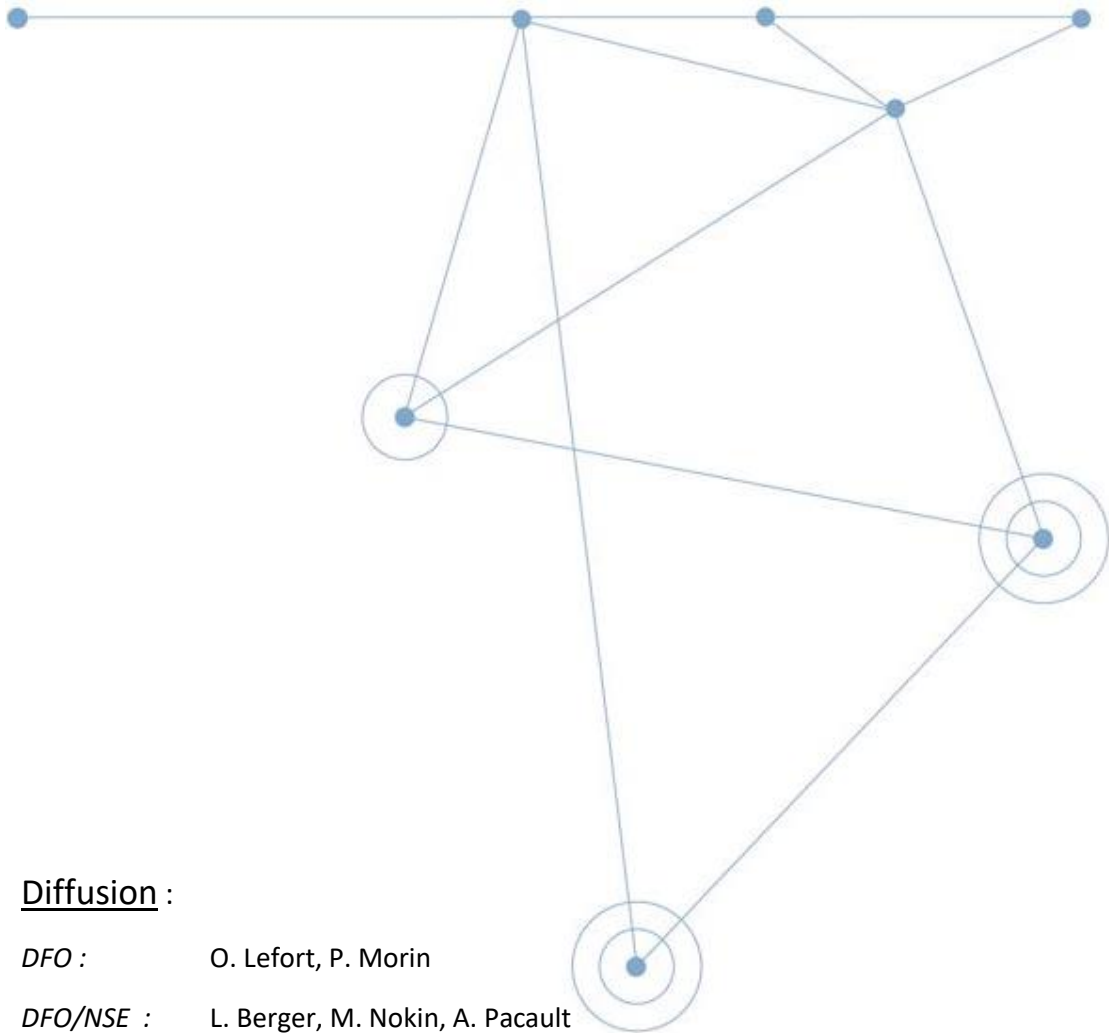


PROTOCOLE DE PROTECTION DE LA FAUNE MARINE LORS DES CAMPAGNES SISMIQUES



Diffusion :

DFO : O. Lefort, P. Morin

DFO/NSE : L. Berger, M. Nokin, A. Pacault

DFO/PON : G. Peltier, A. Feld, M. Delmas, M. Denniel

GENAVIR: R. Balcon, F. Benon, J.Y. Tous

Fiche documentaire


| | | | | | |
|---|--------------|-------------|---|--------------------|--|
| Titre du rapport : PROTOCOLE DE PROTECTION DE LA FAUNE MARINE ET CAMPAGNES SISMIQUES | | | | | |
| Référence interne : ASTI-2019-148 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ | | | Date de publication : Version : 1.0.0 Référence de l'illustration de couverture Langue(s) : | | |
| Résumé/ Abstract : Ce document précise les mesures prises par l'Ifremer pour la protection de la faune marine lors de l'utilisation des sources sismiques appartenant à la classe 1 (> 500 in ³). Avant de présenter le protocole à appliquer lors des campagnes de géosciences marines, les principes de l'évaluation des risques sonores sont rappelés. | | | | | |
| Mots-clés/ Key words : sismique, mammifères marins, tortues, seuils, PTS, TTS, zone d'exclusion, MMOs, PAM, recherche pré-tir, démarrage progressif, arrêt des tirs | | | | | |
| Comment citer ce document : | | | | | |
| Disponibilité des données de la recherche : | | | | | |
| DOI : | | | | | |
| Révisions : | | | | | |
| <i>Indice</i> | <i>Objet</i> | <i>Date</i> | <i>Rédigé par</i> | <i>Vérifié par</i> | <i>Approuvé par</i> |
| 1 | Création | 19/07/11 | X. Lurton | | |
| 2 | Révision | 09/07/13 | X. Lurton | Y. Le Gall | M. Nokin |
| 3 | Révision | 04/01/16 | C. Ducatel Y. Le Gall X. Lurton | M. Nokin | P. Cotty O. Lefort |
| 4 | Révision | 8/03/2019 | C. Ducatel Y. Le Gall X. Lurton | M. Nokin | O. Lefort  |

TABLE DES MATIERES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PRESENTATION GENERALE | 10 |
| 1.1 | Contexte et objectifs..... | 10 |
| 1.2 | Evaluation des risques sonores des sources sismiques : rappels | 11 |
| 1.2.1 | Principe | 11 |
| 1.2.2 | Seuils auditifs et fonctions de pondération : état de l'art | 14 |
| 1.2.3 | Résultats..... | 16 |
| 1.3 | Description et résumé des mesures de mitigation retenues par l'Ifremer | 18 |
| 1.3.1 | Avant la campagne..... | 18 |
| 1.3.2 | Pendant la campagne..... | 18 |
| 2 | PROTOCOLE DE PROTECTION DE LA FAUNE MARINE CONTRE LES EMISSIONS SISMIQUES DES SOURCES DE CLASSE 1 | 18 |
| 2.1 | Etude amont et risques sonores | 19 |
| 2.1.1 | Zones protégées..... | 19 |
| 2.1.2 | Espèces concernées | 19 |
| 2.1.3 | Etude des risques sonores | 20 |
| 2.2 | Mesures appliquées durant la campagne..... | 20 |
| 2.2.1 | Zone d'exclusion et Zone d'alerte..... | 20 |
| 2.2.2 | Surveillance visuelle | 21 |
| 2.2.3 | Surveillance acoustique | 21 |
| 2.2.4 | Recherche pré-tir | 22 |
| 2.2.5 | Démarrage progressif des sources..... | 22 |
| 2.2.6 | Arrêt des tirs | 23 |
| 2.2.7 | Changement de profil | 23 |
| 2.2.8 | Cas particuliers des tortues..... | 23 |
| 2.2.9 | Qualifications des MMOs et Opérateurs PAM..... | 24 |
| 2.2.10 | Recueil de données..... | 25 |
| 2.2.11 | Reporting..... | 26 |
| 3 | CONCLUSIONS | 26 |
| 4 | BIBLIOGRAPHIE | 27 |
| 5 | ANNEXES | 30 |
| 5.1 | Annexe 1 : Références des principaux guides et conventions..... | 30 |
| 5.2 | Annexe 2 : Sources sismiques concernées par l'application du protocole | 32 |
| 5.3 | Annexe 3 : Caractéristiques acoustiques des sources | 35 |
| 5.4 | Annexe 4 : Fiches des MMOS et des opérateurs PAM..... | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.5 | Annexe 5 : EXTRAIT DE LA FICHE SYNTHETIQUE FIN DE CAMPAGNE..... | 46 |
| 5.6 | Annexe 6 : : RAPPORT FINAL DE L'ACTIVITE DES MMOS ET DES OPERATEURS PAM (PLAN TYPE) | 47 |
| 5.7 | Annexe 7 : Fiche avarie PAM..... | 49 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: Géométrie du champ rayonné par une source sismique en un point donné..... | 12 |
| Figure 2: Géométrie du champ rayonné par une source mobile le long d'un profil d'acquisition [4].. | 13 |
| Figure 3: Fonctions de pondération M-WF issues de Southall 2007 [9] (en continu) et NMFS 2018 [5] (en pointillés). | 15 |
| Figure 4: Cas des cétacés BF : SEL_{cum} le long d'un profil d'acquisition sismique pour la source S_1 de 2570 in^3 | 17 |
| Figure 5: <i>Signature acoustique (simulation Ssource) de la source constituée de 4 canons GGUN ($3 \times 250 \text{ in}^3 + 1 \times 45 \text{ in}^3$)</i> | 33 |
| Figure 6: Signal temporel de la source sismique S_1 ($V=2570 \text{ in}^3$)..... | 36 |
| Figure 7: Spectre fréquentiel du signal sismique de la source S_1 ($V=2570 \text{ in}^3$)..... | 37 |
| Figure 8: Directivité dans le plan vertical/longitudinal, gisement 0° , source sismique S_1 , Gundalf® ... | 38 |
| Figure 9: Directivité dans le plan transversal, gisement 90° , source sismique S_1 , Gundalf® | 38 |
| Figure 10: Diagrammes de directivité dans le plan vertical selon l'axe longitudinal de la source (S_1). | 39 |
| Figure 11: Diagrammes de directivité dans le plan vertical/longitudinal de la source S_1 | 39 |
| Figure 12 : Signal temporel de la source sismique S_2 ($V=4990 \text{ in}^3$)..... | 40 |
| Figure 13: Spectre fréquentiel du signal sismique de la source S_2 ($V=4990 \text{ in}^3$)..... | 40 |
| Figure 14: Directivité dans le plan vertical/ longitudinal, gisement 0° , source sismique S_2 , Gundalf® | 41 |
| Figure 15: Directivité dans le plan vertical/transversal, gisement 90° , source sismique S_2 , Gundalf® | 41 |
| Figure 16: Diagrammes de directivité dans le plan vertical selon l'axe longitudinal de la source (S_2). | 42 |
| Figure 17: Diagrammes de directivité dans le plan vertical selon l'axe longitudinal de la source (S_2). | 42 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Classification des cétacés selon leurs gammes auditives fonctionnelles [5] et [6]..... | 15 |
| Tableau 2: Valeurs des seuils PTS pour des signaux impulsions [5,6] | 16 |
| Tableau 3: Synthèse des seuils et des rayons d'exclusion (m) des Sources S_1 et S_2 pour les trois groupes de cétacés. | 17 |
| Tableau 4 : Durée de la recherche pré-tir en fonction de la configuration de l'équipe de mitigation et de la hauteur d'eau | 22 |
| Tableau 5: Caractéristiques des antennes sismiques Ifremer de Classe 1 | 35 |

GLOSSAIRE

ACCOBAMS : Accord sur la conservation des cétacés de la Mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente

ASCOBANS : Accord sur la conservation des petits cétacés de la mer Baltique et de l'Atlantique Nord-Est

BF : Basse Fréquence

Bonnes conditions d'observation : En période diurne, avec un état de mer inférieur ou égal à 3 Beaufort, et une zone d'exclusion entièrement visible.

Conditions d'observation limites : l'observation visuelle est tout de même possible jusqu'à 5 Beaufort si la zone d'exclusion est dégagée. D'autres critères (état de mer, nébulosité, ...) conditionnent les conditions d'observation. Par conséquent, il revient au responsable de l'équipe MMOs de juger de l'état des conditions météorologiques permettant l'observation visuelle.

Classe 1 : source sismique dont le volume total est supérieur à 500 in³

Classe 2 : source sismique dont le volume total est inférieur à 500 in³

CDB : Convention sur la diversité biologique

CMS : Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage

CPA : *Closest Point of Approach*, Point d'approche le plus proche

DCSMM : Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin

DFO : Direction de la Flotte Océanographique

DFO/PON : Pôle Opérations Navales de DFO

Espèces concernées (EC): regroupe les espèces marines pour lesquelles ce protocole s'applique. Il s'agit de l'ensemble des mysticètes des grands odontocètes (cachalot, orque, fausse orque, globicéphale, baleine à bec, dauphin de Risso), et des marsouins. Le protocole ne tient pas compte des petits delphinidés de type (*stenella et delphinus*), à l'exception des espèces protégées par la réglementation en vigueur de l'Etat riverain. Les tortues marines sont aussi considérées comme des espèces concernées et font l'objet de mesures de mitigation spécifiques.

HF : Haute Fréquence

MF : Moyenne Fréquence

MM: Mammifères Marins

MMO : *Marine Mammal Observer*, Observateur de mammifères marins

NMFS : *National Marine Fisheries Service*, Service National de la pêche maritime

NOAA : *National Oceanic and Atmospheric Administration*, Agence nationale (USA) d'observation océanique et atmosphérique

NP : Non Pondéré

OMI : Organisation Maritime internationale

OSPAR : Convention sur la Protection du Milieu Marin du Nord –Est Atlantique.

PAM (*Passive Acoustic Monitoring*) : système de détection, d'identification et de localisation par acoustique passive. Il s'agit en général d'une flûte remorquée intégrant un réseau d'hydrophones, complétée par son système de traitement de signaux incluant des logiciels spécifiques.

PT : Pertes de Transmission

PTS : *Permanent Threshold Shift*, Décalage permanent du seuil d'audition

RMS : *Root Mean Square*, moyenne quadratique

SEL : *Sound Exposure Level*, niveau d'exposition sonore, ou énergie sonore reçue intégrée au cours du temps

SEL_{CUM} : Niveau d'exposition sonore cumulé

SIG : Système d'Informations Géographiques

SL : *Sound Level*, niveau d'émission

SL_{PK} : *Peak Sound Level*, niveau d'émission crête

SPL : *Sound Pressure Level*, niveau sonore reçu

SPL_{PK} : *Peak Sound Pressure Level*, niveau sonore crête reçu

Soft-start (ou ramp-up): procédé de démarrage progressif des émissions sismiques destiné à augmenter le niveau sonore jusqu'à sa valeur nominale atteinte après une durée déterminée.

TTS : *Temporary Threshold Shift*, décalage temporaire du seuil d'audition

UE : Union Européenne

THF : Très Haute Fréquence

WF: *Weighted Function*, fonction de Pondération

Zone d'alerte : cercle centré sur la source acoustique dont le rayon est fixé à 1,5 km pour les observations visuelles et non délimité pour les détections acoustiques. Une vigilance renforcée est appliquée si une espèce concernée est observée à l'intérieur de cette zone.

Zone d'exclusion (Zex) : cercle centré sur la source acoustique dont le rayon est fixé à 500 m pour les sources sismiques de classe 1. Les tirs sismiques sont arrêtés si une espèce concernée est observée à l'intérieur de cette zone.

1 PRESENTATION GENERALE

1.1 Contexte et objectifs

L'impact du bruit acoustique sous-marin sur la faune (particulièrement les mammifères marins) suscite de nombreux travaux nationaux et internationaux visant d'une part à combler les lacunes scientifiques restantes et d'autre part à développer des technologies et méthodes pour en limiter les conséquences. Selon l'Article 1 de la Convention des Nations Unies portant sur le droit de la mer (UNCLOS, 1982), les sources sonores anthropiques peuvent être considérées comme cause de pollution [1]. De nombreuses décisions inter-gouvernementales ont ainsi orienté plusieurs recommandations et réglementations. L'annexe 1 dresse une liste non exhaustive des principaux textes concernant le bruit anthropique sous-marin et la faune marine. A ce titre, plusieurs états (Australie, Brésil, Nouvelle-Zélande etc) ont d'ores et déjà réglementé l'usage des équipements acoustiques en mer.

Soucieux des enjeux environnementaux et conscient du caractère sensible de certaines émissions sonores, l'Ifremer a dès 2011 défini un protocole de protection pour limiter les risques d'impacts acoustiques sur les mammifères marins. Suite à des travaux de modélisation et de mesures menés depuis plusieurs années, la prise en considération des risques sonores envers les mammifères marins est aujourd'hui limitée au seul cas des sources sismiques. Chaque campagne scientifique mettant en œuvre des sources sismiques appartenant à la classe 1 (volume total > 500 in³) programmée sur un navire de la flotte océanographique est aujourd'hui systématiquement accompagnée d'une analyse des risques sonores et de mesures de précaution adaptées à appliquer en mer [2]. Les impacts des autres systèmes acoustiques (en particulier les sondeurs) sont considérés comme négligeables et ne font pas l'objet de précautions d'emploi particulières [2,3,4].

Des récentes avancées scientifiques dans le domaine [4, 5, 6] ont conduit l'Ifremer à mettre à jour sa méthode d'évaluation des risques sonores des sources sismiques en tenant compte des nouveaux seuils physiologiques NOAA, des nouvelles fonctions de pondération [5, 6] et en calculant l'exposition sonore cumulée le long d'un profil de Survey [4].

Compte tenu de ces avancées et des retours d'expérience des MMOs et opérateurs PAM embarqués sur les campagnes Ifremer, la version ASTI-2016-5 du protocole de protection des mammifères marins contre les émissions sismiques [2] est révisée dans le présent document. Avant de détailler le protocole de protection, les principes de l'évaluation des risques sonores sont rappelés.

1.2 Evaluation des risques sonores des sources sismiques : rappels

1.2.1 Principe

Pour évaluer l'impact potentiel d'une source sonore sur la faune marine, le signal émis par cette source doit être exprimé en niveau sonore maximal reçu instantanément (*Peak Sound Pressure Level: SPL_{PK}*) et en niveau cumulé d'exposition sonore (*Cumulated Sound Exposure Level: SEL_{cum}*). Ces métriques prennent en considération le niveau sonore émis par la source, la fréquence et la directivité angulaire, c'est-à-dire la distribution spatiale de l'énergie sonore, ainsi que la durée et la cadence d'émission des signaux. Le niveau reçu dépend également des phénomènes de propagation de l'onde sonore.

La méthode employée dans le document [7] pour évaluer l'impact physiologique est développée à partir de l'équation du sonar [8], qui traduit un bilan énergétique entre les niveaux du signal émis, reçu et traité. Les définitions et principales équations utilisées dans ce travail sont présentées ci-dessous :

SL est le niveau sonore à l'émission, défini comme étant la valeur maximale de la pression acoustique à la distance de référence $R_0 = 1$ m de la source, exprimée en dB réf $1\mu\text{Pa} @ 1$ m. Dans cette étude spécifique aux sources sismiques, SL_{PK} est la valeur crête, avec une augmentation de 3 dB (dans le cas d'un signal harmonique) par rapport à la valeur quadratique moyenne SL_{RMS} .

$$SL_{PK}(R_0) = 20 \log_{10}(p_{max}/p_{ref})$$

Avec $p_{max} = \max(p(t))$, $p(t)$ est le niveau de pression à la distance R_0 et $p_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$.

$SPL(R)$ représente le niveau de pression acoustique reçu à la distance R , en dB réf $1 \mu\text{Pa}$.

$SEL(R)$ exprime le niveau d'exposition sonore à une distance R . Il est calculé à partir de $SEL(R_0)$ qui est donné par l'intégration de la pression acoustique à $R_0 = 1$ m élevée au carré en fonction du temps sur toute la durée utile du signal reçu et est exprimé en dB réf. $1\mu\text{Pa}^2 \times \text{s} @ 1$ m.

$$SEL(R_0) = 20 \log_{10} \left(\int p^2(t) dt / p_{ref}^2 \right)$$

$DF(\theta)$ est la valeur de la Fonction de Directivité de la source à l'angle θ , décrivant la distribution spatiale de l'intensité transmise. Par convention $DF(0^\circ) = 0$ dB dans l'axe de la source, soit la direction d'intensité maximale (en général orientée verticalement vers le bas pour les sources sismiques et les sondeurs).

$PT(R)$ exprime les pertes de transmission (en dB) à la distance R engendrées par la propagation du signal sonore dans le milieu ambiant. Elles tiennent compte à la fois des pertes géométriques et du phénomène d'absorption [8]. Le modèle de propagation utilisé dans cette étude néglige le phénomène d'absorption du fait des basses fréquences utilisées en sismique. L'équation caractérisant les pertes de transmission (PT) repose alors sur la loi de divergence sphérique :

$$PT(R) = 20 \log R$$

Compte-tenu de ces paramètres et conformément à l'équation du sonar $SPL(R, \theta)$ et $SEL(R, \theta)$ s'expriment comme :

$$SPL(R, \theta) = SL(R_0) + DF(\theta) - PT(R)$$

$$SEL(R, \theta) = SEL(R_0) + DF(\theta) - PT(R)$$

Dans le cas de l'exposition à plusieurs signaux, $SEL(R, \theta)$ doit tenir compte de leur nombre et de leurs niveaux respectifs.

Le risque sonore est évalué pour un mammifère marin exposé à une source sismique mise en œuvre le long d'un profil (route rectiligne pouvant atteindre plusieurs dizaines voire centaines de km). Des zones d'exclusion sont calculées en tenant compte de l'influence de la directivité de la source et des fonctions de pondération fréquentielle des groupes de cétacés classés selon leur audition (BF, HF, THF). Un certain nombre d'hypothèses sont effectuées dans la modélisation :

- la source sonore se déplace à vitesse constante (5 nœuds) et selon une même direction (profil sismique type classe 1 Ifremer, voir Annexe 3 pour les caractéristiques des sources sismiques de l'Ifremer),
- le récepteur est stationnaire,
- la cadence des tirs sismiques est constante,
- les pertes de propagation sont calculées selon le modèle de divergence sphérique [8],
- le SEL_{cum} est calculé en intégrant l'émission lors du passage du navire au point le plus proche (CPA) du mammifère marin afin de tenir compte de l'exposition de plus forte contribution.
- Afin d'obtenir un calcul relativement simple, les fonctions de directivité dans le plan vertical/longitudinal par rapport à la source ont été retenues dans les modélisations, en les considérant invariantes par rotation autour de l'axe vertical à la source (hypothèse d'une source omnidirectionnelle en azimut, a priori correcte pour un airgun seul mais sans doute moins pour une antenne constituée de plusieurs canons).

Calcul du $SPL(R)$:

A la verticale de la source, les niveaux perçus dans l'eau sont fonction du niveau émis et des pertes de propagation dans le milieu. En tenant compte de ces éléments, le niveau maximal reçu ($SPL(R)$) à une distance R de la source est donné par :

$$SPL_{PK}(R) = SL_{PK}(R_0) - PT(R)$$

En d'autres termes, le $SPL_{PK}(R)$ ne tient pas compte :

- de la durée du signal émis,
- du contenu fréquentiel,
- de la fonction de directivité,
- de la cadence de tir,
- des fonctions de pondération.

Avec: $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{z}\right)$
 $R = \sqrt{y^2 + z^2}$

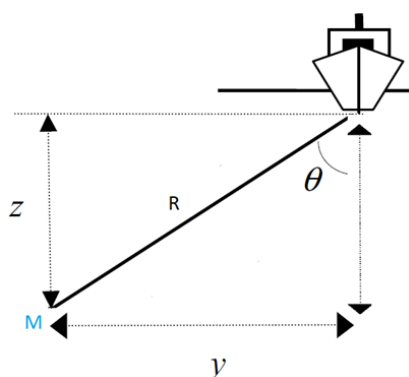


Figure 1: Géométrie du champ rayonné par une source sismique en un point donné

Calcul du SEL le long d'un profil d'acquisition

La géométrie du champ rayonné par la source sismique mobile le long d'un profil d'acquisition est représentée sur la Figure 2. La source est localisée dans le plan ($z = 0$) et se déplace à vitesse constante (ici $V = 5$ nœuds) le long de l'axe X . Un mammifère marin est présent au point M de coordonnées ($X_M = 0, Y_M, Z_M$) où est calculé le niveau d'exposition sonore cumulée.

$$R = \sqrt{X^2 + Y_M^2 + Z_M^2} \text{ et } \theta = \cos^{-1}(Z_M / R)$$

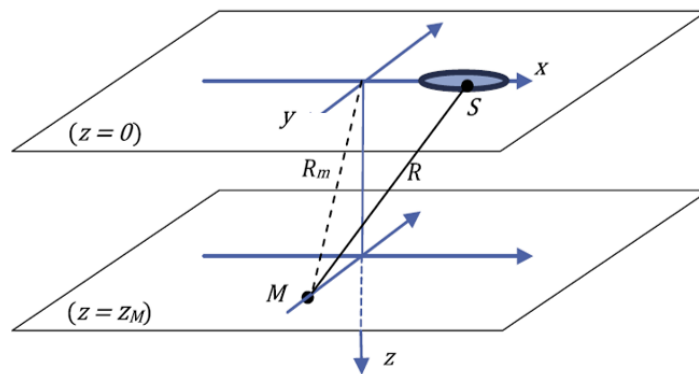


Figure 2: Géométrie du champ rayonné par une source mobile le long d'un profil d'acquisition [4]

Le SEL cumulé est estimé en intégrant l'émission correspondant au passage du navire au CPA. Il est calculé en tenant compte de la cadence de tir et de la vitesse du navire. Les pertes de transmission, la directivité et les fonctions de pondération sont également prises en compte. Le SEL cumulé est déterminé par :

$$SEL (Y_M, Z_M)_{cum} = 10 \log_{10} \sum_i \int_{f_{min}}^{f_{max}} 10^{\left[\frac{DSP(f) + DF(f, \theta_i) + WF(f) - PT(R(X_i))}{10} \right]} df$$

Avec :

- DSP : le niveau spectral de la source sismique donné en dB re 1 μ Pa /Hz @ 1 m,
- DF : la valeur de la fonction de directivité de la source,
- WF : la fonction de pondération.

L'échantillonnage des points en x (axe de l'avancée du navire) est défini de manière à ce qu'il y ait une transmission par coordonnée x_i ; le pas en x est $\Delta x = V \times T$, où V est la vitesse du navire (en m/s) et T la durée entre deux tirs (en s).

1.2.2 Seuils auditifs et fonctions de pondération : état de l'art

Dans les années 1990, pour évaluer les risques sonores, les organismes régulateurs américains (NMFS) ont d'abord défini deux niveaux de harcèlement (*harassment*) correspondant à des niveaux perçus [3] :

- Niveau A équivalant à la limite de danger, au-dessus de laquelle des effets physiologiques sont susceptibles de se produire
- Niveau B correspondant au seuil au-dessus duquel peuvent se produire des effets notables de changement de comportement.

Pour les sources impulsionnelles, les valeurs des niveaux A et B étaient respectivement de 180 et 160 dB re 1 μ Pa (RMS). Cette définition tenait compte uniquement du niveau perçu. La fréquence, la durée, l'occurrence des signaux, et la sensibilité auditive des diverses espèces de mammifères marins n'étaient pas considérées. Par conséquent, ces premiers seuils étaient beaucoup trop simplistes et sont aujourd'hui abandonnés.

En 2007, Southall et une équipe de spécialistes publient une synthèse [9] de l'avancée des connaissances relatives aux capacités auditives des mammifères marins où plusieurs éléments clefs sont développés :

- les mammifères marins sont classés en 5 catégories en fonction de leurs capacités auditives, compte-tenu des mesures directes et indirectes réalisées pour certains individus et certaines espèces¹,
- des fonctions de pondération *M-WF* (*Weighting Function*) sont définies pour chacun de ces groupes,
- de nouveaux seuils [9] sont proposés en tenant compte de la nature du signal, du niveau reçu et de la durée d'exposition.

Proposées initialement dans le rapport [9] les fonctions de pondération *M-WF* ont été développées pour tenir compte de la sensibilité auditive des mammifères marins et évaluer les effets potentiels d'un signal sonore sur une catégorie donnée.

Dans les récents rapports [5,6], le NMFS puis Southall et son équipe synthétisent notamment les nouvelles connaissances obtenues depuis 2007 [10 à 14]. Ces avancées entraînent un ajustement des gammes d'audition fonctionnelle des 6 catégories de mammifères marins et des nouvelles fonctions de pondération et de seuils de TTS et PTS. Le Tableau 1 présente les 3 catégories de cétacés. La Figure 3 illustre les fonctions de pondération de type M [9] représentées en continu et celles retenues à ce jour dans le guide NMFS [5] et dans la revue rédigée par Southall et ses co-auteurs [6], en pointillés.

¹ A noter : aucune mesure audiométrique n'est disponible pour les mysticètes.

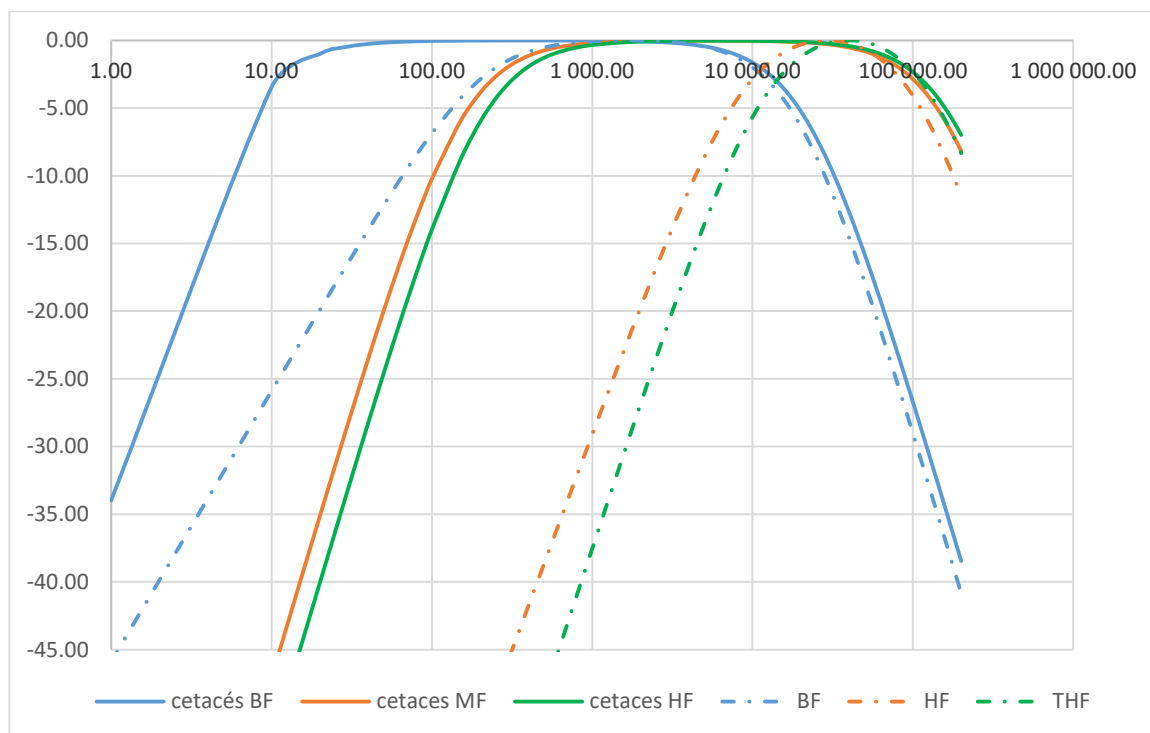


Figure 3: Fonctions de pondération M-WF issues de Southall 2007 [9] (en continu) et NMFS 2018 [5] (en pointillés).

| Groupe de mammifères marins | | Gamme fréquentielle audible |
|-----------------------------|---|-----------------------------|
| BF | Balénidés (<i>Balaena</i> , <i>Eubalaenidae</i> spp.); Balénoptéridés (<i>Balaenoptera physalus</i> , <i>B. musculus</i>); Balénoptéridés (<i>Balaenoptera acutorostrata</i> , <i>B. bonaerensis</i> , <i>B. borealis</i> , <i>B. edeni</i> , <i>B. omurai</i> ; <i>Megaptera novaeangliae</i>); Neobalenidae (<i>Caperea</i>), Eschrichtiidae (<i>Eschrichtius</i>) | 7 Hz à 35 kHz |
| HF | Physeteridae (<i>Physeter</i>); Ziphiidae (<i>Berardius</i> spp., <i>Hyperoodon</i> spp., <i>Indopacetus</i> , <i>Mesoplodon</i> spp., <i>Tasmacetus</i> , <i>Ziphius</i>); Delphinidae (<i>Orcinus</i>); Delphinidae (<i>Delphinus</i> , <i>Feresa</i> , <i>Globicephala</i> spp., <i>Grampus</i> , <i>Lagenodelphis</i> , <i>Lagenorhynchus acutus</i> , <i>L. albirostris</i> , <i>L. obliquidens</i> , <i>L. obscurus</i> , <i>Lissodelphis</i> spp., <i>Orcaella</i> spp., <i>Peponocephala</i> , <i>Pseudorca</i> , <i>Sotalia</i> spp., <i>Sousa</i> spp., <i>Stenella</i> spp., <i>Steno</i> , <i>Tursiops</i> spp.); Montodontidae (<i>Delphinapterus</i> , <i>Monodon</i>); Plantanistidae (<i>Plantanista</i>) | 150 Hz à 160 kHz |
| THF | Delphinidae (<i>Cephalorhynchus</i> spp.; <i>Lagenorhynchus cruciger</i> , <i>L. australis</i>); Phocoenidae (<i>Neophocaena</i> spp., <i>Phocoena</i> spp.) Phocoenoides); Iniidae (<i>Inia</i>); Kogiidae (<i>Kogia</i>); Lipotidae (<i>Lipotes</i>); Pontoporiidae (<i>Pontoporia</i>) | 275 Hz à 160 kHz |

Tableau 1 : Classification des cétacés selon leurs gammes auditives fonctionnelles [5] et [6]

Une exposition sonore suffisamment intense peut entraîner, chez un animal, une augmentation du seuil d'audition, dont la durée de persistance dépend essentiellement du temps d'exposition, de l'amplitude et de la fréquence du signal. Cette modification du seuil d'audition peut être temporaire (*TTS*) ou permanente (*PTS*).

Pour les signaux impulsionnels, la durée de l'exposition sonore n'est pas le seul critère pouvant entraîner un dommage physiologique. C'est en ce sens que le NMFS propose pour les signaux impulsionnels une approche duale en exprimant les seuils *TTS* et *PTS* à la fois en SEL_{cum} (niveau d'exposition sonore cumulée) et en SPL_{PK} . Par ailleurs, la valeur crête de la pression acoustique ne tient pas compte des fréquences auxquelles l'animal considéré est le plus sensible, les fonctions de pondération ne sont donc pas considérées pour la métrique SPL_{PK} . Les seuils *PTS* retenus par la NOAA et l'équipe de Southall sont précisés dans le Tableau 2 [5,6].

| Groupe | SEL_{cum} (pondéré) En dB re $1\mu Pa^2s$ | SPL_{PK} (non pondéré) En dB re $1\mu Pa$ |
|--------|--|--|
| BF | 183 | 219 |
| HF | 185 | 230 |
| THF | 155 | 202 |

Tableau 2: Valeurs des seuils *PTS* pour des signaux impulsionnels [5,6].

1.2.3 Résultats

Conformément aux résultats de l'évaluation des risques sonores des sources sismiques de l'Ifremer deux classes de sources sismiques ont été définies :

- Classe 1 pour des volumes de sources supérieurs à 500 in^3 soit 8.2 litres, pouvant potentiellement impacter les mammifères marins.
- Classe 2 : pour des volumes de sources inférieurs à 500 in^3 soit 8.2 litres.

Cette classification est justifiée en Annexe 2.

Le protocole de mitigation des émissions sonores est appliqué uniquement à la classe 1. La Classe 2 ne fait pas l'objet de mesures particulières de contrôle ou de mitigation.

Le Tableau 3 synthétise les résultats de l'évaluation des risques sonores pour les sources sismiques de l'Ifremer les plus puissantes, notées S_1 ($V = 2570 \text{ in}^3$) et S_2 ($V = 4990 \text{ in}^3$). Les caractéristiques détaillées de ces sources sont fournies en Annexe 3. Pour les cétacés des groupes BF (critère impactant : SEL_{cum}) et HF, espèces les plus rencontrées lors des campagnes de géosciences marines de l'Ifremer, les rayons d'exclusion maximum ainsi calculés sont de l'ordre de 100 m (Tableau 3). En prenant un rayon d'exclusion de 500 m (retenu dans le protocole Ifremer et dans la majorité des protocoles appliqués au niveau international), le facteur de sécurité est donc proche de 5. En considérant les cétacés du groupe THF, avec une probabilité de rencontre très faible sur les campagnes hauturières, le critère impactant est le SPL_{PK} . Le calcul donne alors un rayon d'exclusion maximum de 420 m, qui reste toujours inférieur à la distance de sécurité de 500 m définie dans le protocole Ifremer. Ce rayon est calculé pour des mammifères marins dans l'axe de la source. Pour des espèces évoluant en surface ou à faible immersion, l'atténuation causée par la directivité de l'antenne est de l'ordre de 30 dB, ce qui ramène le rayon d'exclusion à 13 m pour la catégorie THF.

En conclusion, définir un rayon d'exclusion de 500 m pour les sources sismiques de volume supérieur à 500 in³ est donc une mesure conservative.

| | | Groupe de cétacés | | |
|----------------|--|-------------------|-----|-----|
| | | BF | HF | THF |
| | Seuils_SPL _{PK} (dB re 1 μPa) | 219 | 230 | 202 |
| S ₁ | Rex_SPL _{PK} (m) | 41 | 11 | 288 |
| S ₂ | Rex_SPL _{PK} (m) | 60 | 17 | 422 |
| | Seuils_SEL _{cum} (dB re 1 μPa ² .s) | 183 | 185 | 155 |
| S ₁ | Rex_SEL _{cum} (m) | 114 | 0 | 2 |
| S ₂ | Rex_SEL _{cum} (m) | 103 | 0 | 3 |

Tableau 3: Synthèse des seuils et des rayons d'exclusion (m) des Sources S₁ et S₂ pour les trois groupes de cétacés.

La Figure 4 représente les résultats de la modélisation du SEL_{cum} pour les cétacés BF le long d'un profil d'acquisition sismique pour la source sismique la plus pénalisante : S₁.

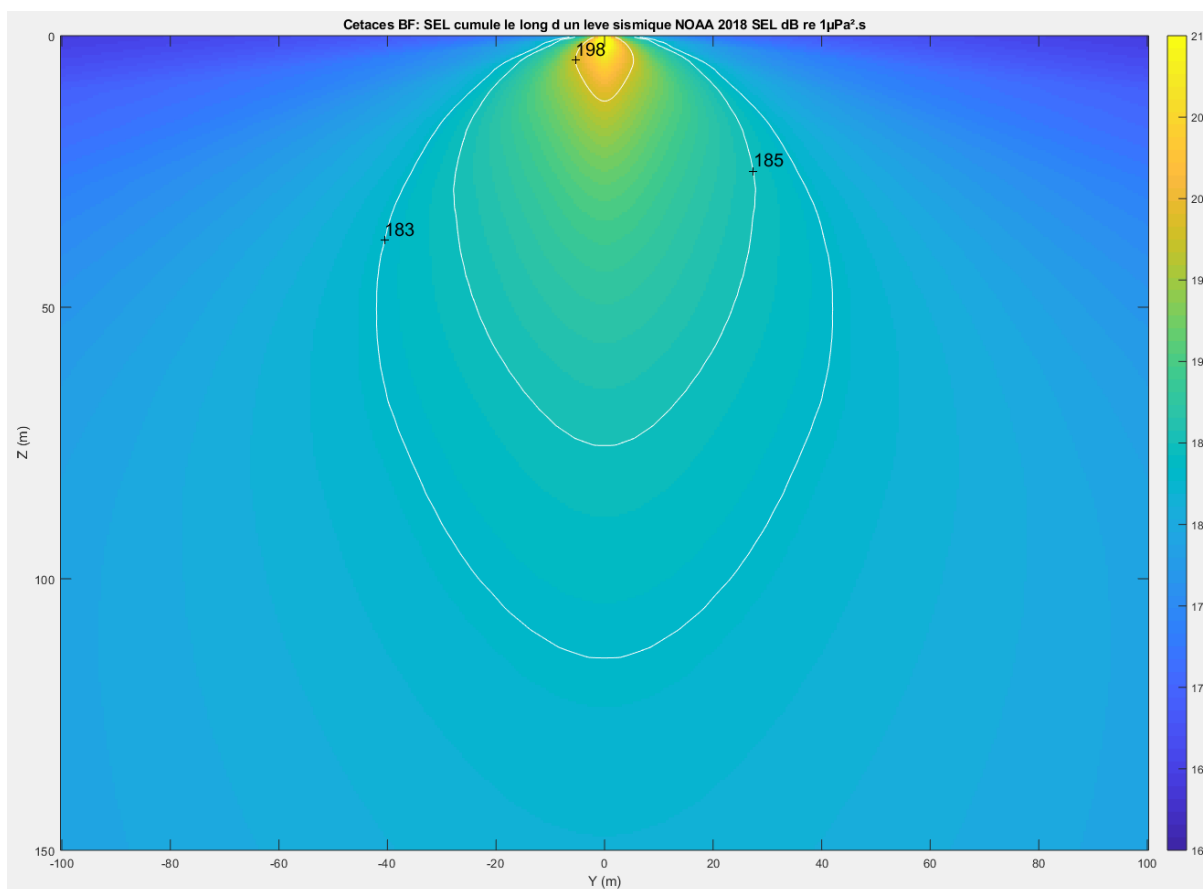


Figure 4: Cas des cétacés BF : SEL_{cum} le long d'un profil d'acquisition sismique pour la source S₁ de 2570 in³

1.3 Description et résumé des mesures de mitigation retenues par l’Ifremer

1.3.1 Avant la campagne

Les équipes scientifiques sont informées des mesures de mitigation définies par l’Ifremer lors des dépôts de dossiers de candidature répondant à l’appel d’offres pour les campagnes océanographiques. Tout projet de campagne mettant en œuvre des sources sismiques de classe 1 s’accompagne d’une pré-étude (menée par l’Ifremer) de la compatibilité des opérations prévues avec la sauvegarde de la population de mammifères marins et des tortues sur la zone (voir § 2.1) et dans un deuxième temps d’une analyse des risques sonores potentiels (voir § 2.2). La programmation de la campagne (zone et période d’étude) tient compte des résultats de cette évaluation, et également des mesures locales pouvant être imposées par l’Etat riverain en réponse à une demande d’autorisation de travail dans les eaux sous sa juridiction.

1.3.2 Pendant la campagne

La procédure de mitigation des émissions sismiques est applicable pour les opérations impliquant des émissions des sources sismiques de classe 1 (justification fournie au § 2.1.3. et dans l’Annexe 2 du présent rapport), autour desquelles une zone d’alerte et une zone d’exclusion spécifique sont définies. Elle inclut les points suivants :

- des observateurs de mammifères marins sont embarqués pour effectuer une surveillance visuelle des zones explorées. Ces observateurs ont pour fonction de détecter la présence d’espèces concernées dans la zone d’exclusion et au sein de la zone d’alerte. Ils recueillent également toutes informations relatives au comportement des mammifères marins pendant les émissions sismiques.
- Les émissions sismiques ne peuvent débuter qu’après une période d’observation préliminaire destinée à constater l’absence de cétacés dans la zone d’exclusion ; elles commencent par une augmentation progressive du niveau (*ramp-up*) ; cette phase doit permettre aux animaux éventuellement présents sur zone de s’éloigner suffisamment de la source sismique.
- En cas de détection d’espèces concernées à l’intérieur de la zone d’exclusion définie autour de la source sismique, les émissions sont immédiatement arrêtées. Après éloignement des animaux avéré par une nouvelle période d’observation préliminaire, les émissions reprennent en respectant la même procédure d’initialisation.
- Le système PAM est déployé lorsque la réglementation de l’Etat riverain l’impose. En fonction du contexte, l’Ifremer se réserve le droit de le déployer et de l’utiliser en tant qu’équipement complétant et renforçant les moyens visuels de surveillance.
- L’autorité de demande d’arrêt des tirs revient aux observateurs de mammifères marins et aux opérateurs PAM.
- Le recrutement de l’équipe MMOs/opérateurs PAM est validé par l’Ifremer.

2 PROTOCOLE DE PROTECTION DE LA FAUNE MARINE CONTRE LES EMISSIONS SISMIQUES DES SOURCES DE CLASSE 1

N.B. Les mesures décrites ici et leur cadre d’applicabilité correspondent à l’autorégulation définie par l’Ifremer pour son activité propre mettant en œuvre ses sources sismiques. Elles ne se substituent pas à l’application d’éventuelles réglementations issues de lois spécifiques de l’Etat riverain.

Le protocole présenté ici est une révision de la version précédente (Révision 3). Cette mise à jour tient compte des dernières connaissances scientifiques concernant l'évaluation des risques sonores, des récents guides et recommandations internationaux [5, 6] visant la protection des mammifères marins lors des acquisitions sismiques (cf. Annexe 1), mais également des retours d'expériences des observateurs embarqués lors des trois dernières années. Dans ce contexte, ce protocole de protection définit les mesures les mieux adaptées et les plus pertinentes à appliquer pour les campagnes mettant en œuvre les sources sismiques de forte puissance de l'Ifremer.

2.1 Etude amont et risques sonores

Chaque proposition de campagne mettant en œuvre un équipement sismique de l'Ifremer de classe 1 doit s'accompagner d'une étude préalable de la présence potentielle de populations des espèces concernées sur zone, amenant éventuellement à un aménagement des opérations prévues. Cette pré-étude est menée à l'Ifremer lors de la phase d'instruction préliminaire des dossiers de proposition de campagnes ; un comité ad hoc se réunit pour cette analyse.

En fonction des conclusions de la pré-étude, l'Ifremer se réserve le droit de proposer des aménagements au programme des travaux prévus (en particulier les dates de programmation) voire de refuser la demande.

Les modalités d'examen préliminaire et les résultats de l'évaluation sont annoncés aux équipes déposant une proposition de campagne faisant l'objet de cette procédure.

2.1.1 Zones protégées

Les zones écologiquement importantes pour les mammifères marins (zones de nourrissage et de reproduction, de mise-bas, couloirs de migration, et zones connues pour être des habitats potentiels de grands plongeurs) doivent faire l'objet de mesures de protection approfondies et particulières. Les connaissances nécessaires pour identifier de telles zones sont par ailleurs indispensables, et un effort spécifique de collecte de ces données dans la littérature doit éventuellement être mené.

2.1.2 Espèces concernées

Les mammifères marins sont classés en 6 catégories en fonction de leurs capacités auditives. Des fonctions de pondération et des seuils de dangerosité ont été définis pour chacun de ces groupes [5, 6].

Le protocole s'applique pour les espèces suivantes :

- l'ensemble des mysticètes,
- les grands odontocètes (cachalot, orque, fausse orque, globicéphale, baleine à bec, dauphin de Risso),
- l'ensemble des cétacés THF.

Le protocole s'appliquant pour des sources sismiques de forte puissance déployées en pleine mer, les mammifères côtiers (pinnipèdes et siréniens) ne font pas partie des EC.

Les tortues marines sont par contre considérées comme des espèces concernées et font l'objet de mesures de mitigation spécifiques, voir § 2.2.8.

Les petits delphinidés, nageurs rapides, sont couramment observés à l'étrave du navire, donc à plus de 100 m de la source sismique et par conséquent en dehors de la zone de risque physiologique pour ces espèces (le rayon d'exclusion calculé est de l'ordre de 13 m en tenant compte de la directivité de la source, voir § 1.2.3). Par conséquent, le protocole ne tient pas compte de ces petits delphinidés (de type *Stenella* ou *Delphinus* espèces évoluant principalement en surface ou sub-surface). Toutefois, en cas de réglementation spécifique de protection de ces espèces appliquées par l'Etat riverain, ils seront alors considérés comme espèces concernées. Par ailleurs, si une espèce présente sur zone ne peut pas être identifiée par les observateurs, le principe de précaution est appliqué.

2.1.3 Etude des risques sonores

Le protocole de mitigation des émissions sonores est appliqué uniquement à la classe 1, et le rayon d'exclusion, entraînant un arrêt des sources acoustiques quand une espèce concernée pénètre dans le périmètre de sécurité, est fixé à 500 m.

Ces mesures de protection adoptées par l'Ifremer sont très précautionneuses à plusieurs titres :

- Le SEL cumulé reçu par le mammifère est estimé en intégrant l'émission correspondant au passage du navire au CPA afin d'incorporer la contribution la plus forte à l'exposition sonore. Il tient compte de la cadence de tir et de la vitesse du navire. Les pertes de transmission, la directivité et les fonctions de pondération sont également prises en compte;
- La limite entre les deux classes d'après les calculs est située à 800 in^3 . Le choix d'une limite à 500 in^3 est donc conservatif. ;
- En fonction du groupe de cétacés et du critère d'évaluation choisi, le calcul donne des rayons d'exclusion compris entre 100 m (catégorie BF) et 400 m (catégorie THF). Le choix d'un rayon unique de 500 m est donc très conservatif car il tient compte de la catégorie THF, peu observable au large.

2.2 Mesures appliquées durant la campagne

2.2.1 Zone d'exclusion et Zone d'alerte

La zone d'exclusion est définie par un cercle centré sur la source sismique et de rayon 500 m. En dehors de cette zone, la probabilité de dommages physiologiques chez les EC est considérée comme négligeable. Cette zone est surveillée par l'équipe de mitigation lors des périodes d'acquisition sismiques (recherche pré-tir, démarrage progressive des sources et tir à pleine puissance). Dès lors qu'une EC est détectée dans cette zone, les opérations sont reportées ou arrêtées, en fonction de la phase du processus d'acquisition.

La zone d'alerte est définie par un rayon de 1,5 km autour de la source. Toute détection visuelle d'espèce concernée à l'intérieur de cette zone implique obligatoirement un échange immédiat d'information par radio entre équipe MMO, opérateurs PAM et équipe sismique Genavir. Le comportement de l'animal doit alors être observé de façon spécialement attentive.

Le rayon de la zone d'alerte pour le système PAM est illimité. Par conséquent, en période diurne, toute détection acoustique doit être immédiatement signalée (par radio) aux MMOs.

2.2.2 Surveillance visuelle

Deux observateurs visuels doivent être en poste durant toute la durée des activités sismiques, du lever au coucher du soleil pour surveiller les zones et signaler toute présence d'espèces concernées. Cette période comprend donc l'aurore et le crépuscule sous réserve que la luminosité soit suffisante pour réaliser des observations efficaces. Le responsable MMO est juge de l'appréciation de la luminosité. Etant donné les temps de repos nécessaires à une bonne concentration, il est recommandé de faire embarquer 3 observateurs afin de pouvoir effectuer des rotations. En cas d'utilisation du PAM, le nombre total d'observateurs (MMOs + PAM) sera adapté aux spécificités de la campagne (nature et durée des travaux).

Les observateurs doivent se trouver à un point suffisamment haut du navire pour leur assurer une vue dégagée et efficace pour la détection de mammifères marins, en général le pont supérieur ou la passerelle.

La détection des animaux se fait à l'œil nu. Les jumelles graduées permettent ensuite d'identifier et de localiser l'animal. De façon générale, la distance est calculée à partir du nombre de réticules séparant l'horizon de l'observation.

Les observateurs ont toute autorité pour faire cesser les tirs en cas de présence d'espèces concernées dans la zone d'exclusion. Ils ont également un rôle de conseil et d'expertise auprès du bord et de la mission scientifique, dans les situations qui nécessitent un avis de spécialistes.

2.2.3 Surveillance acoustique

Du fait des limitations actuelles des performances du système PAM, son déploiement n'est pas systématique, et dépend de la réglementation éventuellement applicable dans le pays concerné. Toutefois, l'Ifremer se réserve le droit d'imposer ce système pour certaines campagnes définies au cas par cas, en fonction de la zone et de la période considérées ainsi que des caractéristiques des sources mises en œuvre. En cas de décision de déploiement, le protocole spécifique défini ci-après s'applique.

Un opérateur PAM doit être disponible durant toute la durée des activités sismiques. Comme pour les détections visuelles par les MMOs, en cas de détections acoustiques d'EC dans la zone d'exclusion, l'ordre d'arrêt des tirs relève de la responsabilité des opérateurs PAM. Les données PAM seront systématiquement enregistrées pour chaque détection acoustique et/ou visuelle, qu'elle soit à l'intérieur ou à l'extérieur des zones, et pendant les pauses des opérateurs.

En temps réel, il est très difficile de différencier acoustiquement les différentes espèces de delphinidés. Par précaution, un arrêt des tirs est ordonné lorsque l'opérateur PAM est en mesure de localiser plusieurs trains de clics émis par des petits cétacés non identifiés alors que les observations visuelles ne permettent pas de lever le doute sur leur espèce.

Pour les clics HF (Haute fréquence) (> 100 kHz) la localisation n'est pas nécessaire du fait de l'absorption rapide des signaux émis à de telles fréquences, qui interdit pratiquement des détections à des distances supérieures à 500 m. La détection de clics HF indique donc la présence de mammifères marins à l'intérieur de la zone d'exclusion.

Plus généralement, la localisation acoustique des mammifères marins avec le système PAM 2D de l'Ifremer est un processus complexe et imprécis du fait de sa configuration géométrique particulière. Dans ce cas, le calcul de triangulation n'est précis que si l'animal se déplace à une faible vitesse,

hypothèse valable par exemple pour des cachalots et baleines à bec. En revanche, pour la plupart des delphinidés, cette condition n'est plus respectée, et l'imprécision de localisation peut être élevée. L'ordre d'arrêt repose alors sur les compétences et l'expérience des opérateurs PAM, capables de juger si la situation justifie un arrêt des tirs. Les éventuelles discussions sur la détection et la localisation des animaux, si nécessaires, ne pourront avoir lieu qu'après l'arrêt des canons.

De nuit ou dans des conditions de faible visibilité, lorsque le système PAM rencontre un problème technique affectant son fonctionnement, les acquisitions sismiques peuvent continuer pendant 30 minutes, durée allouée à l'opérateur pour évaluer l'incident. Passé ce délai, si le PAM nécessite une réparation, alors les tirs sismiques peuvent continuer pendant une heure, sous réserve qu'aucune espèce concernée n'ait été détectée par le PAM dans la zone d'exclusion au cours des deux heures précédant son arrêt. Une fois passé ce délai d'une heure, si le PAM n'est toujours pas réparé, les émissions sismiques devront être stoppées et ne pourront reprendre qu'une fois que les conditions permettant l'observation visuelle seront rétablies.

2.2.4 Recherche pré-tir

La recherche pré-tir vise à s'assurer de l'absence d'EC dans la zone d'exclusion en préalable à toute émission. Les zones de plus de 200 m de fond sont connues pour abriter des grands plongeurs (cachalots, baleines à bec) à longue durée d'apnée (> 30 min). La durée de la recherche pré-tir ou les moyens pour détecter la présence de ces grands plongeurs sont adaptés de manière à optimiser leurs observations. Le Tableau 4 définit la durée de la recherche pré-tir en fonction de la hauteur d'eau et de la configuration de l'équipe de mitigation. En fonction de la zone géographique et de la saison ces paramètres peuvent être également adaptés.

| Hauteur d'eau | 3 MMOs | MMOs/PAM | PAM |
|---------------|--------|----------|--------|
| 0 à 200 m | 30 min | 30 min | 30 min |
| > 200 m | 60 min | | 60 min |

Tableau 4 : Durée de la recherche pré-tir en fonction de la configuration de l'équipe de mitigation et de la hauteur d'eau

Si une observation visuelle et/ou une détection acoustique d'une EC a lieu dans la zone d'exclusion pendant la recherche pré-tir, le démarrage progressif des sources sismiques doit être reporté jusqu'à ce que 30 ou 60 min (voir Tableau 4) consécutives se soient écoulées sans présence détectable d'EC dans la zone d'exclusion.

2.2.5 Démarrage progressif des sources

Une séquence de tirs sismiques à pleine puissance ne peut avoir lieu qu'après une phase de démarrage progressif de la source (dite *soft-start* ou *ramp-up*) destinée à éloigner les animaux éventuellement présents, et leur faire quitter la zone potentiellement dangereuse. Le démarrage progressif des sources sismiques s'étend sur une durée comprise entre 20 et 40 min et commence par les émissions du canon le moins puissant de l'antenne, minimisant ainsi le risque de lésion auditive (par exemple un canon Mini-GI émet typiquement un niveau crête de l'ordre de 220 dB re 1 μ Pa @ 1 m alors que le niveau des sources complètes peut excéder 250 dB). Puis les autres canons

sont mis en service successivement, jusqu'à atteindre le niveau d'émission maximal à la fin de la durée programmée.

L'objectif de ce protocole est de protéger les espèces concernées des émissions sismiques et de manière générale, de limiter les émissions sonores inutiles. Le *soft-start* doit donc être appliqué de façon à minimiser l'intervalle de temps entre sa phase finale de tirs à pleine puissance et le début de profil, soit 30 min maximum.

Si une EC est observée ou détectée dans la zone d'exclusion pendant la phase de *ramp-up*, les canons sont alors stoppés. Le *pré-watch* reprend de façon à ce qu'un délai de 30 ou 60 min consécutives se soit écoulé sans nouvelle observation d'EC.

La reprise des tirs à plein régime sans phase de *soft-start* est autorisée après des arrêts d'une durée inférieure à 15 minutes et si la détection d'EC dans les zones d'exclusion s'avère négative par les MMOs et opérateurs PAM. Cette disposition ne concerne pas les arrêts induits par la présence d'EC dans la zone d'exclusion.

2.2.6 Arrêt des tirs

Dès qu'une EC pénètre dans la zone d'exclusion, les MMOs et/ou opérateurs PAM ont autorité pour faire cesser les tirs sismiques : l'ordre d'arrêt est directement donné aux techniciens Genavir, par radio UHF. Aussitôt après, les MMOs et/ou opérateurs PAM informent l'officier de quart, le commandant et le chef de mission. L'arrêt des tirs doit être immédiat.

Le *pré-watch* reprend lorsque les animaux détectés sont en dehors du champ de vision des observateurs, de façon à ce qu'un délai de 30 ou 60 min consécutives s'écoule sans observation d'EC.

Toutefois, lorsque les petits delphinidés sont considérés comme EC et en raison de leur capacité de nage rapide, le démarrage progressif des sources peut reprendre dès qu'ils ne sont plus observés ou détectés dans la zone d'exclusion.

Par ailleurs les observateurs alertent l'équipe sismique dès que des animaux s'approchent de la zone d'exclusion (notion de zone d'alerte, voir §2.2.1) afin de pouvoir anticiper un éventuel arrêt des tirs et minimiser le temps de réaction.

2.2.7 Changement de profil

Lors du dépôt de dossier de proposition de campagne, l'intention de collecter les données sismiques pendant les girations pour répondre aux objectifs scientifiques doit être manifestée par le chef de mission. Les phases de girations sont alors considérées comme des zones de levé sismique sur la zone d'étude, et soumises aux mêmes contraintes de surveillance. Dans ce cas uniquement, les tirs sismiques pourront continuer pendant les girations.

Dans le cas contraire, seul le plus petit canon sera maintenu en marche pendant les girations. Avant de reprendre les acquisitions en conditions nominales d'émission, un démarrage progressif devra être appliqué pendant 20 à 40 minutes avant le début de profil.

2.2.8 Cas particuliers des tortues

Les tortues marines seraient capables de percevoir des signaux sonores dans une gamme allant de 50 à 1000 Hz. Toutefois, à l'heure actuelle, les seuils de dangerosité ne sont pas connus [15 à 21]. Trois états (Brésil, Canada et Etats-Unis) ont inclus les tortues parmi les espèces concernées. En raison de leur faible taille et de leur nage en surface, elles ne peuvent être observées qu'à de faibles distances même avec de bonnes conditions météorologiques ; un rayon d'exclusion de 500 m est

donc inapplicable. Pratiquement on retient une distance d'exclusion de 100 m autour du navire. Dès qu'une tortue est observée à l'intérieur de cette zone, les opérations sont stoppées pendant 5 minutes, temps nécessaire au navire pour s'éloigner suffisamment de la tortue. Les tirs sismiques peuvent reprendre à plein régime au bout de ces 5 minutes si la tortue n'est plus observée dans un rayon de 100 m autour du navire.

2.2.9 Qualifications des MMOs et Opérateurs PAM

Il est essentiel que les MMOs et les opérateurs PAM soient indépendants de l'Ifremer, de Genavir et de l'équipe scientifique embarquée, afin de pouvoir mener leur activité en toute impartialité et sans conflit d'intérêt.

Il est également primordial que les MMOs et les opérateurs PAM soient qualifiés et expérimentés. Les MMOs doivent pouvoir justifier d'expériences préalables² dans l'observation en mer et la conduite d'études de terrain, ainsi que des connaissances suffisantes sur l'identification des mammifères marins et leur écologie. Ils doivent être aptes à suivre un protocole scientifique strict et à réaliser rigoureusement la saisie des informations dans une base de données informatiques. Les MMOs doivent être réactifs, avoir un bon sens relationnel et savoir prendre et assumer des décisions (arrêt des tirs, engagement des diverses procédures) conditionnant le déroulement de la mission scientifique. Ils doivent être à même de conseiller le bord, les techniciens sismique et l'équipe scientifique dans certaines situations ou de leur apporter des explications sur la situation et sur les décisions prises.

L'opérateur PAM doit pouvoir justifier de son expérience dans la détection en temps réel de mammifères marins, et de formations adéquates. Il doit être apte à utiliser le logiciel *PamGuard* et à le configurer, connaître le matériel et pouvoir apporter des conseils en cas de difficulté de fonctionnement. Il doit avoir des expériences préalables d'études de terrain, être réactif et savoir prendre des décisions.

Préalablement à chaque campagne, une réunion d'information dédiée à l'application des protocoles de mitigation et aux mesures propres à la campagne est organisée par l'Ifremer et la société prestataire à l'attention de l'équipe de mitigation. Cette réunion ne peut en aucun cas constituer leur seule qualification ou expérience : elle a pour but d'informer les MMOs et les opérateurs PAM sur les mesures spécifiques qui seront appliquées lors de la campagne et les méthodes d'observation préconisées par l'Ifremer, mais les personnels doivent déjà avoir acquis au préalable les connaissances théoriques et pratiques nécessaires. Il est également vivement encouragé de recruter un personnel doté de la double compétence MMO/PAM de façon à relayer les opérateurs si besoin (pause-déjeuner par exemple).

La réunion d'information comprend plusieurs grands thèmes:

- Principes de base et présentation des outils de sismique,
- Objectifs scientifiques et déroulement de la campagne sismique,
- Notions d'acoustique sous-marine,
- Impacts acoustiques,
- Espèces présentes dans la zone de travail,
- Protocole de protection des espèces concernées,

² L'équipe de MMOs et d'opérateurs PAM peut toutefois être constituée de seniors encadrant des juniors en formation. On entend par Junior une personne ayant suivi une formation mais ayant pas ou peu d'expérience terrain.

- L'organisation du travail et des responsabilités à bord.

Avant le début des opérations sismiques, le responsable de l'équipe MMOs/PAM doit présenter à l'ensemble de l'équipe scientifique, aux techniciens opérationnels Genavir, et aux membres d'équipage concernés, le protocole de mitigation qui sera appliqué, l'organisation du travail de son équipe à bord et les responsabilités de cette équipe. Rappelons que le chef de mission a connaissance de ce protocole au plus tard lors de la réunion de préparation de campagne avec DFO/PON.

2.2.10 Recueil de données

Le recueil des données est un point crucial de ce type de campagnes. Un certain nombre d'informations doit être relevé systématiquement afin de pouvoir exploiter au mieux les données d'observation acquises.

Tout au long des périodes d'observation, les conditions environnementales doivent être relevées régulièrement, en cohérence avec les observations faites par le bord : état de la mer, conditions météo, éblouissement... L'activité du navire doit également être renseignée (travaux en cours, vitesse, cap...). Ces paramètres doivent être actualisés dès que l'une des conditions vient à changer. Les heures de début et de fin de chaque période d'observation pendant laquelle l'ensemble des paramètres est stable doivent être notées. L'heure UTC est utilisée afin d'être compatibles avec les enregistrements du journal de bord (ou autre logiciel de navigation ou de suivi de quart).

Chaque observation d'EC doit être notée, qu'elle ait lieu dans la zone d'exclusion ou en dehors. L'espèce doit être renseignée dans la mesure du possible, ainsi que le nombre d'individus, le comportement des animaux, la distance et le gisement par rapport au navire.

Les informations sont notées sur des fiches normalisées (cf. Annexe 4 et 5) lors des périodes d'observation puis saisies dans la base de données. La centralisation dans une seule et unique base est essentielle pour s'assurer de l'harmonisation et de la standardisation des données.

Le respect du protocole, la standardisation des procédures et des données, et le recueil de tous les paramètres nécessaires garantissent une exploitation scientifiquement rigoureuse des données acquises. Les observations de comportement collectées durant les émissions sismiques sont des données pertinentes pour étudier l'impact de ce type d'activités sur les mammifères marins et faire éventuellement évoluer les protocoles applicables.

La prise de photographies est encouragée afin d'identifier *a posteriori* les espèces qui n'ont pu l'être sur le moment ou pour confirmer des identifications effectuées. Toutefois, cette prise de photos ne doit pas se faire au détriment de la qualité des observations et de la surveillance, ni de la capacité de réaction rapide, qui restent la priorité.

En plus des observations des EC lors des acquisitions sismiques, l'équipe de mitigation est encouragée à collecter des données sur la mégafaune marine dans son ensemble et les activités humaines lorsque cela est possible (sans nuire à la mitigation de la Zex).

Hors période de tirs, les MMOs collecteront des données sur la mégafaune marine dans son ensemble et les activités humaines selon le protocole hors-tir qui leur sera remis lors de la réunion d'information.

2.2.11 Reporting

A l'issue de la campagne, les MMOs et les opérateurs PAMs doivent rédiger un rapport relatant sous forme chronologique le déroulement de la mission, les observations effectuées, les situations rencontrées, les arrêts de tir et leurs circonstances. Le rapport doit également faire le point sur les difficultés rencontrées, les solutions trouvées ou non, et les améliorations qui pourraient être apportées à l'avenir, conformément à la trame donnée en Annexe 6. Par ailleurs, un compte-rendu hebdomadaire synthétique est demandé au responsable de l'équipe MMOs/PAM. Toutes ces activités de reporting sont régies contractuellement. De plus, l'ensemble des données numériques (photos, fichiers xls de collecte de données et d'analyses, les cartes SIG et shapefiles) sont à retourner à l'Ifremer lors de la livraison du rapport provisoire.

3 CONCLUSIONS

Le protocole retenu par l'Ifremer pour la prévention des risques et la mitigation des émissions sonores pour la protection des espèces concernées (mammifères marins et tortues marines) est applicable lorsque l'équipement sismique de l'institut est mis en œuvre, avec des modalités dépendant des caractéristiques des sources utilisées (sources sismiques de Classe 1).

Il comprend un ensemble de règles définies en fonction des connaissances scientifiques actuelles dans ce domaine [5, 6]. Il est donc logiquement très similaire aux préconisations définies par d'autres acteurs internationaux dans divers domaines (scientifique, industriel, environnemental) et basées sur les mêmes éléments scientifiques.

On rappelle que ce protocole est une autorégulation définie par l'Ifremer pour encadrer son activité. Il n'exclut pas l'application d'autres mesures qui seraient demandées par exemple dans le cadre d'une régulation nationale ou régionale.

Enfin, l'Ifremer se réserve le droit de faire évoluer ce protocole en fonction des progrès ultérieurs des connaissances scientifiques, des technologies disponibles, de l'expérience de terrain acquise et des observations effectuées.

4 BIBLIOGRAPHIE

[1] Convention sur le droit de la mer (avec annexes, acte final et procès-verbaux de rectification de l'acte final en date des 3 mars 1986 et 26 juillet 1993), conclue à Montego Bay le 10 décembre 1982, RTNU, entrée en vigueur le 16 novembre 1994.

[2] **Ducatel, C, Le Gall, Y, Lurton, X. (2016).** Contrôle des risques sonores pour les mammifères marins - Protocole Ifremer pour les émissions sismiques. Brest, France: Ifremer IMN/NSE/ASTI-2016-5.

[3] **Lurton, X. and Antoine, L. (2007).** Analyse des risques pour les mammifères marins liés à l'emploi des méthodes acoustiques en océanographie (Rapport final). Brest, France: Ifremer DOP/CB/NSE/AS/07-07.

[4] **Lurton X. (2016).** Modeling of the sound field radiated by multibeam echosounders for acoustical impact assessment. Applied Acoustics (Elsevier BV), 2016-01, Vol. 101, P. 201-221, [10.1016/j.apacoust.2015.07.012](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.07.012)

[5] **National Marine Fisheries Service. (2018).** Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

[6] **Southall, B. L., Finneran, J.J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D.R., Bowles, Ann. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., Tyack, Peter.L. (2019).** Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. Aquatic Mammals 2019, 45(2), 125-232, DOI 10.1578/AM.45.2.2019.125.

[7] **Ducatel, C, Le Gall, Y, Lurton, X. (2019).** Evaluation des risques sonores des sources sismiques. Brest, France: Ifremer IMN/NSE/ASTI-2019-147.

[8] **Lurton X. (2010).** An Introduction To Underwater Acoustics – Principles and Applications, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, 680 pp

[9] **Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E. et al. (2007).** Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. Aquatic Mammals 33, 411-521.

[10] Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., Dooling, R., (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Mar. Pollut. Bull.* 103, 15–38. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.12.007

[11] Finneran, J.J., (2015). Noise-induced hearing loss in marine mammals: A review of temporary threshold shift studies from 1996 to 2015. *J. Acoust. Soc. Am.* 138, 1702–1726. doi:10.1121/1.4927418

[12] Finneran, J.J., Jenkins, A.K., (2012). Criteria and thresholds for US Navy acoustic and explosive effects analysis (Technical report). DTIC Document.

[13] Finneran, J.J., (2016). Auditory Weighting Functions and TTS/PTS Exposure Functions for Marine Mammals Exposed to Underwater Noise. Space and Naval Warfare Systems Center Pacific San Diego United States, San Diego, California.

[14] Ketten, D.R. (2009). Marine mammal auditory systems: summary of audiometric and anatomical data and its implication for underwater acoustics impacts. NOAA-Technical Memorandum NMFS-SW FSC-256.

[15] BARTOL, S.M., KETTEN, D.R., (2006). Turtle and tuna hearing. In: Swimmer, Y., Brill, R. (Eds.), *Sea Turtle and Pelagic Fish Sensory Biology: Developing Techniques to Reduce Sea Turtle Bycatch in Longline Fisheries* Technical Memorandum NMFS-PIFSC-7. National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA), US Department of Commerce, pp. 98–105.

[16] LAVENDER, A.L., BARTOL, S.M., BARTOL, I.K., (2014). Ontogenetic investigation of underwater hearing capabilities in loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) using a dual testing approach. *J. Exp. Biol.* 217, 2580–2589. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.096651>

[17] LENHARDT, M., (1994). Seismic and very low frequency sound induced behaviors in captive loggerhead marine turtles (*Caretta caretta*). *Proceedings of the Fourteenth Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation*. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-351, pp. p238–p241.

[18] MARTIN, K.J., ALESSI, S.C., GASPARD, J.C., TUCKER, A.D., BAUER, G.B., MANN, D.A., (2012). Underwater hearing in the loggerhead turtle (*Caretta caretta*): a comparison of behavioral and auditory evoked potential audiograms. *J. Exp. Biol.* 215, 3001–3009. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.066324>.

[19] Piniak, W., Eckert, S., Harms, C., Stringer, E., (2012). Underwater hearing sensitivity of the leatherback sea turtle (*Dermochelys coriacea*): assessing the potential effect of anthropogenic noise. In: U.S Department of the Interior Bureau of Ocean Energy Management (Ed.), U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Headquarters, Herndon, VA. OCS Study BOEM 2012-01156.

[20] DERUITER, S., LARBI DOUKARA, K., (2012). Loggerhead turtles dive in response to airgun sound exposure. *Endanger. Species Res.* 16, 55–63. <http://dx.doi.org/10.3354/esr00396>.

[21] Nelms, Sarah & Dow Piniak, Wendy & Weir, Caroline & Godley, Brendan. (2016). Seismic surveys and marine turtles: An underestimated global threat?. *Biological Conservation.* 193. 49-65. 10.1016/j.biocon.2015.10.020.

5 ANNEXES

5.1 Annexe 1 : Références des principaux guides et conventions

Le tableau ci-dessous dresse une liste non-exhaustive des principaux textes concernant le bruit sous-marin et la faune marine. La plupart de ces conventions, guides, normes, et procédures recommandées de caractère international revêtent une nature politique et ne sont pas juridiquement contraignantes. Toutefois, en application du principe de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, des mesures de précaution s'imposent.

| ORGANISMES | REFERENCES | DESCRIPTION |
|------------------|---------------------------|--|
| ACCOBAMS | Résolution 2.16 | Evaluation du bruit anthropique et de son impact |
| | Résolution 3.10 | Lignes directrices pour aborder le problème de l'impact du bruit d'origine anthropique sur les mammifères marins dans l'aire de l'ACCOBAMS |
| | Résolution 4.17 | Lignes directrices pour atténuer l'impact du bruit anthropique sur les cétacés dans la zone ACCOBAMS |
| | Résolution 6.17 | Bruit d'origine anthropique |
| | Résolution 6.18 | Mise en œuvre d'un certificat ACCOBAMS pour des Observateurs de Mammifères Marins Hautement Qualifiés |
| ASCOBANS: | Résolution 5.4 | Effets néfastes des bruits, des navires et d'autres formes de perturbation sur les petits cétacés |
| | Résolution 6.2 | Effets néfastes du bruit sous-marin sur les mammifères marins au cours des activités de construction en mer pour les activités de construction à partir de sources renouvelables |
| CDB | Décisions VIII / 28 | Lignes directrices volontaires de la CDB sur l'évaluation d'impact sur la diversité biologique |
| | Décision XII / 23» | Préconisation de l'utilisation des technologies moins bruyantes et application des meilleures pratiques disponibles dans toutes les activités pertinentes. |
| CMS | Résolution CMS 9.19 | Impacts acoustiques marins/océaniques anthropogènes nuisibles pour les cétacés et autres biotes. |
| | Résolution CMS 10.24 | Mesures supplémentaires pour réduire la pollution sonore sous-marine afin de protéger cétacés et autres espèces migratrices. |
| | UNEP/CMS/COP12/Doc.24.2.2 | Lignes directrices sur l'évaluation de l'impact environnemental du bruit sous-marin généré par les activités humaines. |
| | UNEP/CMS/Resolution 12.14 | Résolution adoptée par l'ensemble des Etats membres de l'ONU. Il s'agit d'un guide |

| | | |
|---------------|--|---|
| | | concernant l'évaluation des impacts environnementaux des activités marines génératrices de bruit |
| <u>OSPAR</u> | ICG-Noise | ICG-Noise a été créé afin d'organiser le travail selon 3 volets (Bruits impulsionsnels, coordonnées par la Grande-Bretagne, Bruit ambiant coordonnées par les Pays-Bas, et mesures d'atténuation coordonnée par l'Allemagne). |
| <u>UE</u> | TG Noise | Groupe de travail relatif au descripteur 11 de la DCSMM |
| <u>France</u> | Le Plan national d'action pour les cétacés | (action 43 du plan biodiversité) prévoit des mesures de réduction du bruit sous-marin d'origine anthropique |

5.2 Annexe 2 : Sources sismiques concernées par l'application du protocole

Seuils de risque d'atteinte physiologiques

Les valeurs de niveau crête (SPL_{PK}) et de niveau d'exposition sonore cumulé (SEL_{cum}) reçus par le mammifère marin sont à comparer aux seuils de risque d'atteinte physiologique définis aujourd'hui pour les cétacés des trois catégories (BF, HF et THF) et pour les signaux impulsionnels émis par les canons à air [5, 6]. Le protocole Ifremer repose sur l'utilisation de ces seuils objectifs définis par les risques physiologiques.

| Groupe | SEL_{cum} (pondéré) En dB (re. $1\mu Pa^2s$) | SPL_{PK} (non pondéré) En dB (re. $1\mu Pa$) |
|--------|--|--|
| BF | 183 | 219 |
| HF | 185 | 230 |
| THF | 155 | 202 |

Seuils PTS pour des signaux impulsionnels (d'après [5, 6])

Les deux seuils significativement impactants en termes de niveau d'exposition sonore cumulé et de niveau crête reçu sont :

- $SEL_{cum} = 183$ dB (re. $1 \mu Pa^2s$) pour la catégorie BF³,
- $SPL_{PK} = 202$ dB re. $1 \mu Pa$ pour la catégorie THF.

Sources sismiques concernées par les mesures de protection

La procédure Ifremer de mitigation des émissions est systématiquement applicable dans le cas d'émissions sismiques de forte puissance pour lesquelles la détermination des niveaux reçus conclut à des distances d'exclusion supérieures à 100 m.

Niveau d'exposition sonore cumulé

Tenant compte du seuil à 183 dB (re. $1 \mu Pa^2s$), le rayon d'exclusion en termes de SEL_{cum} a été estimé à partir d'un calcul le long d'un profil sismique type, pour les deux sources de forte puissance de l'Ifremer décrites en Annexe 3.

Pour les sources Ifremer S_1 (14 canons ; $V = 2570 \text{ in}^3$; cadence de tirs : 20 s) et S_2 (16 canons ; $V = 4990 \text{ in}^3$; cadence de tirs : 60 s), les rayons d'exclusion sont respectivement de 114 et 103 m, donc très proches de la limite de 100 m à partir de laquelle le protocole de mitigation s'applique.

Le dépassement du seuil de niveau d'exposition sonore cumulé à une distance de 100 m ne s'obtient donc que pour des sources sismiques très puissantes (réflexion ou réfraction) de volume important ($> 2500 \text{ in}^3$).

³ En raison de l'application des fonctions de pondération fréquentielle, qui élimine de fait les catégories HF et THF de l'impact des signaux sismiques de très basses fréquences

Niveau sonore crête reçu

Pour un niveau sonore crête reçu à 100 m égal à la valeur maximale acceptable (202 dB re. 1 μ Pa), il est possible de remonter au niveau d'émission de la source à la distance de référence (R_0) de 1 m :

$$SL_{PK}(R_0) = 202 + PT(100 \text{ m}) = 202 + 40 = 242 \text{ dB re. } 1 \mu\text{Pa à } 1 \text{ m,}$$

pour une perte de transmission $PT(R) = 20 \log(R/R_0)$.

Le niveau d'émission peut se traduire en pression acoustique crête (p_{max} : grandeur très classiquement utilisée pour caractériser les sources sismiques) à la distance (R_0) :

$$SL_{PK}(R_0) = 20 \log_{10} (p_{max} / p_{ref}) \text{ avec } p_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$$

On trouve dans notre cas :

$$p_{max} = 12.6 \text{ bar à } 1 \text{ m}$$

Le logiciel *Sisource* permet de modéliser la signature acoustique d'antennes constituées de plusieurs canons à air, à partir de mesures effectuées en mer sur les canons individuels. Il a été utilisé ici pour simuler la configuration d'antenne, faisant appel à des canons de types *GGUN*, qui génère un niveau de pression crête comparable à la valeur obtenue de 12.6 bar à 1 m. Une antenne placée à une immersion de 6 m et constituée de trois canons *GGUN* de 250 in³ et d'un canon *GGUN* de 45 in³ transmet ce niveau de pression acoustique :

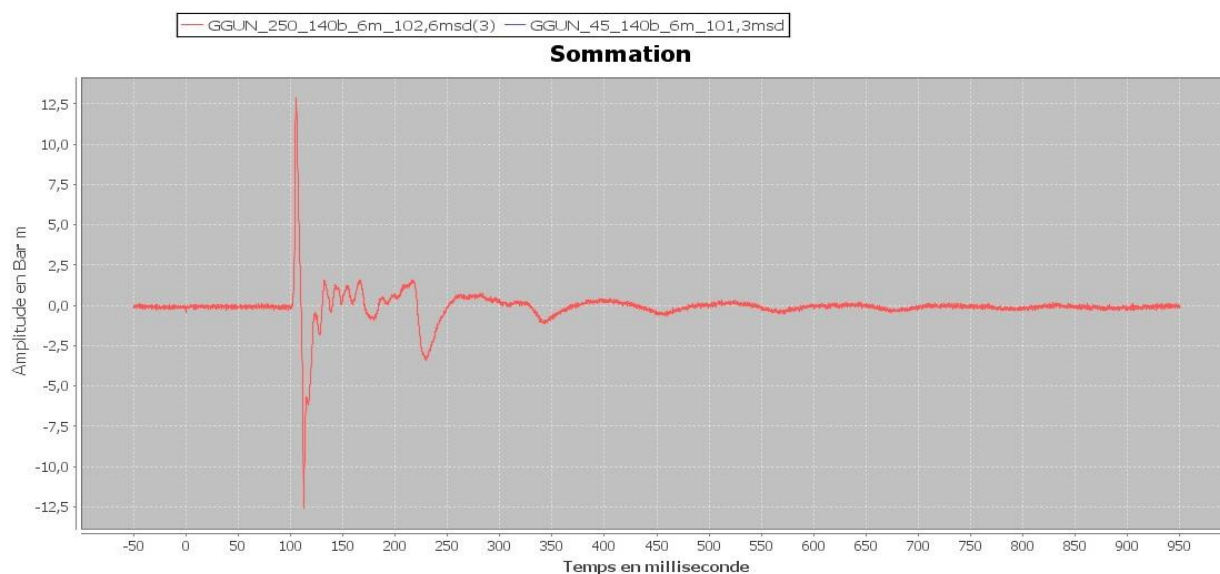


Figure 5: Signature acoustique (simulation *Sisource*) de la source constituée de 4 canons *GGUN* (3x250 in³ + 1x 45 in³)

Le dépassement du seuil de niveau sonore crête reçu à une distance de 100 m est donc obtenu pour des sources sismiques de volume supérieur à $\sim 800 \text{ in}^3$. Le seuil de niveau sonore reçu par des mammifères de la catégorie THF est donc beaucoup plus impactant que le seuil de niveau d'exposition sonore cumulé reçu par des mammifères de la catégorie BF.

Classes de sources sismiques

A partir de cette valeur-charnière de 800 in^3 , et appliquant un facteur de sécurité supplémentaire, nous avons fixé de façon conservatrice un **volume-limite de 500 in^3** . Nous retenons donc de classer les sources sismiques en deux catégories :

- **Classe 1** : sources dont le volume total est supérieur à 500 in^3 , pour lesquelles le protocole de mitigation des émissions sera appliqué,
- **Classe 2** : sources dont le volume total est inférieur à 500 in^3 , pour lesquelles aucun protocole de mitigation des émissions ne sera appliqué, sauf demande ou réglementation spécifiques de l'Etat riverain.

A titre de comparaison, la Nouvelle-Zélande applique son protocole "standard" (MMOs, PAM, pre-watch, ramp-up, ...) pour des sources sismiques dont le volume total est supérieur à 427 in^3 , valeur-charnière très comparable à celle retenue par l'Ifremer.

5.3 Annexe 3 : Caractéristiques acoustiques des sources

Parmi la classe 1 des sources sismiques de l’Ifremer deux types d’antenne sont utilisables en fonction des objectifs scientifiques des campagnes océanographiques. Le Tableau 5 synthétise les caractéristiques acoustiques de ces deux sources sonores.

| | Source 1 (S ₁) | Source 2 (S ₂) |
|--|--------------------------------|-----------------------------------|
| Volume total (in ³) | 2570 | 4990 |
| Nombre de canons | 14 | 16 |
| Immersion (m) | 6 | 10 |
| Dimensions de la source (m) | 9 m (longit.) x 15 m (transv.) | 10 m (longit.) x 16,5 m (transv.) |
| Pression maximale 0-pic (bar.m) | 36,52 | 53,10 |
| Cadence de tir : T (s) | 20 | 60 |
| Durée du signal (s) | 0,020 | 0,029 |
| SL _{PK} (dB re 1μPa @ 1 m) | 251,2 | 254,5 |
| SEL (dB re 1 μPa ² s @ 1 m) | 229,2 | 233,6 |

Tableau 5: Caractéristiques des antennes sismiques Ifremer de Classe 1

Description de la source S₁

La source S₁ compte 14 canons à air totalisant un volume d’air de 2570 in³ et présente une cadence de tir de 20 secondes.

La forme du signal dans le domaine temporel de S₁ est représentée sur la Figure 6. Le niveau maximum de pression (en valeur absolue) mesuré sur le tracé $p(t)$ est égal à 36,52 bar @ 1m, soit $36,52 \times 10^{11}$ μPa @ 1 m. Le niveau-crête de source (SL_{PK}) à la distance de référence R₀ de 1 m est défini comme :

$$SL_{PK}(R_0) = 20 \log(36,52 \times 10^{11}) \approx 251,2 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa @ } 1\text{m}$$

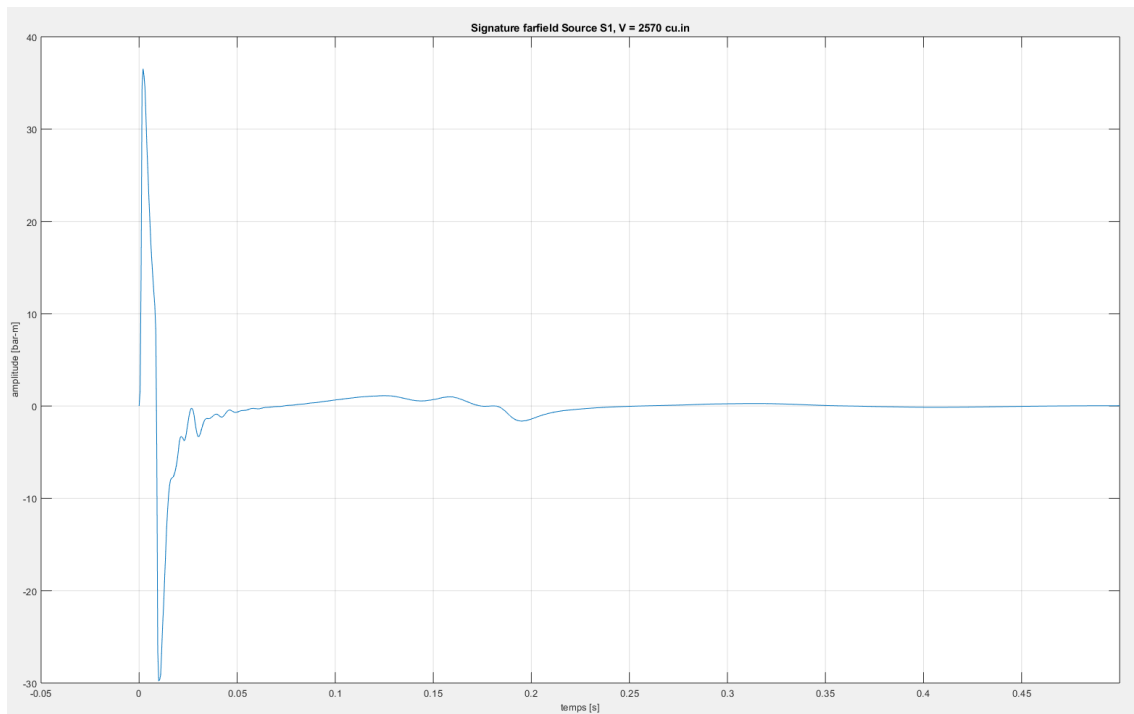


Figure 6: Signal temporel de la source sismique S_1 ($V=2570 \text{ in}^3$)

Le niveau d'exposition sonore (*SEL* : *Sound Exposure Level*, en dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$) pour un tir est donné par l'intégration de l'intensité sur le temps :

$$SEL = 10 \log \int p^2(t) dt$$

Dans ce cas, à partir du tracé de $p(t)$ donné en Figure 4, le SEL pour un 1 tir est égal à 229,2 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ à 1 m.

Le spectre fréquentiel (densité spectrale de puissance) obtenu par transformée de Fourier du signal $p(t)$ est représenté sur la Figure 7.

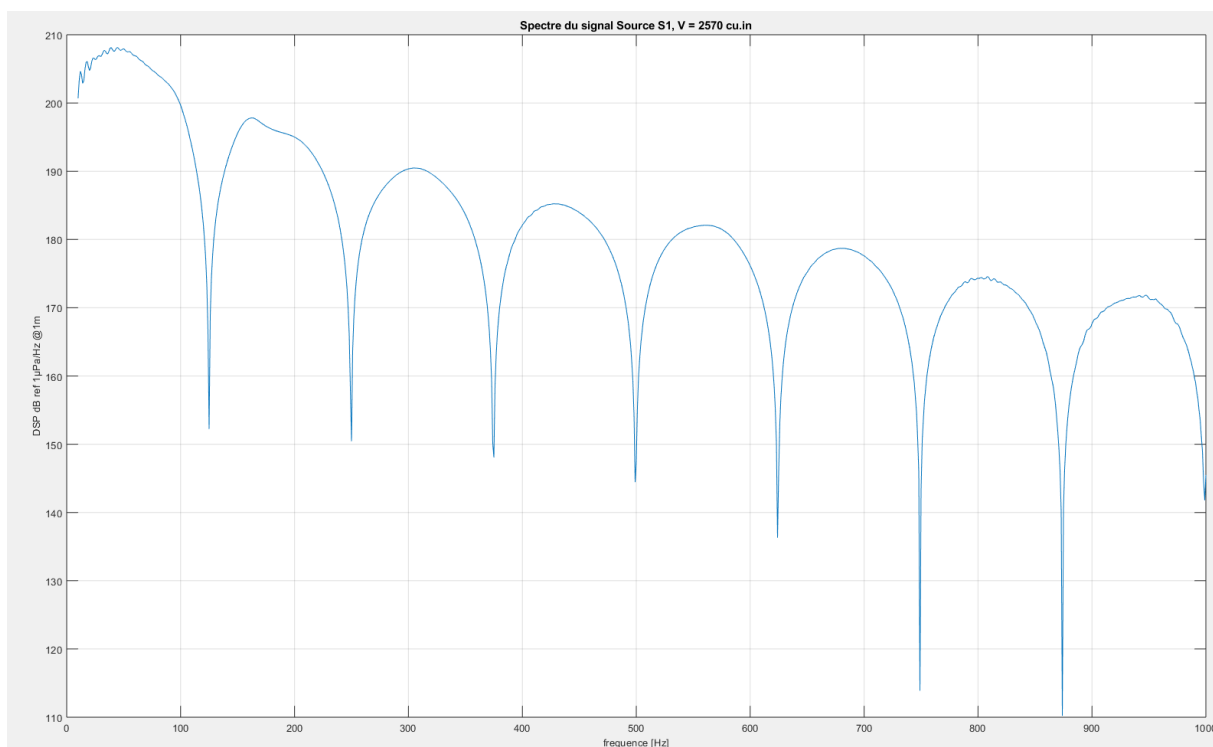


Figure 7: Spectre fréquentiel du signal sismique de la source S_1 ($V=2570 \text{ in}^3$)

Le maximum d'énergie (208,1 dB re $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ @ 1 m) est atteint pour une fréquence de 45 Hz. Le *SEL* calculé à partir de l'intégrale de l'énergie contenue dans le signal pour la gamme fréquentielle [2-1000 Hz] est de 229,2 dB re $1\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$ @ 1 m. Cette valeur est bien sûr cohérente avec celle obtenue en intégrant le signal temporel.

Modélisation de la Fonction de Directivité

La Figure 8 représente la fonction de directivité (*DF* pour *Directivity Function*) simulée de l'antenne sismique S_1 dans le plan vertical selon l'axe longitudinal du navire, en fonction de la fréquence de 0 à 250 Hz. Cette modélisation angle/fréquence est obtenue à l'aide du logiciel *Gundalf*[®], référence mondiale dans la simulation des antennes sismiques.

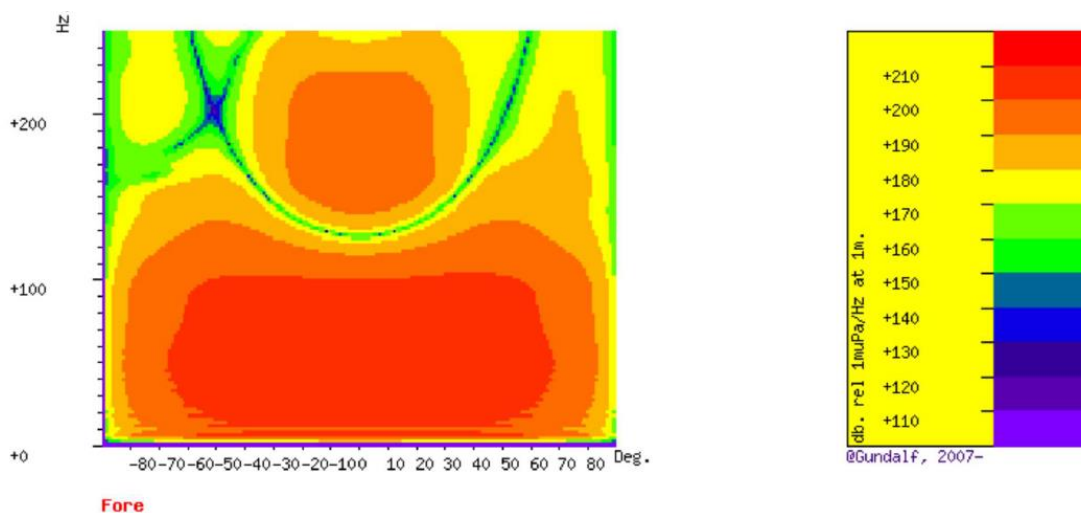


Figure 8: Directivité dans le plan vertical/longitudinal, gisement 0°, source sismique S_1 , Gundalf®

La Figure 9 représente la directivité, simulée par Gundalf®, de l'antenne sismique dans le plan vertical et selon l'axe transversal du navire.

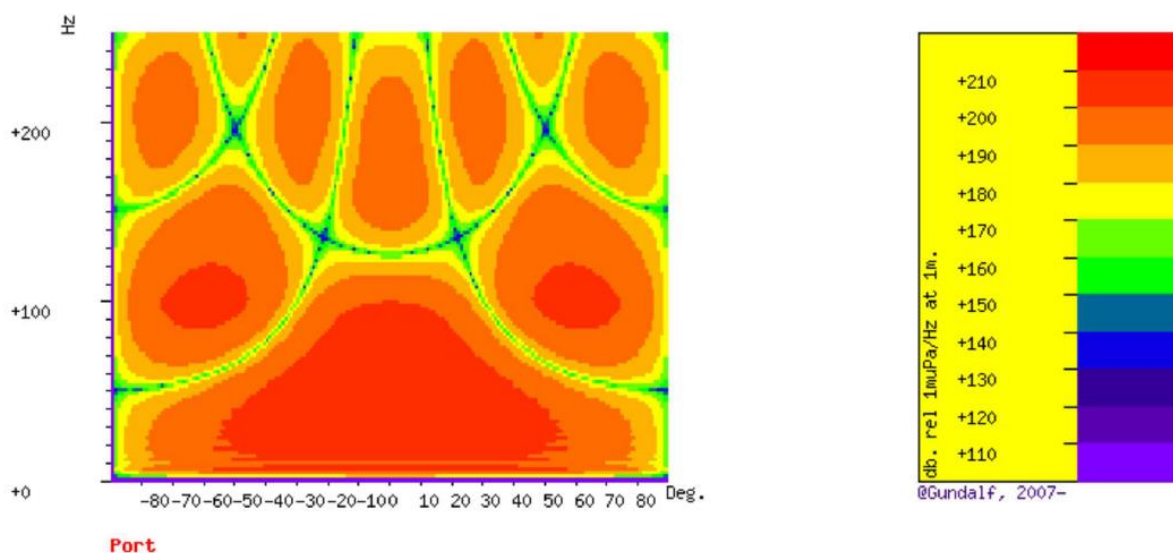


Figure 9: Directivité dans le plan transversal, gisement 90°, source sismique S_1 , Gundalf®

La Figure 10 représente les diagrammes de directivité verticale/longitudinale pour les fréquences de 10 à 50 Hz de la source S_1 .

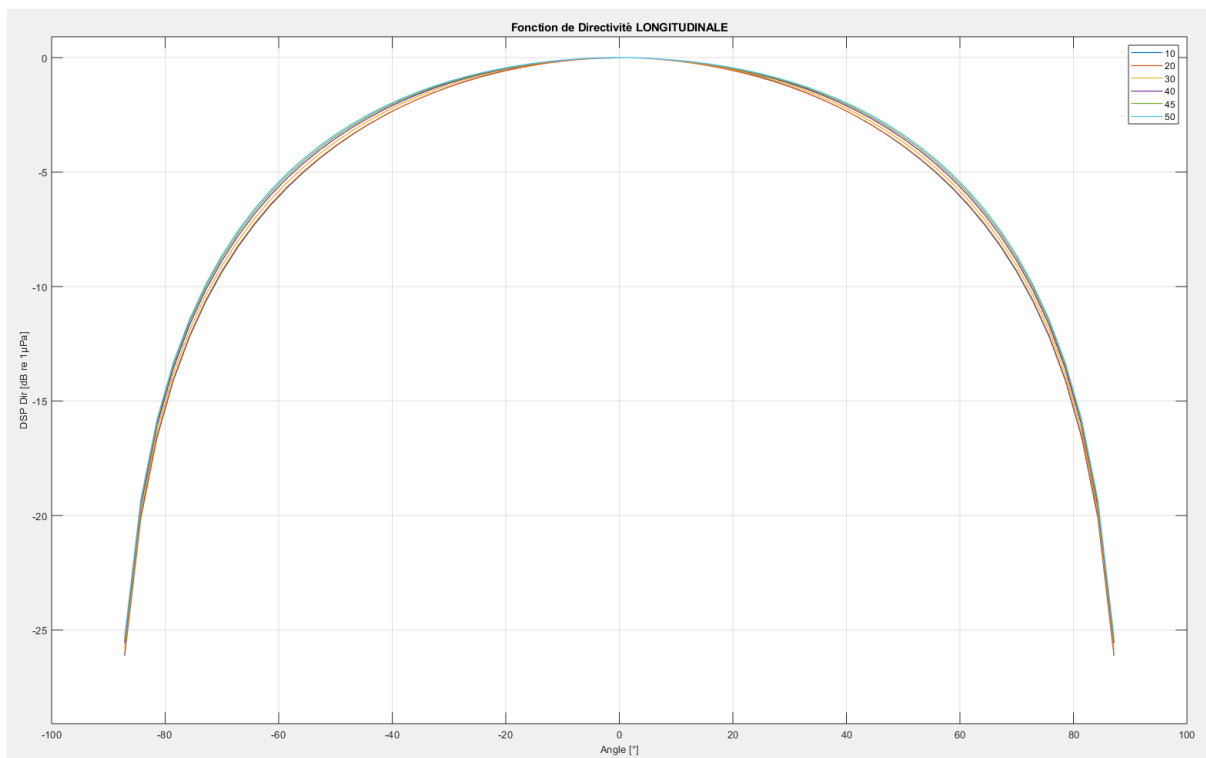


Figure 10: Diagrammes de directivité verticale/longitudinale de la source (S_1)

La Figure 11 représente les diagrammes de directivité verticale/longitudinal de 60 à 100 Hz.

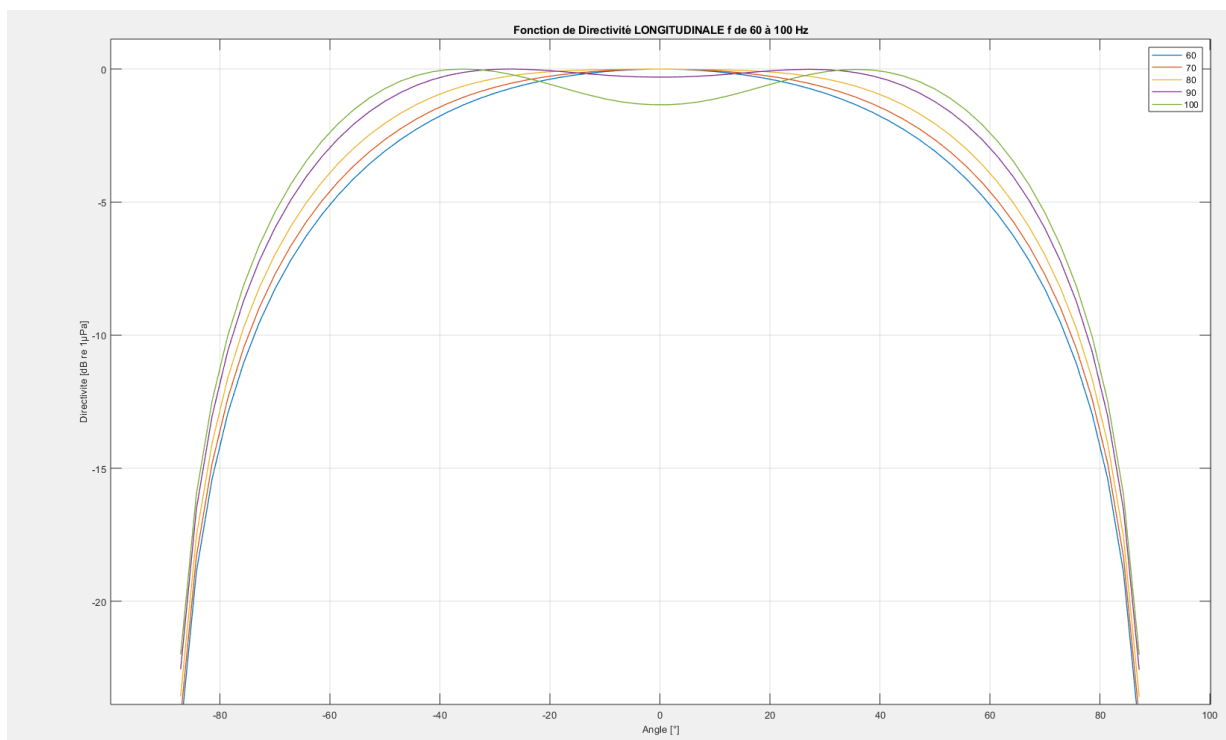


Figure 11: Diagrammes de directivité verticale/longitudinale de la source S_1

Description de la source S_2

Les Figures 12 et 13 représentent respectivement la forme du signal dans le domaine temporel et le spectre fréquentiel de la source S_2 , plus volumineuse (4990 in^3) que S_1 , et constituée de 16 canons émettant toutes les 60 secondes, à un $SL(R_0) = 254,5 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa @ } 1 \text{ m}$.

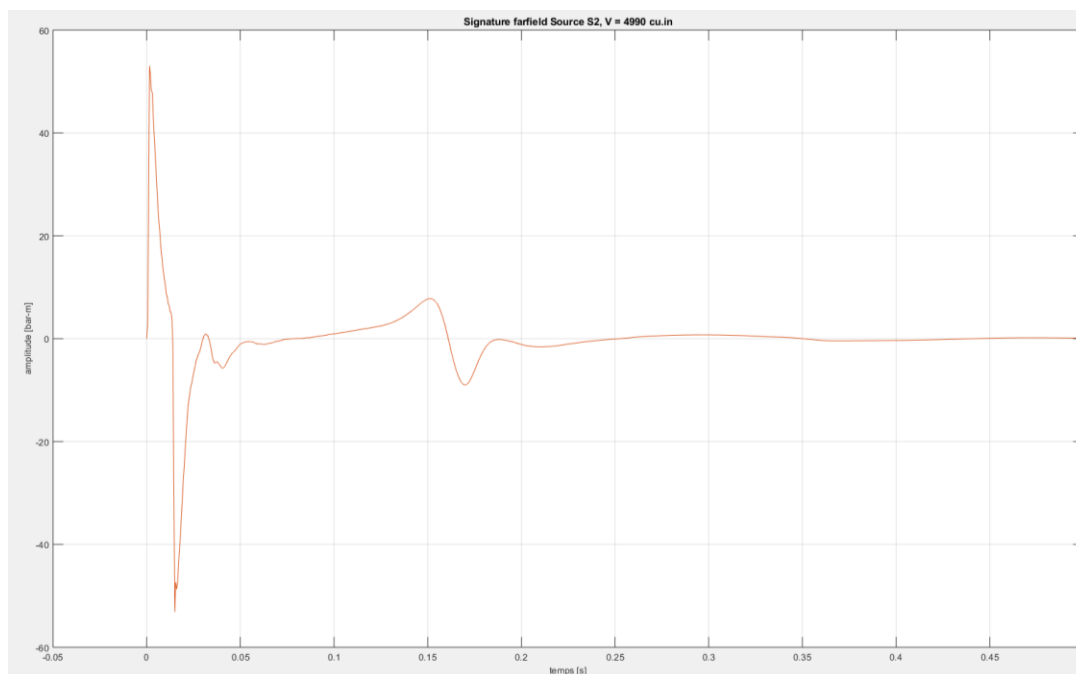


Figure 12 : Signal temporel de la source sismique S_2 ($V=4990 \text{ in}^3$)

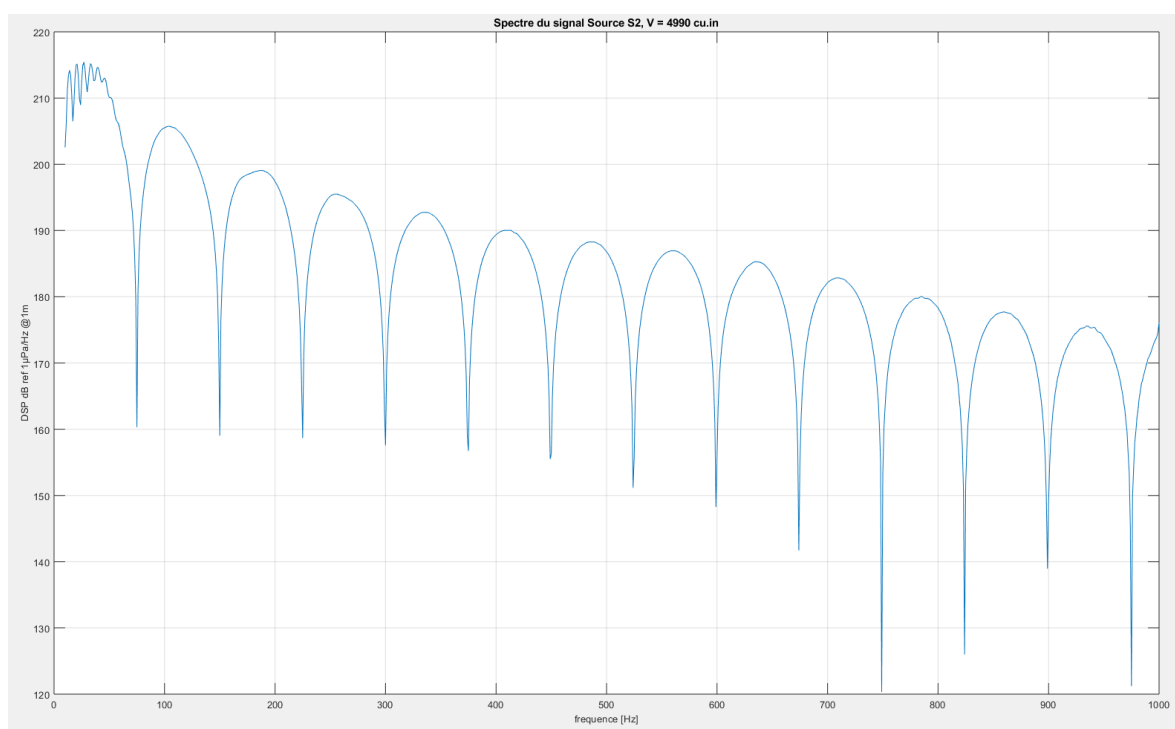


Figure 13: Spectre fréquentiel du signal sismique de la source S_2 ($V=4990 \text{ in}^3$)

Pour un tir, cette source de 4990 in³ présente niveau d'exposition sonore de 233,6 dB re 1μPa²s @ 1 m. Le maximum d'énergie (215,6 dB re 1μPa/Hz @ 1 m) est atteint pour la fréquence de 27 Hz.

Calcul de la Fonction de Directivité

La Figure 14 représente la fonction de directivité simulée de l'antenne sismique S₂ dans le plan vertical/longitudinal, en fonction de la fréquence de 0 à 250 Hz. Cette modélisation angle/fréquence est obtenue à l'aide du logiciel *Gundalf*[®]

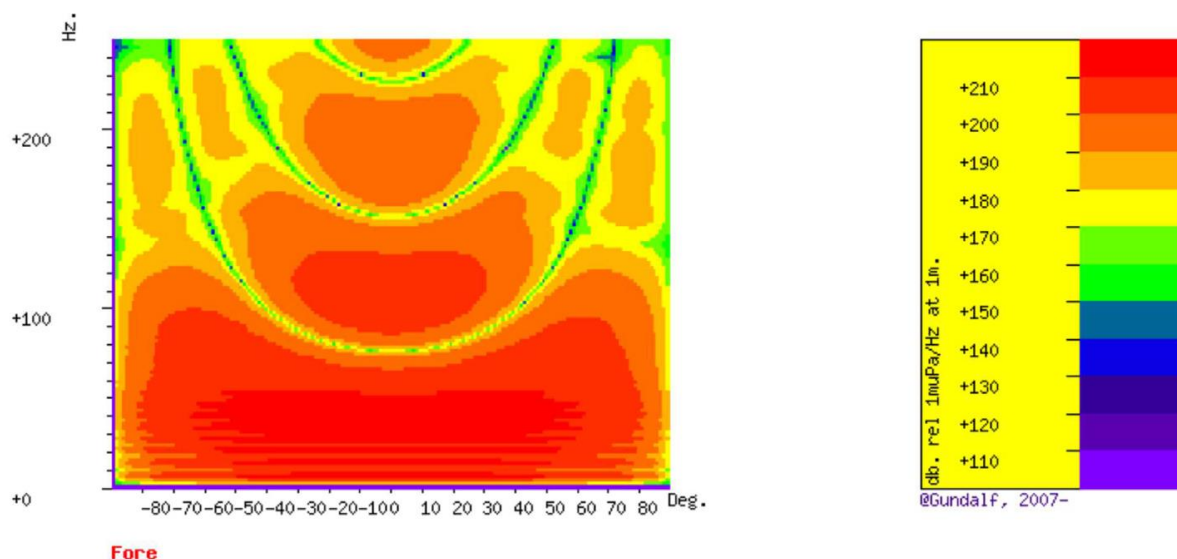


Figure 14: Directivité verticale/longitudinale, gisement 0°, source sismique S₂, Gundalf[®]

La Figure 15 représente la directivité, simulée par *Gundalf*[®], de l'antenne sismique dans le plan vertical transversal.

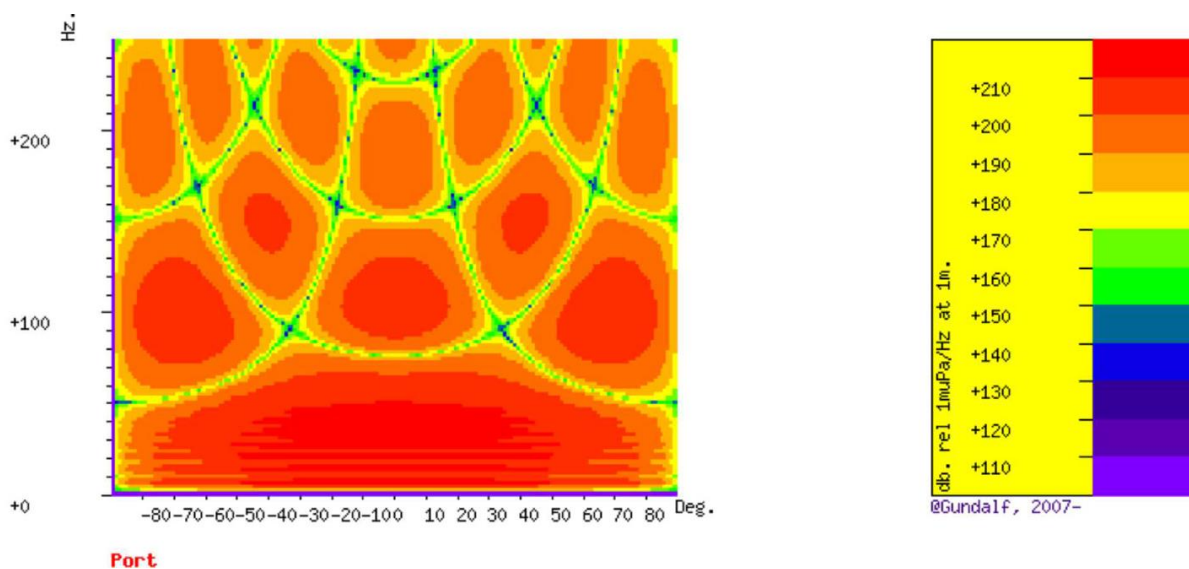


Figure 15: Directivité verticale/longitudinale, gisement 90°, source sismique S₂, Gundalf[®]

La Figure 16 représente les diagrammes de directivité verticale/longitudinale pour les fréquences de 10 à 50 Hz de la source S_2 .

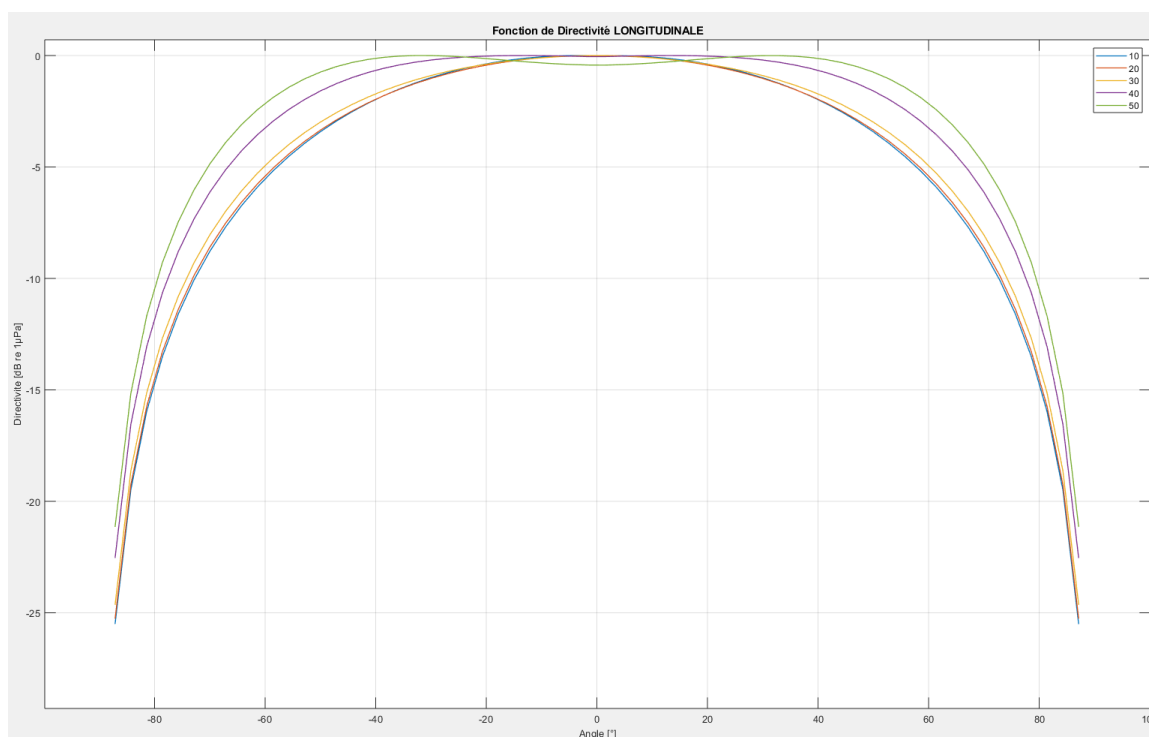


Figure 16: Diagrammes de directivité dans le plan vertical selon l'axe longitudinal de la source (S_2)

La Figure 17 représente les diagrammes de directivité verticale/longitudinale de 60 à 100 Hz de la source S_2 .

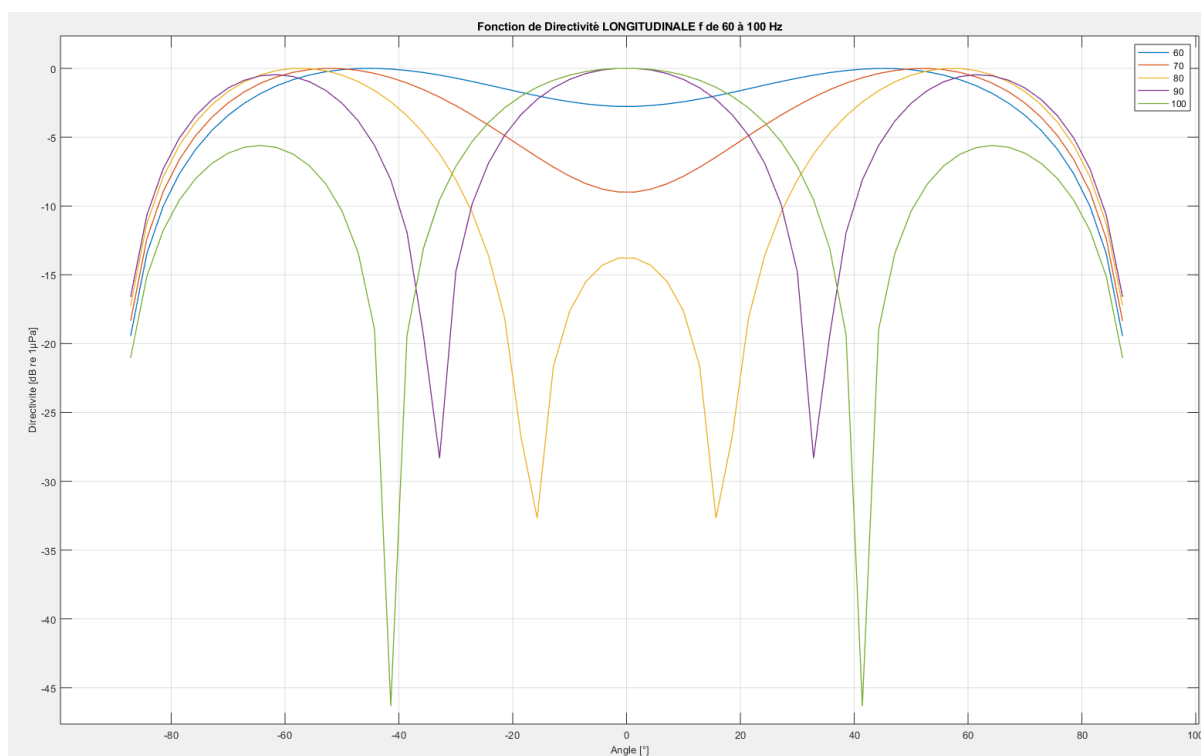


Figure 17: Diagrammes de directivité dans le plan vertical selon l'axe longitudinal de la source (S_2)

5.4 Annexe 4 : Fiches des MMOS et des opérateurs PAM



Compte Rendu d'observation de Mammifères marins

Campagne : Navire : Dates :

Observateur : Affiliation :

ENVIRONNEMENT

Date : Heure observation: Vitesse navire Cap navire

Zone : Longitude : Latitude : Hauteur d'eau

Etat de mer : T° air / eau Pluie Visibilité Vitesse vent : Direction vent :

Emission sismique : Emission sonar :

Remarques :

ANIMAUX OBSERVES

Espèce : Nombre : Adultes/jeunes Tailles : Photo/vidéo

Description des animaux

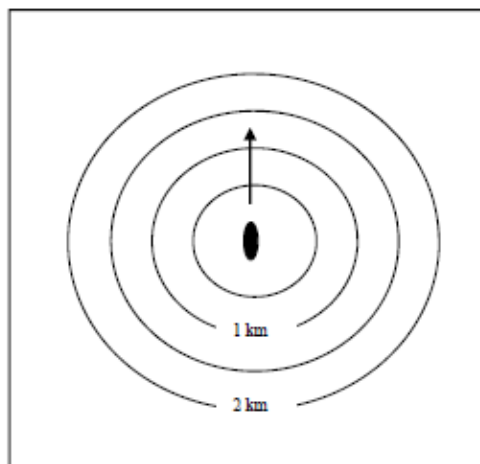
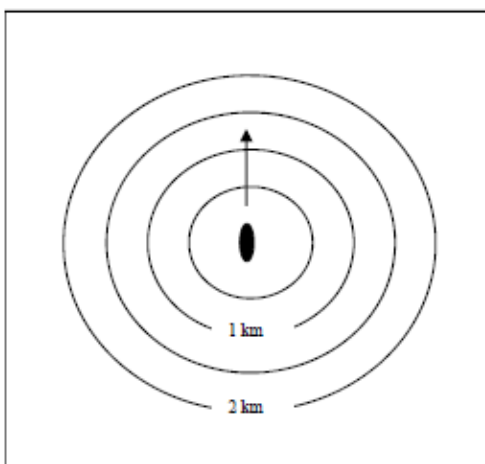
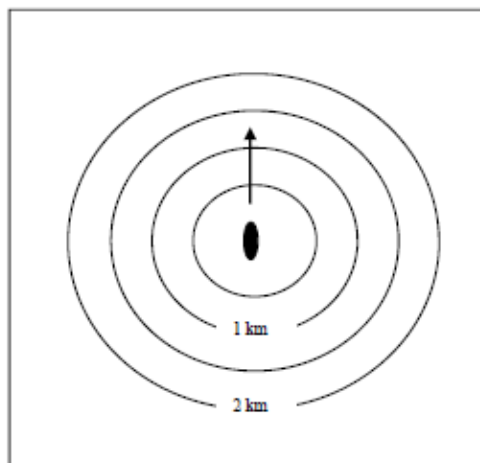
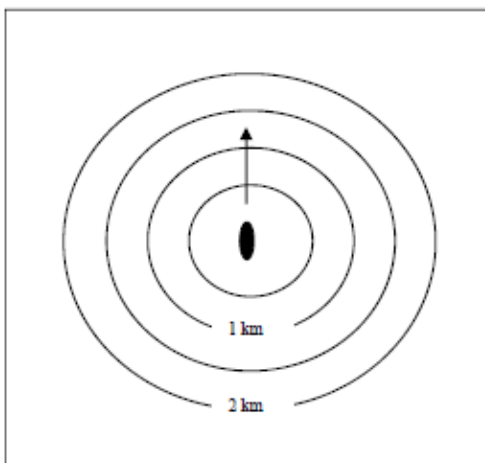
COMPORTEMENT DES ANIMAUX

En route Arrêté Etrave Autre

Description du comportement

DEPLACEMENTS PAR RAPPORT AU NAVIRE

Distance initiale au navire



| | | | |
|---|---------------------------|--------------------------------------|--|
| Compte-Rendu HEBDOMADAIRE | | | |
| Campagne | | Dates globales de la campagne | |
| <i>NOM</i> | | <i>DATE</i> | |
| Observateurs mammifères marins | | A bord du navire | |
| <i>NOM</i> | | <i>NOM</i> | |
| COMPTE RENDU N°X | | | |
| <i>Date</i> | | <i>Semaine n°X</i> | |
| Horaires de travail M/MO | | | |
| Horaires | | Nombre d'heures sans les repas | |
| Temps bureau à différencier de l'effort d'observation | | | |
| Heures de travail hors observations (saisie / tri des photos / identification espèces / planning / concertations) | | | |
| RECAPITULATIF DE L'EFFORT D'OBSERVATION | | | |
| Effort général (heure) | | Effort canons éteints (heure) | Effort canons allumés (heure) |
| Détails des phases | | | |
| SISMIQUE | | | HORS SISMIQUE |
| Manœuvre | Prewatch (pré-tir) | Ramp-up | Profils (tirs à pleine puissance) |
| Effort d'observation (heure) | | | Prospection (transit) |
| Nombre de phases | | | |

| | | | |
|--|--|------------------------------|---|
| RECAPITULATIF DES OBSERVATIONS | | | |
| Moyens visuels de prospection | | OBSERVATION D'ESPECES | |
| | | Espèces | Estimation du nombre d'individus |
| | | | Distances aux canons |
| <i>Nombre d'arrêts des canons suite à détection de mammifères marins</i> | | | |
| <i>Nombre d'observations totales canons en marche</i> | | | |
| <i>Nombre d'observations canons éteints</i> | | Photos des observations | |
| <i>Nombre d'observations de cétacés</i> | | | |
| <i>Nombre d'observations d'oiseaux</i> | | | |
| BILAN SUR LE RESPECT DU PROTOCOLE | | | |
| | | | |
| OBSERVATIONS SUR LES OPERATIONS EFFECTUEES ET L'EVOLUTION DE LA CAMPAGNE (résultats, planning opérations prévues, etc.) | | | |
| | | | |
| REMARQUES DIVERSES SUR LES CONDITIONS A BORD (échanges avec le bord, utilisation du matériel, mise en œuvre des protocoles, etc.) | | | |
| | | | |
| Conditions d'observations rencontrées (état de la mer et conditions subjectives) | | | |
| | | | |

5.5 Annexe 5 : EXTRAIT DE LA FICHE SYNTHETIQUE FIN DE CAMPAGNE

MITIGATION ACTION ON SURVEY

| | | NUMBERS OF | | | | |
|-----------|--------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---------------|---|
| | | DELAY | SHUTDOWN | NO ACTION | NONE REQUIRED | |
| DELSPP | MARINE MAMMALS | | | | | |
| | SMADEL | <i>Tursiops spp</i> | | | | |
| | SMADEL | <i>stenella longirostris</i> | | | | |
| | SMADEL | <i>Stenella frontalis</i> | | | | |
| | SMADEL | <i>Stenella attenuata</i> | | | | |
| | SMADEL | | | | | |
| | SMADEL | | | | | |
| | SMADEL | | | | | |
| | SMADEL | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | LARDEL | <i>Lagenodelphis hosei</i> | | | | |
| | LARDEL | <i>Sousa chinensis</i> | | | | |
| | LARDEL | | | | | |
| | LARDEL | <i>orca</i> | | | | |
| | LARDEL | | | | | |
| | LARDEL | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Blackfish | <i>Globicephala macrorhynchus</i> | | | | |
| | Blackfish | <i>pseudo crassidens</i> | | | | |
| | Blackfish | | | | | |
| Blackfish | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Blackfish | | | | | | |
| U DEL | | | | | | |
| | TOTAL DELSPP | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| PHYMAC | <i>Physeter macrocephalus</i> | | | | | |
| BALSPP | <i>Megaptera novaeangliae</i> | | | | | |
| | <i>Balaenoptera physalus</i> | | | | | |
| | <i>Balaenoptera</i> | | | | | |
| | | | | | | |
| U BALSPP | | | | | | |
| | TOTAL BALSPP | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| KOGSPP | <i>Kogia sima</i> | | | | | |
| | <i>Kogia breviceps</i> | | | | | |
| | U KOGIA | | | | | |
| | KOGSPP | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| UTW | Unidentified toothed whale | | | | | |
| UC | unidentified cetacean | | | | | |
| ZISPP | <i>Ziphus</i> | | | | | |
| | TOTAL DURING THE SURVEY | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Total Shutdown due to SoC detection | 0 |
| Total Delay due SoC detection | 0 |
| Total detection airguns ON | 0 |
| Total detection airguns OFF | 0 |
| TOTAL detection SoC | 0 |

| | | NUMBERS OF | | | |
|--------|--------------------|--------------------------------|----------|-----------|---------------|
| | | DELAY | SHUTDOWN | NO ACTION | NONE REQUIRED |
| TURTLE | SEA TURTLES | | | | |
| | TURTLE_Cc | <i>Caretta caretta</i> | | | |
| | TURTLE_Cm | <i>Chelonia mydas</i> | | | |
| | TURTLE_D | <i>Dermochelys coriacea</i> | | | |
| | TURTLE_E | <i>Eretmochelys imbricata</i> | | | |
| | TURTLE_Lk | <i>Lepidochelys kempii</i> | | | |
| | TURTLE_Lo | <i>Lepidochelys olivacea</i> | | | |
| | TURTLE_N | <i>Natator depressa</i> | | | |
| | U TURTLE | | | | |
| | | TOTAL DURING THE SURVEY | 0 | 0 | 0 |

5.6 Annexe 6 : : RAPPORT FINAL DE L'ACTIVITE DES MMOS ET DES OPERATEURS PAM (PLAN TYPE)

Résumé

1. Généralités

1.1. Contexte et objectifs de la mission (repris à partir du document de préparation de mission, faisant apparaître dates, zones géographiques et types d'opérations)

1.2. Mesures d'observation et de mitigation mises en œuvre (rappel des mesures spécifiques Ifremer, et de leur adaptation éventuelle à la campagne concernée, zone d'exclusion, détails des phases)

1.3. Populations de mammifères marins fréquentant la zone concernée (présentation à partir des éléments prévisionnels disponibles, faisant apparaître le statut des espèces concernées)

2. Méthodologie et organisation

2.1. Sources sismiques et équipements : configuration des sources sismiques : volume, géométrie, caractéristiques acoustiques (SEL, SPL), cadence de tir ; lister les autres équipements acoustiques activés

2.2. Planning des opérations : tableau synthétisant l'activité quotidienne du navire (transit, manœuvre, tir, etc.)

2.3. Observation visuelle (présentation et organisation) : postes d'observation, configuration de la plateforme d'observation, communication avec le bord, matériel, feuilles de terrain, route du navire, base de données, photo identification, comptes rendus hebdomadaires

2.4. Détection acoustique (présentation et organisation) : système utilisé, déploiement et paramétrage justifié du fichier de configuration Pamguard

2.5. Equipe de surveillance (liste des MMOs et opérateurs PAM, incluant leurs noms, affiliations, formations et spécialités)

3. Résultats

3.1. Opérations : préciser les éventuelles modifications de la configuration de la source, du plan de position, etc.

3.2. Faune marine observée pendant la campagne : efforts d'observation réalisés, diagramme représentant le détail de l'effort d'observation par activité du navire et par phase, tableau montrant le statut de l'effort d'observation par phase en nombre d'heures, bilan des opérations, conditions météorologiques d'observation, synthèse des principales observations d'espèces concernées et leur distribution, synthèse des principales observations de la faune marine, synthèse de l'activité humaine susceptible de générer un impact

3.3. Résultats de détection acoustique : efforts d'observation réalisés, diagramme représentant le détail de l'effort d'observation par activité du navire et par phase, tableau montrant le statut de l'effort d'observation par phase en nombre d'heures, effort d'observation et bilan des opérations, présentation des principales détections acoustiques : distribution des détections, heure des détections, durée des détections, hauteur d'eau lors des détections

3.4. Bilan sur le respect du protocole sismique : bilan sur les détections et observations à l'intérieur de la zone d'exclusion et des mesures prises, recoupement des observations visuelles et détections acoustiques

4. Discussion, recommandations et conclusions

Contenu laissé à l'initiative des observateurs et opérateurs

5. Annexes

Annexe A. Tableau détaillé des périodes d'observation (spécifiant les noms des observateurs en fonction des plages horaires, ainsi que l'activité sismique et sonar)

Annexe B. Liste détaillée des observations d'animaux marins (pour chaque observation : date, coordonnées géographiques et heure, espèce observée, nombre d'animaux et composition du groupe, distance de détection, état des opérations des canons à air, conséquence sur l'activité des airguns, remarques éventuelles). Peut être présenté sous forme de « fiches-événements », cf. Annexe 4 et 5.

Annexe C. Compte-rendu journaliers et hebdomadaires des périodes d'observations (report chronologique du déroulement des opérations et des observations)

Annexe D. Photographies et documents divers

5.7 Annexe 7 : Fiche avarie PAM

