

**EXPERTISE ACOUSTIQUE :
CARACTERISATION DE L'IMPACT
D'UNE CARRIERE D'EXTRACTION
DE ROCHES MASSIVES SUR LE
MILIEU MARIN (CARRIERE DE
KOUNGOU – MAYOTTE)**

RAPPORT FINAL

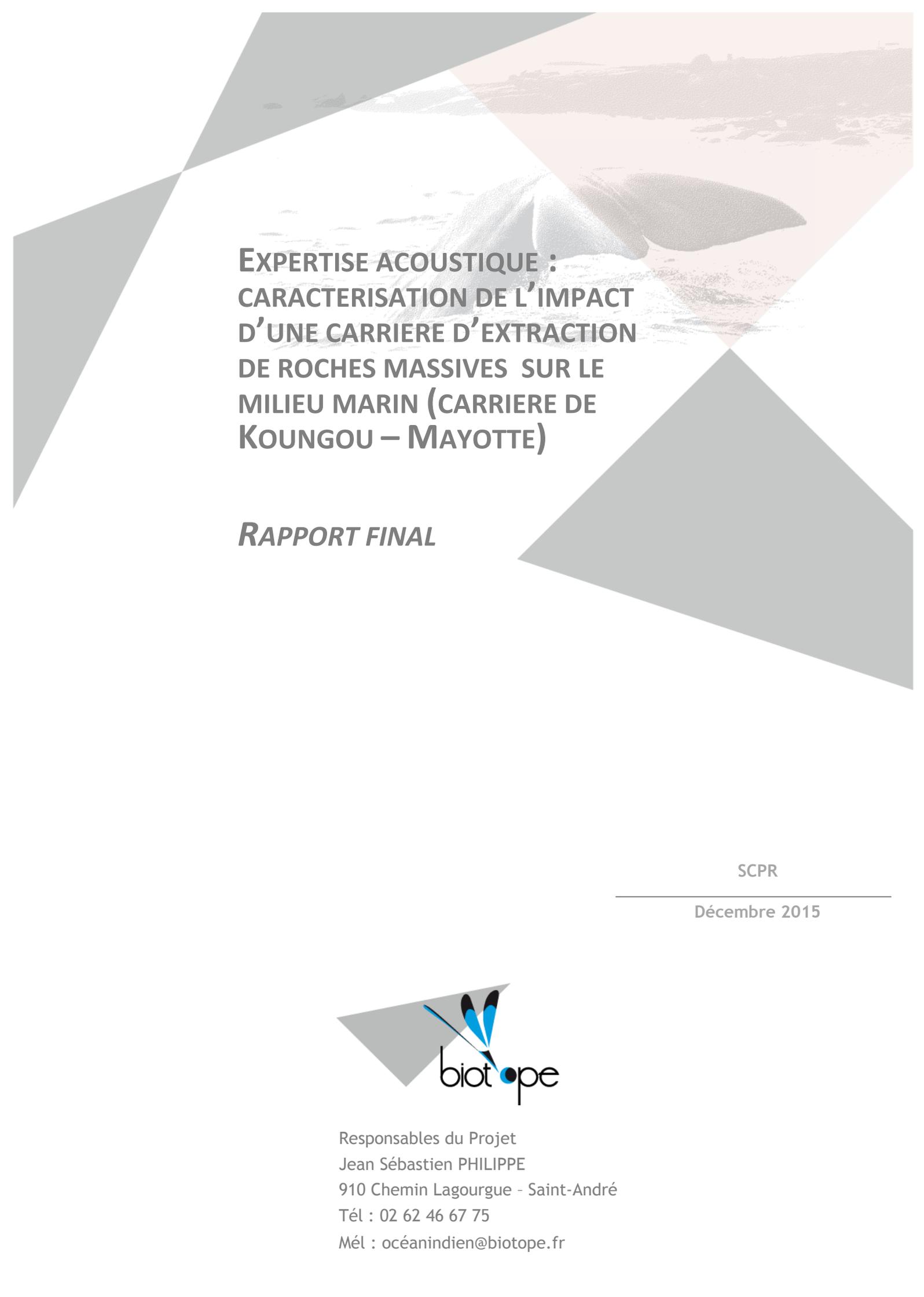


De grandes idées naissent de la pierre

Décembre 2015

collection des études





**EXPERTISE ACOUSTIQUE :
CARACTERISATION DE L'IMPACT
D'UNE CARRIERE D'EXTRACTION
DE ROCHES MASSIVES SUR LE
MILIEU MARIN (CARRIERE DE
KOUNGOU – MAYOTTE)**

RAPPORT FINAL

SCPR

Décembre 2015



Responsables du Projet
Jean Sébastien PHILIPPE
910 Chemin Lagourgue - Saint-André
Tél : 02 62 46 67 75
Mél : océanindien@biotope.fr

Sommaire

I.	Introduction	5
II.	Contexte et objectifs	6
III.	Méthodologie	7
III.1	Méthodologie générale	7
III.2	Nature des travaux mesurés	9
III.3	Méthodologies spécifiques	11
III.3.1	Moyens de mesure acoustique	11
III.3.2	Mode opératoire	12
III.3.3	Définition des unités de mesure	15
III.3.4	Configuration des tirs de mines	15
III.4	Limites de l’expertise	16
IV.	Résultats	17
V.	Analyse et discussion	20
V.1	Évaluation des bruits marins	20
V.1.1	Bruit ambiant existant	20
V.1.2	Bruits associés aux opérations de mines	20
V.2	Analyse biologique des bruits en lien avec l’opération	25
VI.	Conclusion	28

FIGURES

<i>Figure 1 : Plan du projet de carrière de roches massives défini sur la commune de St Leu à La Réunion (SCPR, 2015)</i>	5
<i>Figure 2 : Baie de Koungou, au droit de la carrière (BIOTOPE, 2015)</i>	6
<i>Figure 3 : Localisation de la baie de Koungou et de la carrière, zone d'étude de l'expertise</i>	7
<i>Figure 4 : configuration de la carrière de Koungou et emplacements de chaque tir de mines. Emplacements de sismographe (source ETPC)</i>	10
<i>Figure 5 : Répartitions spatiale et temporelle des charges explosives (source ETPC)</i>	11
<i>Figure 6 : Boîtiers SM2M (Wildlife Acoustics Inc)</i>	11
<i>Figure 7 : Localisation cartographique simplifiée des 3 hydrophones</i>	12
<i>Figure 8 : Configuration expérimentale spécifiant l'implantation des tirs de mines (o) et la localisation des enregistreurs acoustiques (o) dans la colonne d'eau.</i>	13
<i>Figure 9 : Schéma d'installation des hydrophones au point P01 (gauche) et au point P02 (droite)</i>	13
<i>Figure 10 : Préparation du matériel acoustique (à gauche) et hydrophone SM2M immergé (à droite)</i>	14
<i>Figure 11 : Configuration des SM2M (à gauche) et des iclisten (à droite)</i>	14
<i>Figure 12 : Niveau d'exposition sonore perçu dans la bande de fréquence 6Hz-115kHz. La perception des explosions se situent à 09 :15 :27 le 16/11/2015 et à 09 :16 :23 le 17/11/2015. UTC</i>	22
<i>Figure 13 : Signature acoustique des deux tirs de mines (figure du haut, signal temporel en μPa / figure du bas, évaluation de la durée significative du signal)</i>	23
<i>Figure 14 : Statistique des niveaux sonores perçus en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (la courbe jaune correspond à la réponse fréquentielle du tir de mines).</i>	24
<i>Figure 15 : Petits dauphins observés à Mayotte (hors zone d'étude) : <i>Stenella attenuata</i> (à gauche) et <i>Stenella longirostris</i> (à droite)</i>	27

I. Introduction

Dans le cadre de l'exploitation d'une carrière de roches massives à La Réunion (carrière de ravine du Trou à St Leu), SCPR souhaite engager une expertise acoustique pour définir les niveaux de bruits émis dans la colonne d'eau (océan), modéliser cette émission et en définir le cas échéant un plan de gestion des risques.

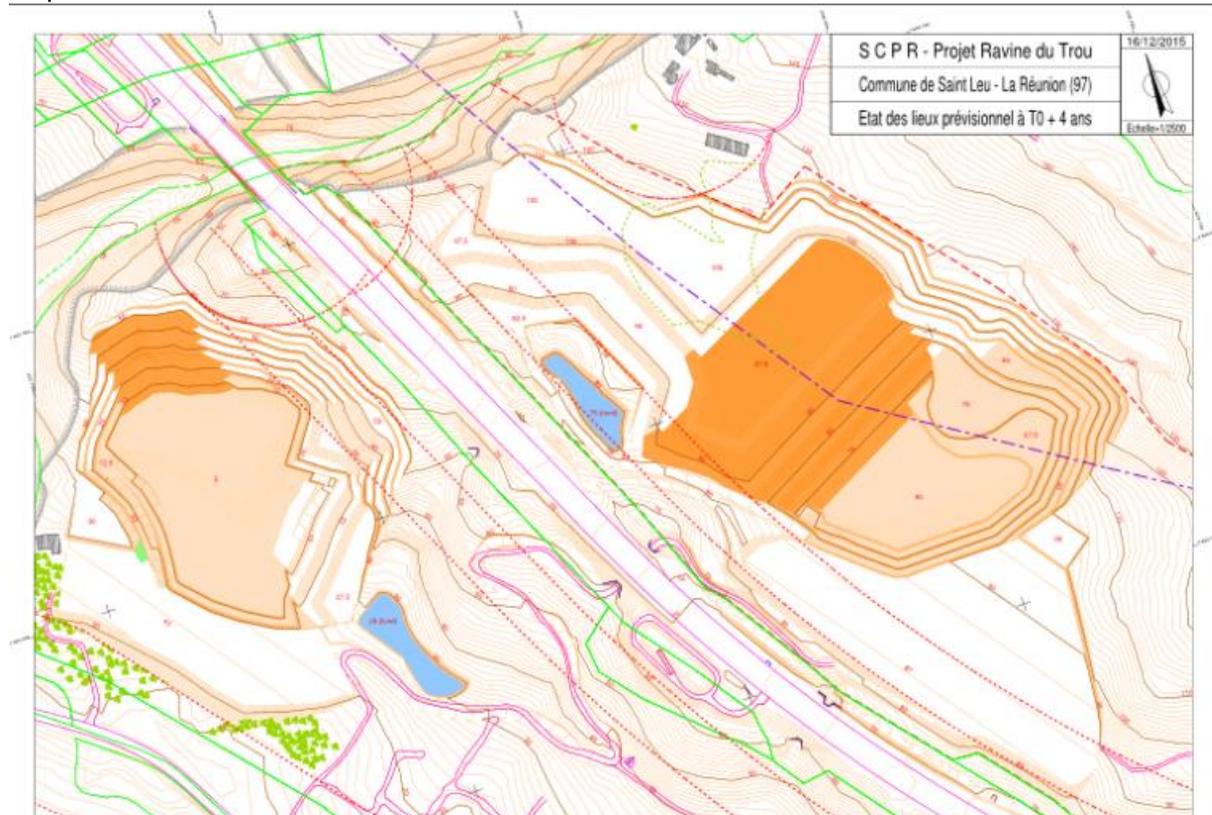


Figure 1 : Plan du projet de carrière de roches massives défini sur la commune de St Leu à La Réunion (SCPR, 2015)

Cette évaluation acoustique se définit selon 3 grandes phases :

- État 0 - Évaluation pilote / carrière de Koungou (Mayotte)
- Phase 1 - Évaluation pilote / carrière de Bois blanc (La Réunion)
- Phase 2 - Modélisation des risques et plan de gestion des risques biologiques / carrière de Bois blanc (La Réunion) - *Sous condition d'une émission sonore marine significative-*

Dans ce cadre, en associant les compétences biologique et acoustique, le groupement BIOTOPE - QUIET OCEANS a réalisé la première phase, à savoir l'évaluation pilote constituant un état 0 de l'émission acoustique d'une opération de minage dans la carrière de Koungou à Mayotte. Le présent rapport présente ces résultats.

II. Contexte et objectifs

Dans le cadre du projet de carrière de Ravine du Trou (Bois-Blanc ; commune de St Leu - La Réunion), différentes études ont été réalisées pour constituer le dossier réglementaire pour permettre son exploitation.

La présente expertise vise à identifier les potentielles incidences sonores sous-marines des opérations de minage effectuées à terre mais sur la bande littorale. En effet, ce type d'opération doit être réalisé dans le cadre de l'exploitation de la carrière de ravine du Trou. À ce jour, aucune donnée ne permet d'évaluer le niveau sonore dans le milieu marin et les possibles incidences sur les cétacés.

Sur cette base, une évaluation acoustique sous-marine doit être menée. Dans un premier temps, un état initial (état 0) réalisé dans une carrière en exploitation à Mayotte (carrière de Koungou), permet de disposer de résultats préliminaires. Bien que ce tir ne soit pas nécessairement identique sur le plan physique à celui de Saint-Leu (profondeur, substrat, morphologie du site, paramètres divers...), cette expertise doit permettre d'apporter des éléments d'aide à la décision quant aux niveaux sonores transmis dans le milieu marin.

Dans un second temps, des expertises complémentaires pourront être réalisées sur le site visé par ce projet, devant clairement définir les incidences sonores sous-marines des travaux d'exploitation de la carrière de Ravine du Trou à Saint-Leu.



Figure 2 : Baie de Koungou, au droit de la carrière (BIOTOPE, 2015)

III. Méthodologie

Le présent chapitre comprend un premier volet relatif à la méthodologie générale, puis un second volet visant à préciser la méthodologie spécifique à l'expertise acoustique.

III.1 Méthodologie générale

Localisation de l'aire d'étude

Le site d'étude de l'état 0 se trouve dans la baie de Koungou (voir la Figure 3). La zone reste mal connue et « non hydrographiée ».

La nature du fond est constituée de sédiments meubles (sable et/ou vase).

La bathymétrie de la zone est caractérisée par le profil suivant :

Du littoral au tombant du récif frangeant la profondeur est de 0 à -4m selon le marnage. Le récif frangeant tombe droit vers des fonds de 15 à 20m. La pente y est faible, atteignant progressivement une trentaine de mètres à mi-parcours avec la barrière.

Les conditions hydrodynamiques du site semblent peu marquées : le vent, la houle et les courants sont faibles.

Le trafic maritime est peu important sur le secteur, seules quelques petites embarcations peuvent traverser la zone. Il est à noter qu'un chenal est spécifié sur les cartes marines à proximité de la zone d'étude. De même, un câble sous-marin traverse la zone d'étude, pouvant constituer un élément à considérer lors du déploiement des enregistreurs.

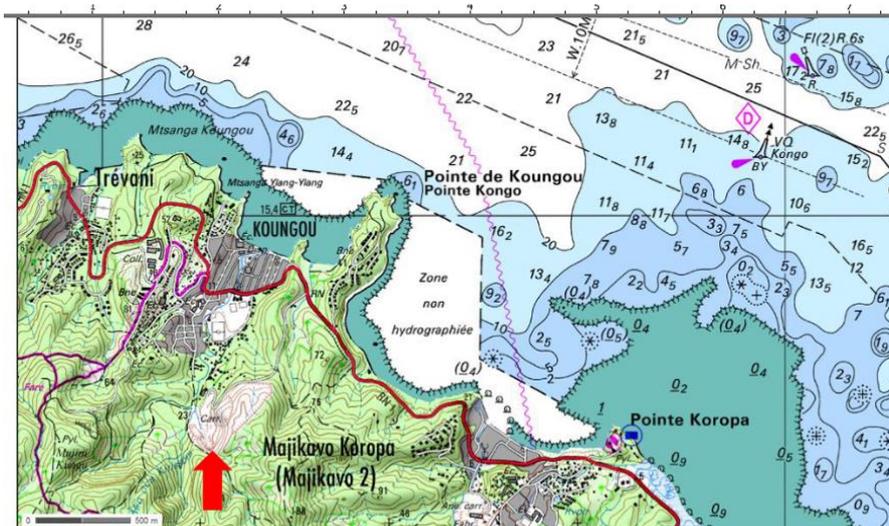


Figure 3 : Localisation de la baie de Koungou et de la carrière, zone d'étude de l'expertise

L'équipe de travail

L'expertise acoustique a été réalisée par l'équipe suivante :



BIOTOPE a coordonné la mission de façon générale, a assuré l'acquisition des données acoustiques dans le cadre de la mission à Mayotte, ainsi que l'analyse des données en lien avec la sensibilité des cétacés.



QUIET OCEANS s'est chargé du volet acoustique physique et notamment de l'évaluation et l'analyse des bruits marins physique en lien avec l'opération de minage. Cela va se traduire par une certification des niveaux acoustiques sous-marins engendrés par les travaux de tir de mines effectués dans la carrière de Koungou (Mayotte).



La société STMM a assuré la logistique en mer, permettant la bonne réalisation de la mission à Mayotte (bateau, petit matériel...), et le déploiement des enregistreurs sous-marins.

Équipe de travail	
Domaines d'intervention	Agents
BIOTOPE	
Directeur d'études Coordination et rédaction de l'étude Suivi acoustique (Mayotte) Interprétation et analyse des données sur le plan biologique et écologique	Jean-Sébastien PHILIPPE
Experts acoustiques Mammifères marins Organisation et réalisation du suivi acoustique (acquisition des données) Interprétation et analyse des données sur le plan biologique et écologique	Manon CONDET
QUIET OCEANS	
Directeur de projet Suivi et coordination du volet acoustique physique	Dr Thomas FOLEGOT
Chef de projet Analyse du volet acoustique physique	Dr Dominique CLORENNEC
Chargé d'étude Appui organisationnel en lien avec le matériel et la mission d'acquisition des données	Guillaume LE PROVOST
STMM	
Pilotes et logistique en mer (bateau, petit matériel...)	Équipe STMM Nicolas MARTINEAU

Planning de l'expertise acoustique

Cette expertise s'est étalée sur les mois de novembre et décembre 2015. La mission d'acquisition des données acoustiques s'est tenue à Mayotte entre les 07 et 09 novembre 2015.

Le planning est précisé ci-après.

Planning de l'expertise acoustique						
	Semaine 46	Semaine 47	Semaine 48	Semaine 49	Semaine 50	Semaine 51
Recherche bibliographique, consultations						
Préparation de la mission d'acquisition (formalités douanières, matériel...)						
Mission d'acquisition des données acoustique pour 2 opérations de minage (carrière de Koungou)						
Vérification et transfert des données acoustiques (OI => Europe)						
Réception et traitement des données						
Rédaction du rapport						

III.2 Nature des travaux mesurés

La présente expertise doit donc permettre d'évaluer les niveaux sonores mesurés dans le cadre d'opérations de minage dans la carrière terrestre de Koungou (Mayotte).

Les travaux consistent en deux tirs de mines effectués dans la carrière de Koungou (Figure 4) :

- Le premier tir a été réalisé le 16/11/2015 vers 09:16:00 UTC
- Le second tir le 17/11/2015 vers 09:17:00 UTC.

Chaque tir possède des caractéristiques techniques différentes :

- Le tir de mines du 16/11/2015 est effectué avec un ensemble de 36 charges explosives de masse unitaire 63kg (soit une masse totale de 2268 kg). Chaque charge est espacée de 3,5m. Un retard de 25ms est appliqué entre chaque charge soit au total une différence de 585ms entre la 1^{ère} et

la dernière explosion (Figure 5) ;

- Le tir de mines du 17/11/2015 est effectué avec une ensemble de 18 charges de masse unitaire 95kg (soit une masse totale de 1710 kg) et le retard est de 1ms entre de deux charges successives.

Pendant chaque tir, un sismographe est placé à quelques dizaines de mètres du tir afin de contrôler l'intensité du tir et la datation.



Figure 4 : configuration de la carrière de Koungou et emplacements de chaque tir de mines. Emplacements de sismographe (source ETPC)

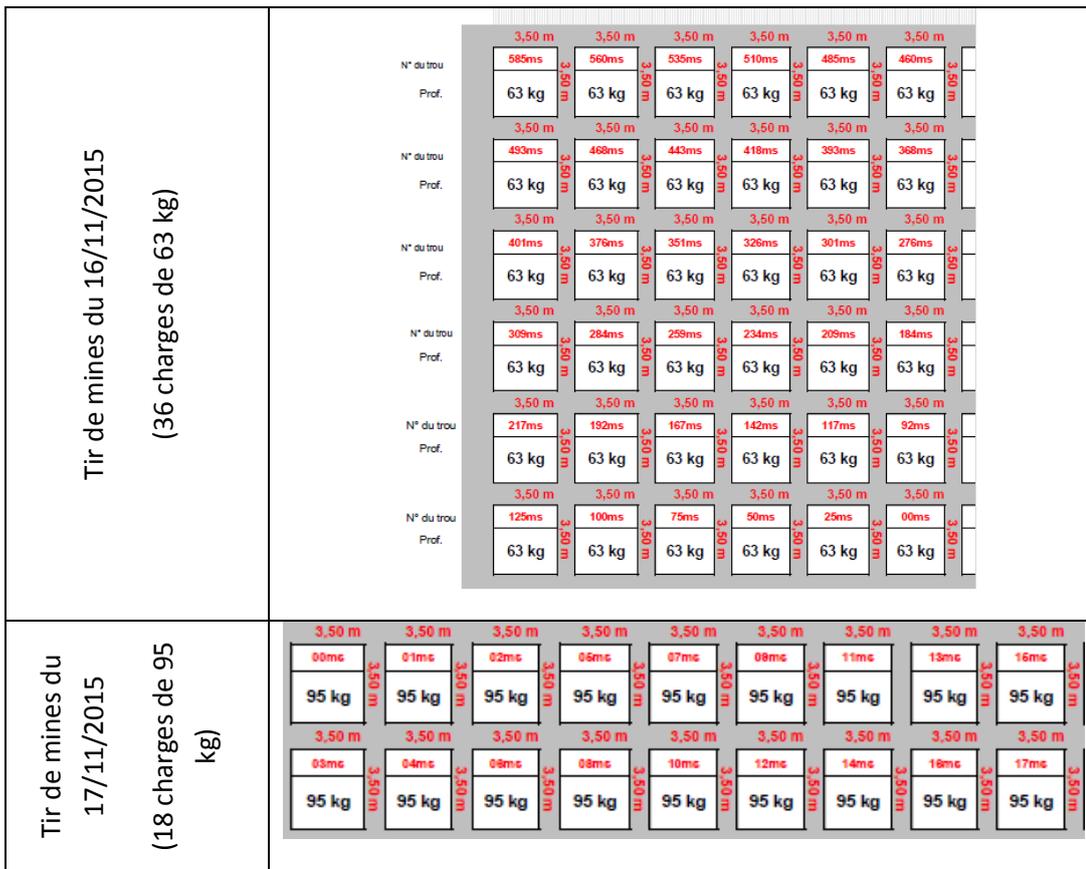


Figure 5 : Répartitions spatiale et temporelle des charges explosives (source ETPC)

III.3 Méthodologies spécifiques

III.3.1 Moyens de mesure acoustique

Pour cette expertise, 3 enregistreurs acoustiques autonomes (système Iclisten et SM2M) ont été utilisés.



Figure 6 : Boîtiers SM2M (Wildlife Acoustics Inc)

Les caractéristiques des différents enregistreurs permettent d’enregistrer différentes ambiances :

- les caractéristiques des enregistreurs SM2M (référéncés HY180B et HY199B) sont favorables à l’enregistrement d’un niveau sonore ambiant tel que le bruit environnemental, le bruit des organismes vivants (mammifères et benthos) et le bruit des embarcations légères,
- le système de mesure Iclisten (référéncé SBW1319) permet quant à lui de mesurer des niveaux sonores intenses.

III.3.2 Mode opératoire

Les enregistreurs ont été déployés par BIOTOPE dans la colonne d’eau. Cette opération s’est effectuée les 16/11/2015 et 17/11/2015 à l’entrée de l’anse de Koungou à la distance voisine de 850 m des ateliers de tir de mines (Figure 7 et Figure 8).

Ces hydrophones ont été immergés à une profondeur minimale de 10m.

La disposition simplifiée est la suivante :

- Au point P01 => deux enregistreur de type Iclisten et le SM2M
- Au point P02 => un enregistreur de type SM2M

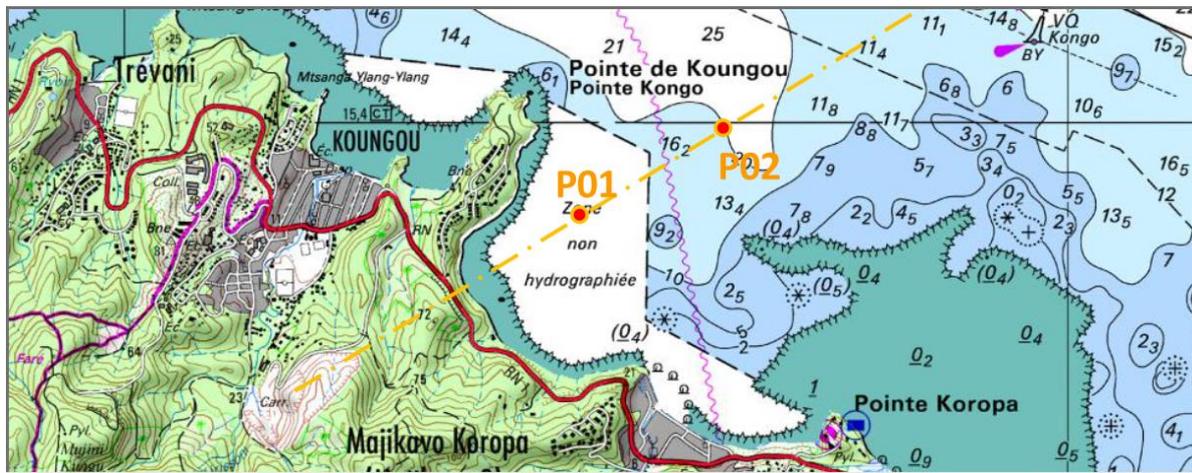


Figure 7 : Localisation cartographique simplifiée des 3 hydrophones



Figure 8 : Configuration expérimentale spécifiant l'implantation des tirs de mines (o) et la localisation des enregistreurs acoustiques (o) dans la colonne d'eau.

Les hydrophones ont été installés selon la configuration suivante (voir la Figure 9).

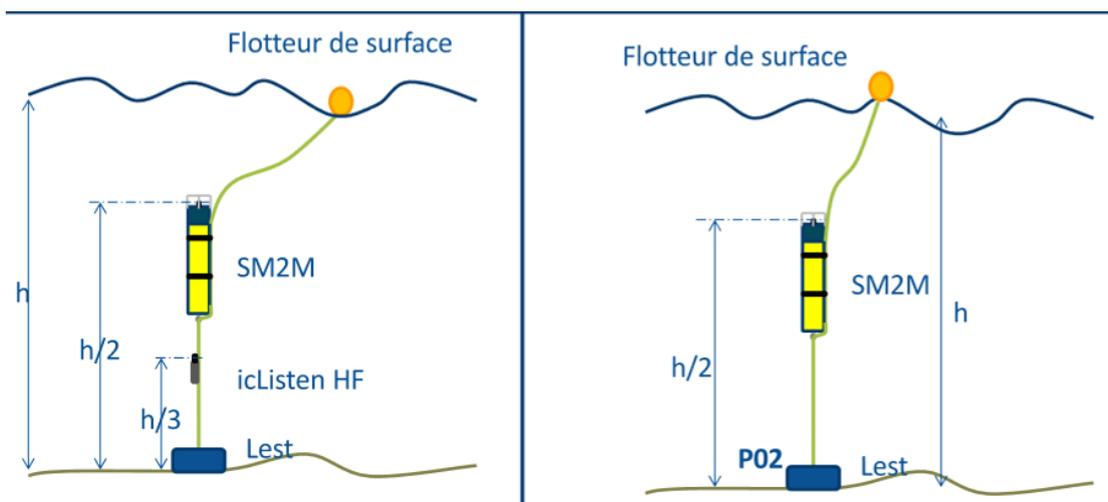


Figure 9 : Schéma d'installation des hydrophones au point P01 (gauche) et au point P02 (droite)

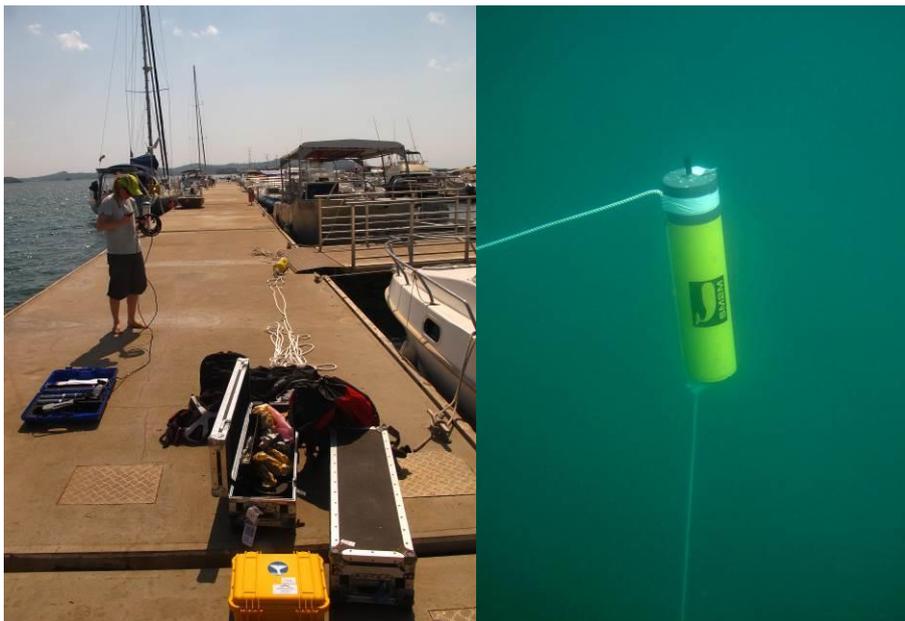


Figure 10 : Préparation du matériel acoustique (à gauche) et hydrophone SM2M immergé (à droite)

La configuration des enregistreurs a été définie de sorte à pouvoir enregistrer les données acoustiques émanant du milieu physique. Les paramètres retenus sont présentés Figure 11).

Paramètre	valeur
Mode	Autonome
Rapport cyclique	Mesure continue
Alimentation	8 Piles D
Dynamique	16 bits
Fs	96 kHz
Gain hard	12 dB (Photo DipSwitch)
Filtre hard	Passe haut 3 Hz
Plage de mesure	71 – 157 dB re μ Pa
Compression	Wav
Mémoire	64 Go minimum

Paramètre	valeur
Mode	Autonome (6h)
Rapport cyclique	Mesure continue
Alimentation	Batterie interne
Fs	256 kS/s
Dynamique	24 bits
Gain (soft)	0 dB
Plage de mesure	113 à 210 db re μ Pa
Mémoire	Interne 32 GB

Figure 11 : Configuration des SM2M (à gauche) et des iclisten (à droite)

III.3.3 Définition des unités de mesure

Dans l'ingénierie sonore, l'énergie d'un son est spécifiée par son niveau exprimé en décibels (dB). Cependant, une valeur de dB unique n'est pas toujours une caractérisation suffisante. La particularité des sons impulsionnels (qui constituent par exemple une opération de minage) imposent de caractériser un niveau sonore par différentes unités :

- Le niveau de pression sonore (SPL1 peak-peak) exprimé en *dB réf. 1μPa*, qui correspond au maximum de pression sonore instantanée ;
- Le niveau d'exposition sonore (SEL2) exprimé en *dB réf. 1μPa²s* qui correspond à l'énergie moyenne d'un signal sonore $s(t)$ sur une durée finie T entre T_1 et T_2 (durée significative du signal) où p_0 est la pression sonore de référence (1μPa), sur une bande de fréquences donnée. La bande de fréquences peut être soit la bande passante de l'instrumentation, soit la bande de sensibilité d'une espèce :

$$SEL = 10 \text{ Log} \left(\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \frac{s(t)^2}{p_0^2} dt \right)$$

Dans le cas d'un signal impulsif, les temps T_1 et T_2 sont estimés à partir du niveau d'énergie sonore cumulée. T_1 est le temps à partir duquel l'énergie cumulée est égale à 5% de l'énergie totale de l'impulsion (T5%) et T_2 est le temps à partir duquel l'énergie cumulée est égale à 95% de l'énergie totale (T95%). La durée significative du signal impulsionnel est alors la différence (T_2-T_1) et est exprimée en seconde ;

- Le niveau d'exposition sonore cumulée (CSEL³) exprimé en *dB réf. 1μPa²s* correspond à l'énergie sonore totale perçue sur une bande de fréquence donnée durant une période d'activité.

III.3.4 Configuration des tirs de mines

Les différents tirs ont été faits dans des conditions spécifiques. L'ensemble des paramètres sont rappelés ci-après. Ces éléments sont importants à connaître car ils permettent de préciser l'analyse des données en fonction des conditions définies pour les tirs de mines.

¹ Sound Pressure Level

² Sound Exposure level

³ Cumulative Sound Exposure Level

Synthèse des configurations des 2 tirs de mines				
	Tir de mines	Hydrophone SBW1319	Hydrophone HY180B	Hydrophone HY199B
TIR 1 - 16/11/2015 (09:16:00 UTC)				
Latitude	012° 44' 28.60'' S	012° 44' 16.560'' S	012° 44' 16.560'' S	012° 44' 14.040'' S
longitude	045° 12' 29.02'' E	045° 12' 54.060'' E	045° 12' 54.060'' E	045° 12' 56.040'' E
Profondeur/surface (m)	12	8	5.5	6.5
Hauteur d'eau (m)	NA	11	11	14.5
Distance/source (m)	NA	841	841	929
TIR 2 - 17/11/2015 (09:17:00 UTC)				
Latitude	012° 44' 28.13'' S	012° 44' 16.560'' S	012° 44' 16.560'' S	012° 44' 14.040'' S
longitude	045° 12' 29.60'' E	045° 12' 54.060'' E	045° 12' 54.060'' E	045° 12' 56.040'' E
Profondeur/surface (m)	4	8	5.5	6.5
Hauteur d'eau (m)	NA	11	11	14.5
Distance/source (m)	NA	819	819	907

III.4 Limites de l'expertise

Il est important de relever que l'ensemble de l'expertise est réalisée dans un contexte physique propre aux conditions de l'étude (substrat géologique, fonds marins, conditions de tir, distance de l'opération...).

Les résultats obtenus permettent de définir une tendance, révélant notamment le caractère significatif (ou non) d'une opération de minage dans une carrière de roches massives vis-à-vis du milieu marin

Dans le cadre de la carrière de la ravine du Trou, les résultats sont donc à prendre avec précautions et nécessiteront des ajustements contextuels si nécessaire en fonction des résultats obtenus (dans le cas d'une émission sonore présentant des niveaux élevés susceptibles de présenter un impact sur la faune marine).

IV. Résultats

Différents résultats ont été obtenus lors des mesures acoustiques des 2 opérations de minage menées dans la carrière de Koungou (Mayotte) les 16 et 17 novembre 2015.

Les résultats de ces mesures sont présentés dans les tableaux ci-après.

Expertise acoustique menée lors du tir de mines du 16/11/2015

Synthèse des mesures du tir de mines du 16/11/2015		
Opération certifiée	Nature de l'atelier	Tir de mines
	Prestataire	ETCP
	Nb de charge	36
	Charge unitaire (kg)	63
	Micro delay (ms)	25
	Latitude (WGS84)	12°44'28.60''S
	Longitude (WGS84)	45°12'29.02''E
	Date de démarrage de l'opération	16/11/2015 09:16:00 UTC
	Date de fin de l'opération	16/11/2015 09:16:00 UTC
	Durée totale de l'opération	0.585s
Mesure acoustique sous-marine	Instrument	IcListen SBW 1319
	Modèle	SB2-ETH-X2
	Date de calibration	17/09/2014
	Latitude (WGS84)	012°44'16.560"S
	Longitude (WGS84)	045°12'54.060"E
	Distance de l'atelier (m)	841
	Profondeur de l'hydrophone (m)	8
	Fréquence d'échantillonnage (kHz)	256
	Bande passante de l'instrument	6Hz-100kHz
	Duty cycle	100%

Synthèse des mesures du tir de mines du 16/11/2015		
Bruit ambiant mesuré en dehors des phases déclarées ⁴	Date de démarrage	16/11/2015 08:24:00 UTC
	Date de fin	16/11/2015 09 :13:00 UTC
	Niveau de bruit ambiant minimum (dB ref1μPa ²)	99.5
	Niveau de bruit ambiant médian (dB ref1μPa ²)	102.2
	Niveau de bruit ambiant maximum (dB ref1μPa ²)	123.3
Propriétés acoustiques mesurées de l'atelier	Durée significative	0.85s
	Etalement du signal	8s
	Niveau de pression sonore max (SPL) <i>0-peak</i> (dB ref 1μPa) dans la bande passante de l'instrument	167
	Excitation maximale dans la bande passante de l'instrument	149.7 dB ref 1μPa ² /Hz @31Hz
	Niveau d'Exposition Sonore max (SEL) (dB ref 1μPa ² s) dans la bande passante de l'instrument	156.1

Expertise acoustique menée lors du tir de mines du 17/11/2015

Synthèse des mesures du tir de mines du 17/11/2015		
Opération certifiée	Nature de l'atelier	Tir de mines
	Prestataire	ETCP
	nb de charge	18
	Charge unitaire (kg)	95
	Micro delay (ms)	1
	Latitude (WGS84)	012°44'28.13''S
	Longitude (WGS84)	045°12'29.60''E
	Date de démarrage de l'opération	17/11/2015 09:17:00 UTC
	Date de fin de l'opération	17/11/2015 09:17:00 UTC
	Durée totale de l'opération	0.017 s

⁴ Niveau acoustique intégré sur la bande passante de l'instrument

Synthèse des mesures du tir de mines du 17/11/2015		
Mesure acoustique sous-marine	Instrument	lclisten SBW 1319
	Modèle	SB2-ETH-X2
	Date de calibration	17/09/2014
	Latitude (WGS84)	012°44'16.560"S
	Longitude (WGS84)	045°12'54.060"E
	Distance de l'atelier (m)	819
	Profondeur de l'hydrophone (m)	8
	Fréquence d'échantillonnage (kHz)	256
	Bande passante de l'instrument	6Hz-100kHz
	Duty cycle	100%
Bruit ambiant mesuré en dehors des phases déclarées⁵	Date de démarrage	17/11/2015 08:24:00 UTC
	Date de fin	17/11/2015 09:15:00 UTC
	Niveau de bruit ambiant minimum (dB ref 1µPa ²)	99.8
	Niveau de bruit ambiant médian (dB ref 1µPa ²)	102.9
	Niveau de bruit ambiant maximum (dB ref 1µPa ²)	122.1
Propriétés acoustiques mesurées de l'atelier⁴	Durée significative	1.1 s
	Etalement du signal	8 s
	Niveau de pression sonore max (SPL) <i>0-peak</i> (dB ref 1µPa) dans la bande passante de l'instrument	165.9
	Excitation maximale dans la bande passante de l'instrument	144.7 dB ref 1µPa ² /Hz @22.5Hz
	Niveau d'Exposition Sonore max (SEL) (dB ref 1µPa ² s) dans la bande passante de l'instrument	154.5

⁵ Niveau acoustique intégré sur la bande passante de l'instrument

V. Analyse et discussion

V.1 Évaluation des bruits marins

Dans le cadre de l'évaluation acoustique des opérations de mines menées dans la carrière de Koungou, un niveau sonore a été calculé, se traduisant par un niveau d'exposition sonore. Ce niveau a été évalué en intégrant une large bande de fréquence et calculé sur des segments de 1 seconde entre 6Hz et 100 kHz (voir la Figure 12). Le taux de recouvrement était de 85%.

☞ Durant ces périodes, le signal sonore est majoritairement associé au bruit ambiant. Chaque tir de mines montre une élévation significative et ponctuelle du signal perçu.

V.1.1 Bruit ambiant existant

L'environnement sonore marin existant a été mesuré dans l'anse de Koungou avant et après les opérations de mines. Celui-ci se caractérise principalement par les conditions environnementales et la présence d'organismes marins, principalement benthiques (crustacés, mollusques, faune corallivore...). Cet environnement sonore subit des fluctuations relativement importantes de 99 à 122 dB ref1 μ Pa² avec un bruit ambiant médian de l'ordre de 102 dB ref1 μ Pa².

V.1.2 Bruits associés aux opérations de mines

En considérant le **niveau énergétique des signaux acoustiques**, les mesures mettent en évidence, pour chaque tir de mine, une élévation de l'ordre de 55 dB à une distance voisine de 850m du point d'explosion, dans un niveau large bande (6Hz-100kHz ; se référer à la Figure 12).

Le tir de mines effectué le 16/11 est plus intense de 1.6 dB en comparaison du tir de mines effectué le 17/11. Cet écart peut s'expliquer par la différence de masse d'explosif mise en œuvre (2268 kg pour le tir 1 et 1710 kg pour le tir 2) et par la différence de configuration géographique entre les deux tirs.

L'évaluation de la signature temporelle a été calculée en μ Pa pour chaque tir de mines. Il apparaît que le signal mesuré émerge du bruit ambiant pendant une durée de 8 secondes alors que les tirs n'ont duré respectivement que 0,85 et 1,10 seconde (voir la Figure 13). Cet étalement du signal sonore s'explique par la propagation qui se diffuse dans le sol, dans le substrat océanique et dans la colonne d'eau. Cette dilatation temporelle peut également provenir des

différentes vibrations engendrées par les frottements et effritements de la roche suite à l'explosion. Cela indique une dépendance potentiellement importante aux conditions de site.

La **répartition statistique des niveaux sonores** (en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) a été évaluée pour chaque tir de mines (voir la Figure 14). Cela met en évidence la répartition statistique des niveaux sonores (en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) avant, pendant et après chaque tir de mines. Le percentile 0% (en jaune) correspond dans le cas présent à l'évènement du tir de mines. Les autres percentiles sont représentatifs des fluctuations du niveau de bruit ambiant existant avant et après le tir. Chaque tir de mines montre une émergence limitée à la bande de fréquence entre 5 Hz et 1 kHz avec une prépondérance dans la bande de 10 Hz à 70 Hz. Dans cette bande de fréquence prédominante, une élévation de 70 dB du niveau sonore a été constatée par rapport au bruit médian. Dans le cas du 1er tir de mine, un maximum plus significatif (>10 dB) à la fréquence de 30 Hz est observable dans le spectre.

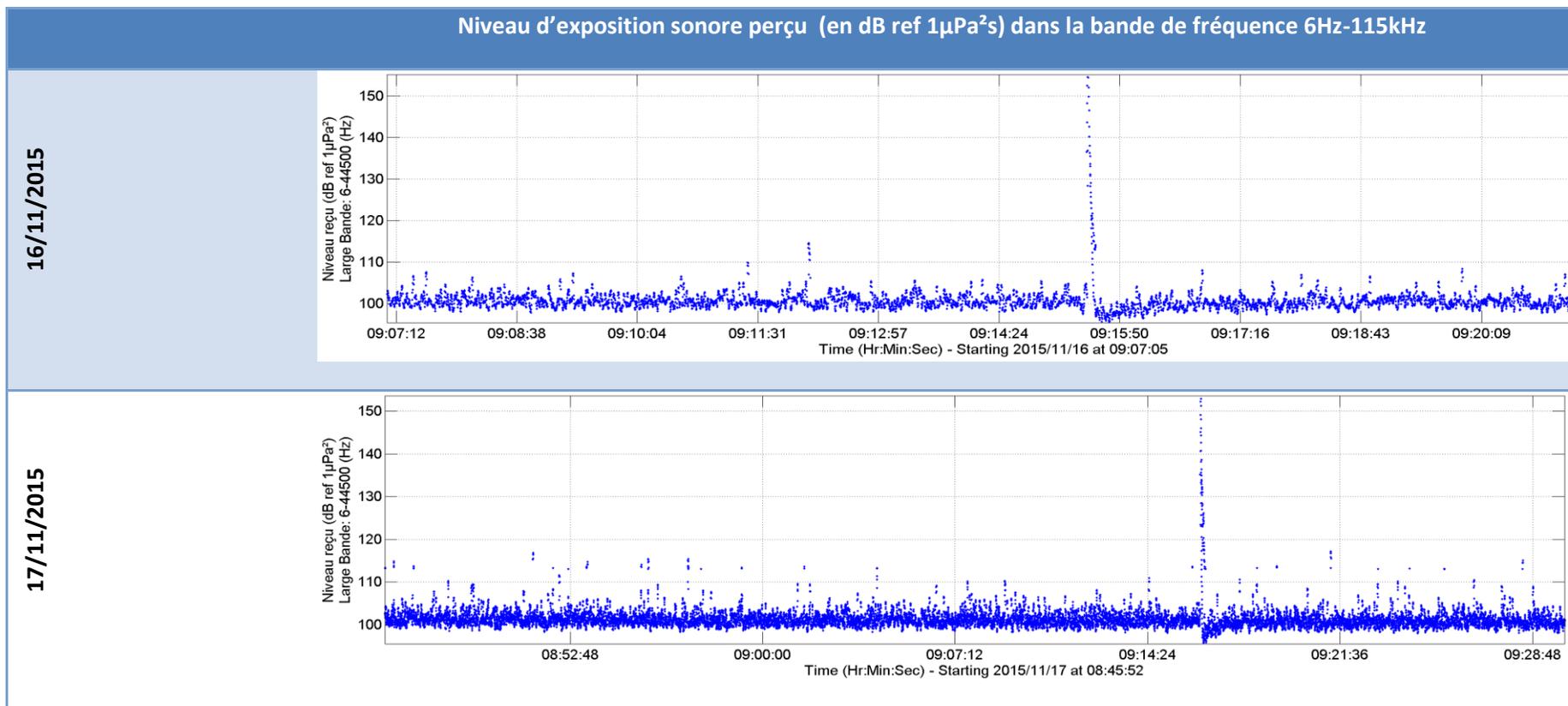


Figure 12 : Niveau d'exposition sonore perçu dans la bande de fréquence 6Hz-115kHz. La perception des explosions se situe à 09 :15 :27 le 16/11/2015 et à 09 :16 :23 le 17/11/2015. UTC

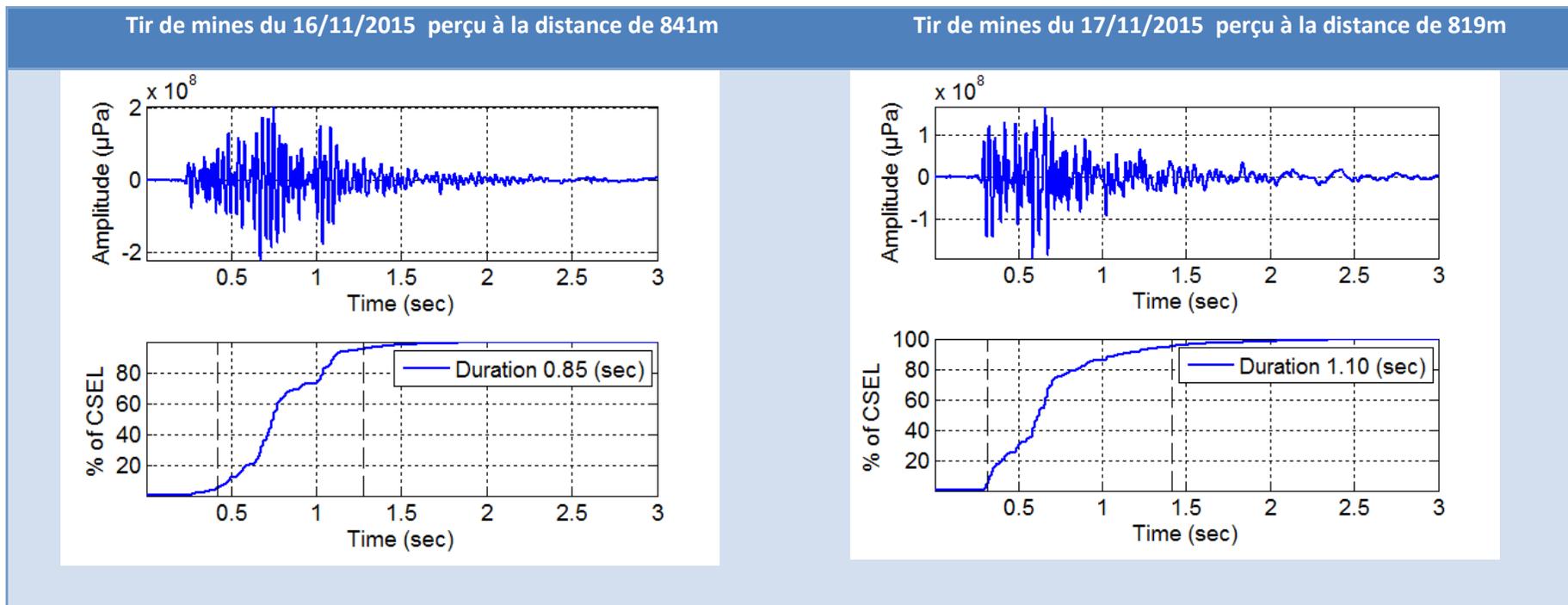


Figure 13 : Signature acoustique des deux tirs de mines (figure du haut, signal temporel en µPa / figure du bas, évaluation de la durée significative du signal)

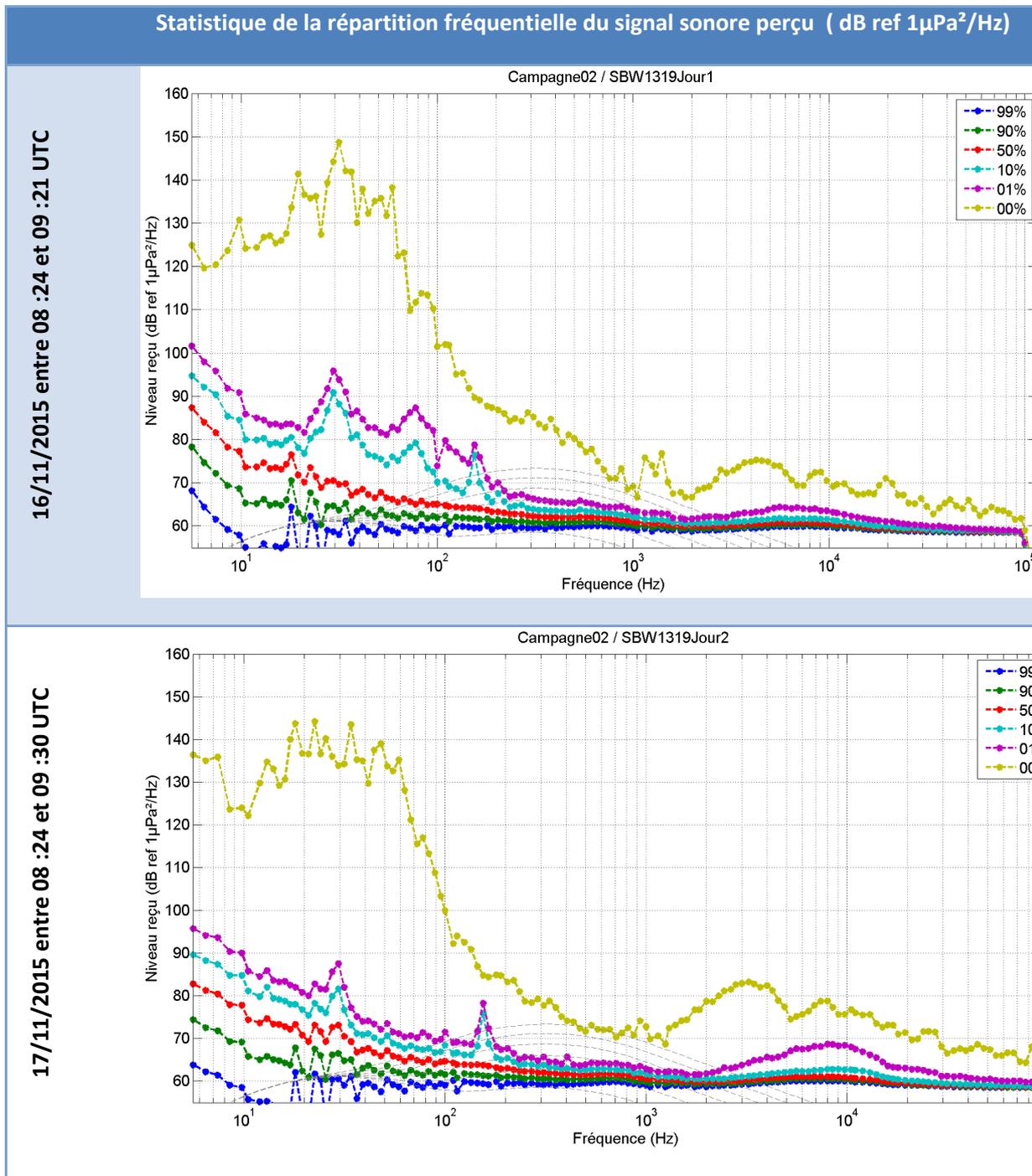


Figure 14 : Statistique des niveaux sonores perçus en dB ref 1 μ Pa²/Hz (la courbe jaune correspond à la réponse fréquentielle du tir de mines).

V.2 Analyse biologique des bruits en lien avec l'opération

Dans le milieu marin, les incidences acoustiques concernent principalement les mammifères marins. En effet, la fonction acoustique est utilisée à différents niveaux par ces animaux, que ce soit pour la communication (liens familiaux, reproduction...) que pour l'alimentation (chasse...).

L'altération de l'environnement sonore ou de l'appareil auditif peut avoir des conséquences sur les individus (dommages physiologiques, comportement...) et sur une population (fragmentation d'un territoire vital...).

En se référant aux résultats obtenus dans le cadre de cette expertise acoustique, il convient donc de corréler les seuils de tolérance sonore connus en lien avec les mammifères marins.

Comme cela a déjà été évoqué, les unités de mesure se traduisent sous 2 formes (voir le § III.3.3) : le niveau de pression sonore (SPL /peak-peak) et le niveau d'exposition sonore (SEL).

Suivant les projets d'aménagement, sur la base de ces unités de mesure, des seuils de gênes ou de dégâts physiologiques sont définis. Ils reprennent certaines références internationales (ex. recommandation de la FEA Allemande), en intégrant les conditions locales du milieu (ex. arrêté préfectoral défini pour la construction de la Nouvelle Route du Littoral). Ces différents seuils sont présentés ci-après, ils permettent de limiter les incidences sonores. En plus de ces seuils, la durée, la répétition et la forme intrinsèque des sons est à considérer pour évaluer l'impact réel des travaux.

Présentation des seuils retenus définis pour les cétacés dans le cadre de certains projets d'aménagement		
	Niveau de pression sonore (SPL)	Niveau d'exposition sonore (SEL)
	<i>dB ref 1µPa</i>	<i>dB ref 1µPa²s</i>
Recommandation allemande @750m (Federal Environmental Agency Umweltbundesamt, UBA)	190	160
Arrêté préfectoral pour la construction de la NRL	190	160
Émission du tir de mines pour la carrière de Koungou (tir 1 / tir 2)	165.9 / 167	154.5 / 156.1

☞ En se référant aux résultats obtenus lors de cette expertise acoustique, il apparaît que les seuils acoustiques sont inférieurs à ceux définis pour le projet NRL ou selon la FEA (recommandations allemandes).

Toutefois, il convient de corrélérer ces résultats aux seuils de tolérance connus pour les cétacés. En effet, suivant les émissions sonores produites, les conséquences sont différentes sur les mammifères marins, au travers :

- d'une modification comportementale,
- d'un dommage physiologique temporaire,
- d'un dommage physiologique permanent.

Ces différents seuils sont définis ci-après, intégrant l'ensemble des connaissances synthétisées sur les tolérances acoustiques des cétacés.

Seuils de tolérance vis-à-vis des mammifères marins				
Catégorie acoustique	Gamme de fréquences approximatives de sensibilité	Seuils de Niveau d'Énergie d'Exposition perçue (SEL / dB réf. 1µPa²s)		
		Seuil de modification du comportement	Seuil de dommages Temporaires	Seuil de dommages Permanents
Cétacés hautes fréquences	0,200-180kHz	145 ⁶	164 ⁵	198 ⁷
Cétacés moyennes fréquences	0,150-160kHz	Non défini	183 ⁶	198 ⁶
Cétacés basses fréquences	0,007-22kHz	Non défini	183 ⁶	198 ⁶
Pinnipèdes	0,075-75kHz	Non défini	171 ⁶	186 ⁶

Les niveaux d'exposition sonore (SEL) sont compris entre 154,1 et 156, 1 dB ref 1µPa²s pour les 2 opérations de minage réalisées dans la carrière de Koungou.

☞ En se référant aux seuils de tolérance des cétacés, il apparaît tout d'abord qu'aucun dommage physiologique permanent ou temporaire n'affecterait des mammifères marins dans une telle configuration ; en revanche les incidences d'une telle opération peuvent entraîner une modification du comportement pour les cétacés « hautes fréquences ». Dans la zone d'étude, cela concerne les grands et petits dauphins (du genre *Tursiops* et *Stenella*).

En se référant à la répartition statistique des niveaux sonores, chaque tir de mines montre une émergence limitée à la bande de fréquence comprise entre 5 Hz et 1 kHz avec une prépondérance dans la bande de 10 Hz à 70 Hz. Dans cette bande de fréquence prédominante, une élévation de 70 dB du niveau sonore a été constatée par rapport au bruit médian. Ce résultat semble montrer que l'ensemble des espèces pourraient être concernées (basses à hautes fréquences), bien que les connaissances ne permettent pas de conclure sur les incidences comportementales connues sur les espèces basses et hautes fréquences (voir le tableau ci-dessus).

6 (Lucke 2009)

7 (Southall, et al. 2007)

En se référant à la nature du son, le caractère impulsionnel engendre un risque de stress au travers l'effet de surprise. Contrairement au son émis par les navires ou autres engins motorisés qui émettent un son fort mais continu et progressif (laissant le temps aux mammifères marins de se déplacer pour éviter l'incidence sonore), le son dégagé par un tir de mine n'augmente pas avec l'approche de la source mais se détecte spontanément. La nature de ce son impulsionnel ne permet ainsi pas aux cétacés de s'éloigner, comme ils le font aisément à l'approche d'un navire qu'ils entendent de loin.

Toutefois, il est à noter que cette incidence reste limitée dans le temps dans la mesure où le signal mesuré émergeant du bruit ambiant s'étale sur 8 secondes avec un tir d'une durée maximale de 1.1 seconde.

☞ Sur la configuration de la zone d'étude (baie de Koungou), cet impact comportemental reste donc difficile à évaluer. Il concernerait donc principalement les espèces « hautes fréquences » (dauphins). Il peut être qualifié de temporaire, pour un niveau évalué entre faible et modéré (modification comportementale de courte durée). Pour les autres espèces, les conclusions en termes d'incidences restent difficiles à établir, compte tenu de l'état de l'art actuel. Rappelons enfin qu'aucun impact physiologique, qu'il soit temporaire ou permanent, n'est attendu au regard des résultats obtenus.

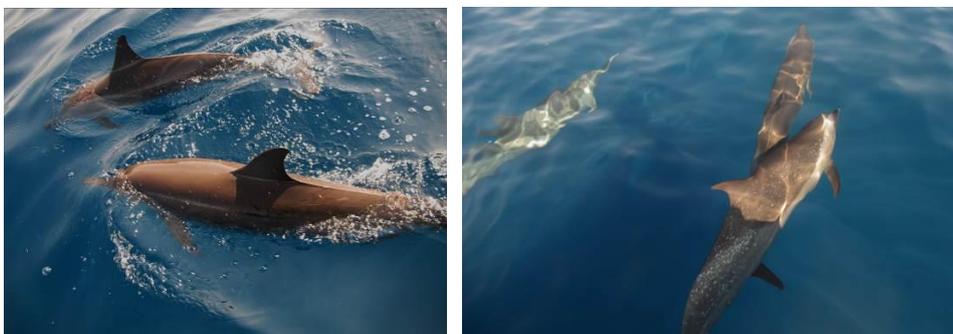


Figure 15 : Petits dauphins observés à Mayotte (hors zone d'étude) : *Stenella attenuata* (à gauche) et *Stenella longirostris* (à droite)

VI. Conclusion

Afin de caractériser la diffusion du bruit sous-marin à partir de tirs de mines au sein de carrières terrestres littorales, SCPR a confié la réalisation d'une expertise acoustique au groupement BIOTOPE / QUIET OCEANS. Cette expertise a concerné deux opérations de minage dans la carrière de roches massives de Koungou à Mayotte. Lors de ces opérations, réalisées en novembre 2015, des mesures acoustiques sous-marines ont été réalisées grâce au déploiement de 3 hydrophones.

Concernant le **milieu physique**, l'environnement sonore naturel (= bruit ambiant sous-marin) est de l'ordre de 102 dB ref1 μ Pa² en moyenne, avec des fluctuations relativement importantes de 99 à 122 dB ref1 μ Pa².

Lors des tirs de mines, le niveau énergétique des signaux acoustiques met en évidence une élévation de l'ordre de 55 dB pour ces explosions engendrées à une distance voisine de 850m, dans un niveau large bande (6Hz-100kHz). D'après les unités de référence, les tirs présentent un niveau d'exposition sonore (SEL) compris entre 154.5 et 156.1 dB ref 1 μ Pa²s, et un niveau de pression sonore (SPL /peak-peak) compris entre 165.9 et 167 dB ref 1 μ Pa.

En considérant l'évaluation de la signature temporelle (en μ Pa), pour chaque tir de mines, il apparaît que le signal mesuré émerge du bruit ambiant pendant une durée de 8 secondes alors que les tirs n'ont duré respectivement que 0,85 et 1,10 seconde. Enfin, la répartition statistique des niveaux sonores (en dB ref 1 μ Pa²/Hz) montre une émergence limitée à la bande de fréquence entre 5 Hz et 1 kHz avec une prépondérance dans la bande de 10 Hz à 70 Hz, et une élévation de 70 dB du niveau sonore dans cette bande de fréquence prédominante.

En croisant les résultats avec les **connaissances sur la sensibilité acoustique biologique des cétacés**, ces opérations peuvent être considérées comme potentiellement bruyantes de façon temporaire, puisqu'elles émergent pendant quelques secondes (< 8s.) du bruit ambiant.

Au regard des seuils fixés par la littérature scientifique, les niveaux perçus par les différentes espèces de cétacés (quelque soit leur catégorie acoustique : basses, moyennes ou hautes fréquences) ne dépassent à aucun moment les seuils connus et ne présentent donc factuellement aucun risque de dommage physiologique direct (temporaire ou permanent) pour l'ensemble des espèces potentiellement présentes localement.

Si les risques de dommage physiologique permanent ou temporaire sont nuls, il existe en revanche un risque de modification du comportement pour les espèces « hautes fréquences » susceptibles d'être présentes dans la baie de Koungou. L'intensité de la modification du comportement est ensuite conditionnée par la fréquence et la cadence de tirs mais dépend également de

l'activité des cétacés au moment des tirs. S'agissant des espèces basses et moyennes fréquences, les seuils de modification du comportement ne sont actuellement pas connus dans la bibliographie, ce qui ne permet pas de conclure sur le risque de modification du comportement pour les espèces répondant à ces deux catégories acoustiques.

Par ailleurs, il paraît intéressant d'indiquer que les **niveaux enregistrés dans le cadre de l'expertise réalisée, sont « conformes » avec la réglementation la plus exigeante à ce sujet à l'échelle mondiale**. En effet, les seuils fixés par la réglementation Allemande, qui ont d'ailleurs été repris dans les arrêtés Loi sur l'eau et espèces protégées du projet NRL, n'ont jamais été dépassés lors des 2 tirs de mine expertisés lors de la présente étude.

Les résultats acoustiques obtenus dans le cadre de la présente expertise menée sur Mayotte (site de Koungou) montrent, pour ce site, une élévation des niveaux sonores consécutive aux tirs de mines, toutefois sans impact physiologique sur les mammifères marins mais avec un impact temporaire sur leur comportement. Cette expertise permet ainsi de disposer de résultats intéressants en termes de diffusion du bruit sous-marin à partir de tirs de mines effectués sur terre, sur un site littoral, et de ses incidences sur la faune marine. **La nature et la topographie de chaque site conditionnant la transmission du bruit au travers le sol, une expertise similaire mérite également d'être menée sur les premiers tirs de la carrière de la Ravine du Trou**, afin de consolider et transposer cette première expertise. Cette nouvelle expertise permettra de vérifier le niveau énergétique des sons transmis dans la colonne d'eau dans le secteur concerné.

Cette approche devra également être croisée avec le contexte biologique et écologique de la zone d'étude. Celle-ci devra être élargie en lien avec le projet, de façon à évaluer la sensibilité des espèces de mammifères marins présentes vis-à-vis de ce type de travaux. Au-delà de la nature des espèces présentes, le taux de fréquentation des espèces au droit de la zone d'influence de modification du comportement est notamment une donnée importante pour croiser un impact prévisible avec le niveau d'enjeu écologique lié aux mammifères marins.