plus grande partie de leurs communications se produise à l'échelle des 20 Hz, mais aucun renseignement n'est disponible sur leur seuil auditif (Richardson, 1995).

Les principales sources de bruit en provenance des navires sont les hélices, les machines de propulsion et les autres équipements, qui peuvent générer un bruit significatif à basse fréquence mais peu de bruit aux fréquences supérieures à 5 kHz où le bruit causé par le vent et les vagues domine le spectre sonore océanique (Wenz, 1962). En outre, le bruit des hautes fréquences est fortement atténué dans l'eau salée : par exemple, à 10 kHz, la perte sonore par propagation est de 1,3 dB/km; à 100 kHz, elle est de 20 dB/km (Wenz, 1962). Les bruits en provenance de navires est dominant sous les 300 Hz et dépasse rarement les 1000 Hz (Wenz, 1962).

Les plus grands navires produisent des bruits de plus basse fréquence en raison de la vitesse plus faible de leurs hélices; les navires de moyenne à grande taille produisent des bruits dont les plus forts sont inférieurs à 50 Hz (Richardson et al. 1995). Les bruits de cavitation et d'écoulement peuvent aller jusqu'à 100 kHz, mais atteignent un pic entre 50 et 150 Hz (Ross 1976); encore une fois, les sons de plus haute fréquence seraient fortement atténués. Les autres équipements à bord peuvent produire des sons atteignant quelques kilohertz, mais il ne s'agit pas des bruits dominants en provenance des navires. Les petits moteurs hors bord peuvent produire des bruits de fréquence très élevée; cependant, ce type de bruit n'est pas pertinent à ce projet. En général, les bruits de construction ne forment une partie significative du spectre sonore que pour les sons d'une fréquence inférieure à 1 kHz. À l'occasion, les machines peuvent produire des sons dont les harmoniques peuvent atteindre 6 kHz (Richardson, 1995).

Le modèle MONM est efficace pour caractériser les pertes sonores par propagation pour les fréquences entre 100 Hz et 2 kHz; aux fréquences supérieures à cette gamme, l'emploi d'un autre type de modèle (par exemple un modèle à traçage de rayon) serait nécessaire pour évaluer correctement la perte par propagation. Comme les principales sources sonores de préoccupation pour le terminal méthanier d'Énergie Cacouna concernent les bruits en provenance des navires, des activités de construction et d'autres sources anthropiques, lesquels dominent le spectre sonore sous les 1 à 2 kHz mais ne produisent pas de bruit significatif dans les hautes fréquences, le

modèle MONM permet une caractérisation suffisante des effets potentiels de la construction et de l'exploitation du terminal sur les populations de mammifères marins présentes dans la région selon les critères d'impact discutés ci-dessus. En outre, il faut noter que le bruit ambiant pour les fréquences supérieures à 1 kHz provient en majeure partie du vent, des vagues et des fortes précipitations, et non de l'activité humaine.

En conclusion, bien que l'ouïe des bélugas puisse capter des fréquences aussi élevées que les 100 kHz, on prévoit que les activités de construction et d'exploitation du terminal méthanier d'Énergie Cacouna ne produiront des bruits significatifs qu'à des fréquences généralement inférieures à 1 kHz. Par conséquent, le modèle MONM permettra un calcul exact des niveaux sonores à large bande requis pour l'évaluation selon les critères d'impact.

3.4 Environnement géoacoustique et océanographique

Pour réaliser la modélisation de la propagation sonore, des données concernant l'environnement océanique de la zone sont nécessaires. Les paramètres nécessaires comprennent les profils géoacoustiques du plancher sous-marin de la région à l'étude, les profils saisonniers de vitesse du son et la bathymétrie. Les propriétés géoacoustiques utilisées dans la modélisation sont résumées dans le Tableau 7 et expliquées dans les sections suivantes.

Tableau 7: Sommaire des propriétés environnementales utilisées dans la modélisation de la propagation

Propriétés géoacoustiques		
	Couche 1 (sable silteux)	Couche 2 (roche calcaire de fond)
Vitesse du son :	1646 m/s	3000 m/s
Gradient de vitesse du son :	1,3 m/s /m	0 m/s/m
Densité :	1,8 g/cm ³	2,4 g/cm ³
Atténuation :	1,56 dB/λ	0,10 dB/λ
Onde équivolumentique		
Vitesse :	350 m/s	
Atténuation :	4,6 dB/λ	
Vitesse du son dans l'eau	Profondeur (m)	c (ms)
Été :	1,8	1475,0
	13,5	1460,8
	35,8	1461,1
	38,4	1455,0
Automne :	1,6	1467,6
	13,3	1464,9
	16,0	1462,9
	25,0	1462,9

3.4.1 Propriétés géoacoustiques

Les sédiments du lit du fleuve à proximité immédiate du port de Gros Cacouna sont un mélange d'argile, de limon, de sable et de gravier. Les proportions dans les granulométries peuvent varier mais les valeurs moyennes étaient de 13 % d'argile, 38 % de limon, 48 % de sable et 2 % de gravier (Golder Associés Ltée, 2005). Ce mélange correspond plus particulièrement au « sable silteux » (Hamilton, 1980), lequel est constitué de 57,6 % de sable, 28,9 % de limon et 13,5 % d'argile; donc, les données de densité, de porosité et de vitesse du son pour le sable silteux que l'on retrouve dans Hamilton (1980), ont été utilisées comme intrant pour le modèle du plancher sous-marin. Des carottes indiquent que les 50 premiers mètres au moins consistent en un mélange de sédiments (Sandwell Engineering, 2005). Le modèle a donc été installé en présumant qu'une couche de 50 m de sédiments silteux recouvrait l'assise rocheuse et en utilisant les valeurs d'Hamilton (1980) pour le sable silteux et de Jensen (2000) pour l'assise rocheuse.

3.4.2 Vitesse du son

La vitesse du son a été calculée (Mackenzie 1981) d'après les profils de CTP (conductivité, température, profondeur) effectués dans la région pendant les mesures de perte par propagation. Au cours de l'étude sur le terrain, 14 profils de CTP ont été effectués à différents endroits près de l'emplacement projeté du port. Les profils de vitesse du son calculés à partir de des données CTP ont été examinés et quelques-uns ont été éliminés pour raison d'anomalies dans les données, d'emplacement non représentatif de la région de modélisation, ou d'eau peu profonde près du site d'échantillonnage. Les résultats indiquent quatre profils de vitesse du son tels que montrés à la Figure 9(a) et dont on a fait la moyenne pour produire le profil de la Figure 9(b). Un profil représentatif de la vitesse du son, établi en fonction du profil moyen de la vitesse du son, a été utilisé comme intrant dans le MONM afin de modéliser la perte par propagation pour les scénarios prévus à l'automne.

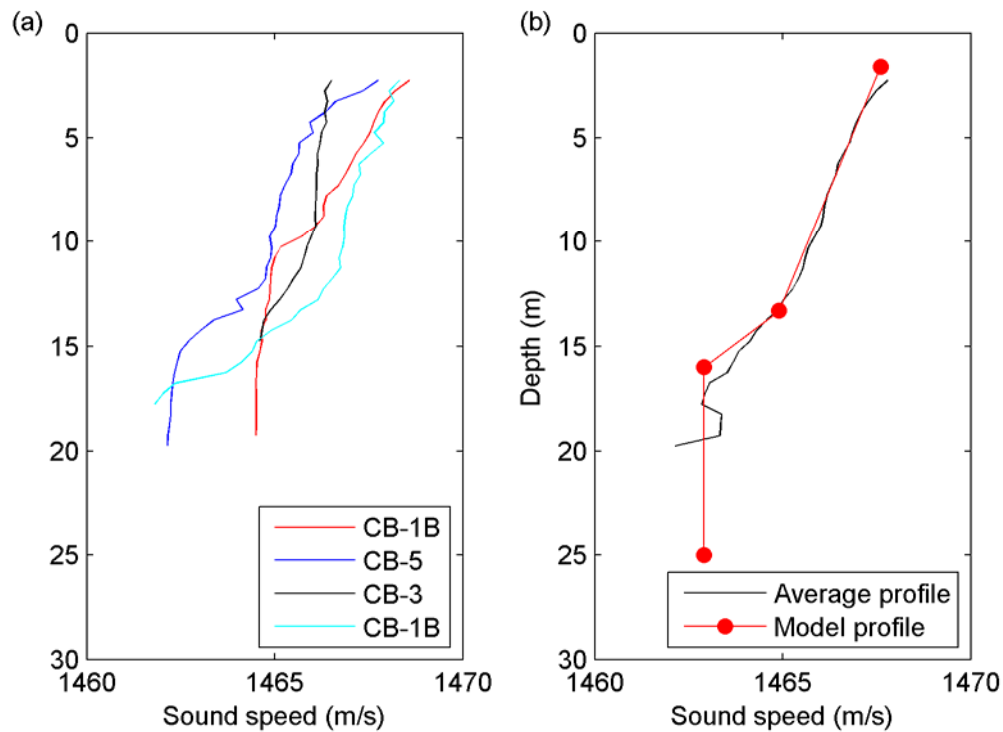


Figure 9: (a) Vitesse du son (*sound speed*) en fonction de la profondeur (*depth*) provenant de quatre profils CTP, (b) Moyenne des profils de vitesse du son présenté en (a) (*average profile*), et profil approximatif utilisé comme donnée d'entrée dans le modèle (*model profile*).

Il est prévu que la construction s'effectuera tard au printemps, à l'été et au début de l'automne. La période estivale a été choisie comme la saison représentative pour la modélisation du scénario de construction. Un profil de la vitesse du son pour les mois d'été était une donnée d'entrée nécessaire dans le modèle. Des profils CTP qui ont fait l'objet d'un contrôle de la qualité sont disponibles auprès du Service des données sur le milieu marin (SDMM) du ministère des Pêches et des Océans Canada. Cependant, il n'y avait qu'un seul profil disponible pour la région, à 47° 59' 53.880" N, 69° 33' 49.721" O, effectué le 19 juillet 2005. On peut voir le profil de la vitesse du son calculé à partir de cet unique jeu de données du SDMM à la Figure 10, de même que les points choisis pour représenter la forme que prendra le profil de la vitesse du son à l'été dans le modèle.

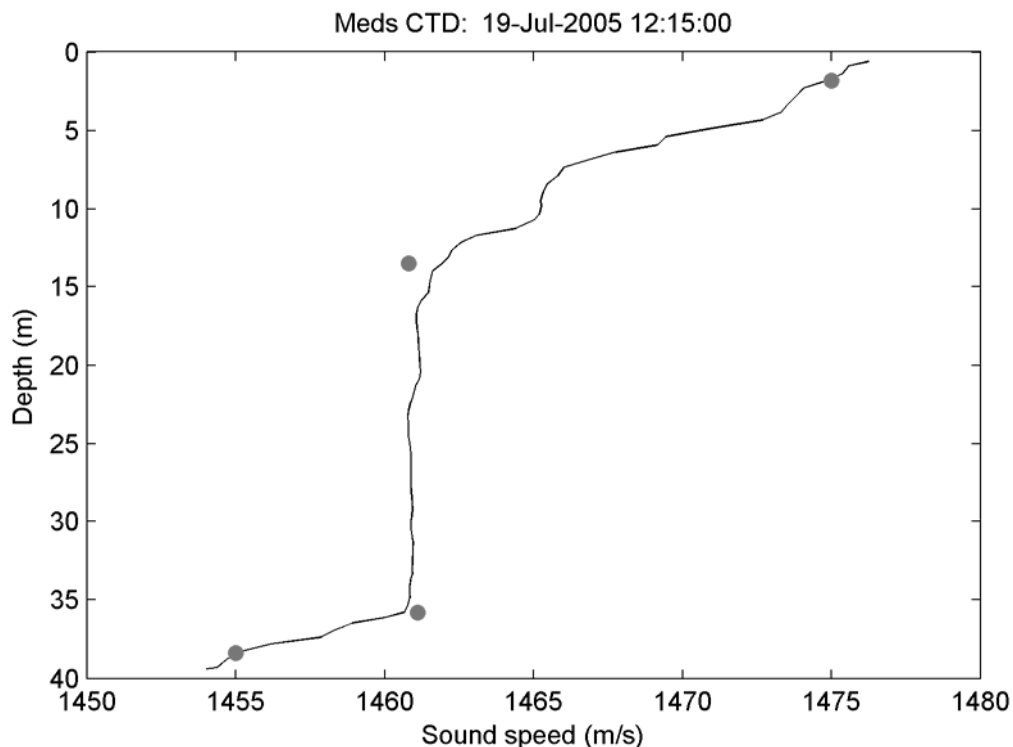


Figure 10 : Vitesse du son (*sound speed*) en fonction de la profondeur (*depth*) calculée d'après les données CTP du SDMM. Les points gris sont les données utilisées pour représenter la vitesse du son dans le MONM au cours de l'été

3.4.3 Bathymétrie

Deux jeux de données bathymétriques provenant du Nautical Data, Inc. ont été combinés pour couvrir la région entre 47° 44' 11" N et 48° 14' 35" N et 69° 13' 51" O et 69° 58' 28" O approximativement. Les jeux de données, ayant initialement une résolution horizontale entre 60 et 90 m, ont été linéairement interpolés sur une grille régulière d'une résolution de 50 m pour être utilisés comme données d'entrée dans le MONM. Les contours bathymétriques espacés de 50 m sont tracés en bleu sur les cartographies des bruits sous-marins.

3.5 Comparaison avec les mesures de perte sonore par propagation

Une comparaison de la perte sonore par propagation mesurée et modélisée a été utilisée pour valider le choix des paramètres géophysiques utilisés dans le modèle. Les profils de vitesse du son ont été mesurés directement au cours de la prise de mesures de la perte par propagation. On a cependant déduit les propriétés géoacoustiques pour la région à partir des données accessibles au public.

Le modèle MONM a été configuré à l'aide d'un récepteur localisé à l'emplacement du système d'enregistrement autonome et d'un émetteur localisé aux emplacements d'émission des tonalités. Le niveau sonore transmis, qui varie en fonction de la fréquence, est montré à la Figure 11 et a été mesuré par JASCO Research à l'aide d'un hydrophone installé près de l'émetteur. Les figures C-1 à C-6 (annexe C) montrent la perte par propagation modélisée et mesurée par bande de $1/3$ d'octave pour chaque emplacement où la propagation a été mesurée.

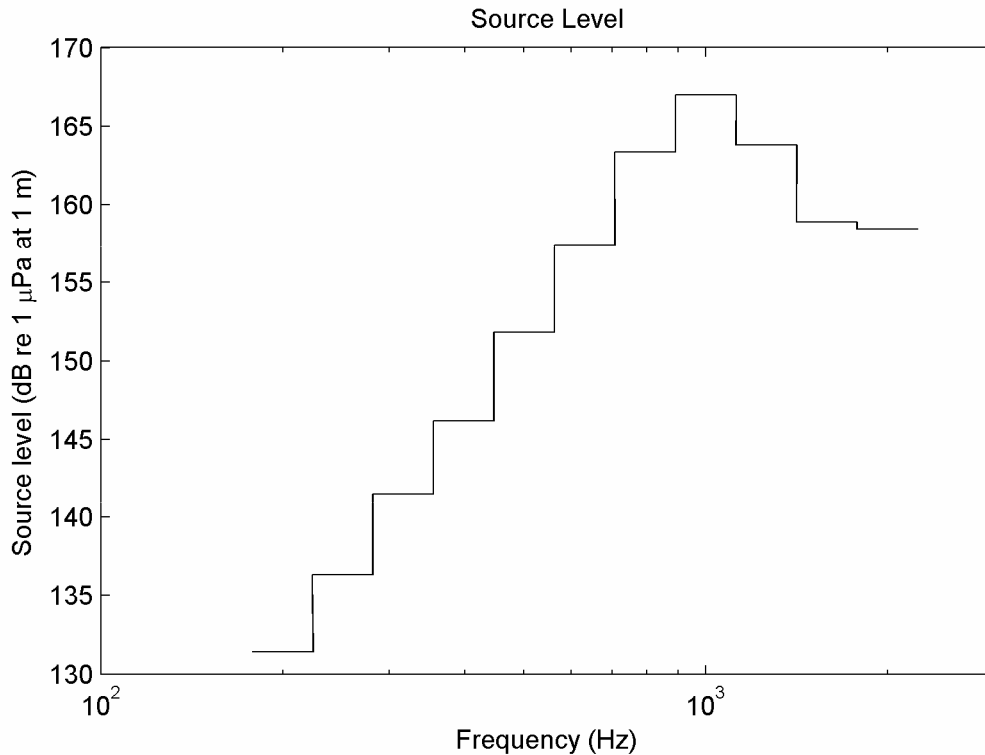


Figure 11: Niveau sonore à la source (*source level*) en fonction de la fréquence (*frequency*) pour le transducteur utilisé dans les expériences de perte par propagation.

La concordance entre la perte par propagation modélisée et mesurée par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave est généralement bonne, comportant des différences typiquement entre 2 et 5 dB et quelques valeurs atypiques. Les niveaux sonores mesurés et modélisés par large bande sont présentés à la Figure C-7 en fonction de la distance. Les niveaux sonores mesurés et modélisés par large bande concordent très bien, avec une différence maximale de 3,5 dB et une différence moyenne de 0,9 dB, suggérant que le modèle peut prévoir avec exactitude les niveaux sonores reçus dans cette région lorsqu'il est configuré en utilisant les paramètres géoacoustiques indiqués à la Section 3.4.1.

3.6 Résultats de la modélisation – scénarios de transport maritime

Deux scénarios de transport maritime ont été modélisés : un méthanier en transit entre l'île Rouge et le port et un méthanier durant une opération d'amarrage au port. Les niveaux de pression acoustique ont été modélisés au-dessus de la zone $47^{\circ} 44' 11''$ N et $48^{\circ} 14' 35''$ N et $69^{\circ} 13' 51''$ O et $69^{\circ} 58' 28''$ O.

3.6.1 Scénario de transit du méthanier

Le scénario de transit du méthanier a été modélisé en utilisant des données de vitesse du son pour la fin de l'été/début de l'automne, bien que les transits se produiront à longueur d'année. Le méthanier a été modélisé en transit environ à mi-chemin entre l'île Rouge et le continent ($48^{\circ} 02' 02.145''$ O, $69^{\circ} 30' 35.000''$ N), correspondant à la route de navigation prévue. Les

procédures opérationnelles prévues exigent un remorqueur servant d'escorte, lequel a été inclus comme une source de bruit supplémentaire dans le scénario modélisé.

Il n'y a pas de mesure disponible des bruits sous-marins produits par les méthaniers. Cependant, certains travaux ont été effectués afin de déterminer les bruits sous-marins provenant de superpétroliers. Les niveaux d'émission utilisés dans la modélisation sont établis en fonction de formules empiriques.

Les grands navires commerciaux et les superpétroliers ont de puissants moteurs et de grosses hélices à faible vitesse de rotation. Ces navires produisent des niveaux sonores élevés surtout à de basses fréquences. À ces fréquences, le bruit prédominant est celui de la cavitation de l'hélice joint à des tonalités dominantes générées par la fréquence des pales de l'hélice. Une expression empirique (Junger, 1987) pour le niveau spectral de l'émission (bande passante de 1 Hz) dans la gamme de fréquences entre 100 Hz et 10 kHz est

$$SL = 163 + 10 \log_{10} \frac{BD^4 N^3}{f^2} \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa} \quad (6)$$

où B = le nombre de pales, D = le diamètre de l'hélice en mètres, N = le nombre de révolutions de l'hélice par seconde et f = la fréquence en Hz. Pour les hélices carénées, la constante est environ 7 dB plus élevée.

Les niveaux sonores à la source du méthanier par bande de $1/3$ d'octave ont été calculés en utilisant l'équation (6). Les niveaux par bande de $1/3$ d'octave du remorqueur proviennent de mesures effectuées par Jasco Research sur le remorqueur Katun. Les niveaux d'émission par bande de $1/3$ d'octave pour les deux navires apparaissent au tableau 8.

Tableau 8: Niveaux d'émission sonores de large bande, profondeurs des sources sonores et niveaux d'émission sonores par bande de $1/3$ d'octave utilisés dans le scénario de transit du méthanier

Méthanier demi vitesse – 45 tr/min (calculé)		Katun (remorqueur) (mesuré)
Niveau sonore par large bande (dB re 1 μ Pa à 1m)		
174,6		184,4
Profondeur de la source sonore (m)		
8,0		3,2
Fréquence centrale (Hz)	Niveau sonore par bande de $1/3$ d'octave (dB re 1 μ Pa à 1m)	
10	163,6	126,4
12,5	163,6	122,4
16	163,6	121,2
20	163,6	127,0
25	163,6	163,7
31,5	163,6	146,8
40	163,6	125,1
50	163,6	138,0
63	163,6	109,7
80	163,6	130,2
100	163,6	121,7
125	161,7	110,5
160	159,5	119,4
200	157,6	131,0
250	155,7	135,7
315	153,7	137,8
400	151,6	140,3
500	149,6	150,4
630	147,6	150,4
800	145,6	142,9
1000	143,6	139,2
1250	141,7	144,4
1600	139,5	138,2
2000	137,6	139,4

La Figure D - 1 est un tracé de contours des niveaux sonores reçus dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de transit du méthanier. La superficie à l'intérieur de chaque ligne de contour (incluant des zones présentant des niveaux sonores plus élevés ou égaux au niveau indiqué) ainsi que la distance moyenne de chaque ligne de contour sont indiquées au tableau 9.

Le bruit provenant des navires est classifié comme un son continu de sorte que le contour 120 dB constitue le critère d'impact acoustique pertinent. Le niveau sonore descend sous les 120 dB pour les distances supérieures à 1,8 km du navire et la zone dans laquelle les niveaux sonores dépassent 120 dB est de 10 km².

Tableau 9: Sommaire des résultats du scénario de transit du méthanier

Ligne de contour(dB)	Superficie (km ²)	Distance moyenne (m)
110	46	3900
120	10	1800
130	2	700

3.6.2 Scénario d'amarrage du méthanier

Le scénario d'amarrage du méthanier a été modélisé au cours de l'automne en utilisant le profil de la vitesse du son mesuré à l'automne. Le méthanier a été modélisé à l'emplacement (47° 56' 27,332" O, 69° 31' 10,367" N) avec quatre remorqueurs (un à chaque coin de la zone d'amarrage). Durant la saison des glaces, il y aura quatre remorqueurs, un effectuant la gestion des glaces et les trois autres fournissant l'aide à l'amarrage. En dehors de la saison des glaces (printemps, été et automne), trois remorqueurs fournissant l'aide à l'amarrage seront probablement nécessaires, un quatrième se tenant prêt en cas d'urgence seulement. Les niveaux d'émission sonore utilisés dans le scénario de transit du méthanier ont été utilisés comme niveaux d'émission du méthanier, et les niveaux d'émission de Katun ont été utilisés comme niveaux d'émission du remorqueur, tel que spécifié au tableau 8.

La Figure D - 2 est un tracé de contours des niveaux sonores reçus dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario d'amarrage du méthanier. La superficie à l'intérieur de chaque ligne de contour (incluant des zones présentant des niveaux sonores plus élevés ou égaux au niveau indiqué) ainsi que la distance moyenne de chaque niveau de contour sont indiquées au tableau 10.

Le bruit du navire est classifié comme un son continu de sorte que le contour 120-dB constitue le critère d'impact acoustique pertinent. Le niveau sonore descend sous les 120 dB pour les distances supérieures à 0,7 km du navire et la zone dans laquelle les niveaux sonores dépassent 120 dB est de 2 km².

Tableau 10: Sommaire des résultats du scénario d'amarrage des méthaniers

Ligne de contour (dB)	Superficie (km ²)	Distance moyenne (m)
110	5	1300
120	2	700

3.7 Résultats de la modélisation – Scénarios de construction

Deux scénarios de construction maritime ont été modélisés : le vibrofonçage et le battage des palplanches. Les deux scénarios ont été modélisés durant la saison estivale. En plus de l'équipement pour enfoncer les palplanches (par vibrofonçage ou par battage), deux barges et un remorqueur ont été inclus dans les deux scénarios.

Les niveaux d'émission par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave du vibrofonçeur ont été calculés à partir de mesures effectuées par Subacoustech, Ltd. lors d'opérations dans la rivière Arun, en Angleterre (Nedwell and Edwards, 2002). À Gros Cacouna, le lit du fleuve étant très meuble, il est possible que les niveaux d'émission utilisés soient trop élevés, résultant en évaluations exagérément conservatrices des émissions sonores pouvant réellement survenir au cours de la construction. Les niveaux d'émission par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave de l'enfoncement des palplanches par battage ont été calculés à partir de mesures effectuées par Greeneridge Sciences, Inc. lors d'opérations sur la Plateau néo-écossais (Greene, 1999). Les niveaux d'émission de la barge proviennent de mesures effectuées par JASCO sur la SEMAC 1, une barge de pose. Les niveaux d'émission du remorqueur proviennent du Katun. Tous les niveaux d'émission utilisés dans la modélisation des scénarios sont résumés au tableau 11. Les sources sonores ont toutes été localisées à l'emplacement du port (47° 56' 30,883" N, 69° 31' 05,920" O).

Tableau 11 : Niveaux d'émission sonores de large bande, profondeurs des sources sonores et niveaux d'émission sonores par bande de $1/3$ d'octave utilisés dans les scénarios de construction.

	Katun (remorqueur)	Semac (barge)	Vibrofonceur	Marteau pour battage (mesure de contingence)
Niveau sonore par large bande (dB re 1 μ Pa à 1m)				
	184,4	179,3	164,3	216,0
Profondeur des sources sonores (m)				
	3,2	9,6	5,0	5,0
Fréquence centrale (Hz)	Niveau par bande de $1/3$ d'octave (dB re 1 μ Pa à 1m)			
10	126,4	159,7	126,4	--
12,5	122,4	151,8	122,4	202,0
16	121,2	157,8	121,2	192,0
20	127,0	158,1	127,0	187,0
25	163,7	161,5	163,7	184,0
31,5	146,8	163,2	146,8	186,0
40	125,1	166,0	125,1	188,0
50	138,0	165,8	138,0	184,0
63	109,7	164,6	109,7	188,0
80	130,2	166,3	130,2	198,0
100	121,7	163,4	121,7	200,0
125	110,5	163,0	110,5	204,0
160	119,4	163,4	119,4	208,0
200	131,0	163,6	131,0	209,5
250	135,7	176,9	135,7	209,0
315	137,8	162,2	137,8	204,0
400	140,3	160,8	140,3	204,5
500	150,4	161,3	150,4	205,0
630	150,4	160,5	150,4	198,0
800	142,9	159,5	142,9	195,0
1000	139,2	155,8	139,2	194,0
1250	144,4	150,5	144,4	195,0
1600	138,2	147,8	138,2	194,0
2000	139,4	145,6	139,4	192,0

3.7.1 Scénario d'enfoncement des palplanches par vibrofonçage

La Figure D - 3 est un tracé de contours des niveaux sonores reçus dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de vibrofonçage. La superficie à l'intérieur de chaque ligne de contour (incluant des zones présentant des niveaux

sonores plus élevés ou égaux au niveau indiqué) ainsi que la distance moyenne de chaque niveau de contour sont indiquées au tableau 12.

Le son provenant du vibrofonçage est classifié comme un son continu de sorte que le contour 120-dB constitue le critère d'impact acoustique pertinent. Le niveau sonore descend sous les 120 dB pour les distances supérieures à 1,6 km du site de vibrofonçage, et la zone dans laquelle les niveaux sonores dépassent 120 dB est de 7 km².

Tableau 12 : Sommaire des résultats du scénario de vibrofonçage.

Ligne de contour (dB)	Superficie (km ²)	Distance moyenne (m)
110	29	3400
120	7	1600
130	2	700

3.7.2 Scénario d'enfoncement des palplanches par battage

La Figure D - 4 est un tracé de contours des niveaux sonores reçus ans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario d'enfoncement des palplanches par battage. La superficie à l'intérieur de chaque ligne de contour (incluant des zones présentant des niveaux sonores plus élevés ou égaux au niveau indiqué) ainsi que la distance moyenne de chaque niveau de contour sont indiquées au tableau 13.

Le bruit provenant du battage est classifié comme un son d'impact; les contours de 160 et 180 dB démontrent donc des niveaux correspondant au critère d'impact acoustique pertinent pour les mammifères marins. Le niveau sonore descend sous les 180 dB pour les distances supérieures à 130 m de l'émission et la zone dans laquelle les niveaux sonores dépassent 180 dB est de 0,05 km².

Tableau 13 : Sommaire des résultats du scénario de battage

Ligne de contour (dB)	Superficie (km ²)	Distance moyenne (m)
110	324	13500
120	225	10800
130	116	7800
140	40	4000
150	14	2300
160	2,9	1100
170	0,55	430
180	0,050	130
190	0,006	46

4 Résumé

Des relevés acoustiques sous-marins et une modélisation de la propagation du son spécifique au site a été menée de façon à évaluer les impacts potentiels du bruit sur les mammifères marins découlant de la construction et des opérations subséquentes d'Énergie Cacouna relativement au terminal méthanier projeté.

Les niveaux sonores ambiants moyens à large bande ont été déterminés à partir des données mesurées au cours de périodes peu bruyantes, c'est-à-dire, des périodes durant lesquelles le bruit généré par l'écoulement de l'eau près de l'hydrophone était minimal et il n'y avait pas de source sonore d'origine anthropique identifiable comme du trafic maritime à proximité. Les niveaux sonores moyens du bruit ambiant à large bande varient entre :

- 89,6 et 101,6 dB re 1 μ Pa dans la région avoisinant Gros Cacouna et
- 104,0 et 108,7 dB re 1 μ Pa près de l'île Rouge.

Une modélisation acoustique utilisant des données propres au site et validée par des mesures de la perte sonore par propagation a été effectuée pour évaluer les impacts possibles du bruit sous-marin provenant de quatre scénarios :

- le transit du méthanier,
- l'amarrage du méthanier,
- l'enfoncement des palplanches par vibrofonçage, et
- l'enfoncement des palplanches par battage.

Les distances moyennes pour le critère 120 dB utilisé pour évaluer les impacts découlant du vibrofonçage, du transit et de l'amarrage du méthanier étaient respectivement de 1 600 m, 1 800 m et 700 m. Les critères de 190, 180 et de 160 dB ont été appliqués pour évaluer les impacts potentiels de l'enfoncement des palplanches par battage, une activité considérée comme une mesure de contingence. Pour ces trois critères, les distances moyennes étaient respectivement de 46 m, 130 m et 1 100 m.

5 Bibliographie

- Collins, M.D. (1993) "A split-step Pade solution for the parabolic equation method." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, pages 1736 à 1742.
- Golder Associates Ltd. (2005) Baseline summary - Cores and bathymetry : Reference Study.
- Gosselin, J.-F., Measures, L. (2002) Beluga whale population of the estuary. *St. Lawrence Vision 2000* (Monitoring the state of the St. Lawrence River, 15) 6 pp.
- Greene, C. R. Jr. (1999) Piledriving and vessel sound measurements during installation of a gas production platform near Sable Island, Nova Scotia, during March and April, 1998. Greeneridge Sciences, Inc. Final Report 205-2.
- Hamilton, E. L. (1980) Geoacoustic modeling of the sea floor. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68(5) : 1313:1340.
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., et Schmidt, H. (2000) Computational Ocean Acoustics. AIP Press, New York.
- Junger, M. C. (1987) "Shipboard Noise: Sources, Transmission, and Control." Proceedings of NOISE-CON 87. pp27 – 38.
- Lesage, V., Barrette, C., Kingsley, M.C.S., and Sjare, B. (1999) The effect of vessel noise on the vocal behaviour of belugas in the St. Lawrence River Estuary, Canada. *Marine Mammal Science* 15(1): 65-84.
- Mackenzie, K. (1981) Nine-term equation for the sound speed in the oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70(3) : 807-812.
- Madsen, P.T. (2005) Marine mammals and noise: Problems with root mean square sound pressure levels for transients. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117(6) : 3952-3957.
- Medwin, H., and Clay, C. S. (1998) Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, Toronto.
- Nedwell, J., and Edwards, B. (2002) Measurements of underwater noise in the Arun River during piling at County Wharf, Littlehampton. Subacoustech, Ltd. Report 513 R 0108.
- NOAA (2005) Saguenay-St. Lawrence Marine Park, Canada.
<http://effectivempa.noaa.gov/sites/saguenay.html>
- NMFS (2003) Taking marine mammals incidental to conducting oil and gas exploration activities in the Gulf of Mexico. Federal register 68(41): 9991-9996.
- NMFS. (2000) Taking and importing marine mammals; Taking marine mammals incidental to Naval activities/Proposed rule. Fed. Regist. 65(239 12 December): 77546-77553.
- NRC (2003) *Marine Mammals and Low-frequency Sound Progress Since 1994*. National Academy Press, Washington DC. 158 pages
- Richardson, W. J., Greene, C. R. Jr., Malme, C. I., and Thomson, D. H. (1995) Marine Mammals and Noise. Academic Press, New York.

- Richardson, W.J., B.W. Würsig and C.R. Greene Jr. (1990) Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to drilling and dredging noise in the Canadian Beaufort Sea. *Marine Environmental Research* 29: 135-160.
- Ross, D. (1976) Mechanics of underwater noise. Pergamon, New York. (Reprinted 1987, Peninsula Publ., Los Altos, CA).
- Sandwell Engineering a (2005) Preliminary Front End Engineering Design, Gros Cacouna LNG Marine Terminal. Report No.: 04-250-01_Rev.1_PRE
- Sandwell Engineering b (2005) Installation Methodology Marine Study, Gros Cacouna LNG Marine Terminal. Report No.: 142829, Rev. A.
- Transport Canada (2005) Installation portuaire de Gros-Cacouna.
<http://www.tc.gc.ca/quebec/fr/port/groscacouna.htm>
- Wenz, G. M. (1962) Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34(12), 1936-1956.
- Willis, J., and Dietz, F. T. (1961) Effect of tidal currents on 25 cps shallow water ambient noise measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33(11), 1659.

Annexe A

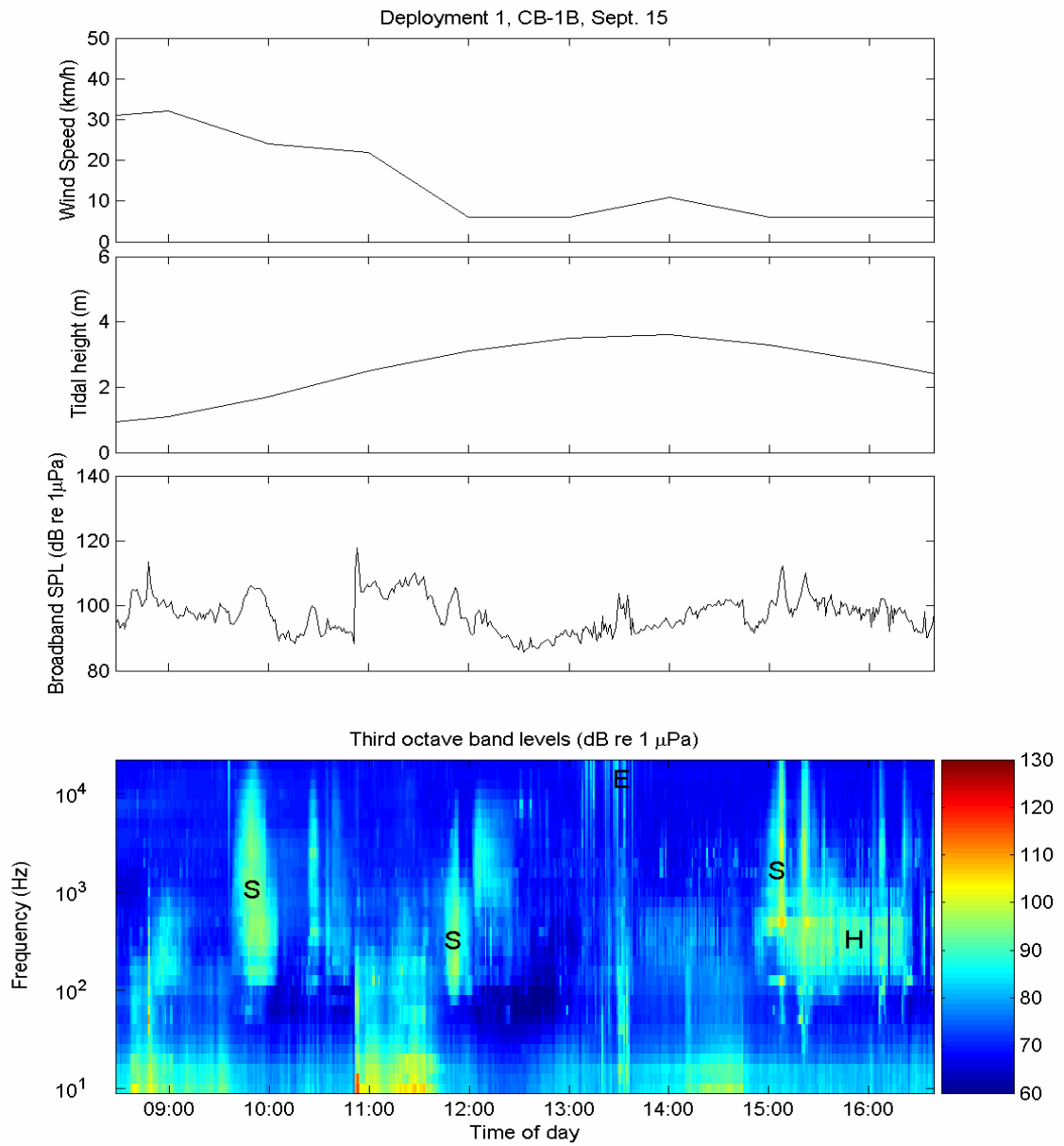


Figure A- 1: Déploiement 1, CB-1B, 15 septembre 2005.

(Vitesse du vent : *wind speed*; hauteur des marées : *tidal height*; niveau sonore du bruit ambiant par large bande : *broadband SPL*; niveau sonore par bande de $\frac{1}{3}$ d'octave : *third octave band levels*; fréquence : *frequency*; heure de la journée : *time of day*)

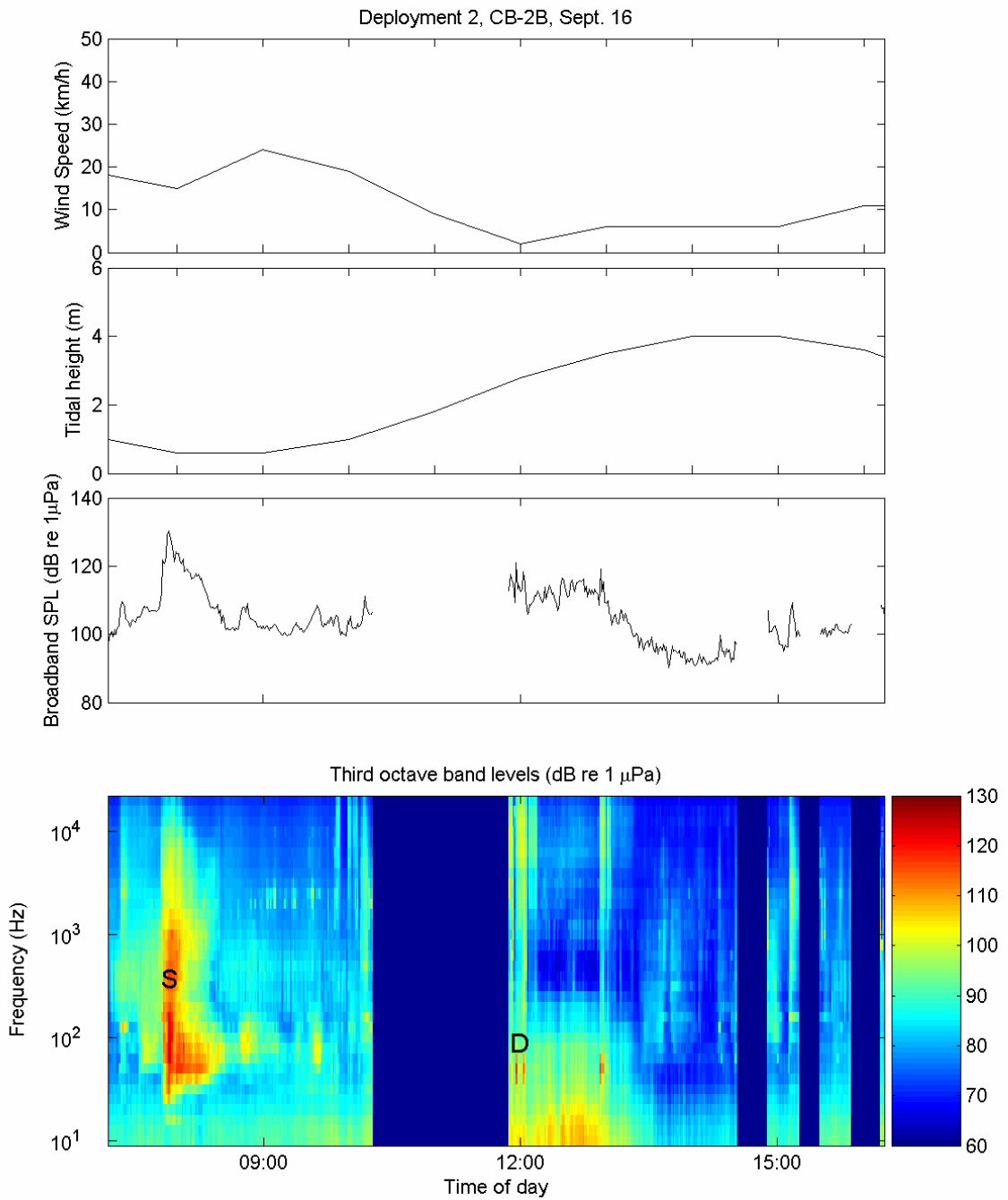


Figure A- 2: Déploiement 2, CB-2B, 16 septembre 2005.

Voir figure A-1 pour légende.

Annexe A - 2

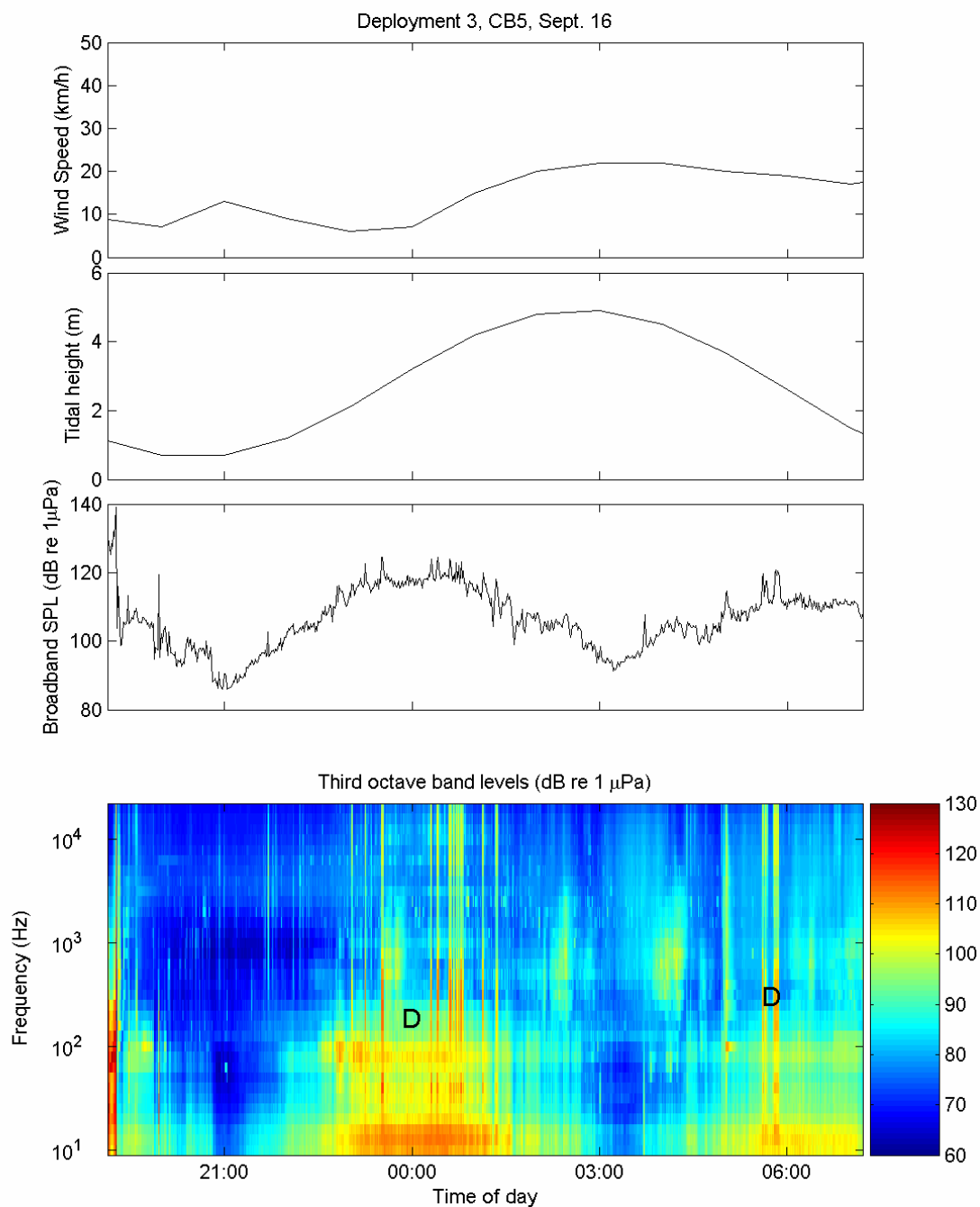


Figure A- 3: Déploiement 3, CB5, 16 septembre 2005.

Voir figure A-1 pour légende.

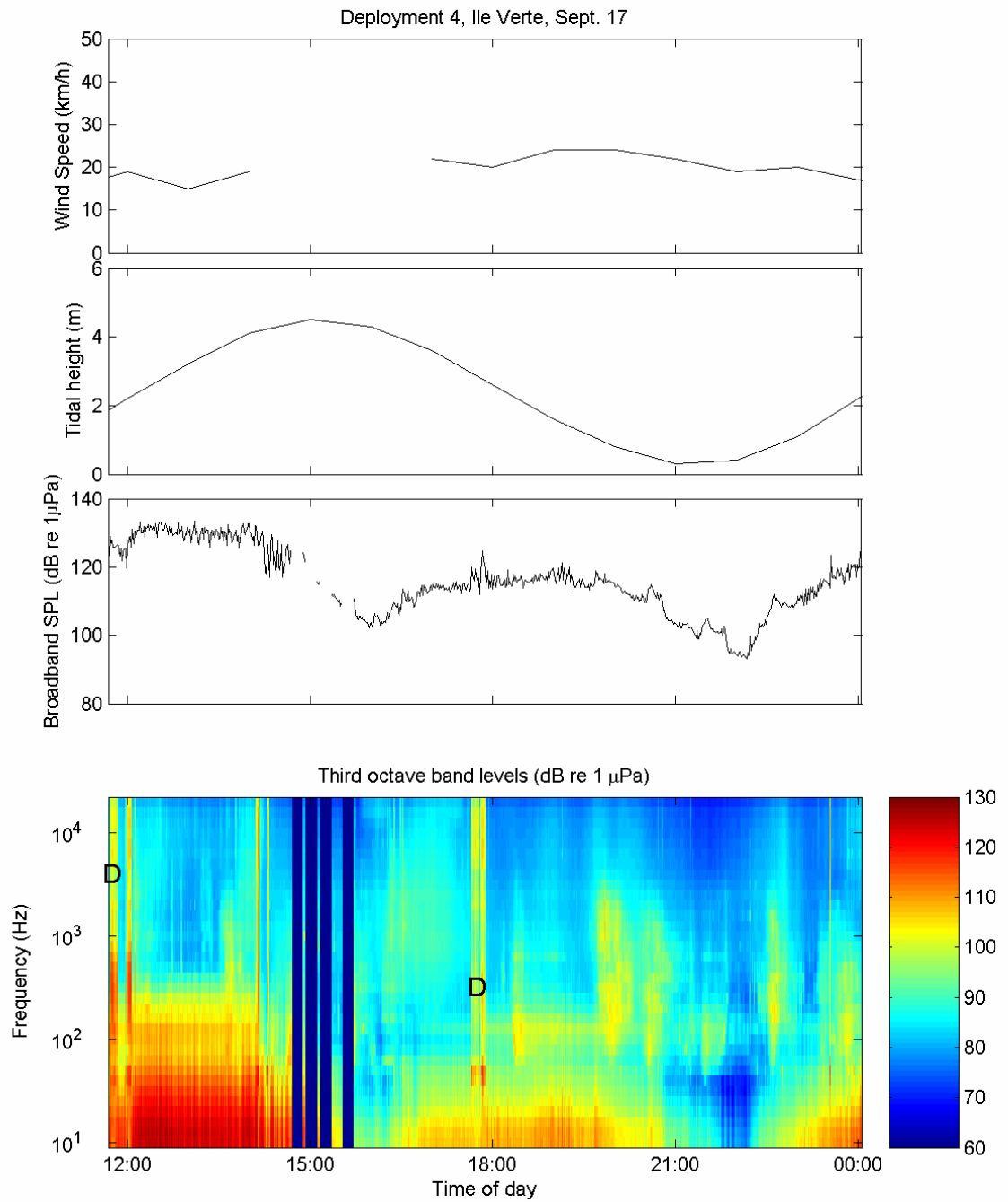


Figure A- 4: Déploiement 4, Île Verte, 17 septembre 2005.

Voir figure A-1 pour légende.

Annexe A - 4

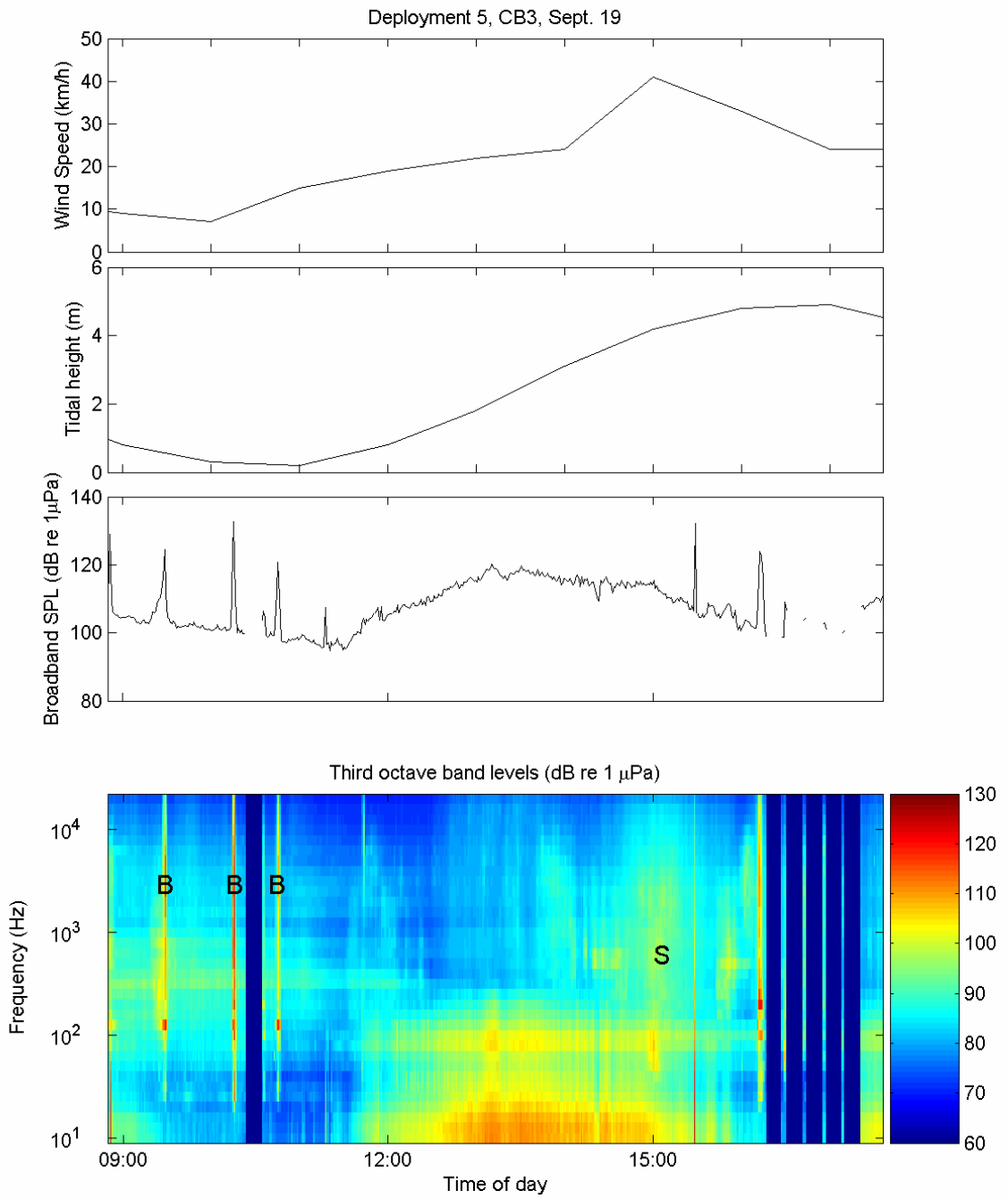


Figure A- 5: Déploiement 5, CB3, 19 septembre 2005.

Voir figure A-1 pour légende.

Annexe A - 5

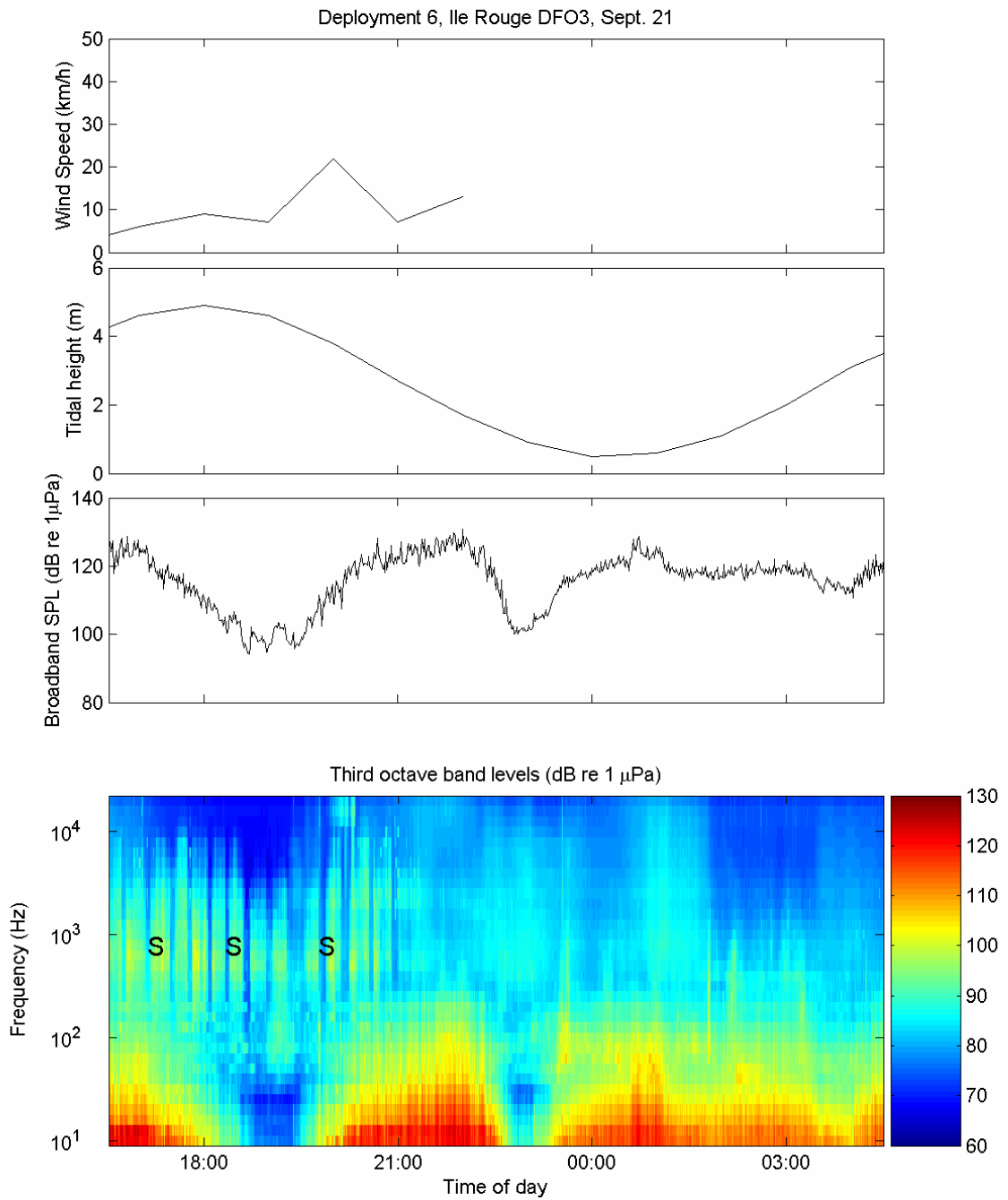


Figure A- 6: Déploiement 6, DFO3 - Île Rouge, 21 septembre 2005.

Voir figure A-1 pour légende.

Annexe A - 6

TRADUCTION FRANÇAISE - VERSION NON OFFICIELLE

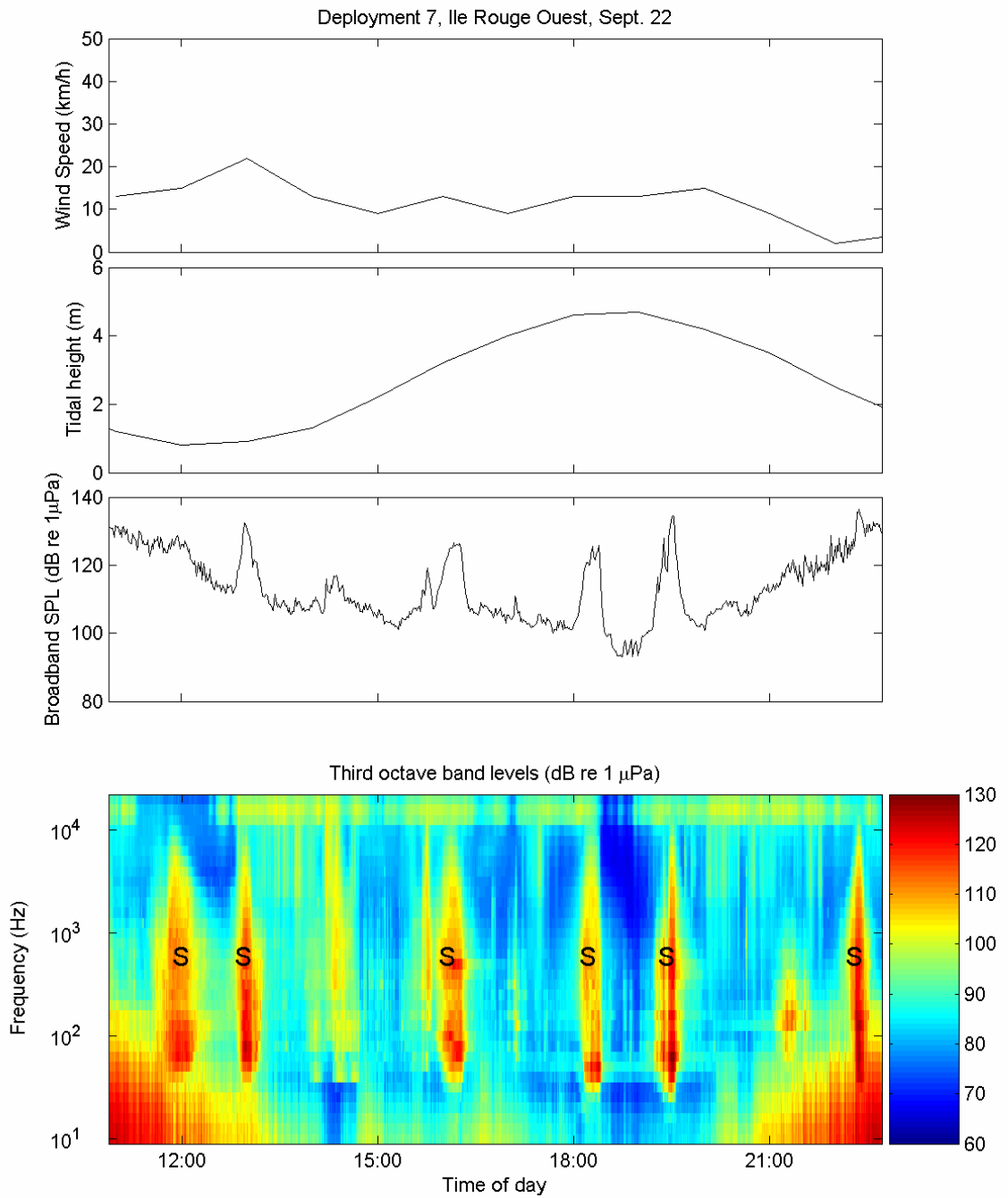


Figure A- 7: Déploiement 7, DFO3 - Île Rouge Ouest, 22 septembre 2005..

Annexe B

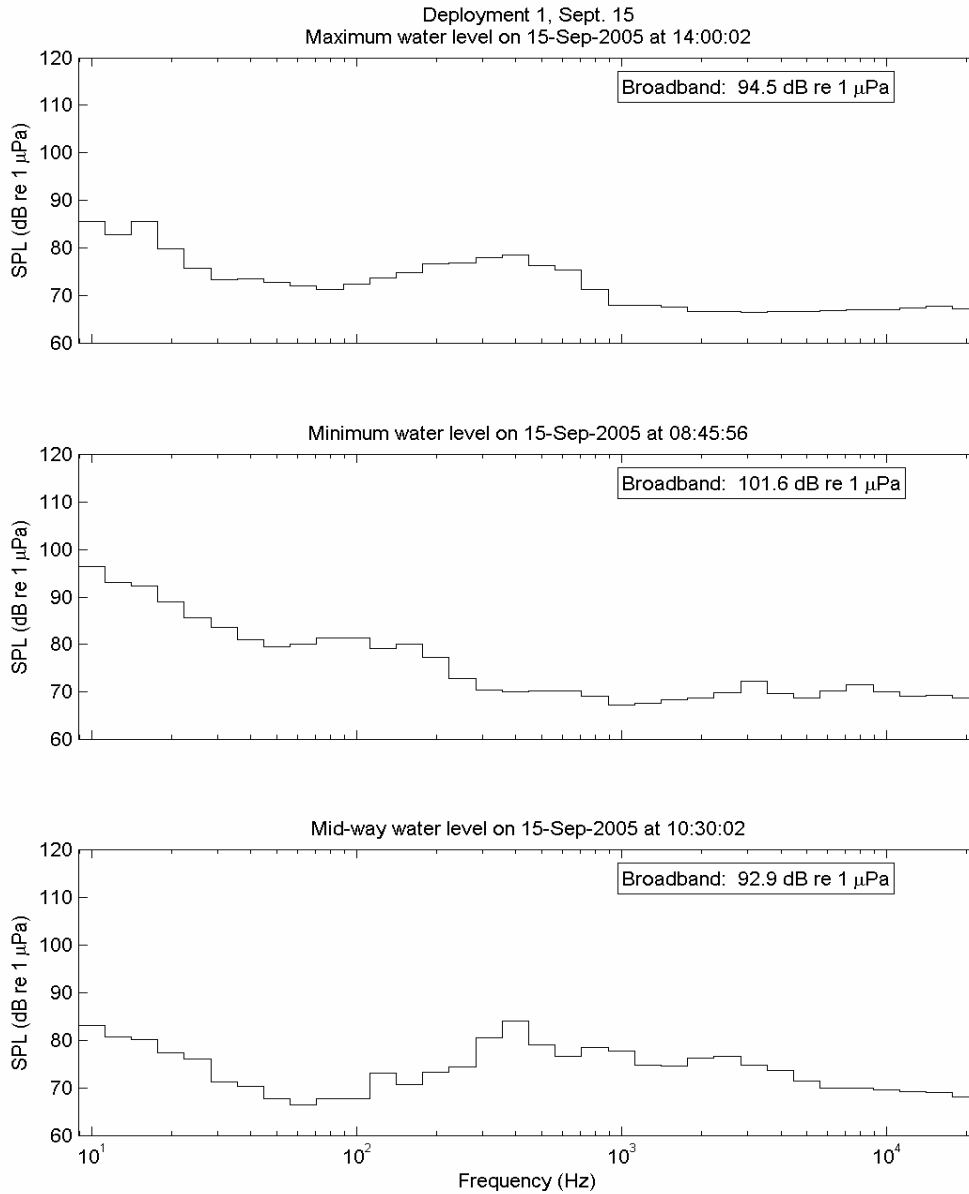


Figure B - 1: Déploiement 1, CB-1B, 15 septembre 2005.

(niveau d'eau maximal : *maximum water level*; niveau d'eau minimal : *minimum water level*; niveau sonore : *SPL or Sound Pressure Level*; niveau sonore à large bande : *broadband*; fréquence : *frequency*)

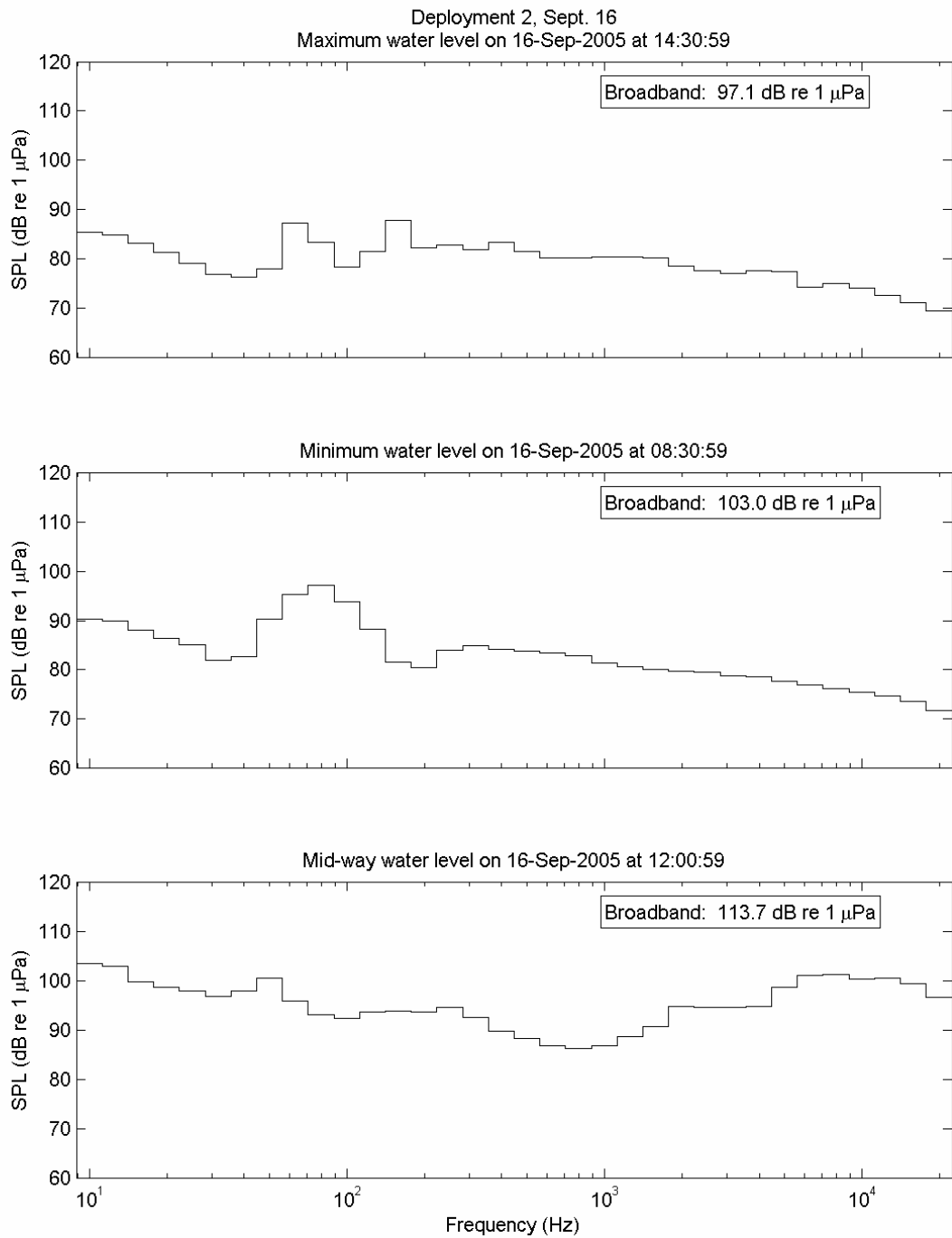


Figure B - 2: Déploiement 2, CB-2B, 16 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 2

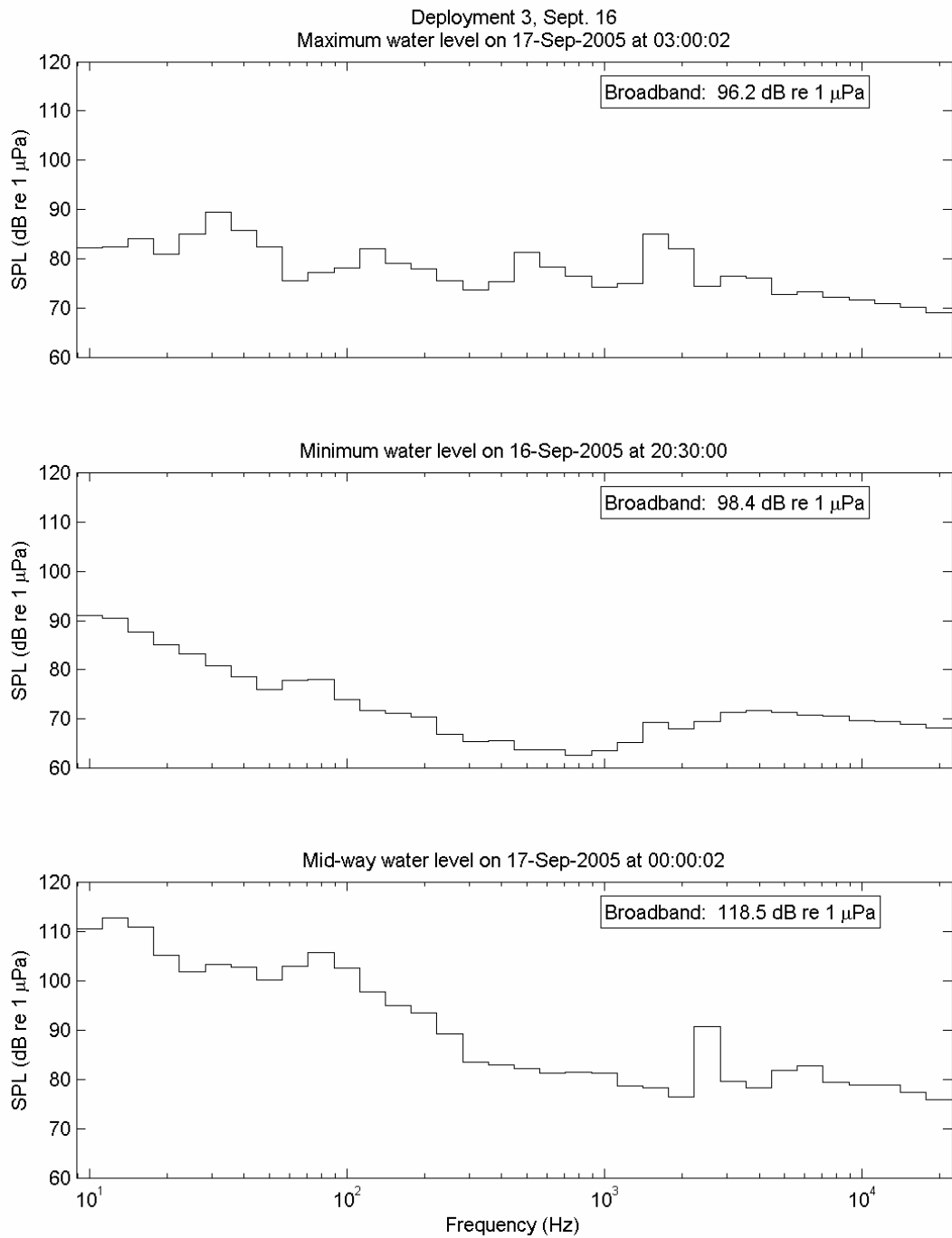


Figure B - 3: Déploiement 3, CB5, 16 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 3

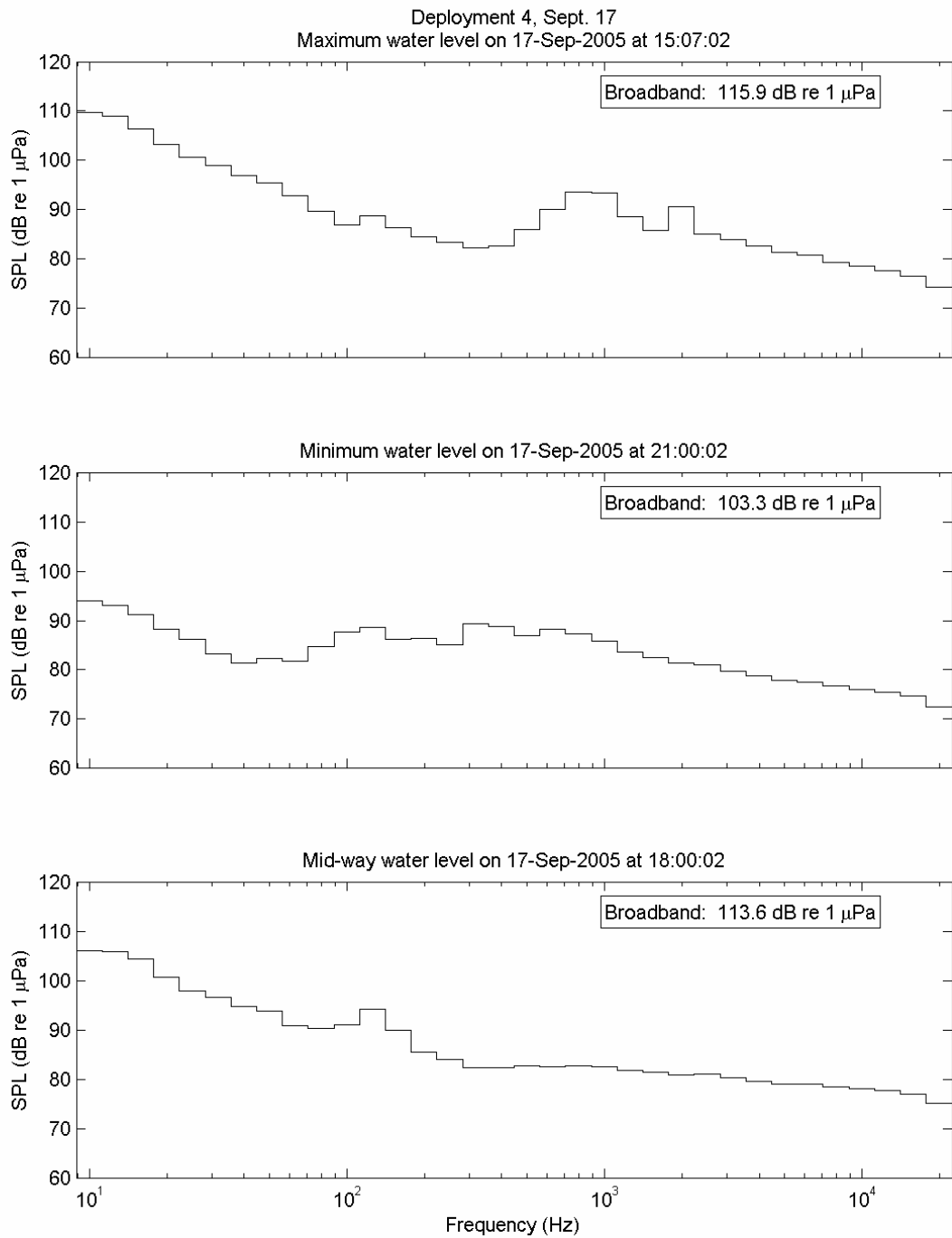


Figure B - 4: Déploiement 4, Île Verte, 17 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 4

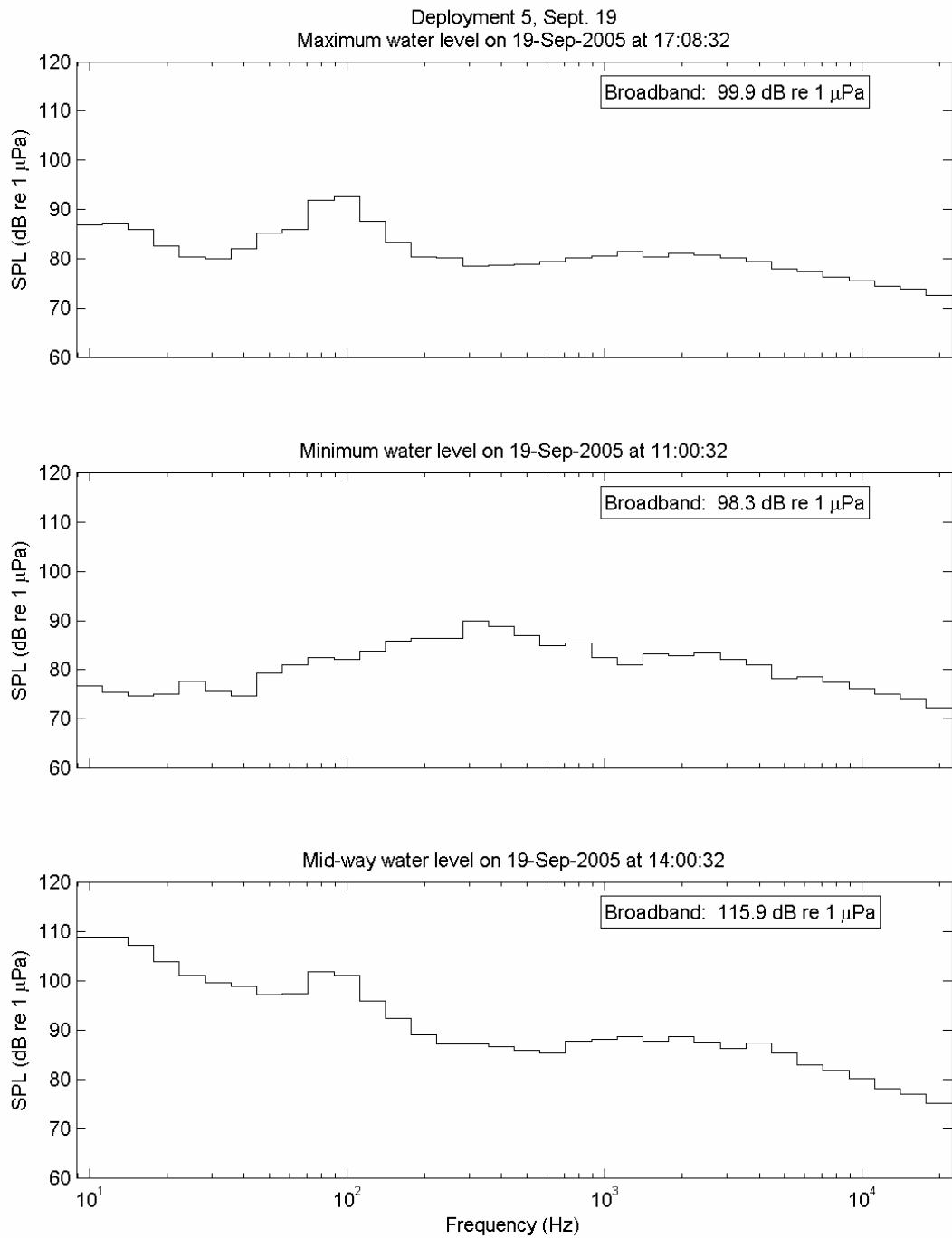


Figure B - 5: Déploiement 5, CB3, 19 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 5

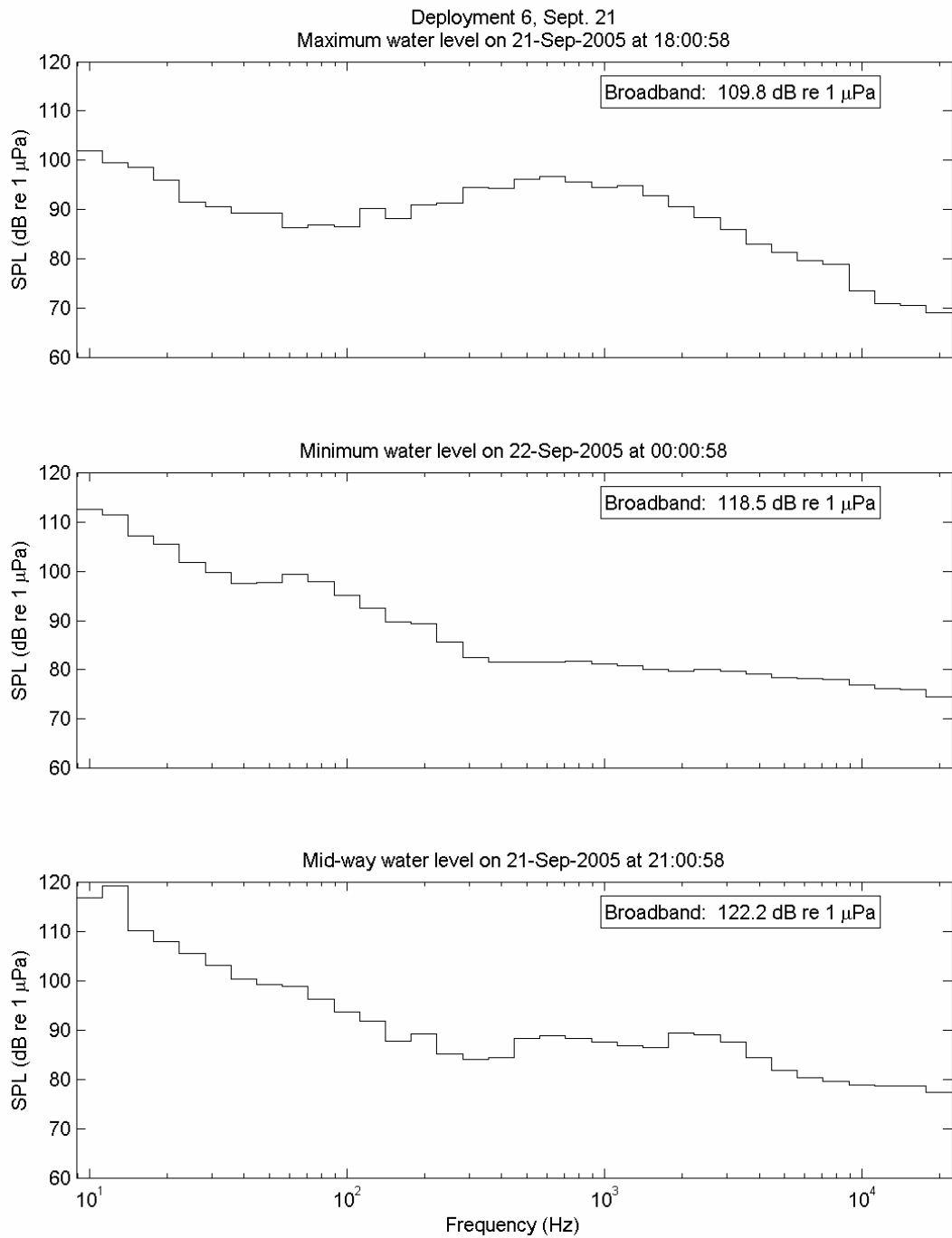


Figure B - 6: Déploiement 6, DFO3 - Île Rouge, 21 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 6

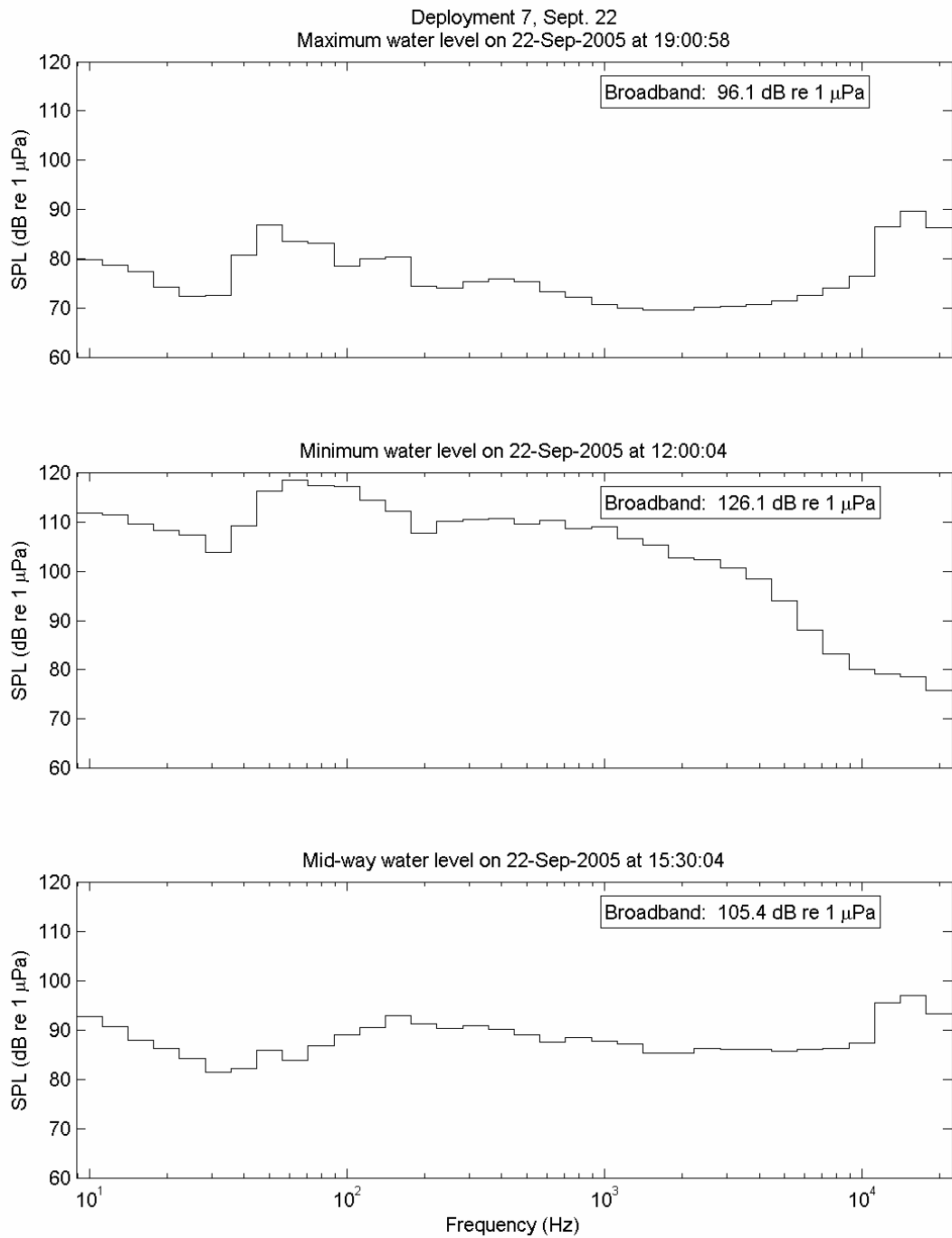


Figure B - 7: Déploiement 7, DFO3 - Île Rouge Ouest, 22 septembre 2005.

Voir figure B - 1 pour légende.

Annexe B - 7

Annexe C

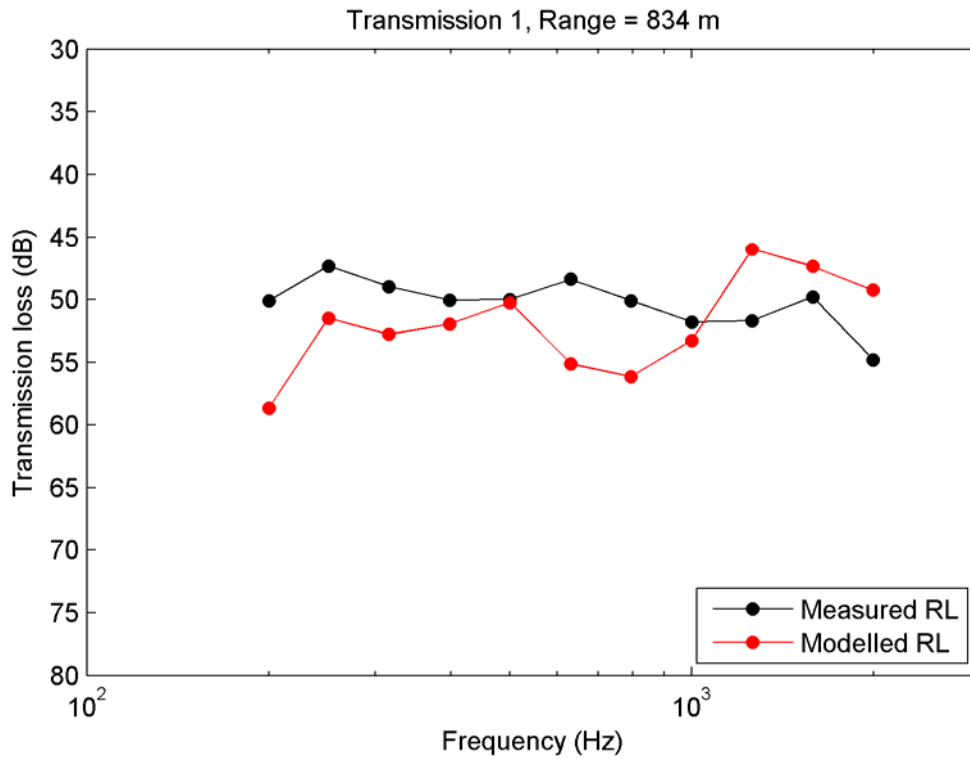


Figure C - 1: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 1.

(distance : *range*; perte sonore par propagation : *transmission loss*; niveau sonore reçu mesuré : *measured RL*; niveau sonore modélisé : *modelled RL*; fréquence : *frequency*)

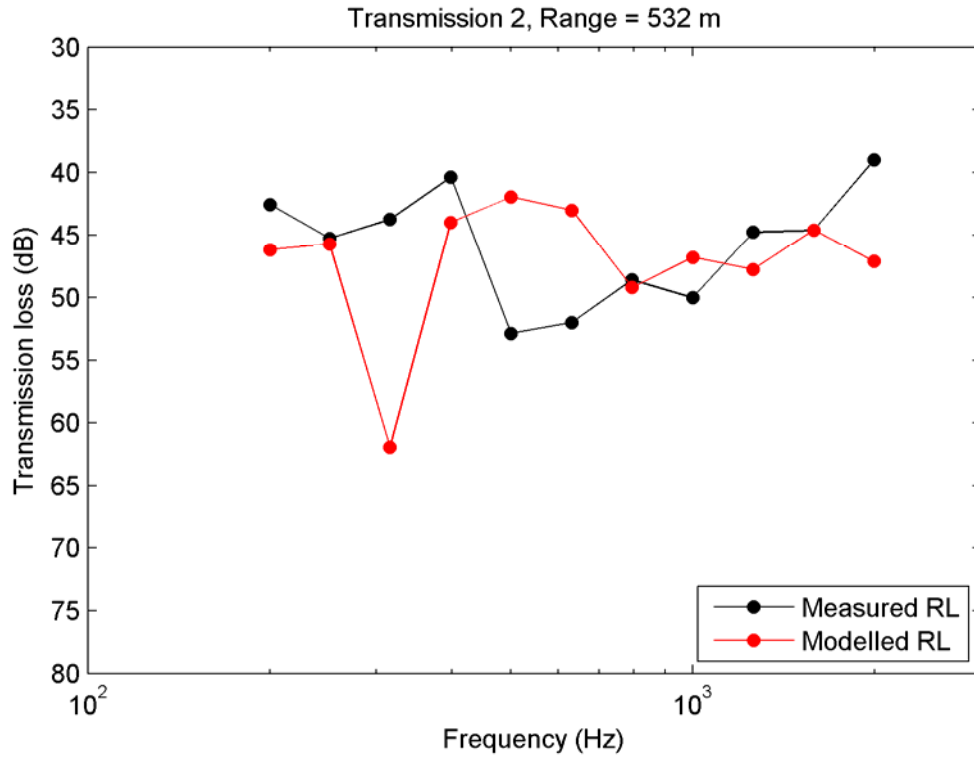


Figure C - 2: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 2.

Voir figure C - 1 pour légende

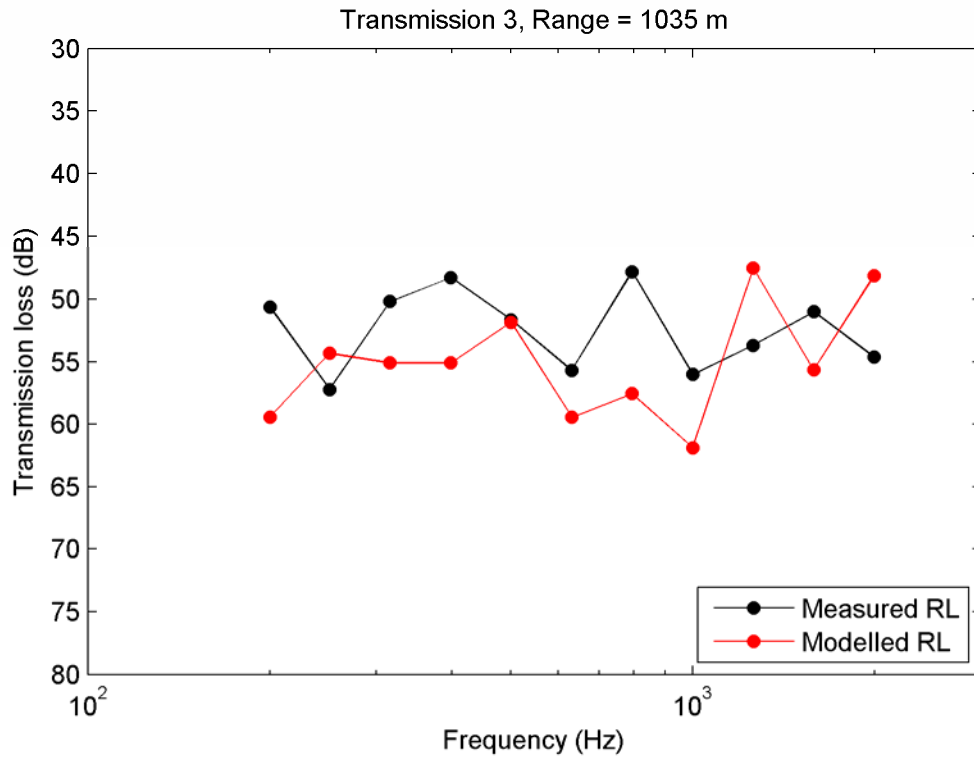


Figure C - 3: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 3.

Voir figure C - 1 pour légende

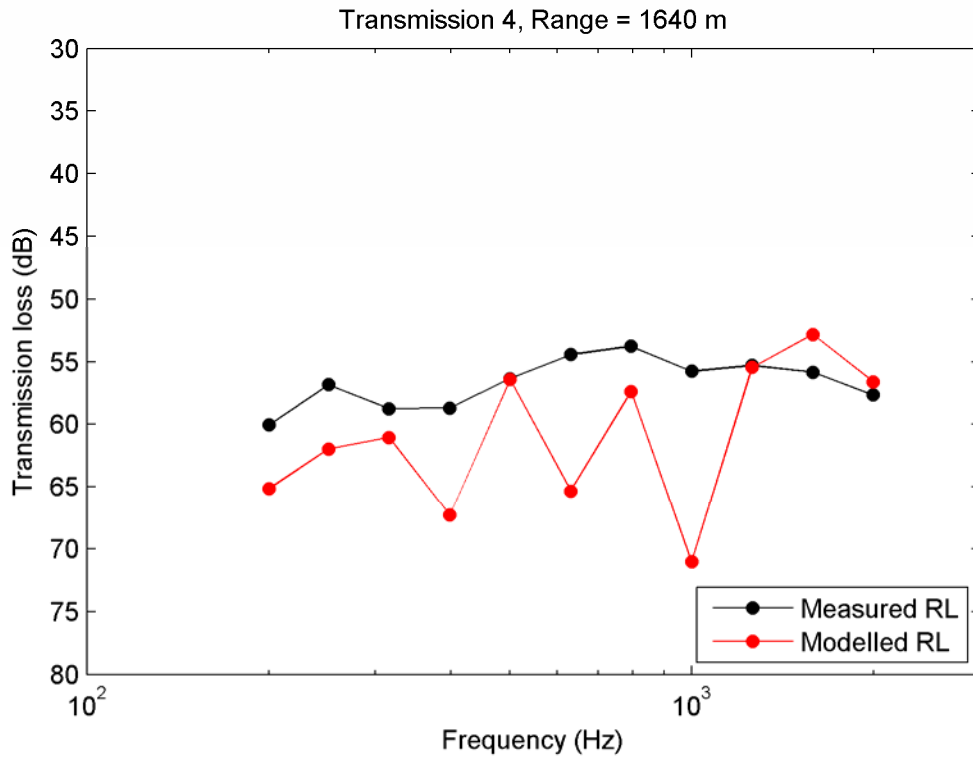


Figure C - 4: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 4.

Voir figure C - 1 pour légende

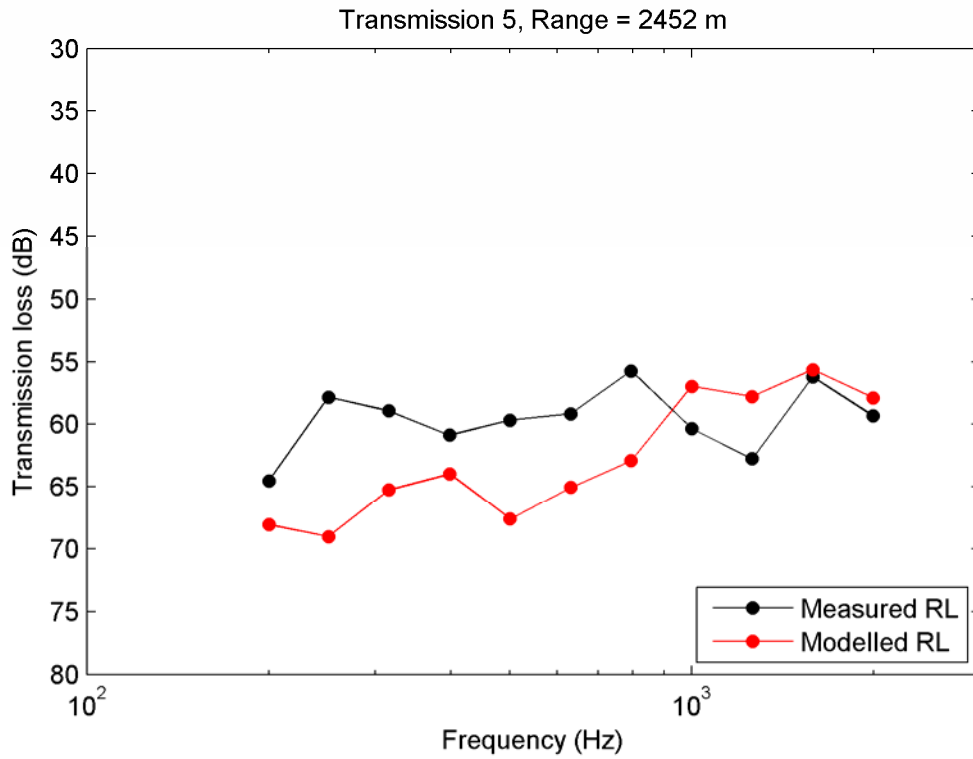


Figure C - 5: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 5.

Voir figure C - 1 pour légende

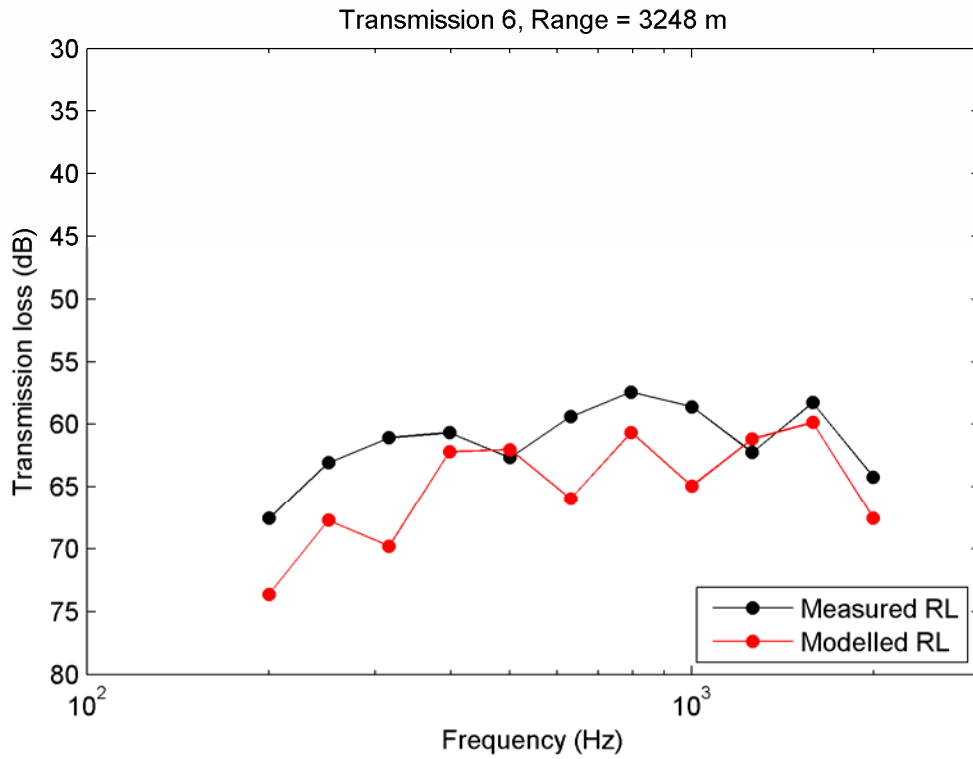


Figure C - 6: Perte sonore par propagation (dB) en fonction des fréquences centrales des bande de tiers d'octave pour les mesures obtenues sur le terrain et les résultats de modélisation relatifs à l'expérience de propagation no 6.

Voir figure C - 1 pour légende

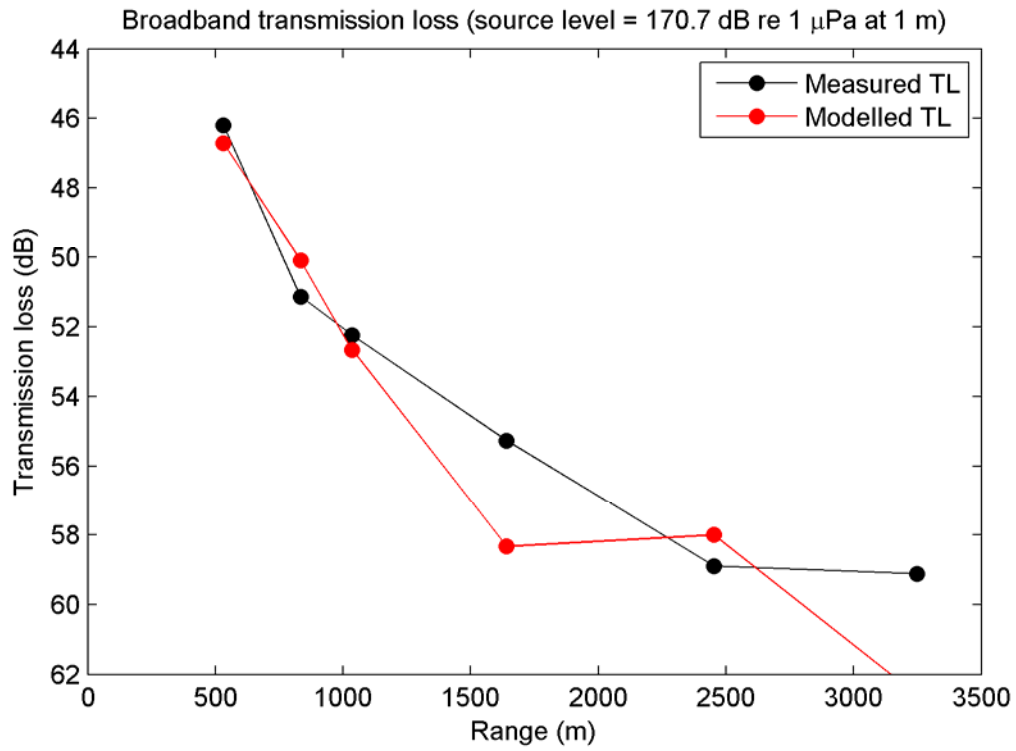
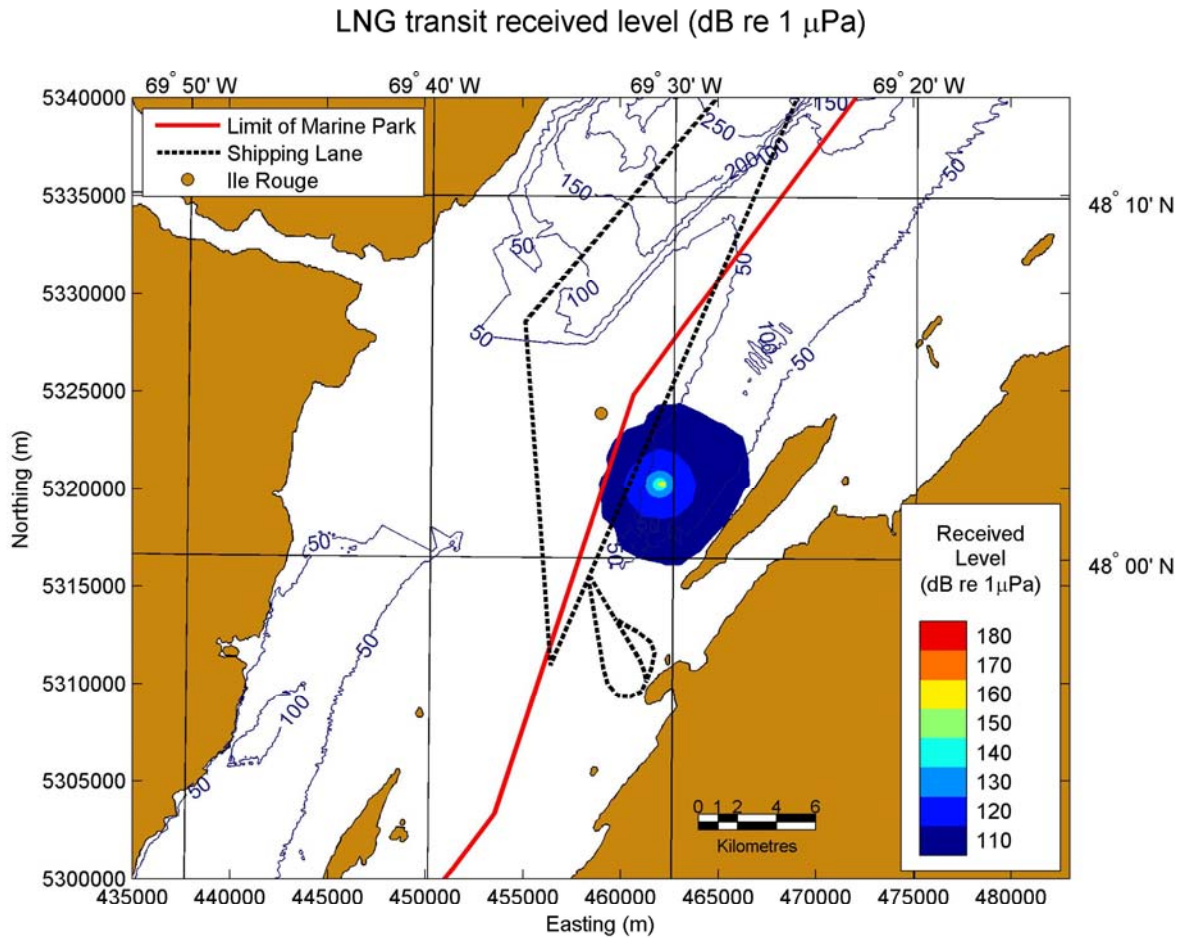


Figure C - 7: Perte sonore par propagation par large bande en fonction de la distance par bande large.

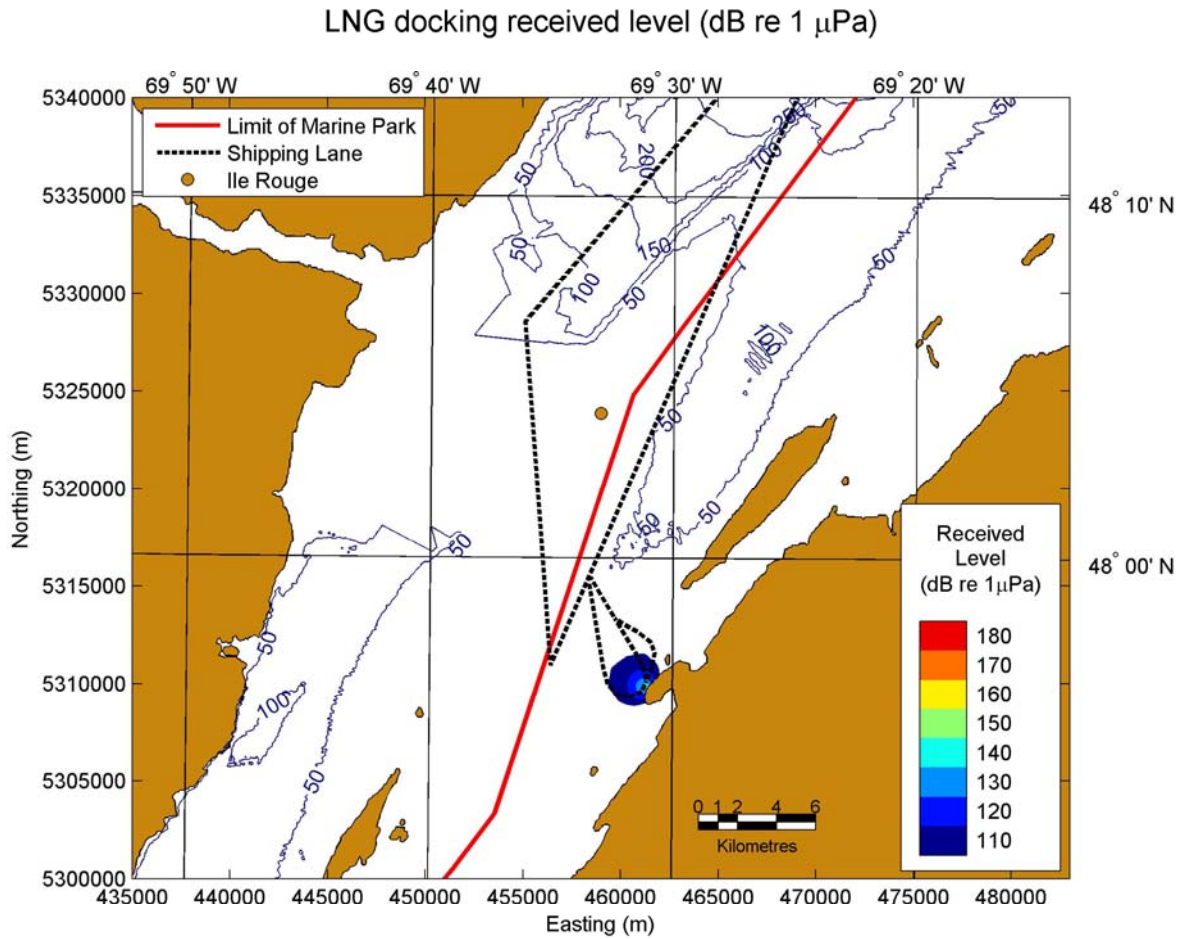
Voir figure C - 1 pour légende

Annexe D



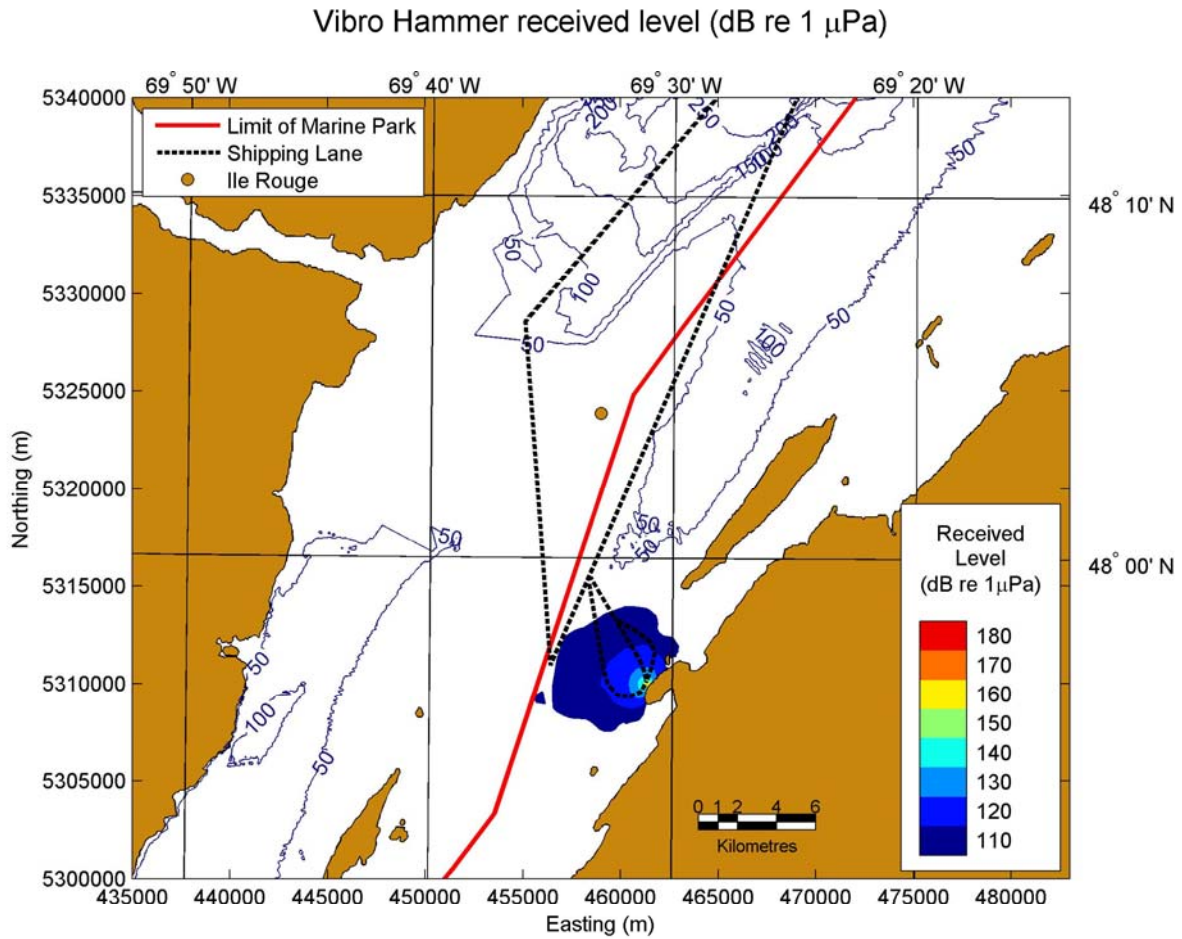
Bathymetric data: Copyright © Her Majesty the Queen in Right of Canada - Canadian Hydrographic Service. Adapted from Nautical Data International Inc. Electronic Charts No. 3003582, 3003623

Figure D - 1: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (*received level*) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de transit du méthanier (*LNG transit*).



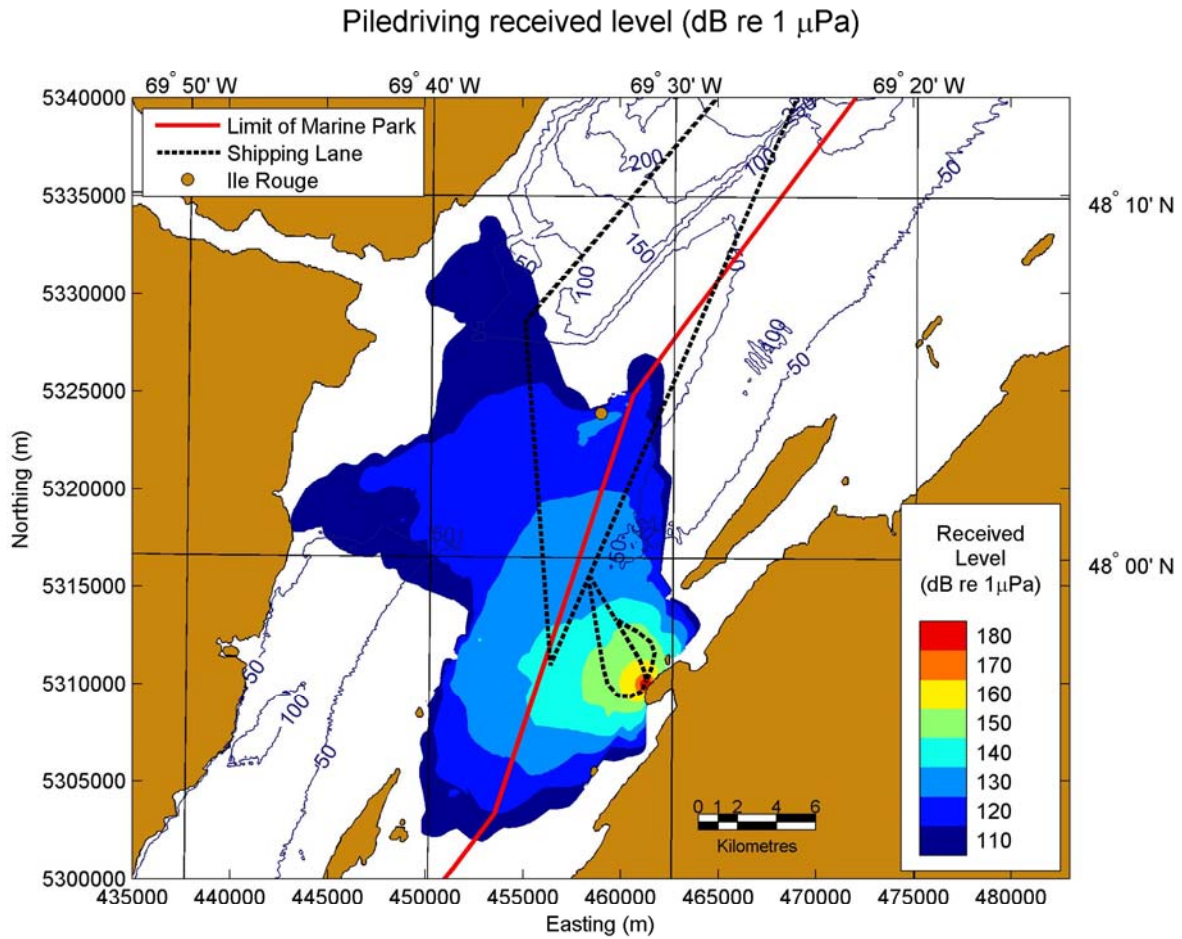
Bathymetric data: Copyright © Her Majesty the Queen in Right of Canada - Canadian Hydrographic Service. Adapted from Nautical Data International Inc. Electronic Charts No. 3003582, 3003623

Figure D - 2: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (*received level*) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario d'amarrage du méthanier (*LNG docking*).



Bathymetric data: Copyright © Her Majesty the Queen in Right of Canada - Canadian Hydrographic Service. Adapted from Nautical Data International Inc. Electronic Charts No. 3003582, 3003623

Figure D - 3: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (*received level*) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de vibrofonçage (*vibro hammer*).



Bathymetric data: Copyright © Her Majesty the Queen in Right of Canada - Canadian Hydrographic Service. Adapted from Nautical Data International Inc. Electronic Charts No. 3003582, 3003623

Figure D - 4: Tracé de contours des niveaux sonores reçus (*received level*) dans la région avoisinant le terminal méthanier d'Énergie Cacouna pour le scénario de battage des palplanches (*pile driving*).