

Remise en état du pont de la Gabarre

Note technique sur l'impact acoustique sous-marin

6 août 2024



Informations relatives au document

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Auteur(s)	Vincent MAHAMADALY
Fonction	Expert – Acoustique sous-marine
Type de document	Note technique
Version	V2
Référence	ENSI07102

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Approuvé par	Fonction	Signature
V1	02-Aout-2024	Maxime JABIER	Directeur	
V2	06-Aout-2024	Maxime JABIER	Directeur	

DESTINATAIRES

Nom	Entité
Maxime JABIER	ACOUSTB
Noe DU MANOIR	EGIS
Yves DELMARES	EGIS
Frédéric MENUUEL	EGIS

Sommaire

1	CONTEXTE	9
2	MÉTHODOLOGIE GLOBALE	11
3	SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	12
3.1	Méthodologie	12
3.2	Mammifères marins	12
3.2.1	Généralités	12
3.2.2	Cadres réglementaires	12
3.2.3	Contexte local	13
3.3	Tortues de mer	14
3.3.1	Généralités	14
3.3.2	Cadres réglementaires	14
3.3.3	Contexte local	15
3.4	Méthodes et moyens planifiés pour le projet	15
3.4.1	Fonçage ou vérinage en pression continue	15
3.4.2	Forage avec barrière physique métallique imperméable	16
3.5	Enjeux et sensibilités	16
4	MODÉLISATION DE PROPAGATION ET ÉVALUATION DE L'IMPACT SONORE	17
4.1	Méthodologie	17
4.1.1	Logiciel de modélisation de propagation	17
4.1.2	Données d'entrée	17
4.1.3	Évaluation de l'impact sonore	18
4.2	Modélisation de propagation	18
4.2.1	Conformité avec les normes acoustiques	18
4.2.2	Données d'entrée	20
4.2.2.1	Bathymétrie	20
4.2.2.2	Nature des fonds	21
4.2.2.3	Bathycélérimétrie	22
4.2.2.4	Conditions environnementales	23
4.2.2.5	Signature sonore de la source	23
4.2.2.6	Algorithmes de propagation sonore	24
4.2.3	Synthèse des données d'entrée	25
4.2.4	Stratégies de modélisation	26
4.3	Évaluation de l'impact sonore	27
4.3.1	L'audition chez les mammifères marins	28
4.3.2	Seuils de tolérance au bruit pour les mammifères marins	29
4.3.3	L'audition chez les tortues de mer	30
4.3.4	Seuils de tolérance au bruit pour les tortues de mer	31
4.3.5	Cartes de bruit et distances d'impact	31

4.3.5.1	Modélisation Lp non pondérée.....	32
4.3.5.2	Modélisation LE,p,24h non pondérée pour 6h de forage.....	33
4.3.5.3	Modélisation LE,p,HG,24h pondérée pour 6h de forage aux groupes d'audition.....	34

5	CONCLUSION.....	37
----------	------------------------	-----------

6	BIBLIOGRAPHIE.....	38
----------	---------------------------	-----------

Références

Figure 1.	Emprise du sanctuaire AGOA (Office Français de la Biodiversité).....	14
Figure 2 :	Données bathymétriques compilées du projet HOMONIM (SHOM, 2018).....	21
Figure 3 :	Carte sédimentaire mondiale (SHOM, 2021).....	22
Figure 4 :	Spectre acoustique de la source sonore (MTES, 2020)	23
Figure 5.	Applicabilité des algorithmes de propagation (Farcas et al., 2016)	24
Figure 6.	Différence entre les bruits émis, reçu et perçu.	27
Figure 7 :	Audiogrammes médians des différents groupes de mammifères marins (Southall et al., 2019).....	29
Figure 8 :	À gauche, audiogrammes de quatre espèces de tortues marines. À droite, audiogramme de la tortue caouanne (<i>Caretta caretta</i>) à différents stades du cycle de vie (Ketten & Bartol, 2006 , Piniak et al, 2012 et 2016).	31
Figure 9 :	Propagation sonore du niveau Lp de l'atelier de forage	32
Figure 10 :	Propagation sonore du niveau LE,p,24h (pour 6h de forage).....	33
Figure 11 :	Propagation sonore du niveau LE,p,LF,24h (pour 6h de forage pour les mammifères marins LF)....	34
Figure 12 :	Propagation sonore du niveau LE,p,HF,24h (pour 6h de forage pour les mammifères marins HF) .	35
Tableau 1.	Données d'entrée pour la modélisation.....	17
Tableau 2.	Indicateurs acoustiques	19
Tableau 3.	Coordonnées du point de modélisation du forage	21
Tableau 4.	Données d'entrée du scénario de propagation et leurs sources	25
Tableau 5 :	Groupe d'audition des cétacés (Southall et al., 2019).	28
Tableau 6 :	Seuils de perte temporaire (TTS) et permanente (PTS) d'audition pour chaque groupe de mammifères marins exposés à un bruit continu. (Southall et al., 2019).	30
Tableau 7.	Seuils TTS et PTS et distances maximales d'impact associées.....	36
Tableau 8.	Seuil TTS et distance maximale d'impact associée	36

ABRÉVIATIONS

MTE(S) : Ministère de la Transition Écologique (et Solidaire)

NMFS : National Marine Fisheries Service

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

PTS : Permanent Threshold Shift (seuil de perte permanente de l'audition)

RMS : Root Mean Square (moyenne quadratique)

SEL : Sound Exposure Level (niveau d'exposition sonore)

SPL : Sound Pressure Level (niveau de pression sonore)

TTS : Temporary Threshold Shift (seuil de perte temporaire de l'audition)

UNITÉS

dB : décibels

Hz : Hertz

Pa : Pascal

GLOSSAIRE ET FORMULES

Bande de fréquence :

Correspond à l'ensemble des fréquences caractérisant un son (appelée aussi gamme).

Bande de tiers d'octave :

Représentation graphique en bande de fréquences ne se chevauchant pas et large d'un tiers d'octave. Trois bandes de tiers d'octave adjacentes forment une octave (une octave est un doublement de la fréquence).

Décibel (dB) :

Unité de niveau sonore (logarithmique de base 10) correspondant à un dixième de bel.

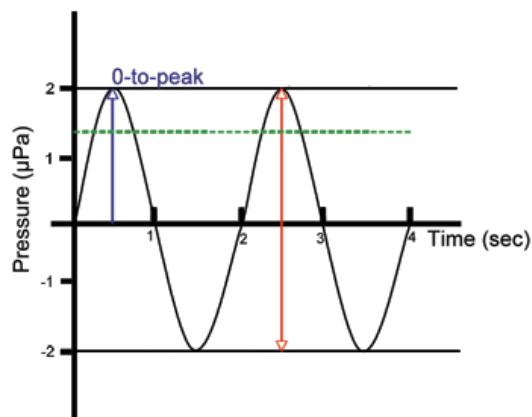
Fréquence :

Rythme d'oscillation mesuré en cycles par unité de temps. Elle est exprimée en hertz (Hz).

Par exemple : 1 Hz signifie 1 cycle par seconde.

Peak (pk) :

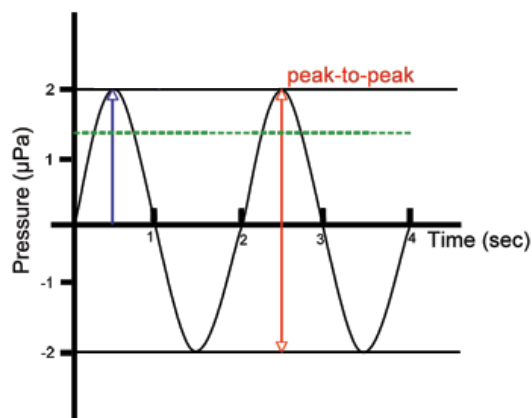
Crête. Niveau maximum (crête) atteint dans un laps de temps donné depuis l'amplitude 0.



Le Peak est calculé en dB re 1 μPa et est utilisé principalement pour les sons impulsifs. La notation ISO du peak est $L_{p,pk}$ ou $L_{p,0-pk}$.

Peak to peak (pk-to-pk) :

Crête à crête. Niveau maximum (crête à crête) atteint dans un laps de temps donné de l'amplitude négative à l'amplitude positive.



Le peak to peak est calculé en dB re 1 μPa et peut être utilisé pour les sons impulsifs. Il est noté $L_{p, pk-to-pk}$.

Percentiles :

Analyse statistique permettant de déterminer la distribution des données en 100 parts égales. En acoustique, elle permet de déterminer les niveaux sonores à partir desquels il y a dépassement des données sur une période de temps donnée. La notation peut être en %, ou notée L_n ou P_n , n correspond au percentile associé.

Par exemple : $L_{10} = 120$ dB signifie que sur 10% de la durée totale analysée, les niveaux sonores dépassent 120 dB. L_1 fait donc référence au niveau maximum atteint, L_{100} au minimum et L_{50} au niveau médian.

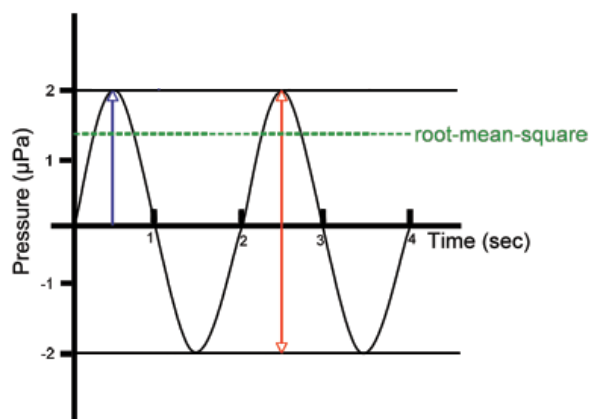
PSD (Power Spectral Density) :

(DSP) Densité Spectrale de Puissance. Représentation graphique indiquant la distribution du niveau sonore par fréquence.

RMS (Root Mean Square) :

Moyenne quadratique d'un niveau sonore sur une période de temps donnée. Aussi appelé niveau efficace, il correspond à $0.707 \times$ l'amplitude d'une sinusoïde. Le RMS est exprimé en dB dont la formule est :

$$SPL_{rms} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_T \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) dt \right)$$

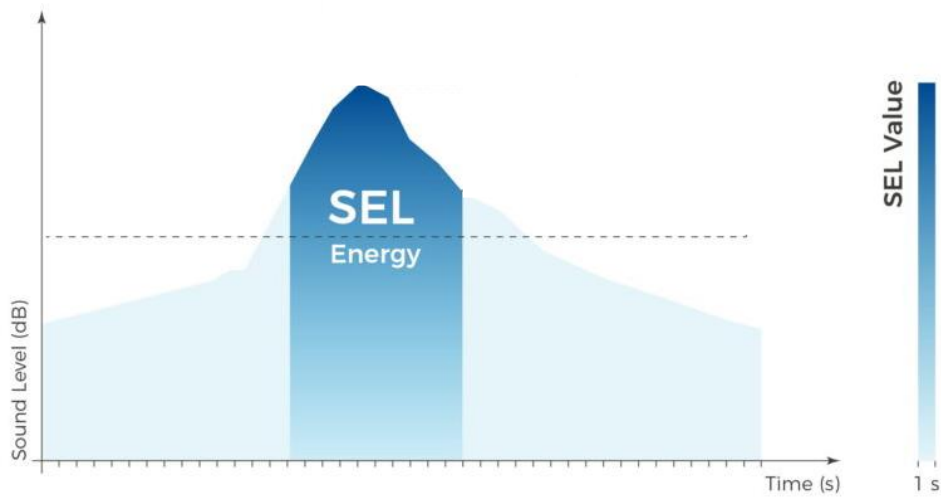


Le RMS est calculé en dB re 1 μPa et est utilisé principalement pour les sons continus. La notation ISO pour le RMS est L_p ou $L_{p,rms}$.

SEL (Sound Exposure Level) :

Niveau d'exposition sonore sur une période de temps donnée rabattue à 1 sec dont la formule est :

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{T_{100}} p^2(t) dt}{T_0 p_0^2} \right)$$



Le SEL est calculé en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. La notation ISO du SEL est $L_{E,p}$.

Spectre sonore :

Représentation graphique correspondant aux niveaux sonores par bande de fréquences. Le spectre est utilisé pour caractériser un son (appelé aussi signature sonore ou gabarit). Il est généralement affiché en bande fine (1 Hz).

Spectrogramme :

Représentation graphique du niveau sonore par fréquence en fonction du temps. L'axe des abscisses est le temps, l'axe des ordonnées les fréquences, et un gradient de couleur est appliqué en fonction du niveau sonore.

SPL (Sound Pressure Level) :

Niveau de pression sonore exprimé en dB dont la formule est :

$$X(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right)$$

P_1 est la pression à mesurer en Pa, P_0 est le niveau de référence en Pa (1 μPa pour l'eau).

Le SPL est calculé en dB re 1 μPa .

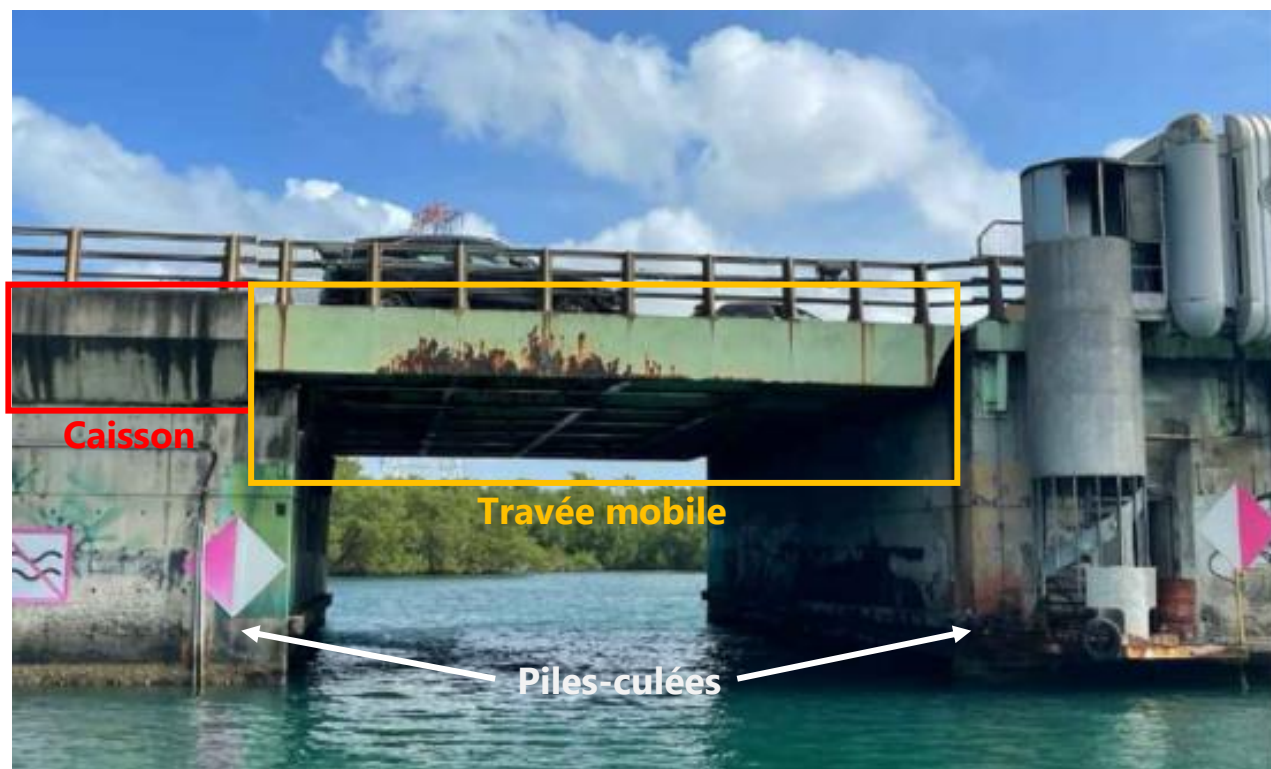
1 CONTEXTE

Le projet a pour objectif la remise en état du pont de la Gabarre. Ce dernier intègre une travée mobile, dont les mécanismes ne sont actuellement plus opérationnels.

Cette travée mobile (dont le tablier est métallique) présente une corrosion importante de ses poutres, avec des perforations des augets à la liaison avec le platelage, qui ne transmet plus les efforts transversaux aux augets. De la corrosion se développe sur l'ensemble de la structure. Il est donc urgent de remplacer cette travée fragilisée du pont qui représente un risque important pour les usagers.



LOCALISATION DE LA TRAVEE MOBILE



VUE DE LA TRAVEE MOBILE DEPUIS LA RIVIERE SALEE – SUD

Dans le cadre de ces travaux de remise en état, des travaux de fonçage ou vérinage en pression continue et des sondages géotechniques par forage sont prévus.

Les services de la DEAL Guadeloupe ont demandé une évaluation sonore des impacts potentiels de ces techniques sur la faune marine, évaluation comprenant une synthèse bibliographique sur les techniques planifiées.

Toute évaluation sonore doit être réalisée en prenant en compte les espèces présentes ou susceptibles de l'être dans la zone stricte mais aussi éloignée du projet.

ACOUSTB, entreprise filiale du groupe Egis et spécialisée en acoustique a réalisé cette évaluation sous forme de note technique.

2 MÉTHODOLOGIE GLOBALE

Notre méthodologie s'est structurée en trois étapes :

- Réalisation d'une synthèse bibliographique sur les espèces en présence ou susceptibles de l'être, sur les ateliers mis en œuvre et leurs signatures sonores (niveaux et fréquences)
- Réalisation d'une évaluation des impacts acoustiques sous-marins et de modélisations de propagation sur les groupes d'audition concernés (mammifères marins et tortues de mer uniquement)
- Émission de recommandations, mesures ERC ou de mitigation si des risques d'impact sont possibles ou avérés

La méthodologie proposée est conforme à :

- La norme [AFNOR ISO 18406](#) d'avril 2017 et [ISO 18405-2017](#) en acoustique sous-marine et relative au mesurage du son sous-marin.
- Le [guide de surveillance du bruit sous-marin dans les mers européennes – Résumé exécutif](#). 2e rapport du sous-groupe technique sur le bruit sous-marin (TSG Noise), parties I, II, III, novembre 2013 (indicateur 11.1 "Distribution dans le temps et dans l'espace des sons impulsifs de haute, basse et moyenne fréquence", et indicateur 11.2 "Son continu de basse fréquence").
- La [décision UE n°2017/848](#) de la commission du 17/05/2017 établissant des critères et des normes méthodologiques applicables au bon état écologique des eaux marines ainsi que des spécifications et des méthodes normalisées de surveillance et d'évaluation, et abrogeant la décision n° 2010/477/UE du 01/09/2010 relative aux critères et aux normes méthodologiques concernant le bon état écologique des eaux marines.
- La [directive n°2008/56/CE](#) du 17/06/2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre « stratégie pour le milieu marin »), transposée dans le Code de l'Environnement ([articles L.219-9 à L.219-18](#) et [R.219-2 à R.219-10](#)).
- L'[arrêté du 9 septembre 2019](#) relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines et aux normes méthodologiques d'évaluation du 27 septembre 2019.
- Le [guide du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire \(MTES\)](#), 2020 : Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine.

3 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Méthodologie

Avant d'évaluer l'impact sonore d'un chantier sur les espèces marines dans une zone d'étude, il est important de réaliser un état initial des connaissances et des données disponibles. Cet état initial permet de mieux appréhender les enjeux et les impacts du bruit sur les espèces cibles.

Pour ce faire, une synthèse bibliographique a été réalisée sur les espèces marines et les ateliers mis en œuvre pour le projet à l'échelle de l'aire d'étude stricte (la Gabarre) et éloignée (Petit cul de sac marin).

Elle a permis de :

- Dresser un état des données disponibles
- Déterminer les lacunes potentielles en termes de données à acquérir
- Définir les enjeux et la sensibilité des espèces présentes

Cette synthèse a été réalisée en compilant et analysant les informations issues des publications scientifiques, de la littérature grise (rapports d'étude, etc.) et de données de distribution. Les données des programmes nationaux ont été utilisées (campagnes d'observation comme EXOCET, REMMOA et CARI'MAM) ainsi que d'éventuels autres jeux de données disponibles et accessibles ou de suivis divers (OBSENMER, KARUNATI).

3.2 Mammifères marins

3.2.1 Généralités

Les mammifères marins regroupent les cétacés, les pinnipèdes et les siréniens, soit plus d'une centaine d'espèces au total. Parmi les cétacés, on distingue généralement, les odontocètes ou cétacés à dents (regroupant les delphinidés, les marsouins, les cachalots et autres grands plongeurs) des mysticètes ou cétacés à fanons (dont les rorquals, les baleines à bosse, grise ou franche). Le groupe des pinnipèdes est quant à lui constitué des phoques, des otaries et des morses. Enfin, le groupe des siréniens est constitué des lamantins et des dugongs.

3.2.2 Cadres réglementaires

Les mammifères marins bénéficient de statuts de protection stricte à l'échelle nationale, communautaire et internationale et sont listés dans bon nombre d'accords internationaux ([CITES](#), [OSPAR](#), [ASCOBANS](#)...). Ils sont protégés contre toute exploitation commerciale, de toute destruction intentionnelle ou capture pour la vente. [Au niveau européen et applicable en Métropole uniquement](#), le marsouin commun, le Grand Dauphin, le phoque gris et le phoque veau-marin sont listés dans l'Annexe II de la Directive Habitats Faune Flore (Natura 2000), ce qui peut justifier la désignation de Zone Spéciale de Conservation (ZSC) pour ces espèces. Les autres espèces sont listées dans l'Annexe IV de la Directive Habitats Faune Flore (Natura 2000), ce qui implique la protection et le maintien de leurs habitats.

L'ensemble de ces réglementations trouve leur application dans le droit français à travers les textes suivants :

- L'[arrêté du 9 juillet 1999](#), fixant la liste des espèces de vertébrés protégées menacées d'extinction en France et dont l'aire de répartition excède le territoire d'un département, modifié par l'arrêté du 27 mai 2009
- L'[arrêté ministériel du 11 juillet 2011 NOR : DEVL110724 A](#), fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection, ainsi qu'un plan national de protection des cétacés. Les mammifères marins présents sur les côtes françaises y sont listés comme espèces strictement protégées contre « la destruction, la mutilation, la capture ou l'enlèvement intentionnels incluant les prélèvements biologiques, la perturbation intentionnelle incluant la poursuite ou le harcèlement des animaux dans le milieu naturel ». Il est également acté que sont interdits « La destruction, l'altération ou la dégradation des sites de reproduction et des aires de repos des animaux »

La France est également signataire de deux textes communautaires au niveau européen :

- Le [règlement \(CE\) n° 812-2004](#) du Conseil du 26 avril 2004 établissant des mesures relatives aux captures accidentelles de cétacés dans les pêcheries
- La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, [applicable en Métropole uniquement \(DCSMM, 2008\) \(2008/56/CE\)](#) qui considère le milieu marin comme un patrimoine précieux qu'il convient de protéger et de préserver. Les principaux objectifs de la directive sont de maintenir la diversité biologique, de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers, et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité végétale et animale. Le déclin de la biodiversité dû à l'intervention de l'homme doit être évité afin de garantir les objectifs de bon état écologique défini dans la DCSMM

En complément des textes ci-dessus, plusieurs cadres légaux internationaux réglementent les impacts sur le milieu marin et plus particulièrement sur les espèces marines. Ces cadres peuvent porter sur des espèces spécifiques, en fonction de leur statut de conservation, de leur vulnérabilité, de leur rareté (espèces endémiques, protégées...) ou être liés à des espaces maritimes ou des zones de protections comme les Aires Marines Protégées (AMP) dont font partie les parcs naturels et les Zones Marines Particulièrement Vulnérables (ZMPV) où sont mises en place des mesures spécifiques de gestion, de protection, de conservation.

La France a également ratifié plusieurs textes internationaux :

- La [convention de Washington](#) relative à la réglementation de la chasse à la baleine et la Commission Baleinière Internationale (CBI) qui en est son organe décisionnel (1946)
- La convention de Washington sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction ou [CITES \(1973\)](#)
- La [convention de Berne](#) relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (1979)
- La [convention de Bonn](#) sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage CMS (1979)

3.2.3 Contexte local

Aux Antilles, il existe une aire de protection dédiée aux mammifères marins : le sanctuaire AGOA (Figure 1). C'est l'une des plus vastes Aires Marines Protégées (AMP), « zone spécialement protégée de la convention de Carthagène », dont l'Agence des aires marines protégées assure la gestion directe et où plus d'une vingtaine d'espèces y ont été observées.

Parmi les Mysticètes observés dans le sanctuaire, on y retrouve la Baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*), le Rorqual de Bryde (*Balaenoptera edeni*) et le Petit Rorqual (*Balaenoptera acutorostrata*). Parmi les odontocètes, on y retrouve le Grand Cachalot (*Physeter macrocephalus*) et le Cachalot pygmée (*Kogia breviceps*), des Baleines à bec (de Gervais, de Cuvier) et des delphinidés comme le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*), le Dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*), etc.

Dans la zone stricte du projet (la Gabarre), il est très peu probable de retrouver des mysticètes, de grands plongeurs, ou encore des odontocètes plus massifs du fait de la profondeur très réduite, ces espèces sont plus généralement présentes au large, sur de plus grandes profondeurs. Il est en revanche possible, à l'échelle d'une aire éloignée (Petit cul de sac marin), de retrouver ces espèces et plus particulièrement des delphinidés, espèces plus côtières et présentes toute l'année (en 2024, l'OMMAG a observé 3 baleines à bosse en face du Gosier, en mars avril 2021, un Grand Dauphin, un Dauphin de Fraser et une Baleine à bosse ont été observés dans la baie via OBSSEMER).

A notre connaissance, il n'existe pas d'autres mammifères marins sur la Guadeloupe autre que les cétacés.

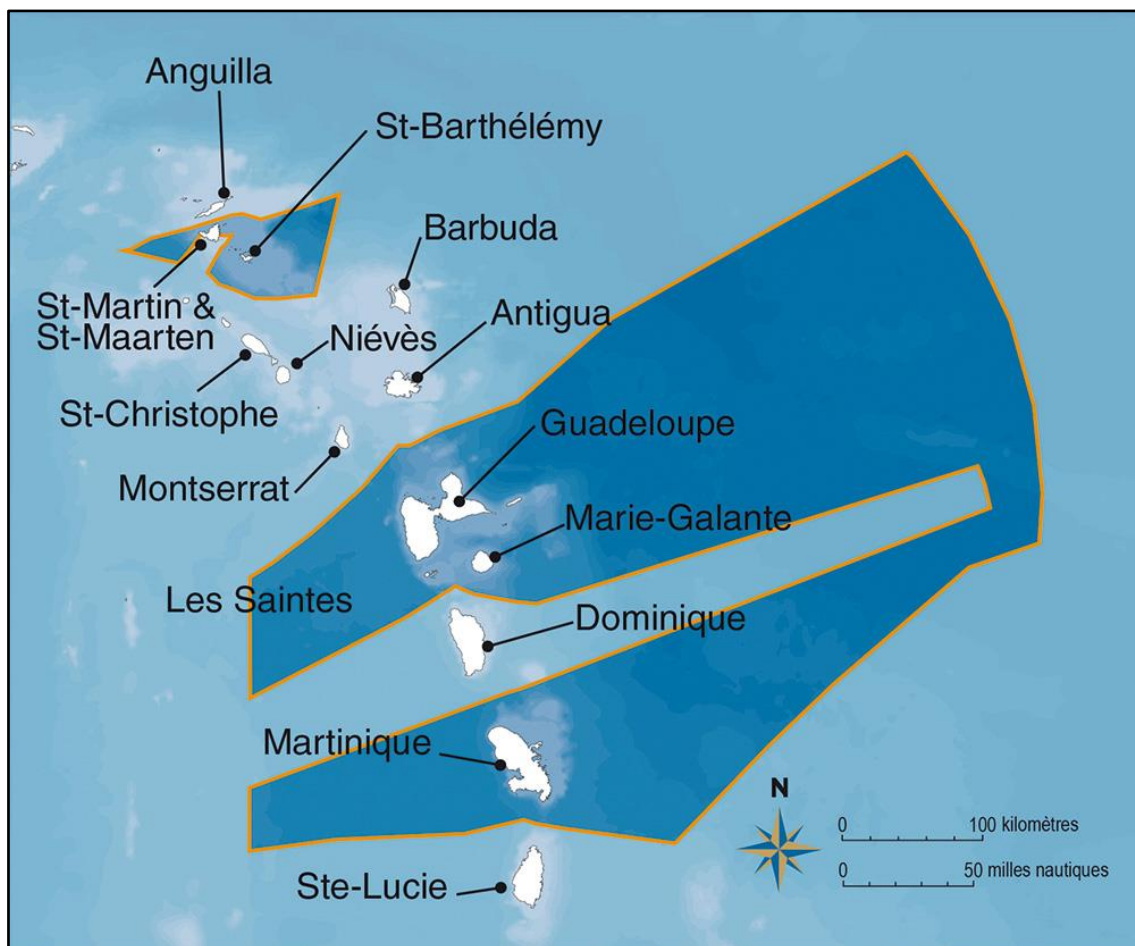


FIGURE 1. EMPRISE DU SANCTUAIRE AGOA (OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITE)

3.3 Tortues de mer

3.3.1 Généralités

Les tortues marines sont des espèces migratrices, à sang-froid, dotées de poumons, à longue durée de vie et à maturité sexuelle tardive. Elles présentent un cycle de vie complexe où de nombreux changements vont s'opérer au niveau de leur alimentation, des habitats utilisés et de leur comportement. Ainsi, les individus juvéniles se développent dans des zones éloignées des côtes, les individus subadultes utilisent des habitats côtiers et les adultes effectuent des migrations entre les zones d'alimentation et les zones de reproduction et d'inter-ponte (Wyneken et al., 2014), n'hésitant pas à traverser les océans. Il existe à l'heure actuelle sept espèces de tortues marines réparties en deux groupes : les Cheloniidés comptant 6 espèces et les Dermochelyidés comptant une seule espèce.

3.3.2 Cadres réglementaires

Les tortues marines sont également protégées par plusieurs réglementations et conventions.

L'ensemble de ces réglementations trouve leur application dans le droit français à travers les trois textes suivants :

- L'Arrêté ministériel du 14 octobre 2005 fixant la liste des tortues marines protégées sur le territoire national et les modalités de leur protection, assure la protection des tortues marines au niveau national
- Le code de l'environnement (Articles L.411- 1 à L.411-2) définissant la protection des espèces non domestiques
- Le Plan National d'Actions (PNA) en faveur des tortues marines aux Antilles françaises (2020-2029)

La France a également ratifié plusieurs textes internationaux :

- La [convention de Washington](#) (1973) sur le commerce international des espèces de faunes et de flores sauvages menacées d'extinction (CITES) : Annexe I
- La [convention de Berne](#) (1979) relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe : Annexe II
- La [convention de Bonn](#) (1979) sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage (CMS) : Annexes I & II
- La [convention RAMSAR](#) sur la conservation des zones humides (1971) pour la protection des zones humides d'intérêt mondial qui présentent des caractéristiques écologiques exceptionnelles
- La [convention de Rio](#) (1992) sur la diversité biologique
- La [convention de Nairobi](#) (1985) relative à la protection, à la gestion et la mise en valeur des milieux marins et côtiers de la [région de l'Afrique orientale](#) et son protocole relatif aux aires protégées ainsi qu'à la faune et la flore sauvage
- Le [mémoire d'accord](#) sur la conservation et la gestion des tortues marines et de leurs habitats de l'[océan Indien et de l'Asie du Sud-Est](#) (2001) pour la protection et la conservation des tortues marines dans l'ensemble de l'océan Indien
- La [résolution 12/04](#) concernant les tortues marines dans le Recueil des Mesures de conservation et de gestion actives de la Commission des Thons de l'[océan Indien](#) définissant les bonnes pratiques à adopter pour atténuer l'impact de la pêche hauturière sur les tortues marines

3.3.3 Contexte local

Aux Antilles, il existe donc un Plan National d'Actions (PNA) en faveur des tortues marines, qui est en application depuis 2020. C'est un document de planification stratégique dont l'objectif est l'amélioration de l'état de conservation des cinq espèces qui fréquentent les plages et les eaux des Antilles françaises, dont la Guadeloupe, la Martinique et Saint-Martin.

Les cinq espèces que l'on retrouve dans les eaux des Antilles sont : La Tortue luth (*Dermochelys coriacea*), la Tortue imbriquée (*Eretmochelys imbricata*), la Tortue verte (*Chelonia mydas*), la Tortue olivâtre (*Lepidochelys olivacea*) et la Tortue caouanne (*Caretta caretta*).

En Guadeloupe, on peut rencontrer 3 espèces de tortues de mer, la Tortue luth, imbriquée et verte. Espèces emblématiques de la richesse de l'archipel et menacées au niveau mondial, les tortues marines sont intégralement protégées en Guadeloupe depuis 1991. Cette protection a été renforcée en 2005 par un arrêté incluant la protection des sites de ponte. **Dans le périmètre strict du projet (la Gabarre), il est peu probable de rencontrer ces espèces puisqu'il n'y a pas de plages de sable et de zones de nourrissage à proximité directe, et les accès au rivage sont complexes (mangroves) ou urbanisés (Grand Port).** En revanche, la rivière salée reste le seul passage entre le sud et le nord des îles mais la profondeur y est très faible (une Tortue verte a été observée, via KARUNATI, par le Parc dans la zone). Les plages les plus fréquentées sont celles du nord, nord-ouest, pointe sud et est des îles, notamment en période de ponte. **Il est en revanche possible de rencontrer ces espèces à l'échelle d'une aire éloignée (Petit cul de sac marin), dans les eaux autour du projet.**

3.4 Méthodes et moyens planifiés pour le projet

3.4.1 Fonçage ou vérinage en pression continue

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux scientifiques spécifiques sur la caractérisation des émissions sonores d'ateliers de fonçage ou vérinage en pression continue. Cette technique semble être beaucoup moins impactante que les techniques traditionnelles d'enfoncement de profils ou pieux tels que le vibrofonçage ou le battage (vibration ou impact avec marteau).

Il est peu probable que cette technique génère donc des niveaux impactant, puisqu'au regard des données dont nous disposons, il semblerait que les émissions sonores attendues pourraient provenir du profil pénétrant le sol ou de vibrations se propageant dans le profil par transmission depuis le vérin. Cette technique est considérée comme génératrice de bruit continu, très certainement de basses fréquences, et omnidirectionnel. **Malheureusement, les données bibliographiques sur les méthodes et moyens qui seront mis en œuvre dans cet atelier sont très limitées. Il n'est pas possible, à ce stade, de statuer sur la signature sonore de cet atelier.**

3.4.2 Forage avec barrière physique métallique imperméable

Il existe, dans la littérature, des éléments concernant des activités de forage sous-marin, mais **pas de travaux scientifiques spécifiques concernant le forage réalisé à l'intérieur de tubes métalliques imperméables à opercule** (faisant office de barrière physique) comme envisagés pour le projet.

Le forage (sans mitigation) **est une source de bruit continu, omnidirectionnelle, basses fréquences, allant de 10 Hz à 10 kHz, avec des niveaux pouvant atteindre 120 à 190 dB re 1 µPa, et un maximum d'énergie entre 10 Hz et 1 kHz** (MTES, 2020). Les travaux de Erbe et McPherson, 2017 font mention de signatures sonores entre 30 Hz et 2 kHz avec des niveaux allant jusqu'à 145 dB re 1 µPa. Les travaux de Kyhn et al., 2014 font mention de niveaux sources à 190 dB re 1 µPa entendus au-dessus du niveau de bruit ambiant jusqu'à 38 km dans l'Arctique (avec une barge foreuse).

De manière globale, les émissions sonores provenant d'un forage varient en fonction du type et du diamètre de la colonne (rotation, percussion, etc.), du type de substrat dans lequel on fore (les substrats denses, rocheux favorisent la propagation par le sol), et la profondeur de forage. Les moyens mis en œuvre pour le forage peuvent également émettre des bruits indirects (bateau, barge, moteurs, compresseurs, etc.).

Concernant le projet, à ce stade, les machines, le type et le diamètre de la tête de forage, les éléments concernant la taille des tubes métalliques, et les profondeurs à atteindre ne sont pas connus. **À ce stade, il est compliqué d'estimer la signature spécifique de ces ateliers avec les tubes métalliques imperméables.**

3.5 Enjeux et sensibilités

Malheureusement, par manque de données dans la littérature scientifique, il est impossible d'être catégorique sur les propos qui suivent, puisque seuls des éléments permettant de caractériser la signature des sources sonores (niveaux et fréquences) permettraient de juger de l'émission (et donc de la propagation) de ces ateliers.

Malgré tout, il est possible, sur base des données récoltées, de présupposer :

- (I) Dans la zone stricte du projet (la Gabarre), **il n'y a pas d'enjeux au regard des émissions sonores attendues et des espèces susceptibles d'être présentes autour de l'atelier de fonçage par pression continue.**
- (II) **Pour les ateliers de forage, en considérant la faible profondeur, il existe tout de même un faible enjeu sur l'aire stricte pour les tortues de mer qui sont plus sensibles dans les basses fréquences** (30 Hz à 2 kHz d'après Ketten & Bartol, 2006, Piniak et al., 2012 et 2016) surtout si les niveaux venaient à se propager plus loin.

Concernant les cétacés basses fréquences LF (mysticètes), malgré le fait qu'ils soient plus sensibles aux basses fréquences également (1 à 8 kHz d'après Southall et al., 2019), **leur probabilité de se trouver à proximité directe des travaux est quasi nulle, le risque sera dépendant de la propagation.** Une modélisation permettra de connaître les distances de propagation pour s'assurer que les zones d'impact soient cantonnées à la zone stricte du projet.

Enfin, **il n'existe pas de risques sur les cétacés hautes fréquences HF (delphinidés) puisque ceux-ci sont plus sensibles entre 10 et 100 kHz** d'après Southall et al., 2019 (en dehors des émissions attendues) **et leur probabilité de présence dans la Gabarre est très peu probable.**

4 MODÉLISATION DE PROPAGATION ET ÉVALUATION DE L'IMPACT SONORE

4.1 Méthodologie

L'objectif des modélisations est d'établir des cartes de bruit qui traduisent les niveaux sonores sous-marins prévisionnels ainsi que leur propagation sur la zone d'étude (niveaux reçus), mais aussi sur les espèces en présence ou susceptibles de l'être, en fonction de leur sensibilité auditive (niveaux perçus). Pour ce faire, il s'agit d'établir le ou les scénarios acoustiques représentatifs les plus impactant à modéliser.

4.1.1 Logiciel de modélisation de propagation

Le logiciel de propagation des ondes sonores dBsea a été utilisé pour modéliser la propagation sonore sur la zone d'étude sur base des données disponibles ou collectées.

Ce logiciel répond aux critères définis par le Laboratoire CMST (Centre for Marine Science and Technology) de l'Université de Curtin (Perth, Australie) et décrit par [Jensen et al., 2011](#). Il est basé sur les codes de référence de la [boîte à outils AcTUP](#) et de la [bibliothèque OceanAcoustics](#) : RAM pour la résolution des équations paraboliques, Kraken pour la résolution des modes normaux et Bellhop pour le lancer de rayons.

Les algorithmes de modélisation utilisés sont choisis en fonction des caractéristiques géoacoustiques du milieu et des caractéristiques acoustiques des sources sonores (algorithmes adaptés à la hauteur d'eau et aux types de couches du substrat)

4.1.2 Données d'entrée

Pour établir les scénarios de propagation le plus représentatifs, un certain nombre de données d'entrée (Tableau 1) ont été nécessaires. Ces données garantissent la robustesse de la résolution des équations de propagation.

TABLEAU 1. DONNEES D'ENTREE POUR LA MODELISATION

Type de données	Format	Description
Bathymétrie	Carte raster	Nécessaire pour établir l'espace de propagation des ondes sonores ainsi que la topographie du fond marin
Nature du fond	Carte ou données bibliographiques	Nécessaire pour évaluer les propriétés de réflexion/absorption des couches de substrat
Bathycélérimétrie	Mesures ou données bibliographiques	Nécessaire pour le calcul des pertes acoustiques en fonction de la distance
Température	Mesures ou données bibliographiques	
Salinité	Mesures ou données bibliographiques	
Conditions météorologiques et océaniques	Données bibliographiques	Nécessaire pour intégrer la géophonie au bruit ambiant
Descriptif des ateliers du chantier	Données sur les opérations : types d'engin, planning des opérations, positions des ateliers	Descriptif et durée des ateliers

Type de données	Format	Description
Mesures de mitigation	Données sur la mitigation	Nécessaire pour déterminer la réduction de niveau à la source
Période des travaux	Données bibliographiques	Nécessaire pour intégrer le marnage et les marées
Modèle de perte par propagation	Équation	Nécessaire pour le calcul des pertes acoustiques en fonction de la distance
Audiogramme des espèces à enjeux	Données bibliographiques Courbe niveau/fréquence	Nécessaire pour prendre en compte la capacité auditive de chaque espèce
Seuils de risque de perte d'audition	Données bibliographiques Niveaux en dB pondérés	Nécessaire pour déterminer les risques de dommages physiologiques

Ces données ont été fournies par le client ou collectées lors de l'étude bibliographique.

4.1.3 Evaluation de l'impact sonore

Des cartes de bruit représentatives de la propagation sonore ont été établies, ainsi que des cartes de bruits pondérés en fonction du groupe d'audition des espèces en présence ou susceptibles de l'être.

Les cartes sont basées sur les dernières connaissances et conformément aux seuils établis dans la bibliographie : mortalité, TTS (Temporary Threshold Shift) et PTS (Permanent Threshold Shift) de la NOAA et NMFS, Southall et al., 2019 pour les mammifères marins, et Popper et al., 2014 pour les poissons et tortues de mer. Seuls les seuils de dommages physiologiques ont été considérés, car les seuils de masquage et de dérangement ne font pas encore consensus dans la communauté scientifique (Southall et al., 2021).

En complément des cartes de bruit, les distances d'impact pour le projet ou par méthode/phase ont été établies en fonction des espèces.

4.2 Modélisation de propagation

Sans données qualitatives fiables (signatures sonores) des ateliers envisagés, il n'est malheureusement pas possible de modéliser une propagation sonore robuste puisque le spectre de la source est l'une des données les plus importantes dans une modélisation.

Au regard des enjeux et sensibilités définis lors de l'étude bibliographique (3.5), seul l'atelier de forage présente une probabilité d'impact sur les tortues de mer et potentiellement sur les mammifères marins LF.

Afin de réaliser un exercice dit « scénario le plus impactant » (niveau le plus fort et propagation favorisée), une proposition de modélisation de forage « standard » (c'est-à-dire sans mitigation) basée sur des signatures sonores issues de la bibliographie et les dernières connaissances en matière de seuils et d'impacts sonores a été réalisée. Cette modélisation reste théorique, mais permet tout de même de quantifier le comportement de la propagation sonore sur la zone et d'établir un impact maximum. L'atelier de forage pressenti, sera donc, par définition et avec des mesures de précaution, moins impactant que ce scénario.

Cette propagation pourra être ajustée si des données complémentaires (mesures *in-situ* par exemple) sont disponibles a posteriori.

4.2.1 Conformité avec les normes acoustiques

Pour évaluer le niveau de bruit ambiant, un certain nombre d'indicateurs ont été calculés. Les indicateurs acoustiques retenus, présentés ci-dessous (Tableau 2), sont conformes aux recommandations du Ministère de la Transition Écologique (MTES, 2020) et à la norme ISO-18405 2017 Acoustique sous-marine - Terminologie.

TABLEAU 2. INDICATEURS ACOUSTIQUES

Indicateur		Notation ISO	Notation courante	Unité	Description
Bruit émis	Niveau d'émission	L_s	SL	dB re 1 μPa @ 1 m	Établit le niveau d'émission d'une source sonore
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$	Établit le spectre acoustique d'une source de bruit (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence)
Bruit reçu	Niveau de pression sonore (niveau RMS)	L_p , ou $L_{p,\text{RMS}}$	SPL_{RMS}	dB re 1 μPa @ X m	Quantifie le niveau de pression efficace (moyenne quadratique) reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice
	Niveau de pression sonore (niveau peak)	$L_{p,\text{pk}}$ ou $L_{p,0-\text{pk}}$	SPL_{peak} ou SPL_{pk}	dB re 1 μPa @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice (différence de pression maximale ou minimale par rapport à la pression de référence)
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice par bande de fréquence et sur une période donnée.
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$	Établit le spectre acoustique du bruit reçu par un hydrophone (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence) sans prendre en compte la distance entre l'émetteur et le récepteur
	Niveau équivalent continu	$L_{\text{eq},T}$	L_{eq}	dB re 1 μPa	Quantifie le niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement
	Niveau d'exposition sonore	$L_{E,p}$	SEL_{ss}	dB re 1 $\mu\text{Pa}^2.\text{s}$	Évalue la quantité d'énergie reçue lors d'une impulsion sonore en intégrant également sa durée
	Niveau d'exposition sonore cumulée	$L_{E,p}$	SEL_{cum}	dB re 1 $\mu\text{Pa}^2.\text{s}$	Évalue la quantité d'énergie cumulée reçue lors de plusieurs impulsions en intégrant également leur durée

La terminologie ISO est retenue pour cette étude, car la notation courante n'est plus en vigueur.

4.2.2 Données d'entrée

Pour définir le scénario de propagation des ondes sonores le plus représentatif, des données d'entrée fiables et robustes ont été sélectionnées. Ces données d'entrée sont :

- La bathymétrie de la zone d'étude
- La nature du fond
- Les conditions environnementales
- La vitesse du son, déclinée de la température et salinité des strates d'eau
- Les données du projet (matériel et méthodes)
- L'audiogramme des espèces marines potentiellement présentes

Les données d'entrée des scénarios modélisés sont synthétisées dans le Tableau 4 et explicitées ci-dessous.

4.2.2.1 Bathymétrie

La bathymétrie joue un rôle important dans la modélisation, car la profondeur de l'eau et la topographie du fond marin agissent sur la propagation des ondes sonores.

Par exemple, les zones plutôt plates ou en pente douce comme les plateaux sous-marins peuvent favoriser la propagation à longue distance, alors qu'au contraire, les morphologies sous-marines plus complexes ou les tombants peuvent entraîner des réflexions ou absorptions.

De la même manière, les profondeurs plus importantes favorisent largement la propagation des ondes sonores, alors qu'en eau peu profonde, les ondes sont réfléchies entre la surface et le fond.

La bathymétrie se comporte également comme un filtre passe-haut, ce qui signifie que les fréquences inférieures à une "fréquence de coupure (fc)" subissent de fortes pertes. Cette fréquence de coupure (fc) est définie par la formule suivante (Jensen et al., 2011) :

$$f_c \text{ (Hz)} = \frac{cw}{4h\sqrt{1 - \left(\frac{cw}{cb}\right)^2}}$$

Avec

h : profondeur de l'eau (m)

cw : célérité du son dans l'eau (m.s-1)

cb : célérité du son dans le substrat (m.s-1)

Avant de réaliser une modélisation de propagation des ondes sonores, il est important de choisir l'étendue spatiale et la résolution du modèle, pour cela des données bathymétriques doivent être disponibles avec une résolution suffisante.

Plusieurs jeux de données ont été comparés afin de sélectionner la bathymétrie présentant la meilleure résolution (GEBCO, SHOM, Litto3D®...). **Ce sont les données du SHOM, projet HOMONIM, qui ont été retenues dans le cadre de cette étude** (Figure 2). **La bathymétrie NM (Niveau Moyen) a été utilisée** (à la place de PBMA (Plus Basse Marée Astronomique) car la hauteur d'eau favorise la propagation sonore.

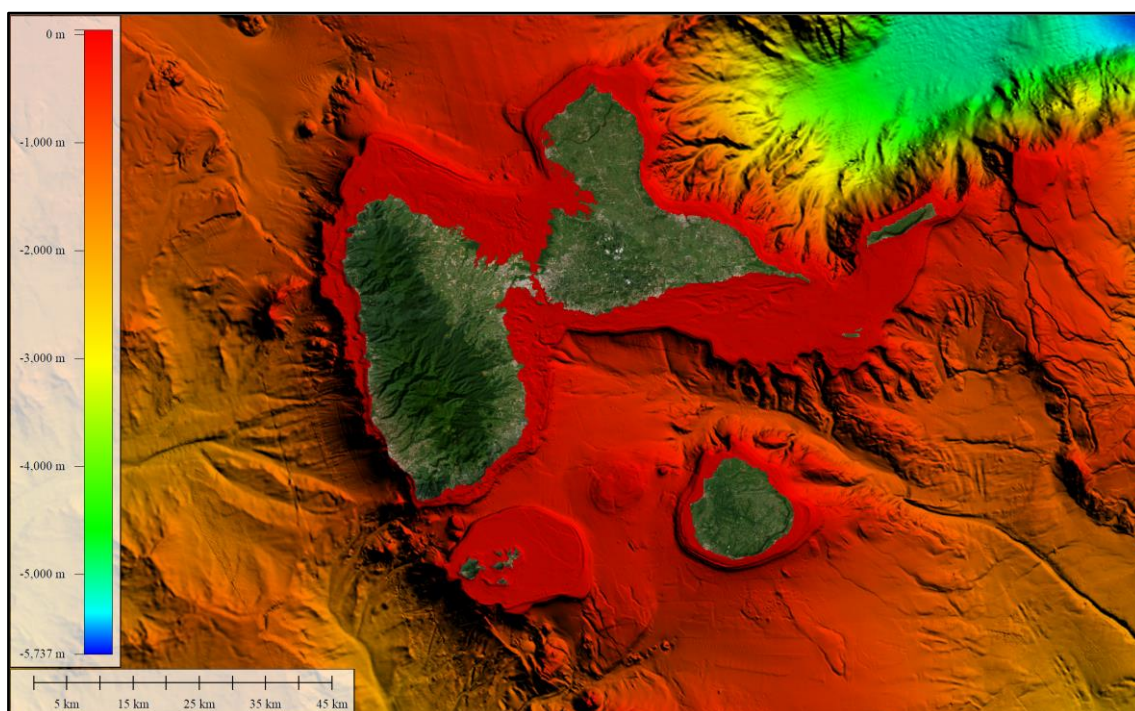


FIGURE 2 : DONNEES BATHYMETRIQUES COMPILEES DU PROJET HOMONIM (SHOM, 2018)

Pour modéliser un point de forage favorisant la propagation, c'est la position au plus profond du chenal, au niveau du pont qui a été sélectionnée.

TABLEAU 3. COORDONNEES DU POINT DE MODELISATION DU FORAGE

Latitude	Longitude	Profondeur
16.25349420° N	61.54900109° W	-3 m

4.2.2.2 Nature des fonds

Les couches du fond marin et plus particulièrement les caractéristiques des sédiments jouent également un rôle important dans la modélisation des ondes sonores. Comme les caractéristiques des sédiments influencent les réflexions, l'absorption et la transmission à travers le fond marin, les données à prendre en compte sont la densité des sédiments, la vitesse du son et l'atténuation acoustique pour modéliser les effets des pertes de propagation du fond.

De nombreuses approches théoriques nécessitent l'entrée de plus de 10 paramètres géophysiques qui sont difficiles à obtenir (même dans des conditions de laboratoire Etter, 2013). Un modèle empirique, développé par Hamilton et basé sur des mesures, est largement utilisé à des fins pratiques (Hamilton, 1972, 1976, 1980, 1987 ; Hamilton et Bachman, 1982). **Les données géologiques et géoacoustiques ont été extraites de la carte sédimentaire mondiale** (Figure 3 SHOM, 2021), **de la base de données INFOTERRE (BRGM), de données transmises (note environnementale EGIS) et de la bibliographie (Jensen et al., 2011).**



FIGURE 3 : CARTE SEDIMENTAIRE MONDIALE (SHOM, 2021)

Les données de nature des fonds considérées pour la modélisation sont donc :

- Recouvrement remblayé : de 3 à 4,2 m
- Dépôt de mangrove : de 4,5 à 5,7 m
- Argile de décalcification : jusqu'à 24 m
- Calcaire corallien

4.2.2.3 Bathycélérimétrie

La vitesse du son et son atténuation sont les deux principaux mécanismes qui affectent la propagation des ondes sonores dans la colonne d'eau. Les conditions océanographiques locales exercent une influence sur la température et la salinité et ces variations peuvent être mesurées dans la colonne d'eau pour établir un profil vertical de la vitesse du son. L'impact de ces deux mécanismes est également renforcé par la position de la source sonore et des organismes récepteurs dans la colonne d'eau étant donné que, lorsque les ondes acoustiques se propageant sous l'eau rencontrent des changements dans la vitesse du son, ces ondes peuvent être réfractées ou « pliées », ce qui peut entraîner un gain ou une atténuation de niveau.

Cependant la plupart des évaluations d'impact du bruit dans l'environnement sont réalisées en eaux peu profondes et à courte distance, où l'influence de la vitesse du son est faible puisque les variations de la profondeur de l'eau sont réduites.

Les données de température et salinité ont été extraites de la base de données SURVAL et de rapports de suivi (Ifremer, 2012, Suez, 2015 et Creoclean, 2016) afin de calculer le profil bathycélérimétrique de la zone. Les stations 124-P-031 - Rivière salée - sous décharge de la Gabarre et 124-P-012 - DDE04 - port de commerce de Pointe à Pitre ont été utilisées. **La bathycélérimétrie est considérée ISO, la vitesse du son dérivée de la température et salinité est estimée à 1545,15 m/s** (équation de Mackenzie, 1981).

4.2.2.4 Conditions environnementales

Lorsque les ondes sonores se propagent dans des eaux peu profondes, elles interagissent non seulement avec le fond marin, mais aussi avec la surface de la mer. Une surface de mer parfaitement calme favorise la réflexion des ondes sonores (l'énergie est facilement transmise) alors qu'au contraire une surface rugueuse (en fonction des conditions météorologiques locales) peut disperser les réflexions et conduire à des atténuations. Il est toutefois important de noter que les pertes acoustiques dues à la surface sont moins importantes que les interactions avec le fond marin.

L'état de mer 0 a été considéré puisqu'il favorise les conditions de propagation sonore dans la zone d'étude.

4.2.2.5 Signature sonore de la source

L'une des données les plus importantes pour obtenir une modélisation de propagation du bruit la plus précise est la signature de la source sonore (niveaux et spectre fréquentiel). C'est pourquoi il est important d'obtenir les spécifications du projet, par exemple l'équipement et les méthodes, car de petites variations peuvent conduire à des résultats sensiblement différents. Trois approches courantes sont généralement utilisées pour établir un spectre sonore de la source :

- Utilisation de mesures in situ pour rétrocalculer le niveau de la source sonore
- Utilisation de mesures provenant d'études antérieures
- Utilisation d'une source de bruit physique ou numérique

Ainsi, le spectre (Figure 4) et les niveaux considérés @1m pour les modélisations sont :

- **Niveau L_p non pondéré de 190 dB re 1 μPa** (correspondant au niveau maximum d'un forage [MTES,2020](#))
- **Niveau LE_p non pondéré de 233 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2.s$** (durée de 6h en continu sur une journée « type » de travail) voir 4.2.4.

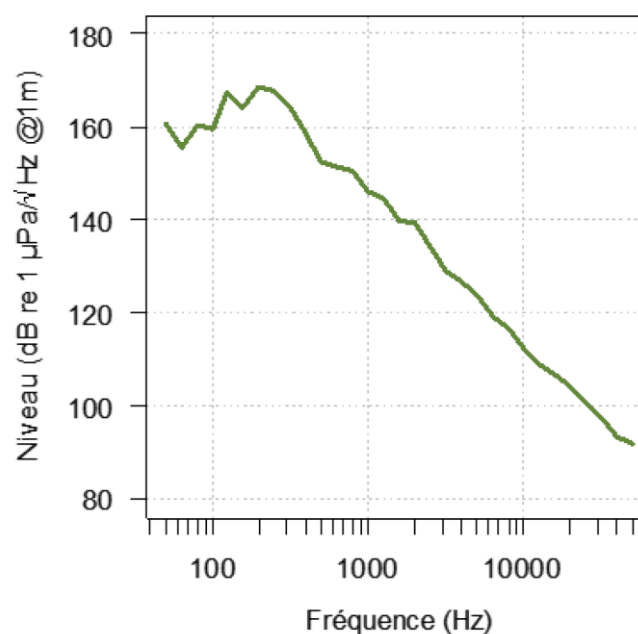


FIGURE 4 : SPECTRE ACOUSTIQUE DE LA SOURCE SONORE ([MTES, 2020](#))

4.2.2.6 Algorithmes de propagation sonore

De nombreux algorithmes de propagation ont été développés, car aucun modèle de propagation unique n'est applicable à tous les environnements acoustiques et à toutes les gammes de fréquences. Ces modèles sont basés sur des méthodes mathématiques telles que la théorie des rayons, les modes normaux, l'expansion par trajets multiples, l'intégration du nombre d'onde ou l'équation parabolique (Porter, 1992 ; Collins, 1993 ; Porter et Liu, 1994 ; Etter, 2009, 2013 ; Jensen et al., 2011).

L'identification du bon modèle de perte de propagation du son (Figure 5) est l'un des paramètres les plus importants qui permet de réduire les incertitudes lors de la modélisation des ondes sonores. En fonction des fréquences, de la profondeur de l'eau, de la portée et des conditions environnementales, des algorithmes combinés sont couramment utilisés à des fins pratiques, en particulier lorsque la bathymétrie est hétérogène.

Cependant, cette stratégie suppose que la portée d'utilisation des algorithmes de propagation choisis et en particulier la fréquence de croisement entre les deux algorithmes soit bien établie au préalable. Cette fréquence doit évoluer en fonction de la bathymétrie et suppose donc des ajustements dynamiques complexes.

Applicability of the most common propagation models according to water depth, acoustic frequency, and range dependence (RI = range independent; RD = range dependent). Black cells indicate modelling approach is applicable and computationally efficient; grey cells indicate limitations in accuracy or computational efficiency; white cells indicate that the modelling approach is neither applicable nor practicable. Adapted from Etter (2009).

Model approach	Example algorithm	Applications							
		Shallow water				Deep water			
		Low frequency		High frequency		Low frequency		High frequency	
		RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray	BELLHOP (Porter and Liu, 1994)								
Normal mode	KRAKEN (Porter, 1992)								
Parabolic equation	RAM (Collins, 1993)								

FIGURE 5. APPLICABILITE DES ALGORITHMES DE PROPAGATION (FARCAS ET AL., 2016)

Dans le cadre de cette étude, la hauteur d'eau présente dans la zone d'étude est inférieure à 50 m, le type de source sonore est un forage dont la bande de fréquence est comprise entre 20 Hz et 10 kHz présentant un maximum d'énergie entre 100 et 400 Hz et la nature du fond considérée est assimilée graviers, vaseuse, argileuse puis rocheuse.

Le modèle de propagation choisi est le modèle KRAKEN (mode normal). Ce modèle est un modèle de propagation en 2D permettant pour un transect donné et à une fréquence précise d'estimer le champ de propagation dans l'ensemble de la colonne d'eau pour différentes distances à la source.

Pour chaque champ de propagation, les pertes de propagation sont estimées en considérant la perte minimale observée dans la colonne d'eau à une distance donnée. **Il est plus approprié pour les basses et hautes fréquences et les bas-fonds en pente douce vers le plateau océanique** (Farcas et al., 2016).

Les paramètres utilisés pour le modèle sont :

- Une résolution selon d'axe de la distance : 50 m
- Une résolution selon l'axe de la profondeur : 1 m
- Une distance maximale de propagation correspondant à la zone d'étude acoustique (15 x 15 km)

Afin d'établir des cartes associées à la propagation du son dans l'ensemble de la zone, les pertes de propagation sont estimées pour différentes fréquences et différents transects en considérant les caractéristiques qui suivent :

- Une estimation des pertes pour les fréquences comprises entre 20 Hz et 10 kHz
- Une décomposition linéairement répartie entre 0 et 360° autour de la source, en 360 transects appelés « slices » présentant ainsi une résolution angulaire de 1°

4.2.3 Synthèse des données d'entrée

La synthèse des données d'entrée compilées pour établissement du scénario de propagation le plus représentatif est présentée dans le tableau ci-dessous :

TABEAU 4. DONNEES D'ENTREE DU SCENARIO DE PROPAGATION ET LEURS SOURCES

Type de données	Format	Source	Donnée d'entrée	Description
Bathymétrie	Carte raster	Données SHOM projet HOMONIM	Figure 2	Nécessaire à la modélisation de la propagation des ondes sonores.
Nature du fond	Carte raster	SHOM	Figure 3	Nécessaire pour évaluer les propriétés de réflexion/absorption des ondes sonores
Bathycélérimétrie	Données	SURVAL + rapports		Nécessaire pour le calcul des pertes acoustiques en fonction de la distance à la source
Température	Données	SURVAL + rapports		
Salinité	Données	SURVAL + rapports		
Descriptif des ateliers du chantier	Données sur les opérations : types d'engin, planning des opérations, positions des ateliers	EGIS	Fiches techniques, Durée journalière de forage, etc	Descriptif et durée des ateliers du chantier
Données sur le forage	Inconnues	Bibliographie	Figure 4*	Niveaux et spectres

Type de données	Format	Source	Donnée d'entrée	Description
Mesures de mitigation	Inconnues			Niveaux et spectres
Conditions météorologiques et océaniques	Fixées		État de mer 0	Permet d'intégrer la géophonie au bruit ambiant
Période des travaux	Inconnue			Permet d'intégrer le marnage et les marées
Durée des travaux	Inconnue		6 heures*	Nécessaire pour le calcul de l'exposition sonore
Modèle de perte par propagation	Équation	Farcas et al., 2016	Figure 5	Nécessaire pour le calcul des pertes acoustiques en fonction de la distance à la source
Audiogramme des espèces à enjeux	Courbe niveau/fréquence	Southall et al., 2019	Bibliographie	Permet de prendre en compte la capacité auditive de chaque espèce afin d'évaluer le niveau de bruit effectivement perçu
Seuils de risque de perte d'audition	Niveaux en dB pondérés	Southall et al., 2019	Bibliographie	Permet de définir des périmètres associés aux risques de dommages physiologiques

* Données présumées

4.2.4 Stratégies de modélisation

Deux stratégies de modélisation ont été réalisées :

- Modélisation de propagation du niveau L_p : permet de modéliser la propagation des ondes sur la zone d'étude (niveaux reçus) sans prendre en compte la durée ni les groupes d'audition auxquels les espèces sont rattachées
- Modélisation de propagation du niveau LE_p pour 6h de battage : permet de modéliser l'exposition sonore sur une durée estimée, en continu, sur une journée « type » de travail (niveaux d'exposition)

La seconde stratégie a été menée sur base des critères de la NOAA (Southall et al, 2019) et NMFS, 2018, consistant à étudier l'exposition sonore LE_p sur 24h pour les groupes d'audition. Cette seconde stratégie permet d'indiquer les distances d'impact (pondérée aux groupes d'audition) en fonction d'une durée prévisionnelle maximum d'exposition au chantier de forage (niveaux réellement perçus par les espèces).

4.3 Évaluation de l'impact sonore

Les mammifères marins et les tortues sont regroupés par groupe d'audition pour lesquels des seuils de tolérance au bruit ont été définis. Ces seuils sont décrits dans la littérature scientifique par [Southall et al., 2019](#) pour les mammifères marins et [Popper et al., 2014](#) pour les poissons et les tortues de mer. Ils constituent à ce jour la référence en matière d'évaluation de l'impact du bruit sur ces espèces cibles et correspondent aux recommandations du MTES.

Ces seuils ont donc été utilisés afin de modéliser l'effet attendu du forage sur chaque groupe d'audition, en fonction de leur capacité auditive. **Pour chaque groupe d'audition, une carte pondérée a donc été réalisée, représentant les périmètres à l'intérieur desquels les espèces du groupe d'audition considéré sont susceptibles de subir une perte d'audition** temporaire (TTS pour Temporary Threshold Shift) ou permanente (PTS pour Permanent Threshold Shift).

On appelle carte pondérée, une carte de propagation sonore qui tient compte de la perception et de la sensibilité acoustique d'un groupe d'audition. En effet le niveau reçu par l'animal est différent de celui qui sera effectivement perçu (pondéré) par celui-ci (Figure 6).

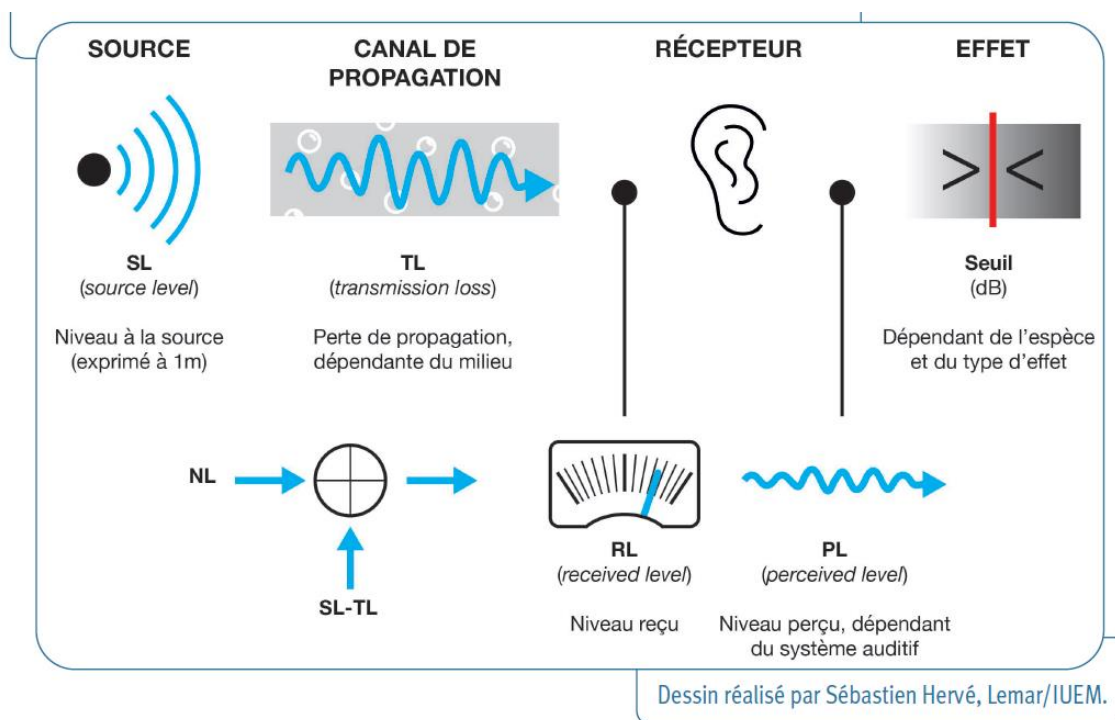


FIGURE 6. DIFFERENCE ENTRE LES BRUITS EMIS, REÇU ET PERÇU.

Cette méthode d'évaluation se base uniquement sur le risque de dommage physiologique encouru.

Elle ne prend pas en compte les éventuelles réactions comportementales (fuite, plongée, arrêt des activités, panique, etc.) qui pourraient être liées aux émissions sonores. Des seuils de bruit susceptibles d'engendrer des réactions comportementales ont déjà été proposés dans la littérature ([NMFS, 1995](#) ; [Nedwell et al., 2007](#) ; [David, 2011](#) par exemple), mais ces seuils sont fortement remis en question aujourd'hui ([Southall et al., 2021](#)). Il est en effet très difficile de relier une réaction comportementale à une cause en particulier et une forte variabilité interindividuelle existe ([Nowacek et al., 2007](#)). À l'inverse, les pertes d'audition consécutives à une exposition au bruit ont fait l'objet de mesures directes sur plusieurs espèces et les seuils disponibles aujourd'hui dans la littérature font consensus au sein de la communauté scientifique.

4.3.1 L'audition chez les mammifères marins

En milieu marin, où la visibilité est souvent réduite à quelques mètres, l'audition est un sens particulièrement important pour les organismes vivants. Ceux-ci ont développé des adaptations physiologiques leur permettant de percevoir les ondes acoustiques. Ces adaptations diffèrent sensiblement selon les espèces.

Les mammifères marins utilisent le son pour se nourrir, se reproduire, communiquer et s'orienter. Leur audition est donc particulièrement bien développée et adaptée au milieu marin. **Dans l'eau, les mammifères marins sont capables de percevoir les sons sur une très large plage de fréquences allant de 10 Hz à 200 kHz. Cependant, tous les mammifères marins n'ont pas la même sensibilité auditive et sont répartis en six « groupes d'audition »** notés HG (Hearing Group - Southall et al., 2019 - Figure 7) :

- Les Cétacés basse fréquence (LF) qui comprennent notamment les baleines à fanons (ou mysticètes) perçoivent les sons entre 10 Hz à 30 kHz avec une sensibilité maximale entre 1000 et 8000 Hz. Dans cette plage de sensibilité maximale, leur seuil d'audition est d'environ 60 dB re 1 μ Pa.
- Les Cétacés haute fréquence (HF) qui regroupent la plupart des delphinidés (dauphins, globicéphales et orques), les ziphiidés (baleines à bec), les monodontidés (béluga et narval) et le grand cachalot. Ces espèces perçoivent les sons entre 100 Hz et 180 kHz avec une sensibilité maximale entre 10 et 100 kHz. À l'intérieur de cette plage de sensibilité maximale, leur seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1 μ Pa.
- Les Cétacés très haute fréquence (VHF), qui incluent les phocénidés (marsouins), quelques petits delphinidés, les dauphins d'eau douce et les kogiidés (cachalots nain et pygmée). Comme les Cétacés haute fréquence, ils sont capables de percevoir les sons de 100 Hz à 180 kHz, mais ils sont plus sensibles aux très hautes fréquences, avec des seuils d'audition minimum inférieurs à 50 dB re 1 μ Pa autour de 100 kHz.
- Les Siréniens (SI) qui comprennent les lamantins et dugongs perçoivent les sons entre 250 Hz et 60 kHz avec une sensibilité maximale entre 10 et 20 kHz. Dans cette plage plus restreinte, leur seuil d'audition maximale se situe autour de 60 dB re 1 μ Pa.
- Les Phocidés (PCW), qui comprennent les phoques et les éléphants de mer. Ces espèces, dépourvues d'oreille externe, sont capables de percevoir les sons aussi bien sous l'eau que dans l'air. Dans l'eau, elles perçoivent les sons entre 100 Hz et 100 kHz. Leur seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1 μ Pa dans leur plage de sensibilité maximale, comprise entre 2 et 30 kHz.
- Les autres carnivores (OCW), qui regroupent les otaries, les lions de mer, le morse, les loutres et l'ours polaire. Contrairement aux phocidés, ces espèces possèdent une oreille externe (à l'exception du morse) et leur seuil d'audition est plus élevé (environ 70 dB re 1 μ Pa au minimum). Dans l'eau, elles perçoivent les sons entre 100 Hz et 60 kHz et leur sensibilité maximale se situe autour de 10 kHz.

TABEAU 5 : GROUPE D'AUDITION DES CETACES (SOUTHALL ET AL., 2019).

Groupe d'audition	Plage d'audition	Sensibilité maximale
Cétacés basse fréquence (LF)	10 Hz - 30 kHz	~60 dB re 1 μ Pa entre 1 et 8 kHz
Cétacés haute fréquence (HF)	100 Hz - 180 kHz	~60 dB re 1 μ Pa entre 10 et 100 kHz
Cétacés très haute fréquence (VHF)	100 Hz - 180 kHz	< 50 dB re 1 μ Pa à 100 kHz

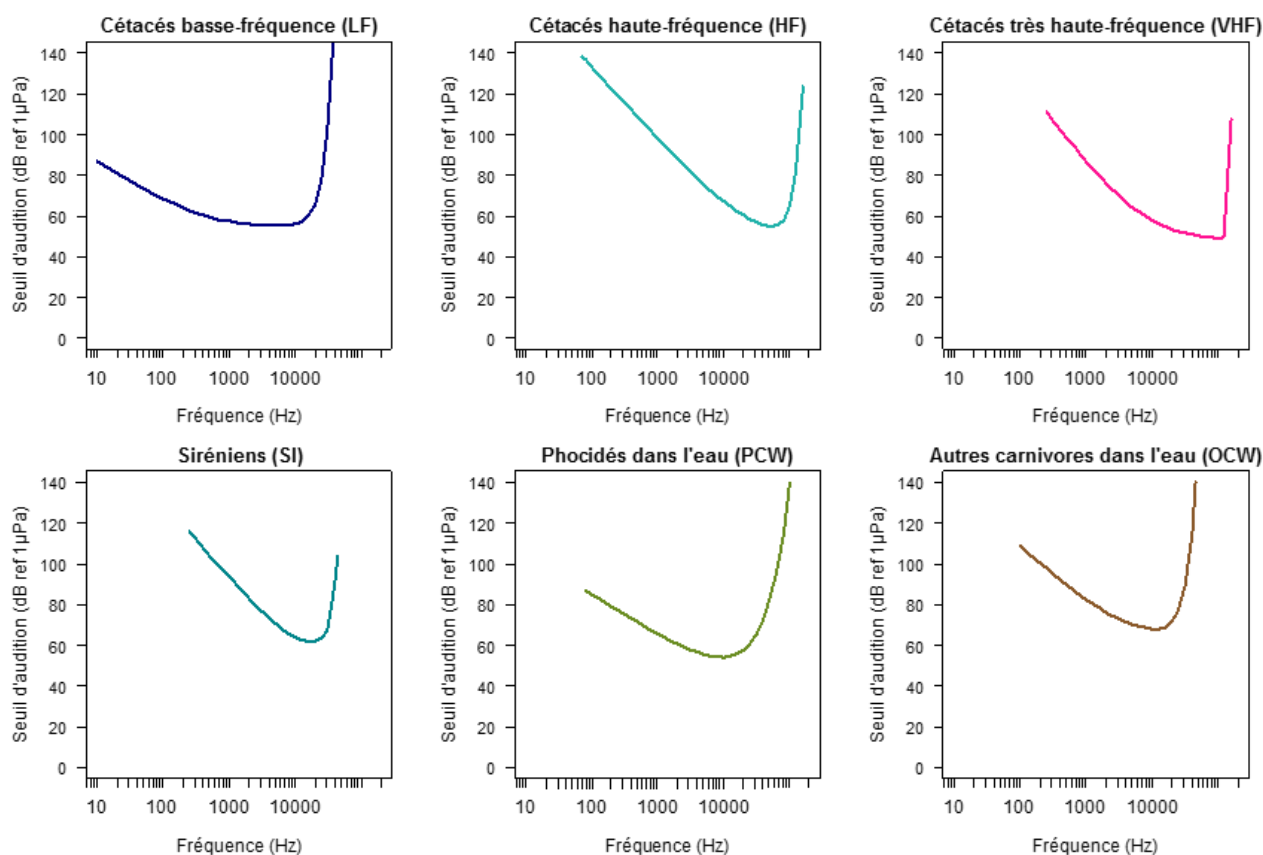


FIGURE 7 : AUDIOGRAMMES MEDIANS DES DIFFERENTS GROUPES DE MAMMIFERES MARINS (SOUTHALL ET AL., 2019).

4.3.2 Seuils de tolérance au bruit pour les mammifères marins

Pour chaque groupe d'audition précédemment cité, des seuils de tolérance au bruit ont été définis en 2007 (Southall et al., 2007) et ont récemment été mis à jour (NMFS, 2018 ; Southall et al., 2019).

Ces seuils intègrent les dernières connaissances scientifiques en matière de bioacoustique et sont considérés aujourd'hui comme les plus robustes pour évaluer l'effet du bruit sur les mammifères marins. Ce sont donc ces seuils qui ont été retenus dans la présente étude.

Ces seuils permettent d'établir à partir de quel niveau de bruit un mammifère marin, en fonction de sa sensibilité auditive, est susceptible de subir une perte d'audition temporaire (TTS) ou permanente (PTS). Ils sont déclinés selon le type de bruit considéré : impulsionnel ou continu.

Dans le cadre de notre étude, ce sont les seuils d'exposition au bruit continu qui ont été considérés.

En effet, dans le cas d'une exposition à un son continu, il est important de prendre en compte la durée d'émission de ce son. De ce fait, les indicateurs TTS et PTS pour un son continu sont exprimés en $LE_{p,24}$ h cumulé sur 24 heures.

Ces indicateurs sont pondérés (leurs calculs intègrent la fonction de pondération du groupe d'espèces considéré) afin de prendre en compte la sensibilité auditive de chaque groupe d'audition chez les mammifères marins (Tableau 6).

Les indicateurs TTS et PTS définis pour les sons de nature impulsionnelle sont exprimés en $LE_{p,HG,24h}$ pondérés, mais également en $L_{p,pk}$ non pondéré, ce qui correspond au niveau de bruit reçu par l'animal, indépendamment de sa capacité auditive.

TABEAU 6 : SEUILS DE PERTE TEMPORAIRE (TTS) ET PERMANENTE (PTS) D'AUDITION POUR CHAQUE GROUPE DE MAMMIFERES MARINS EXPOSES A UN BRUIT CONTINU. (SOUTHALL ET AL., 2019).

Son continu	TTS	PTS
	LE,p,24h (Pondéré)	LE,p,24h (Pondéré)
Cétacés basse fréquence (LF)	179	199
Cétacés haute fréquence (HF)	178	198
Cétacés très haute fréquence (VHF)	153	173

Les niveaux d'exposition sonore cumulés sur 24 heures (LE,p,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$

4.3.3 L'audition chez les tortues de mer

Les tortues marines possèdent un système auditif développé, comprenant une oreille moyenne (avec un tympan) et une oreille interne. L'oreille moyenne conduit le son via la columelle (petit os équivalent à l'étrier chez les mammifères), tandis que l'oreille interne le réceptionne et détecte la position et l'accélération.

Même si son fonctionnement est encore mal connu, les études suggèrent que l'appareil auditif des tortues marines est adapté à la détection des sons aériens et sous-marins.

Le tympan est renforcé par une épaisse couche de graisse, ce qui est propre aux reptiles aquatiques. Les tortues marines sont capables de capter les stimuli acoustiques, mais également les vibrations via le squelette (os de la tête et colonne vertébrale notamment) et la carapace de l'animal qui joueraient le rôle de récepteurs des ondes sonores à terre comme en mer.

Cependant, ce processus de perception des vibrations n'est pas encore très bien connu. La présence d'une oreille moyenne (cavité remplie d'air) suggère que les tortues marines sont également capables de percevoir les variations de pression.

Les tortues marines seraient capables de percevoir des sons sous-marins basse fréquence, entre 30 et 2 000 Hz, avec une sensibilité maximale située entre 200 et 600 Hz (Figure 8), cette sensibilité maximale étant toutefois variable d'une espèce à l'autre, et d'un individu à l'autre, notamment en fonction de son âge. L'appareil auditif des tortues marines est également impliqué dans les déplacements et l'équilibre.

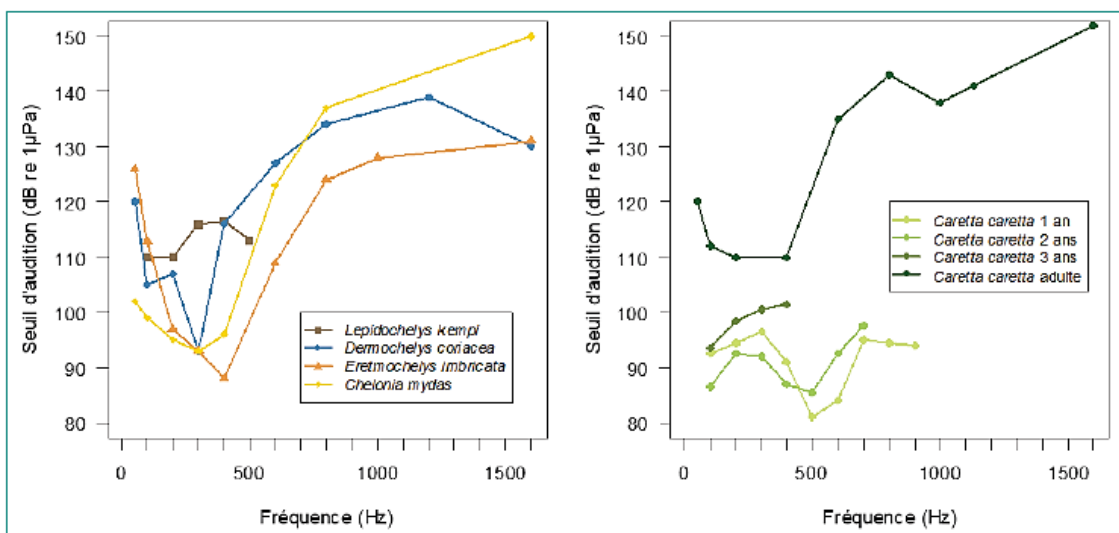


FIGURE 8 : À GAUCHE, AUDIOGRAMMES DE QUATRE ESPECES DE TORTUES MARINES. À DROITE, AUDIOGRAMME DE LA TORTUE CAOUANNE (*CARETTA CARETTA*) A DIFFERENTS STADES DU CYCLE DE VIE (KETTEN & BARTOL, 2006, PINIAK ET AL, 2012 ET 2016).

4.3.4 Seuils de tolérance au bruit pour les tortues de mer

Pour les poissons et tortues marines, des seuils de tolérance au bruit ont été définis en 2014 (Popper et al., 2014). Ces seuils intègrent les dernières connaissances scientifiques en matière de bioacoustique et sont considérés aujourd'hui comme les plus robustes pour évaluer l'effet du bruit sur les tortues de mer.

Les indicateurs PTS définis pour les sons de nature impulsionnelle sont exprimés en LE_pHG_{24h} pondéré, mais également en L_pk non pondéré, ce qui correspond au niveau de bruit reçu par l'animal, indépendamment de sa capacité auditive.

Ces seuils permettent d'établir à partir de quel niveau de bruit une tortue de mer est susceptible de subir une perte d'audition permanente (PTS impulsionnel) (les seuils TTS impulsionnels et les seuils pour les sons continus sont indisponibles par manque de connaissances scientifiques).

Les travaux de Mannes et al., 2023 propose une approche qui consiste à déterminer le seuil TTS à partir d'une exposition à des niveaux dans l'air puis converti à l'eau (re 1 µPa). Ces travaux déterminent un seuil TTS sur 24h à 160 dB re 1 µPa².s pour la tortue de Floride avec une récupération des facultés sous 3 à 5 heures. **Les travaux concluent qu'une exposition sonore sous-marine à long terme à de tels niveaux provoquerait probablement des dommages physiologiques temporaires chez les tortues.**

4.3.5 Cartes de bruit et distances d'impact

Les cartes de bruit sous-marin issues des modélisations de propagation sont présentées ci-dessous. Les distances d'impact maximum ont été calculé et correspondent à la distance maximale atteinte par le seuil TTS ou PTS dans la zone du projet.

4.3.5.1 Modélisation Lp non pondérée

La **modélisation Lp non pondérée de l'atelier de forage** (Figure 9) **correspond aux niveaux propagés (reçus)** pour un niveau source de 190 dB re 1 μ Pa. Cette modélisation permet de quantifier la propagation de niveaux sonores de l'atelier de forage sur la zone d'étude sans considération de durée.

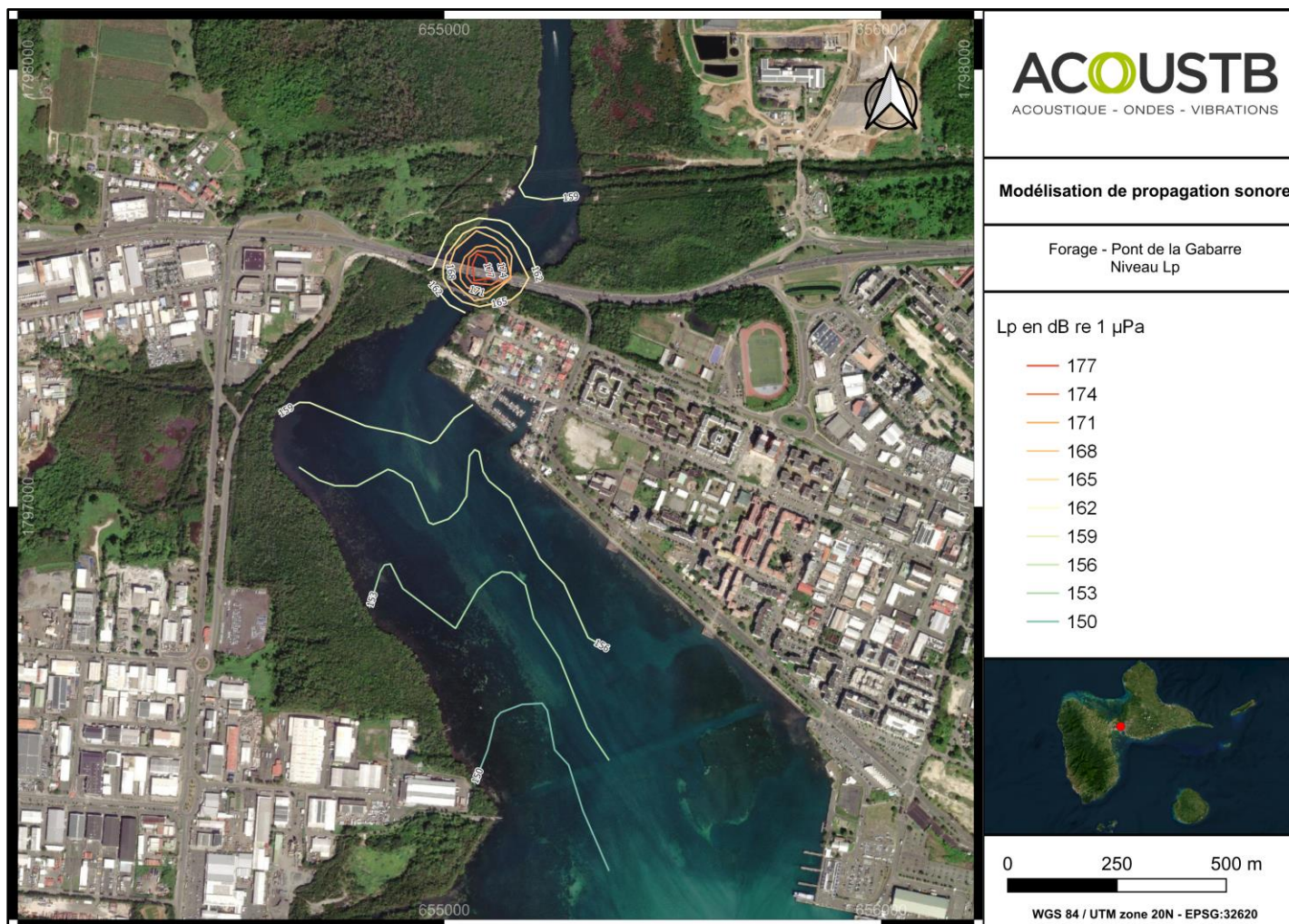


FIGURE 9 : PROPAGATION SONORE DU NIVEAU LP DE L'ATELIER DE FORAGE

4.3.5.2 Modélisation LE,p,24h non pondérée pour 6h de forage

La modélisation LE,p,24h non pondérée de l'atelier de forage (Figure 10) correspond aux niveaux propagés (reçus) pour un niveau source de 233 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ correspondant à une exposition de 6h de forage (définie comme journée « type » plus haut). Cette modélisation permet de quantifier la propagation de niveaux sonores de l'atelier de forage sur la zone d'étude avec considération de la durée.

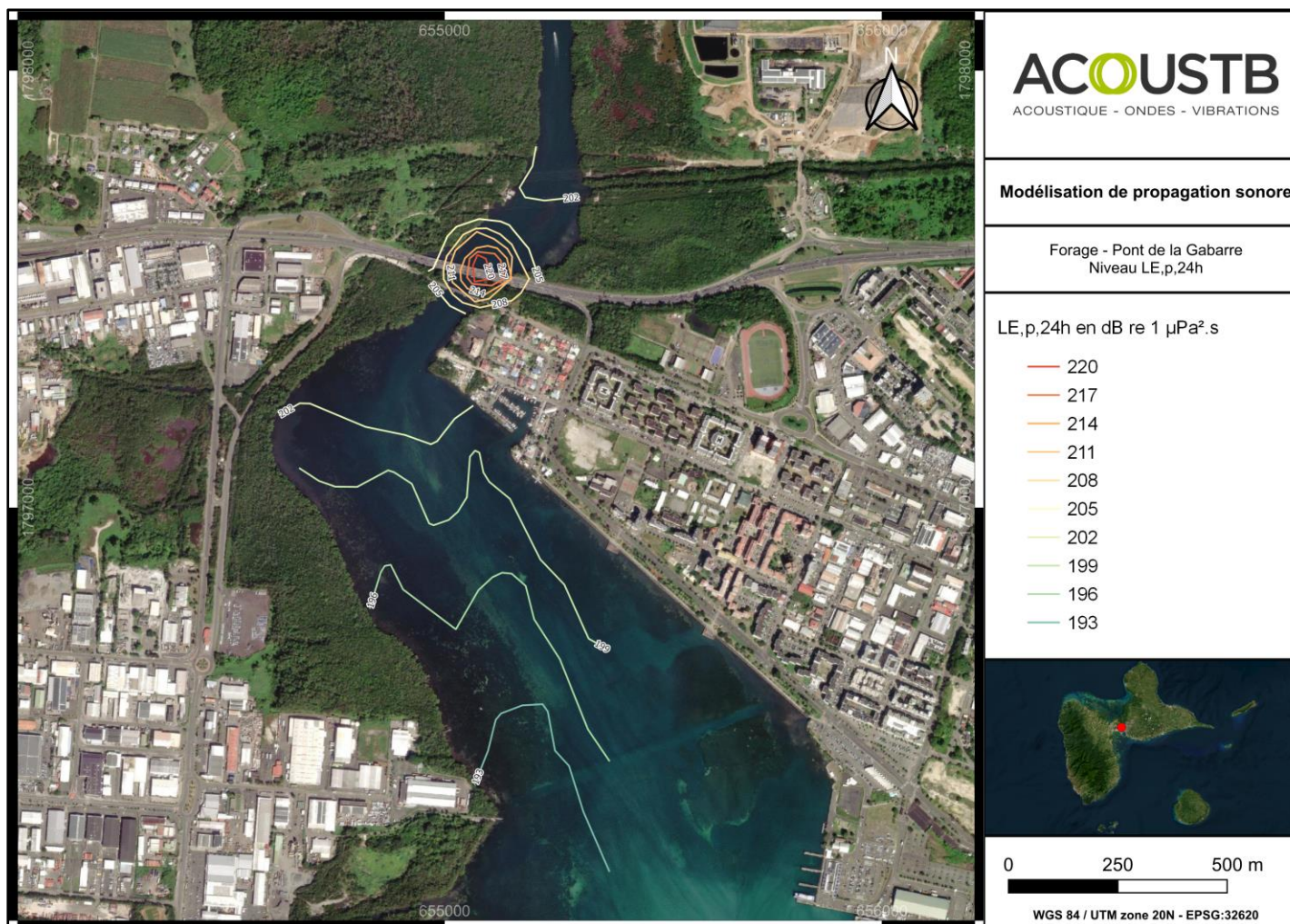


FIGURE 10 : PROPAGATION SONORE DU NIVEAU LE,P,24H (POUR 6H DE FORAGE)

4.3.5.3 Modélisation LE,p,HG,24h pondérée pour 6h de forage aux groupes d'audition

Les modélisations LE,p,LF,24h et LE,p,HF,24h pondérées de l'atelier de forage (Figure 11 et Figure 12) correspondent aux niveaux propagés (perçus) correspondant à une exposition de 6h de forage (définie comme journée « type » plus haut). Cette modélisation permet de quantifier la propagation de niveaux sonores de l'atelier de forage sur la zone d'étude avec considération de la durée et de l'espèce qui perçoit le son

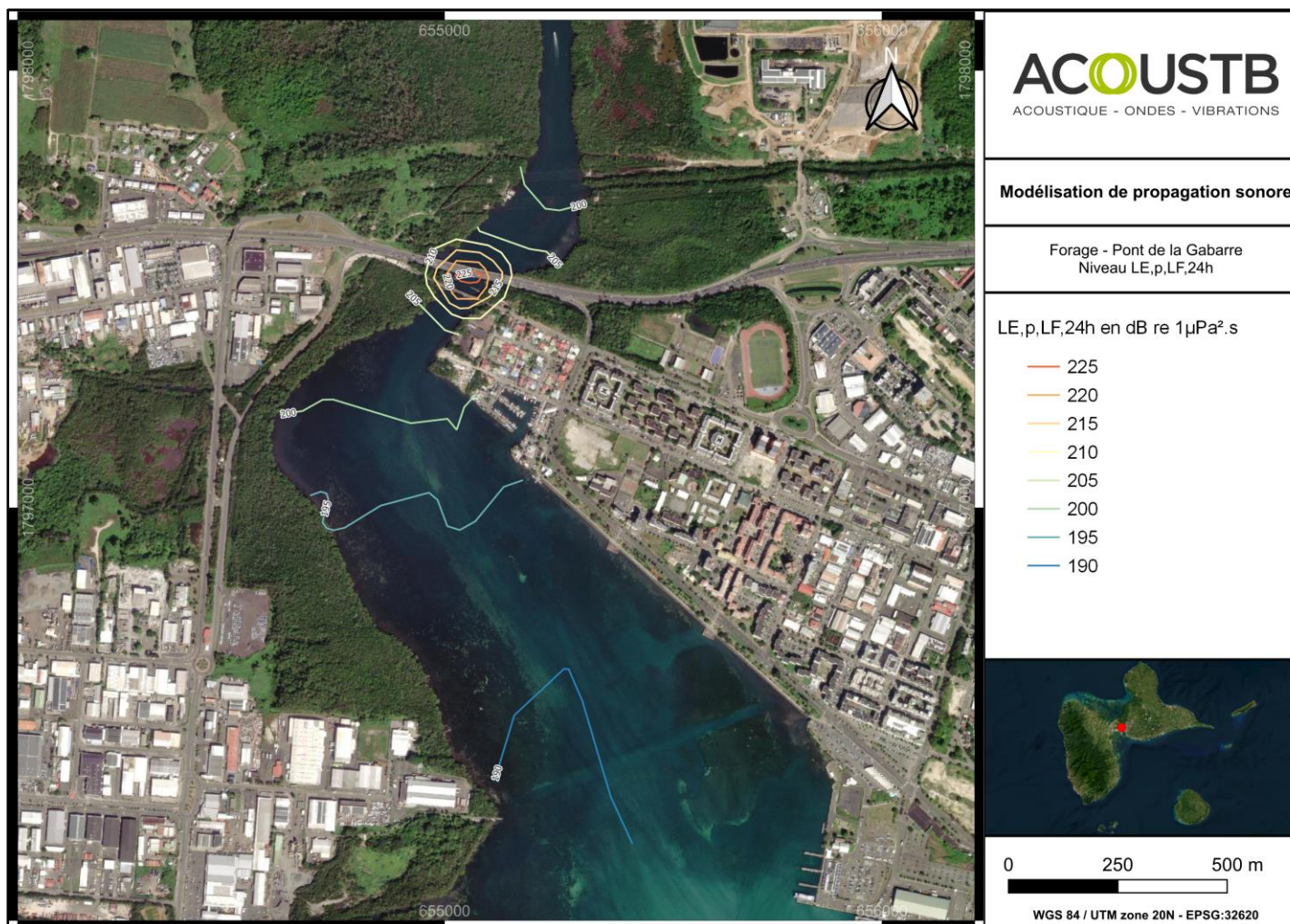


FIGURE 11 : PROPAGATION SONORE DU NIVEAU LE,P,LF,24H (POUR 6H DE FORAGE POUR LES MAMMIFERES MARINS LF)

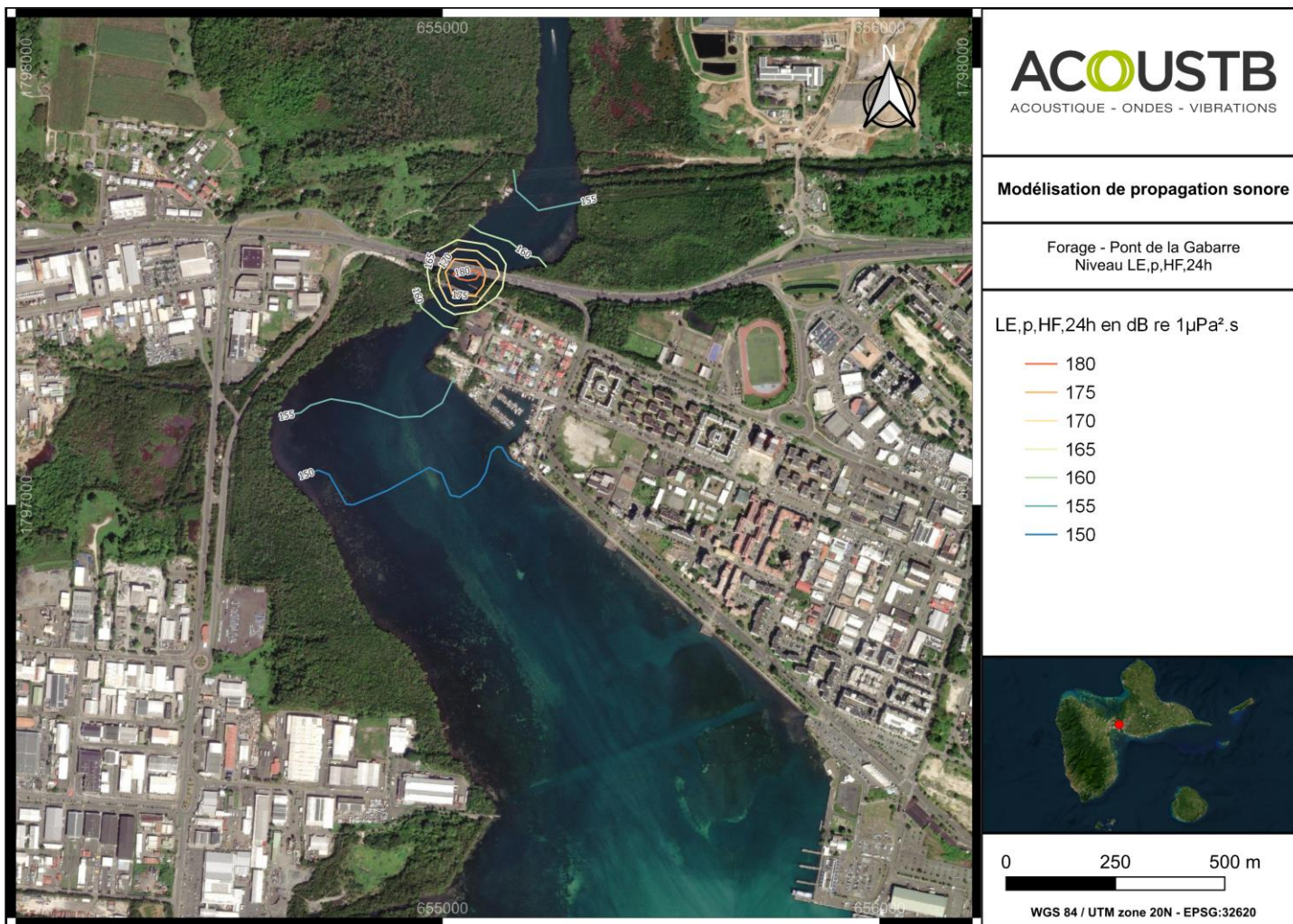


FIGURE 12 : PROPAGATION SONORE DU NIVEAU LE,P,HF,24H (POUR 6H DE FORAGE POUR LES MAMMIFERES MARINS HF)

Les distances d'impact associées aux modélisations pour les mammifères LF et HF sont les suivantes :

TABLEAU 7. SEUILS TTS ET PTS ET DISTANCES MAXIMALES D'IMPACT ASSOCIEES

Son continu	LE,p,24h (pondéré)*			
	TTS		PTS	
	Seuil	Distance max	Seuil	Distance max
Cétacés basse fréquence (LF)	179 dB	> 1,5 km	199 dB	< 500 m
Cétacés haute fréquence (HF)	178 dB	< 50 m	198 dB	Non atteint

* en dB re 1 µPa².s

La distance d'impact associées aux modélisations pour les tortues de mer (basée sur les travaux de Mannes et al., 2023) est la suivante :

TABLEAU 8. SEUIL TTS ET DISTANCE MAXIMALE D'IMPACT ASSOCIEE

Son continu	LE,p,24h (non pondéré)*	
	TTS	
	Seuil	Distance max
Tortues de mer	160 dB	> 1,5 km

* en dB re 1 µPa².s

Attention, les travaux de Mannes et al., 2023 ont été réalisés sur des tortues de Floride exposées à des niveaux dans l'air, le seuil TTS a été ensuite dérivé pour une exposition dans l'eau.

Les distances d'impact présentées ci-dessus n'incluent pas le bruit ambiant de la zone (proximité du GPMG notamment).

5 CONCLUSION

La synthèse bibliographique, les données disponibles collectées et manquantes, les modélisations et les distances d'impact associées permettent de conclure certains points avec des limites techniques essentielles qu'il conviendra de compléter.

- La probabilité de présence de mammifères marins dans la zone stricte du projet semble très faible, voire nulle pour les plus grandes espèces (mysticètes, grands plongeurs, grands odontocètes)
- La probabilité de présence de tortues de mer dans la zone stricte du projet semble faible
- **Il existe une incertitude non négligeable sur les signatures sonores des ateliers prévus (niveaux et fréquences) par manque de données bibliographiques**
- Les émissions sonores attendues pour l'atelier de fonçage ou vérinage par pression continue ne devraient pas être impactantes au regard des données à disposition transmises
- Seuls les tortues de mer et les cétacés LF sont sensibles aux émissions « probables » de l'atelier de forage
- La très faible bathymétrie permet de réduire la propagation des ondes sonores dans la zone

Les modélisations ont été réalisées sur base d'un atelier de forage « maximal », sans mitigation, avec une durée de 6h de travail par jour pour les cétacés LF et HF :

- La modélisation pour les tortues de mer n'est pas possible par manque de données bibliographiques (seuils pour les sources de bruit continu) mais une évaluation a été réalisée (**avec limites**)
- Les distances d'impact pour les cétacés LF sont < 500 m pour le PTS mais > 1,5 km pour le TTS
- Les distances d'impact pour les cétacés HF sont < 50 m pour le PTS et non atteint pour le TTS
- La distance d'impact pour les tortues de mer est > 1,5 km pour le TTS (**avec limites**)

Au regard de ces éléments, des mesures ERCA (Eviter, Réduire, Compenser, Accompagner) sont proposées ci-dessous :

- **Adapter le phasage des ateliers** à la saisonnalité des espèces migratrices LF comme les Baleines à bosse et de pontes des Tortues de mer.
- **Réaliser des mesures « de convenance » sur les ateliers planifiés** ou au moins sur l'atelier de forage. Celles-ci permettraient de connaître plus en détail le spectre sonore et de rectifier/ajuster les modélisations de propagation. Ces mesures pourraient être réalisées au démarrage des opérations.
- Si impact avéré il y a, **maintenir un principe de précaution en appliquant des protocoles dédiés** : pré-watch (observation pré travaux), soft start (montée en puissance de l'atelier), work stoppage (arrêt en cas d'observation) et des mesures de mitigation sonore (rideau de bulles par exemple).

6 BIBLIOGRAPHIE

- Collins, M.D., 1993. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1736–1742. <http://dx.doi.org/10.1121/1.406739>
- David, A., 2011. Underwater environmental impact assessments on marine mammals and fish by high power anthropogenic radiated sound. *Proceedings of Acoustics 2011, The 2011 Conference of the Australian Acoustical Society, Gold Coast.*
- Erbe, C., & McPherson, C. (2017). Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3), EL281-EL285.
- Etter, P.C., 2009. Review of ocean-acoustic models. *Proc. IEEE Oceans 2009.*
- Etter, P.C., 2013. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. CRC Press, FL <http://dx.doi.org/10.1201/b13906>
- Farcas, A., Thompson, P. M., & Merchant, N. D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>
- Hamilton, E.L., 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments. *Geophysics* 37, 620–646. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440287>
- Hamilton, E.L., 1976. Sound attenuation as a function of depth in the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* 59, 528–535. <http://dx.doi.org/10.1121/1.380910>
- Hamilton, E.L., 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* 68, 1313–1340. <http://dx.doi.org/10.1121/1.385100>
- Hamilton, E.L., 1987. Acoustic properties of sediments. *Acoust. Ocean Bottom* 3–58.
- Hamilton, E.L., Bachman, R.T., 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1891–1904. <http://dx.doi.org/10.1121/1.388539>
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). *“Computational ocean acoustics”*, Springer Science & Business Media
- Ketten, D. R. & Bartol, S. M., 2006. Functional Measures of Sea Turtle Hearing. Woods Hole Oceanographic Institution, ONR Award No: N00014-02-1-0510, Report No: 13051000, 6 p.
- Kyhn, L. A., Sveegaard, S., & Tougaard, J. (2014). Underwater noise emissions from a drillship in the Arctic. *Marine Pollution Bulletin*, 86(1-2), 424-433.
- Mannes, L. M., Wahlberg, M., & Christensen-Dalsgaard, J. (2023). Temporary threshold shift in turtles. In *The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations* (pp. 1-8). Cham: Springer International Publishing.
- MTES, 2020. Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d’origine anthropique sur la faune marine. 209 p.
- Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W. H., Lovell, J., Parvin, S. J., Workman, R., Spinks, J. A. L. & Howell, D., 2007. A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise. Subacoustech Ltd., Subacoustech Report No. 534R1231, 74 p.
- NMFS, 1995. Small Takes of Marine Mammals Incidental to Specified Activities; Offshore Seismic Activities in Southern California. *Federal Register* 60 (200), 53753-53760.
- National Marine Fisheries Service. 2018. 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of

Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W. & Tyack, P. L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* 37 (2), 81-115.

Piniak, W. E. D., Mann, D. A., Eckert, S. A., & Harms, C. A. (2012). Amphibious hearing in sea turtles. In *The effects of noise on aquatic life* (pp. 83-87). Springer New York.

Piniak, W. E., Mann, D. A., Harms, C. A., Jones, T. T., & Eckert, S. A. (2016). Hearing in the juvenile green sea turtle (*Chelonia mydas*): a comparison of underwater and aerial hearing using auditory evoked potentials. *PLoS One*, 11(10), e0159711.

Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., & Tavalga, W. N. (2014). Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. In Springer (Issue May). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>

Porter, M.B., 1992. The KRAKEN Normal Mode Program. Tech. Rep. NRL/MR/5120-92- 6920. Naval Research Laboratory, Washington, DC.

Porter, M.B., Liu, Y.-C., 1994. Finite-element ray tracing. *Theor. Comput. Acoust.* 2, 947-956.

Shom, 2018. MNT bathymétrique de façade de la Guadeloupe et de la Martinique (Projet Homonim). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ANTIS100m_HOMONIM_WGS84

Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P. & Tyack, P. L., 2019. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals* 45(2), 125-232.

Southall, B. L., Nowacek, D. P., Bowles, A. E., Senigaglia, V., Bejder, L., & Tyack, P. L. (2021). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Assessing the Severity of Marine Mammal Behavioral Responses to Human Noise. *Aquatic Mammals*, 47(5), 421-464. <https://doi.org/10.1578/am.47.5.2021.421>

Wyneken, J., Lohmann, K. J., & Musick, J. A. (2014). The biology of sea turtles: volume III. *Marine Turtle Newsletter*, 141, 18-19.

egis

www.egis-group.com

