

RAPPORT

Projet d'aménagement et de modernisation des infrastructures portuaires et du terre-plein central des ports de Pornichet

Etude d'impact en acoustique sous-marine des travaux d'aménagement

Avril 2026

CHARIER



CHARIER
**PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHE**

CLIENT : CHARIER

COORDONNÉES	2 bis rue des Meuniers 44220 COUËRON
INTERLOCUTEUR	Milig COLLOBERT

CREOCEAN

COORDONNÉES	Zone Technocéan – Chef de Baie – Rue Charles Tellier 17000 LA ROCHELLE Tél. : 05 46 41 13 13 - Fax : 05 46 50 51 02 E-mail : creocean@creocean.fr
INTERLOCUTEUR	Madame PALLU Tél. : 05.46.41.13.13 E-mail : pallu@creocean.fr

RAPPORT

TITRE	Projet d'aménagement et de modernisation des infrastructures portuaires et du terre-plein central des ports de Pornichet Étude d'impact en acoustique sous-marine des travaux d'aménagement
NOMBRE DE PAGES TOTAL	112 pages
NOMBRE D'ANNEXES	1 annexe

VERSION

RÉFÉRENCE	VERSION	DATE	REDACTEUR	CONTRÔLE QUALITE
241208G	V1	25/11/2025	LHE/MSG	LHE
241208G	V2	02/04/2026	LHE/MSG	LHE

Sommaire

Lexique	2
Évaluation du bruit sous-marin : Indicateurs retenus pour l'étude	5
1.1.1. Indicateurs du niveau de bruit émis	5
1.1.2. Indicateurs du niveau de bruit perçu	6
1. Contexte de l'étude	8
2. Généralités sur le bruit sous-marin	9
2.1.1. La propagation des ondes sonores dans le milieu marin.....	11
3. Définition des enjeux et sensibilités pour les mammifères marins et les tortues marines.....	13
3.1. Evaluation des effets sonores sur la faune marine	17
3.1.1. Seuils acoustiques associés aux risques physiologiques TTS et PTS	17
3.2. Les espèces marines potentiellement présentes sur la zone d'étude et leur sensibilité auditive	24
4. Traitement des données en acoustique sous-marine	24
4.1. Logiciel de traitement des données en acoustique sous-marine	24
5. Particularités acoustiques liées à un environnement portuaire.....	27
5.1. Analyse de l'ambiance en acoustique sous-marine d'un port	27
5.1.1. Suivis acoustiques portuaires	28
5.1.2. Cas spécifique du port d'échouage	30
5.1.3. Classification des sources sonores anthropiques attendues en phase d'exploitation	30
5.1.4. Ambiance sonore sous-marine sur les ports de Pornichet	30
6. Modélisation en acoustique sous-marine des travaux d'aménagement	31
6.1. Logiciel de modélisation.....	31
6.1.1. Algorithmes de propagation sonore utilisé en fonction des caractéristiques de la zone d'étude.....	31
6.1.2. Données d'entrée du modèle.....	31
6.2. Définition des scénarios acoustiques	32
6.2.1. Travaux associés à l'épi de protection – Extension du terre-plein	32
6.2.2. Travaux de renforcement des digues Nord et d'extension du terre-plein.....	34
6.2.3. Travaux de pose de pieux de guidage et pontons.....	34
6.3. Résultats de la modélisation acoustique	39

6.3.1. Evaluation des effets sonores potentiels.....	39
6.4. Evaluation du risque d'impact acoustique.....	50
6.4.1. Cas des plongeurs loisirs.....	53
6.5. Proposition de mesures de mitigation.....	54
7. Conclusion	56
Bibliographie.....	59
Annexe.....	63

Liste des Figures

Figure 1 : Indicateurs de mesure du niveau de pression sonore.....	5
Figure 2 : Extrait du document de PRO illustrant la localisation des différents aménagements maritimes projetés.....	8
Figure 3 : Différents phénomènes pouvant influencer la propagation des ondes acoustiques (MTES, 2020).	10
Figure 4. Audiogramme du Grand Dauphin Tursiops truncatus (d'après Johnson, 1967).	11
Figure 5. Profil type de célérité du son en milieu ouvert (Jensen et al., 2011).	12
Figure 6 : Synthèse des étapes requises pour la définition des enjeux et sensibilités.....	14
Figure 7. SEAc, solution innovante développé par CREOCEAN pour la réalisation d'étude en acoustique sous-marine.	25
Figure 8 : Evolution du Lp (en dB re 1 μPa) par l'enregistreur entre le 27/05/2025 à 10h00 UTC et le 03/06/2025 à 00h00 UTC – Bande passante 7Hz-100 kHz. Bathymétrie moyenne au point de mesure :12 mètres. Suivi acoustique dans le port de Cannes entre le 27/05/2025 à 10h00 UTC et le 03/06/2025 à 00h00 UTC (CREOCEAN, 2025).....	28
Figure 9 : Evolution du Lp ou SPL (en dB re 1 μPa) et du Lp peak ou SPL peak par l'enregistreur OSEAN le 12/09/2019 à 07h48 17h17 heure locale – Bande passante 7Hz-100 kHz. Suivi acoustique devant le port de La Cotinière entre le 12/09/2025 (Néréis environnement, 2019)..	28
Figure 10 : Evolution du Lp (en dB re 1 μPa) par l'enregistreur entre le 02/11/2020 à 10h00 et le 05/11/2020 à 09h50 – Bande passante 7Hz-100 kHz. Suivi acoustique réalisé dans le bassin T. Ducrocq de Haropa Port du Havre (Néréis environnement, 2020).	29
Figure 11 : Spectres acoustiques liés aux opérations de terrassement sur le chantier de la digue. Distribution par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche). Niveaux mesurés à 76 mètres du chantier (source Néréis Environnement 2019 -2022).	33
Figure 12. Procédure de forage à la Dinardaise (d'après Charier).....	35
Figure 13. Gabarits acoustiques (en dB re 1μPa².s @1m) associés à un atelier de vibrofonçage en fonction du diamètre du pieu (d'après une compilation de données issues des études de Créocéan).	36
Figure 14. Gabarits acoustiques (en dB re 1μPa².s @1m) associés à un atelier de forage en fonction du diamètre du pieu (d'après une compilation de données issues des études de Créocéan).	37
Figure 15. Gabarits acoustiques (en dB re 1μPa².s @1m) associés à un atelier de battage de pieu par marteau hydraulique en fonction du diamètre du pieu (d'après Bellmann et al., 2014 - 2020 et compilation de données issues des études de Créocéan).	38
Figure 16. Logigramme associé à la surveillance du plan d'eau par MMO et du périmètre d'exclusion de 750 mètres pour les mammifères marins.	55

Figure 17-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	65
Figure 18-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	66
Figure 19-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	67
Figure 20-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	68
Figure 21-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	69
Figure 22-A : Modélisation d'une opération de foage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	70
Figure 23-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	71
Figure 24-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.	72
Figure 25-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	73
Figure 26-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	74
Figure 27-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	75
Figure 28-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	76
Figure 29-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	77
Figure 30-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	78
Figure 31-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	79
Figure 32-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.	80
Figure 33-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.	81
Figure 34-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.	82

Figure 35-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	83
Figure 36-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	84
Figure 37-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	85
Figure 38-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	86
Figure 39-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	87
Figure 40-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.....	88
Figure 41-A : Modélisation d'une opération de terrassement du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	89
Figure 42-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	90
Figure 43-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	91
Figure 44-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	92
Figure 45-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	93
Figure 46-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	94
Figure 47-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	95
Figure 48-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.....	96
Figure 49-A : Modélisation d'une opération de terrassement du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	97
Figure 50-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	98
Figure 51-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	99
Figure 52-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	100

Figure 53-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	101
Figure 54-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	102
Figure 55-A : Modélisation d'une opération de foage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.	103
Figure 56-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.....	104
Figure 57-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01.....	105
Figure 58-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01.....	106
Figure 59-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01.....	107
Figure 60-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13.	108
Figure 61-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13.....	109
Figure 62-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13.....	110
Figure 63-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir.	111
Figure 64-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue.	112

Liste des tableaux

Tableau 2 : Indicateurs acoustiques retenus pour l'étude (MTES, 2020).	7
Tableau 3 : Matrice de qualification des enjeux.	14
Tableau 4 : Définition des enjeux pour les principales espèces.	15
Tableau 5 : Matrice de qualification des sensibilités.	15
Tableau 6 : Définition des sensibilités pour les principales espèces ciblées.	16
Tableau 7 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Les niveaux de pression sonore ($L_p,0\text{-pk,flat}$) sont exprimés en dB re 1 μPa (d'après Southall et al., 2019).	17
Tableau 8 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (d'après Southall et al., 2019).	18
Tableau 9 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Les niveaux de pression sonore ($L_p,0\text{-pk,flat}$) sont exprimés en dB re 1 μPa (d'après NMFS, 2024).	18
Tableau 10 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (d'après NMFS, 2024).	18
Tableau 11 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les tortues marines exposées à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore pondérés cumulés sur 24 h (LE,p,TU,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Les niveaux de pression sonore ($L_p,0\text{-pk}$) sont exprimés en dB peak re 1 μPa (d'après NMFS, 2023).	19
Tableau 12 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les tortues marines exposées à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore pondérés cumulés sur 24 h (LE,p,TU,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (d'après NMFS, 2023).	19
Tableau 13 : Seuils de mortalité ou de risque de blessure létale pour les tortues marines (chéloniens). Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,24h) sont exprimés en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$. Les niveaux de pression sonore ($L_p,0\text{-pk,flat}$) sont exprimés en dB peak re 1 μPa (d'après Popper et al., 2014).	19
Tableau 14 : Sensibilité auditive des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée (d'après Popper et al., 2019).	20
Tableau 15 : Liste des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée regroupés par groupe d'audition (d'après Popper et al., 2019).	21
Tableau 16 : Seuils de perte temporaire (TTS) d'audition pour chaque groupe de poissons exposé à un bruit impulsionnel de type pile driving ou à un bruit continu. Les niveaux	

d'exposition sonore cumulés (SEL_{cum}) sont exprimés en dB re $1 \mu Pa^2 s^{-1}$. Les niveaux de pression sonore (SPL_{pk} et SPL_{RMS}) sont exprimés en dB re $1 \mu Pa$ (d'après Popper & Hawkins, 2019). 22

Tableau 17 : Groupes d'audition et capacités auditives des mammifères marins retenus pour l'étude (d'après Southall et al., 2019). 24

Tableau 18 : Groupes d'audition et capacités auditives des espèces de tortues présentes aux alentours de la Baie du Pouliguen (d'après Southall et al., 2019). 24

Tableau 19 : Traitements en analyse spectrale appliqués à l'étude. 26

Tableau 20 : Synthèse des différents indicateurs acoustiques mesurés. 29

Tableau 21 : Caractéristiques acoustiques des embarcations motorisées à usage récréatif (MTES, 2020). 30

Tableau 22 : Données d'entrée du scénario de propagation et leurs sources. 31

Tableau 23. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de terrassement. 33

Tableau 24. Caractéristiques du vibreur 30H1. 35

Tableau 25. Caractéristiques du DELMAG type 30-32. 37

Tableau 26 : Positions des différents ateliers. 38

Tableau 27 : Grille d'évaluation des effets liés aux bruits sous-marins générés par les opérations. 39

Tableau 28 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de terrassement en mer – Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines. 41

Tableau 29 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de terrassement en mer – Evaluation des effets sonores sur les poissons. 42

Tableau 30 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PA13– Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines. 43

Tableau 31 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PA13– Evaluation des effets sonores sur les poissons et les invertébrés marins. 46

Tableau 32 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PH01– Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines. 47

Tableau 33 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PH01– Evaluation des effets sonores sur les poissons et invertébrés marins. ... 50

Tableau 34 : Synthèse des risques d'impact pour les espèces considérées (mammifères marins et chéloniens). 51

Tableau 35 : Synthèse des risques d'impact pour les poissons. 52

Tableau 36 : Synthèse des effets des travaux d'aménagement sur les plongeurs loisirs. 53

Liste des annexes

Annexe 1: Cartes acoustiques issues de la modélisation des scénarios de travaux..... 63

Lexique

Intensité sonore (I) Flux moyen d'énergie qui traverse une unité de surface, perpendiculairement à l'axe de propagation. Notée I , elle s'exprime en Watt/m^2 . L'intensité sonore est proportionnelle au carré de la pression sonore mesurée par un hydrophone.
Ainsi :

$$P_{(Pa)} = \sqrt{(1,5 \cdot 10^6 * I)},$$

Avec $P_{(Pa)}$: pression sonore en Pascal (Pa).

L'intensité sonore varie dans une gamme de valeur très étendue. Un bruit très faible a une intensité sonore de l'ordre de 10^{-18} W/m^2 (pression sonore d'environ $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}$) alors qu'une émission sonar peut atteindre 10^3 W/m^2 (pression sonore d'environ $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$). Une telle différence est difficile à appréhender avec une échelle linéaire, elle est donc souvent donnée en échelle logarithmique.

Décibel (dB) Unité de quantification du niveau sonore (notée dB). Elle mesure l'intensité d'une onde acoustique, ou la pression acoustique. Ainsi le niveau sonore exprimé en dB est établi par la relation suivante :

$$N_{(dB)} = 10 * \log_{10} \frac{I}{I_0} = 20 * \log_{10} \frac{P}{P_0},$$

Avec I : intensité sonore de l'onde acoustique exprimée en W/m^2 ;

I_0 : Intensité sonore de référence : pour une pression de $1 \mu\text{Pa}$,

$$I_0 = 6,5 \cdot 10^{-19} \text{ W/m}^2 ;$$

P : Pression acoustique de l'onde sonore mesurée exprimée en μPa ;

P_0 : Pression acoustique de référence valant $1 \mu\text{Pa}$.

Fréquence Notée f et exprimée en Hertz (Hz), la fréquence correspond au nombre d'ondes acoustiques qui passent par seconde en un point donné.

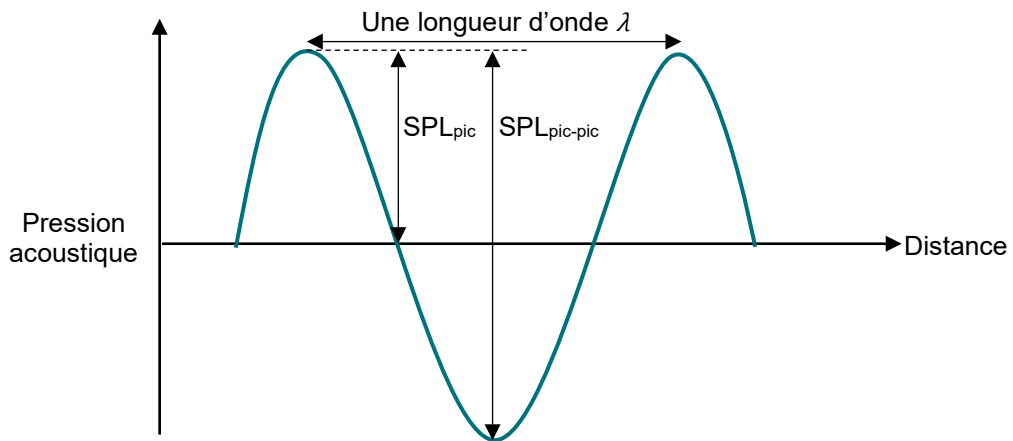
Son pur Un son pur correspond à une onde sinusoïdale dont la fréquence et l'amplitude sont constantes durant toute la durée d'émission.

Fondamental Dans le cas d'un son pur, le fondamental d'une onde acoustique désigne la fréquence f de ce son. Dans le cas d'un spectre de sons complexes qui fait apparaître plusieurs harmoniques, le fondamental désigne dans une famille d'harmonique, le plus petit intervalle fréquentiel entre les harmoniques de même origine. Les harmoniques désignent donc des signaux sinusoïdes de fréquences :

$$f_n = f * n,$$

Où n est un entier positif appelé rang de l'harmonique, et f le fondamental.

Longueur d'onde	<p>Notée λ et exprimée en mètre, elle désigne la distance entre deux points semblables de deux cycles successifs d'une onde acoustique (ex. deux points d'amplitude maximale). La longueur d'onde est fonction de la fréquence de l'onde acoustique et de la vitesse de propagation dans le milieu.</p> <p>On en déduit la relation suivante :</p> $\lambda = \frac{c}{f},$ <p>Avec λ : la longueur d'onde en m ; c : la célérité ou vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le milieu en m.s⁻¹ ; f : la fréquence de l'onde acoustique en Hz.</p>
Niveau de pression acoustique	<p>Le niveau de pression acoustique, noté SPL pour Sound Pressure Level et exprimé en dB ref 1 μPa, correspond au niveau de pression acoustique mesuré par rapport à un niveau de pression acoustique de référence, ramené par exemple à 1 mètre de la source (@1 m).</p>
Niveau de pression acoustique crête	<p>Le niveau de pression acoustique crête, noté SPL_{pic} ou SPL_{peak} pour Sound Pressure Level zero-to-peak, correspond au niveau de pression acoustique P(t), exprimé en dB ref 1 μPa, entre le niveau 0 et le niveau maximal observé sur un signal acoustique donné.</p>
Niveau de pression acoustique crête–crête	<p>Le niveau de pression acoustique crête–crête, noté SPL_{pic-pic} ou SPL_{peak-peak} pour Sound Pressure Level peak-to-peak, correspond au niveau de pression acoustique P(t), exprimé en dB ref 1 μPa, mesuré entre deux extremums d'un signal (minimum et maximum, donc négatif et positif). La différence entre ces deux indicateurs est illustrée ci-dessous :</p>



Niveau d'émission (SL)	<p>Le niveau d'émission, noté SL pour Source Level, représente le niveau sonore émis par une source acoustique composée d'un ensemble de fréquences contenues sur une bande fréquentielle donnée. Ce niveau est exprimé en dB ref 1μPa @1m (dans le cas d'une source sonore dont le niveau exprimé équivaut à sa mesure à 1 mètre)</p>
------------------------	---

Niveau d'exposition sonore (SEL)	<p>Le niveau d'exposition sonore, noté SEL pour Source Exposure Level, est un indicateur du niveau d'exposition au bruit en fonction du temps d'exposition. Exprimé en dB ref $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$, il est défini par la relation suivante :</p> $SEL = 10 \log_{10} \int_T P(t)^2 dt.$
Octave	<p>Une octave représente l'intervalle fréquentiel défini entre deux fréquences f_1 et f_2 tel que : $f_2 = 2 * f_1$.</p>
Tiers d'octave	<p>Un tiers d'octave représente un intervalle fréquentiel défini selon une fréquence centrale, une fréquence basse et une fréquence haute, les fréquences basses et hautes représentant les bornes fréquentielles du tiers d'octave. La fréquence centrale f_c du tiers d'octave n adjacent est définie par la relation suivante :</p> $f_c(n) = 10^{\frac{n}{10}}.$ <p>Les fréquences basses et hautes du tiers d'octave n sont définies par les relations suivantes :</p> $f_{basse}(n) = 10^{\frac{-1}{20}} * f_c(n) \text{ et } f_{haute}(n) = 10^{\frac{1}{20}} * f_c(n).$
Spectre acoustique	<p>Le spectre acoustique d'un son représente la distribution du niveau de bruit généré en fonction des fréquences produites.</p>
Analyse par bande de fréquence	<p>Analyse consistant à évaluer la puissance acoustique d'un signal contenu dans les intervalles fréquentiels définis.</p>
Densité spectrale de puissance (DSP)	<p>Une densité spectrale de puissance, ou DSP, est une représentation du niveau de pression acoustique d'un signal en fonction de la fréquence.</p>
Lofargramme	<p>Représentation fréquentielle d'un signal acoustique dans le temps. Le but de cette représentation est de mettre en évidence les évolutions en fréquence des sources sonores enregistrées.</p>
Spectrogramme	<p>Représentation de l'amplitude du signal dans le plan temps-fréquence.</p>

Évaluation du bruit sous-marin : Indicateurs retenus pour l'étude

Il est important de distinguer le bruit émis, le bruit reçu et le bruit perçu. Le bruit émis correspond au son généré par une source sonore. Le bruit reçu est le son émis par une source sonore qui atteint un récepteur après avoir traversé le milieu, subissant divers changements physiques qui atténuent le signal initial. Le bruit perçu, quant à lui, correspond au niveau de bruit que le récepteur est capable de percevoir. Tous les récepteurs n'ont pas la même acuité auditive, ils possèdent des capacités d'intégration propres qui varient selon les différentes fréquences (MTES, 2020).

1.1.1. Indicateurs du niveau de bruit émis

Niveau d'émission de la source : LS (ou SL pour Source Level)

Mesurer le bruit émis consiste à évaluer le niveau sonore mesuré à une distance de 1 mètre de la source (indiqué par @ 1 m). Ce niveau d'émission est exprimé en dB re 1 μPa @ 1 m.

Densité spectrale de puissance : DSP ou PSD (Power Spectral Density)

La densité spectrale de puissance du bruit émis exprimée en dB re 1 μPa^2 /Hz, représente la répartition de la puissance acoustique émise en fonction de la fréquence, dans une bande de 1 Hz.

Indicateurs du niveau de bruit reçu

Niveau de pression sonore : Lp (ou SPL pour Sound Pressure Level)

Le niveau de pression sonore indique la quantité d'énergie reçue par un récepteur à une certaine distance de la source sonore. Le niveau de pression sonore du bruit reçu est exprimé en dB re 1 μPa , en précisant la distance par rapport à la source.

Il existe plusieurs façons de mesurer les niveaux de pression sonore :

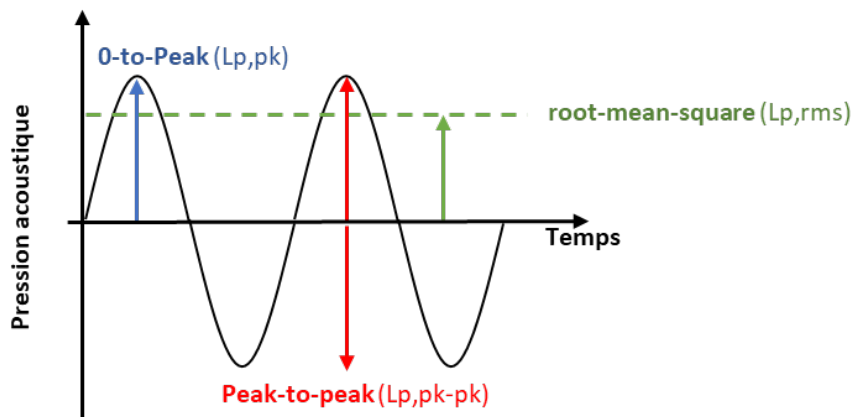


Figure 1 : Indicateurs de mesure du niveau de pression sonore.

Niveau $L_{p,pk}$ (noté aussi $L_{p,peak}$) : Le niveau Peak représente la valeur absolue maximale (différence de pression maximale ou minimale par rapport à la pression de référence).

Niveau $L_{p,pk-pk}$ (noté aussi $L_{p,peak-peak}$) : Ce niveau fait référence à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale d'une onde de pression sonore. Il représente l'amplitude totale de l'onde sonore (la plage de pression entre la pression la plus négative et la pression la plus positive du signal).

Il est possible d'estimer la valeur maximale du niveau de pression sonore $L_{p,pk-pk}$ grâce à la relation :

$$L_{p_{pk-pk}} = L_{p_{pk}} + 6 \text{ dB}$$

Niveau $L_{p,rms}$: Correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période donnée. Cette valeur efficace traduit la valeur équivalente d'énergie d'une onde acoustique. Cet indicateur est privilégié pour le bruit continu.

Niveau d'exposition sonore : LE_p (ou SEL pour Sound Exposure Level)

Le niveau d'exposition sonore est une mesure de l'énergie qui tient compte à la fois du niveau reçu et de la durée d'exposition. Ce niveau permet d'intégrer l'énergie totale reçue sur une période déterminée, ramenée à une seconde. Il s'exprime en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ et peut être déterminé par la relation suivante :

$$L_{E_p} = L_p + 10 \log_{10} t$$

Le LE_p peut être calculé pour une impulsion ($LE_{p,ss}$) ou pour plusieurs ($LE_{p,cum}$). Il est possible de lier les deux indicateurs par la formule :

$$L_{E_{p,cum}} = L_{E_{p,ss}} + 10 \log_{10} n$$

où n correspond au nombre d'impulsions.

Niveau équivalent continu : Leq,T (Equivalent continuous sound pressure level)

Le niveau équivalent continu correspond au niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement. Cet indicateur s'exprime en dB re 1 μPa .

Densité spectrale de puissance : DSP ou PSD (Power Spectral Density)

La densité spectrale de puissance du bruit reçu exprimée en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, représente la répartition de la puissance acoustique reçue par un hydrophone en fonction de la fréquence, dans une bande de 1 Hz.

1.1.2. Indicateurs du niveau de bruit perçu

Niveau d'exposition sonore pondéré :

Le niveau d'exposition sonore pondéré est un indicateur qui tient compte de la capacité auditive du récepteur. Il existe différentes fonctions de pondération adaptées à l'audition des mammifères marins. Ces fonctions prennent en considération les capacités auditives spécifiques des mammifères marins, basées sur leurs audiogrammes, ainsi que d'autres paramètres audiométriques propres à chaque groupe d'espèces (Southall et al., 2019). Elles permettent d'évaluer le bruit perçu en réduisant l'importance des très basses et très hautes fréquences par rapport aux fréquences auxquelles l'animal est le plus sensible.

Le tableau 1 synthétise les indicateurs acoustiques retenus pour l'étude.

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 1 : Indicateurs acoustiques retenus pour l'étude (MTES, 2020).

Indicateur		Notation ISO	Notation courante	Unité	Description
Bruit émis	Niveau d'émission	L_s	SL	dB re 1 μ Pa @ 1 m	Établit le niveau d'émission d'une source sonore.
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 μ Pa ² /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 $L_{p,RMS}$	SPL _{RMS}	dB re 1 μ Pa @ X m	Établit le spectre acoustique d'une source de bruit (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence).
	Niveau de pression sonore (niveau peak)	$L_{p,pk}$ ou $L_{p,0-pk}$	SPL _{peak} ou SPL _{pk}	dB re 1 μ Pa @ 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 μ Pa ² /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 μ Pa ² /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	$L_{eq,T}$	Leq	dB re 1 μ Pa	Quantifie le niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement.
	Niveau d'exposition sonore	$L_{E,p}$	LE,P _{ss}	dB re 1 μ Pa ² .s	Évalue la quantité d'énergie reçue lors d'une impulsion sonore en intégrant également sa durée.
	Niveau d'exposition sonore cumulée	$L_{E,p}$	LE,P _{cum}	dB re 1 μ Pa ² .s	Évalue la quantité d'énergie cumulée reçue lors de plusieurs impulsions en intégrant également leur durée.
Bruit perçu	Niveaux d'exposition sonore pondérés		TTS ou PTS LE,P	dB re 1 μ Pa ² .s	Définit les niveaux d'exposition sonore à partir desquels les groupes d'espèces considérés sont susceptibles de subir des pertes d'audition temporaires (TTS) ou permanentes (PTS).

1. Contexte de l'étude

Dans le cadre du projet d'aménagement et de modernisation des infrastructures portuaires et du terre-plein central des ports de Pornichet, plusieurs aménagements maritimes sont prévus concernant notamment :

- ▶ Le renforcement de la digue du port d'échouage ;
- ▶ Les appontements du port d'échouage ;
- ▶ L'extension du terre-plein.



Figure 2 : Extrait du document de PRO illustrant la localisation des différents aménagements maritimes projetés

Ces travaux maritimes et les ateliers associés vont ponctuellement modifier le paysage sonore sous-marin par l'introduction de sources sonores potentiellement de forts niveaux.

L'objectif de cette étude est d'évaluer, à travers une modélisation en acoustique sous-marine, l'empreinte sonore associée aux différents ateliers maritimes.

L'estimation des effets sonores puis du risque d'impact des différents ateliers maritimes sur la faune marine sera réalisée en se basant sur les travaux et publications scientifiques qui font actuellement consensus.

Une série de mesures de mitigation sera proposée au regard des résultats de la modélisation en acoustiques sous-marine des différents ateliers.

2. Généralités sur le bruit sous-marin

Le son est un phénomène physique qui résulte de la perception d'une onde acoustique. Pour créer un son, il faut :

- ▶ Une source émettrice ;
- ▶ Un milieu dans lequel l'onde peut se propager ;
- ▶ Un récepteur.

La source à l'origine du son produit une vibration : un mouvement mécanique de compression-dilatation du milieu, qui crée une variation de pression. Cette variation de pression se propage ensuite de proche en proche dans un milieu en transmettant de l'énergie aux particules voisines.

Ainsi, l'intensité d'une onde acoustique peut se mesurer de deux manières :

- ▶ Soit en quantifiant la variation de pression (ou pression acoustique) générée par rapport à une pression de référence. Cette composante « variation de pression » se mesure en Pascal (Pa) ;
- ▶ Soit en évaluant le mouvement des particules (molécules d'eau, de gaz, etc. en fonction du milieu traversé) généré lors de la propagation de l'onde. Cette composante « mouvement de particules » se mesure en termes de déplacement (en m), de vitesse (en m/s) ou plus généralement d'accélération (en m/s^2). De ce fait, elle renseigne sur l'intensité du son, mais également sur sa direction.

Un son se caractérise par :

- ▶ Sa fréquence, qui correspond au nombre d'oscillations par seconde. La fréquence se mesure en Hertz (Hz) et définit la « hauteur » du son : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu ;
- ▶ Son intensité, qui correspond au volume du son ;
- ▶ Sa durée d'apparition, ou durée effective du phénomène sonore.

En milieu marin, l'intensité du son se mesure principalement en variation de pression. Ces variations pouvant être très importantes, le niveau sonore se quantifie à l'aide d'une unité logarithmique, le décibel (dB). Le décibel évalue le rapport entre la pression acoustique mesurée (P) et une pression de référence (P_0) égale à $1 \mu Pa$. En acoustique sous-marine, le niveau de pression acoustique (ou niveau de bruit) s'exprime donc en dB par rapport à $1 \mu Pa$ (ou dB re $1 \mu Pa$).

La propagation du son dépend du milieu dans lequel sont émises les ondes acoustiques. Dans l'eau, le son se propage environ 4 fois plus vite que dans l'air. La vitesse du son, ou célérité, dépend uniquement des caractéristiques du milieu et notamment de la température, de la salinité et de la pression. Dans l'eau de mer, la célérité varie donc en fonction de la composition physico-chimique de la masse d'eau et de la profondeur. D'une manière générale, la célérité du son dans l'eau de mer est comprise entre 1450 et 1550 m/s (contre 330 à 350 m/s dans l'air).

Entre l'émission et la réception, plusieurs phénomènes peuvent avoir une influence sur la propagation des ondes acoustiques (figure 2). Ces phénomènes sont de plusieurs types :

- ▶ Les phénomènes liés aux variations de célérité. En traversant des masses d'eau de caractéristiques différentes (température, salinité, pression), l'onde acoustique peut être ralentie ou accélérée ;
- ▶ Les phénomènes de réflexion, réfraction diffraction et diffusion. Induits par des interfaces (eau/air, eau/sédiment, entre différentes masses d'eau ou entre différentes natures de sédiment

par exemple) ou par des obstacles, ces phénomènes vont contribuer à modifier la direction de l'onde ;

- ▶ Les phénomènes d'absorption, qui causent une perte d'énergie. Ces phénomènes sont notamment liés à la nature du fond.

Ces phénomènes conduisent à modifier les caractéristiques du signal transmis entre la source et le récepteur et à induire des interférences dues aux multiples trajets que peuvent prendre les ondes acoustiques. Ces phénomènes sont d'autant plus importants et complexes en milieu côtier (par petit fond), où la propagation des ondes sonores est soumise à de nombreuses réflexions surface/fond, et où le risque de rencontrer un milieu hétérogène (différentes masses d'eau, obstacle) est plus important. Outre ces phénomènes, l'eau de mer va également contribuer à atténuer l'intensité de l'onde acoustique, d'une part par divergence sphérique (l'énergie de l'onde acoustique va « s'étaler » au fur et à mesure de sa progression dans un milieu en 3 dimensions et donc se diluer dans le milieu) et d'autre part par amortissement (absorption de l'énergie acoustique dissipée du fait de la salinité et de la viscosité du milieu et des interactions chimiques).

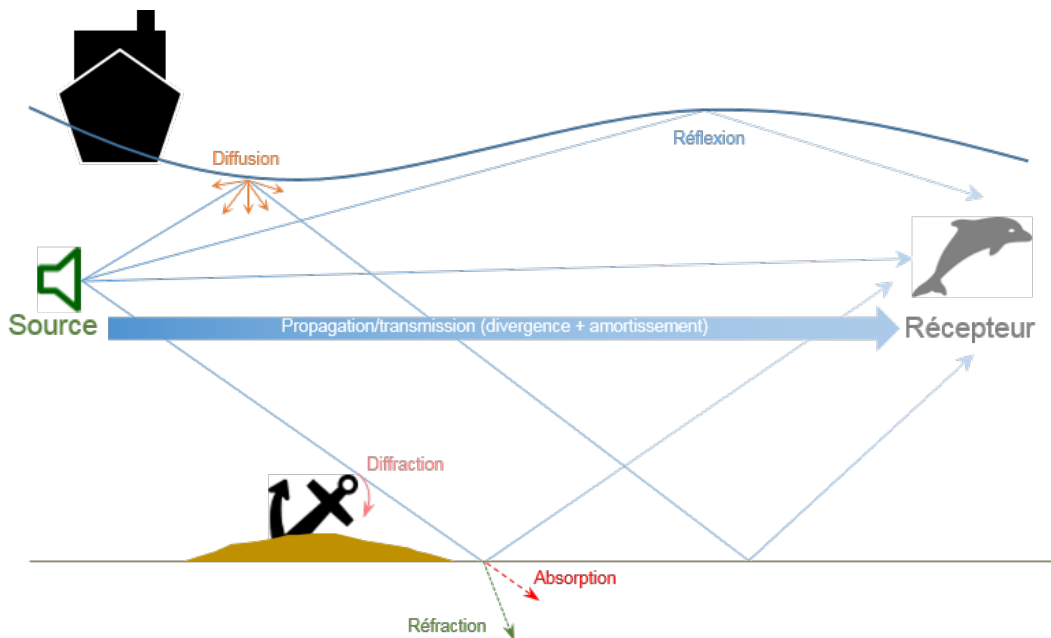


Figure 3 : Différents phénomènes pouvant influencer la propagation des ondes acoustiques (MTES, 2020).

La perte d'intensité d'un son entre le point d'émission et le point de réception est qualifiée de perte de transmission ou perte de propagation. Ces pertes dépendent des caractéristiques du milieu traversé et des caractéristiques de l'onde sonore (fréquence). En effet, les sons basse fréquence (plus graves) se propagent mieux que les sons haute fréquence (plus aigus).

Comme évoqué précédemment, un certain nombre de phénomènes vont avoir une influence sur les ondes sonores entre leur émission et leur réception, ce qui induit de fait une différence de niveau entre le son émis par une source et le son reçu par un récepteur. Cependant, la capacité du récepteur à intégrer le signal reçu va également jouer un rôle. Ainsi, le son reçu par le récepteur est généralement différent du son effectivement perçu, ce dernier correspondant au bruit reçu pondéré par la capacité auditive du récepteur.

La capacité auditive du récepteur doit donc être prise en compte lorsque l'on cherche à évaluer l'effet d'une onde acoustique. Cette capacité auditive peut être matérialisée par un audiogramme, qui représente le plus bas niveau (en dB) de perception d'un son en fonction de la fréquence (figure 4

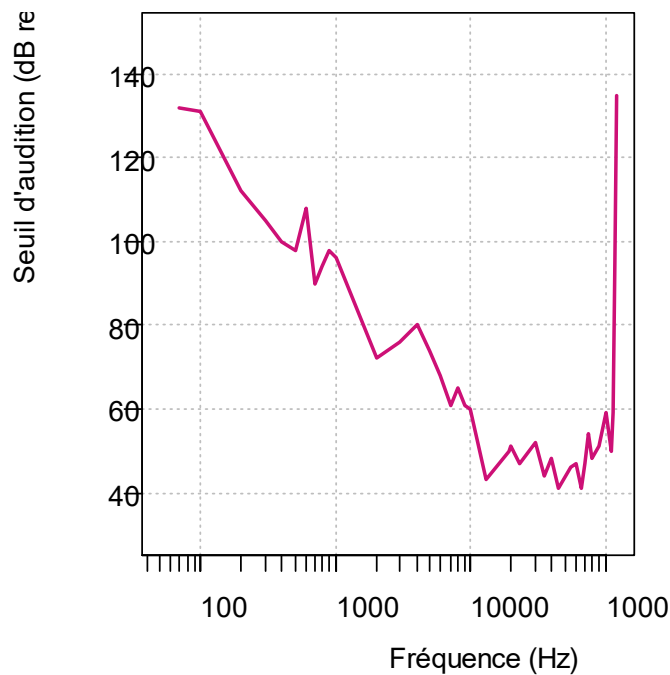


Figure 4. Audiogramme du Grand Dauphin *Tursiops truncatus* (d'après Johnson, 1967).

L'audiogramme est propre à une espèce. Il permet de définir la plage de fréquence effectivement perceptible et le niveau sonore minimum pouvant être perçu. Il permet également de définir la plage de fréquence de sensibilité maximum. Par exemple, l'audiogramme de la figure 3 permet de voir que le Grand Dauphin est capable de percevoir les fréquences comprises entre 70 Hz et 150 kHz, mais qu'il est particulièrement sensible aux fréquences comprises entre 10 et 100 kHz. A ces fréquences, son seuil de perception est inférieur à 60 dB re 1 µPa.

2.1.1. La propagation des ondes sonores dans le milieu marin

Dans l'eau, la propagation du son est environ quatre fois plus rapide que dans l'air. La vitesse de propagation, ou célérité, est influencée par des facteurs tels que la température, la salinité et la pression. Cette célérité peut être exprimée par la formule suivante (Jensen et al., 2011) :

$$c = 1449,2 + 4,6 T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

Où c représente la célérité (en m/s), T la température (en °C), S la salinité (en ‰) et z la profondeur (en m).

Les conditions environnementales du milieu de propagation ont un impact important sur la propagation des ondes sonores, notamment les éléments suivants :

- ▶ La bathymétrie : La propagation des ondes diffère selon que l'on se trouve en eaux profondes ou peu profondes (zones côtières). En milieu côtier, la faible hauteur d'eau influence les conditions de propagation des ondes acoustiques : en dessous d'une certaine fréquence, dite fréquence de coupure, le milieu marin agit comme un filtre passe-haut, provoquant une forte atténuation des ondes sonores.
- ▶ La nature du fond marin : Les propriétés du fond, qu'il soit absorbant (par exemple, un fond vaseux) ou réfléchissant (comme un fond rocheux), vont avoir un effet sur la propagation des ondes sonores.
- ▶ Les profils de température et de salinité de la colonne d'eau : Les variations de température, de salinité et de pression influencent directement la célérité du son. Bien que la célérité soit généralement comprise entre 1450 et 1550 m/s, elle varie spatialement et temporellement, et n'est pas homogène sur toute la colonne d'eau (voir figure 14).

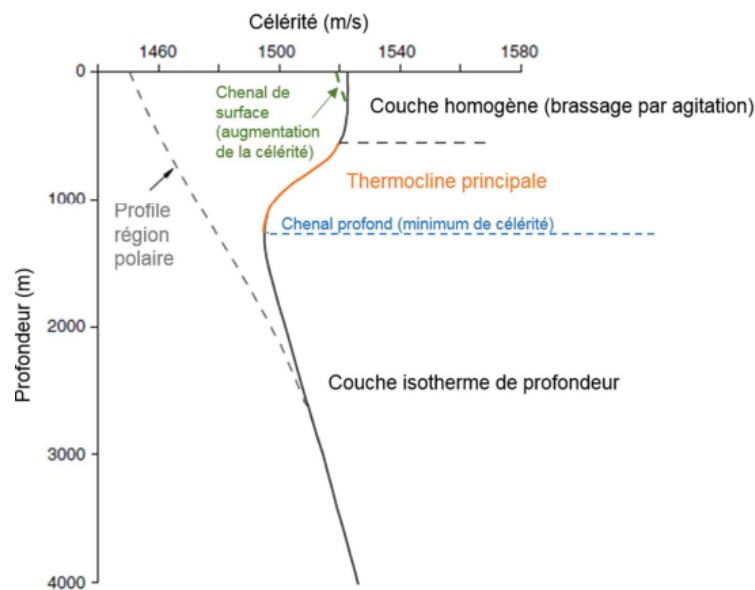


Figure 5. Profil type de célérité du son en milieu ouvert (Jensen et al., 2011).

2.1.1.1. Incidence de la bathymétrie sur le niveau de bruit ambiant sous-marin

Entre la source émettrice (le chantier portuaire ou un navire par exemple) et un récepteur, plusieurs phénomènes peuvent avoir une influence sur la propagation des ondes acoustiques. Ces phénomènes sont de plusieurs types :

- ▶ Les phénomènes liés aux variations de célérité. En traversant des masses d'eau de caractéristiques différentes (température, salinité, pression), l'onde acoustique peut être ralentie ou accélérée ;
- ▶ Les phénomènes de réflexion, réfraction diffraction et diffusion. Induits par des interfaces (eau/air, eau/sédiment, entre différentes masses d'eau ou entre différentes natures de sédiment par exemple) ou par des obstacles, ces phénomènes vont contribuer à modifier la direction de l'onde ;
- ▶ Les phénomènes d'absorption, qui causent une perte d'énergie. Ces phénomènes sont notamment liés à la nature du fond.

Ces phénomènes conduisent à modifier les caractéristiques du signal transmis entre la source et le récepteur et à induire des interférences dues aux multiples trajets que peuvent prendre les ondes acoustiques. Ces phénomènes sont d'autant plus importants et complexes en milieu côtier (par petit fond), où la propagation des ondes sonores est soumise à de nombreuses réflexions surface/fond, et où le risque de rencontrer un milieu hétérogène (différentes masses d'eau, obstacle) est plus important.

Outre ces phénomènes, l'eau de mer va également contribuer à atténuer l'intensité de l'onde acoustique, d'une part par divergence sphérique (l'énergie de l'onde acoustique va « s'étaler » au fur et à mesure de sa progression dans un milieu en 3 dimensions et donc se diluer dans le milieu) et d'autre part par amortissement (absorption de l'énergie acoustique dissipée du fait de la salinité et de la viscosité du milieu et des interactions chimiques).

La hauteur d'eau influe sur la propagation des ondes sonores, le milieu marin fonctionne alors comme un filtre passe bande, ce qui signifie que :

- ▶ Vers les hautes fréquences, le signal sonore est fortement atténué par les phénomènes d'absorption. Les pertes acoustiques augmentent avec la fréquence et la distance source / récepteur ;
- ▶ Vers les basses fréquences, les phénomènes de diffraction génèrent de fortes pertes d'énergie pour des fréquences inférieures à une "fréquence de coupure (fc). Cette fréquence de coupure (fc) est définie par la formule suivante (Jensen et al., 2011) :

$$f_c \text{ (Hz)} = cw / (4h\sqrt{1-(cw/cb)})$$

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).

3. Définition des enjeux et sensibilités pour les mammifères marins et les tortues marines

La définition des enjeux pour les mammifères marins et les tortues de mer s'inspire de la méthodologie développée par l'OFB et appliquée notamment dans le cadre des synthèses de connaissances pour les futurs projets de parcs éoliens¹. La méthode de base a pour objectif de spatialiser les enjeux à l'échelle d'une vaste zone d'étude pour définir les zones de fort intérêt écologique et celles plus propices à accueillir des projets d'énergies marines.

Étant donné l'objectif différent du présent projet et la quantité/qualité des données disponibles, il n'est ni possible ni pertinent de chercher à spatialiser les enjeux dans notre aire d'étude. La philosophie de la méthode sera toutefois conservée afin d'évaluer les enjeux selon les mêmes critères et tendre ainsi vers une standardisation des pratiques.

La figure 6 présente une synthèse des étapes de définition des enjeux puis de la sensibilité des espèces marines.

¹<https://eolbretsud.debatpublic.fr/wp-content/uploads/DMO-projet-eoliennes-flottantes-sud-bretagne.pdf>
<https://eolmernormandie.debatpublic.fr/images/documents/dmo/DMO-complet.pdf>
<https://eos.debatpublic.fr/wp-content/uploads/EOS-DMO-Etude-bibliographique-Environnement-Maritime.pdf>

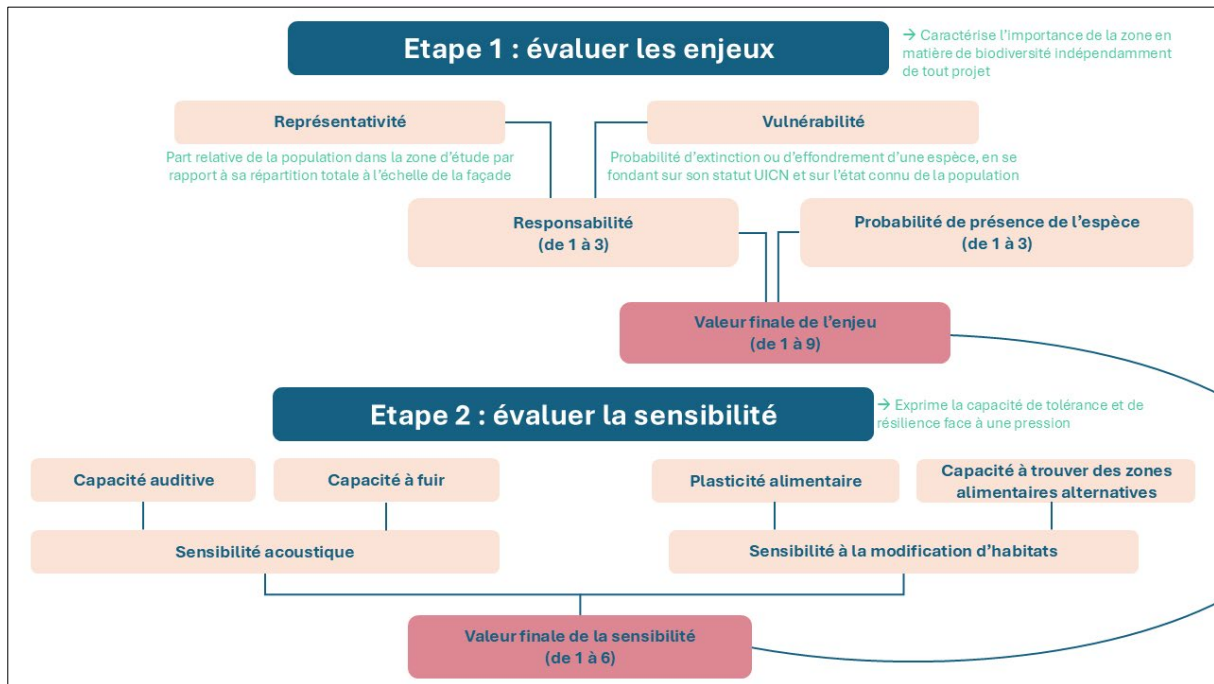


Figure 6 : Synthèse des étapes requises pour la définition des enjeux et sensibilités.

L'enjeu peut ensuite être qualifié de faible, moyen ou fort à partir de la matrice présentée dans le tableau 3.

Tableau 2 : Matrice de qualification des enjeux.

Note enjeux	Qualification Enjeux
1 - 3	Faible
4 - 6	Moyen
7 - 9	Fort

La grille d'évaluation des enjeux pour les principales espèces est présentée dans le tableau 4.

Tableau 3 : Définition des enjeux pour les principales espèces.

Espèce	Responsabilité	Probabilité présence	Note enjeux	Qualification enjeux
Petit rorqual <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	1	1	1	Faible
Dauphin de Risso <i>Grampus griseus</i>	1	1	1	Faible
Globicéphale noir <i>Globicephala melas</i>	1	1	1	Faible
Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	1	1	1	Faible
Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	1	1	1	Faible
Dauphin commun <i>Delphinus delphis</i>	1	2	2	Faible
Marsouin commun <i>Phocoena phocoena</i>	1	1	1	Faible
Phoque gris <i>Phoca vitulina</i>	1	1	1	Faible
Tortue caouanne <i>Caretta caretta</i>	1,5	1	1,5	Faible
Tortue luth <i>Dermochelys coriacea</i>	2,5	1	1,5	Faible

Le tableau 5 présente la matrice d'évaluation de la sensibilité.

Tableau 4 : Matrice de qualification des sensibilités.

Note sensibilité	Qualification sensibilité
1 – 3,3	Faible
3,3 – 6,6	Moyen
> 6,6	Fort

Le tableau 6 présente une synthèse de la sensibilité établie pour les mammifères marins et les tortues marines ciblées dans cette étude.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 5 : Définition des sensibilités pour les principales espèces ciblées.

Espèce	Perturbation acoustique	Modification habitat	Indice sensibilité globale	Enjeux	Note sensibilité (sur 10)	Qualification sensibilité
Petit rorqual <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	3	1	4	1	0.7	Faible
Dauphin de Risso <i>Grampus griseus</i>	2	2	4	1	0.7	Faible
Globicéphale noir <i>Globicephala melas</i>	2	2	4	1	0.7	Faible
Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	1.5	1	2.5	1	0.5	Faible
Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	1.5	1	2.5	1	0.5	Faible
Dauphin commun <i>Delphinus delphis</i>	1.5	1	2.5	2	0.9	Faible
Marsouin commun <i>Phocoena phocoena</i>	1.5	1.5	3	1	0.6	Faible
Phoque gris <i>Phoca vitulina</i>	1.5	1.5	3	1	0.6	Faible
Tortue caouanne <i>Caretta caretta</i>	1	1	2	1,5	0,7	Faible
Tortue luth <i>Dermochelys coriacea</i>	1	1,5	2,5	1,5	0,8	Faible

L'ensemble des espèces considérées de mammifères marins présente une **sensibilité faible**, en raison d'une faible note d'enjeux et une sensibilité relativement faible à la modification de l'habitat pour certaines espèces. De plus, le faible nombre de signalements de mammifères marins au sein de la baie du Pouliguen conduit à une sensibilité globale qualifiée de faible pour chaque espèce.

Le Dauphin commun présente l'indice de sensibilité globale le plus élevé, mais sa note finale est tout même faible : il présente une sensibilité avérée aux perturbations acoustiques et possède la note d'enjeu la plus élevée, mais c'est une espèce très mobile qui a une plasticité alimentaire élevée. Malgré une sensibilité acoustique élevée pour le Petit rorqual, sa faible probabilité de présence au sein de l'aire d'étude éloignée que constitue la baie du Pouliguen, conduit à une sensibilité globale qualifiée de faible.

Bien que côtier, le Marsouin commun possède une note de sensibilité globale faible en raison de la faible probabilité de présence au sein de la baie et d'une bonne capacité à quitter la zone lors des travaux.

Concernant les tortues marines, une **sensibilité faible** est attendue pour les deux espèces considérées. En effet ; la faible probabilité de présence dans la zone d'étude ainsi qu'une sensibilité relativement faible à la perturbation acoustique et à la modification d'habitat (hors période de reproduction) expliquent en partie ces notes.

3.1. Evaluation des effets sonores sur la faune marine

3.1.1. Seuils acoustiques associés aux risques physiologiques TTS et PTS

L'ensemble des travaux réalisés sur les mammifères marins ont abouti à la définition de seuils acoustiques de perte d'audition temporaire (TTS pour Temporary Threshold Shift) ou permanente (PTS pour Permanent Threshold Shift). Un TTS s'entend comme une perte d'audition d'au moins 6 dB. Cela signifie qu'après un TTS, un son devra, pour être audible, être 6 dB plus élevé qu'avant le TTS. Ces seuils, définis par Southall *et al.* en 2007, ont été mis à jour en 2019. Les seuils TTS ont été établis sur la base de mesures directes (essentiellement pour les petits cétacés), d'observations (anatomie du système auditif, fréquences et niveaux des vocalises, etc.). Les PTS ont été établis par extrapolation. Les différents seuils sont proposés en fonction du groupe d'audition (cétacés LF, HF, VHF, siréniens, phocidés dans l'air et dans l'eau, autres carnivores dans l'air et dans l'eau), du type de son (continu ou impulsionnel) et de la durée d'exposition. Ils sont présentés dans le tableau 7 et le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 6 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 µPa².s. Les niveaux de pression sonore (Lp,0-pk,flat) sont exprimés en dB re 1 µPa (d'après Southall et al., 2019).

Son impulsionnel	TTS		PTS	
	LE,p,HG,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)	LE,p,HG,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)
Cétacés basse fréquence (LF)	168	213	183	219
Cétacés haute fréquence (HF)	170	224	185	230
Cétacés très haute fréquence	140	196	155	202
Siréniens (SI)	175	220	190	226
Phocidés dans l'air (PCA)	123	138	138	144
Phocidés dans l'eau (PCW)	170	212	185	218
Autres carnivores dans l'air	146	161	161	167

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Autres carnivores dans l'eau	188	226	203	232
------------------------------	-----	-----	-----	-----

Tableau 7 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re1μPa².s (d'après Southall et al., 2019).

Son continu	TTS	PTS
	LE,p,HG,24h (pondéré)	LE,p,HG,24h (pondéré)
Cétacés basse fréquence (LF)	179	199
Cétacés haute fréquence (HF)	178	198
Cétacés très haute fréquence	153	173
Siréniens (SI)	186	206
Phocidés dans l'air (PCA)	134	154
Phocidés dans l'eau (PCW)	181	201
Autres carnivores dans l'air	157	177
Autres carnivores dans l'eau	199	219

En 2024 le NMFS propose un ajustement des seuils TTS et PTS en fonction de la typologie de la source sonore émettrice de type impulsionnel ou continu, ainsi qu'un ajustement des fonctions de pondération des différents groupes d'audition. Les seuils acoustiques associés sont ainsi présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 8 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re 1 μPa².s. Les niveaux de pression sonore (Lp,0-pk,flat) sont exprimés en dB re 1 μPa (d'après NMFS, 2024).

Son impulsionnel	TTS		PTS / AUD INJ	
	LE,p,HG,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)	LE,p,HG,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)
Cétacés basse fréquence (LF)	168	216	183	222
Cétacés haute fréquence (HF)	178	224	193	230
Cétacés très haute fréquence	144	196	159	202
Siréniens (SI)	171	219	186	225
Phocidés dans l'air (PCA)	125	156	140	162
Phocidés dans l'eau (PCW)	168	217	183	223
Autres carnivores dans l'air	148	171	163	177
Autres carnivores dans l'eau	170	224	185	230

Tableau 9 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les différents groupes de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,HG,24h) sont exprimés en dB re1μPa².s (d'après NMFS, 2024).

Son continu	TTS	PTS / AUD INJ
	LE,p,HG,24h (pondéré)	LE,p,HG,24h (pondéré)
Cétacés basse fréquence (LF)	177	197
Cétacés haute fréquence (HF)	181	201
Cétacés très haute fréquence	161	181
Siréniens (SI)	180	200
Phocidés dans l'air (PCA)	134	154
Phocidés dans l'eau (PCW)	175	195

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Autres carnivores dans l'air	157	177
Autres carnivores dans l'eau	179	199

Les seuils de réaction comportementale proposés par la NMFS (2024) sont de 120 dB re 1µPa pour une exposition sonore à une source de type continu et 160 dB re 1µPa pour une exposition sonore à une source de type impulsionnel.

Ces seuils proposés par le NMFS en 2024 seront considérés pour cette étude.

Chez les tortues marines, les seuils TTS et PTS sont encore mal connus. Une perte d'audition temporaire a été observée chez une tortue caouanne (*Caretta caretta*) exposée à des tirs de canons à air à des niveaux d'exposition sonores de l'ordre de 175 dB re 1µPa².s (Lenhardt, 2002). Des seuils acoustiques ont néanmoins été définis par le National Marine Fisheries Service (NMFS, 2023), et permettent de proposer un premier état d'évaluation des effets sonores potentiels des activités anthropiques associés aux sources sonores d'origine anthropique, de type impulsionnel ou continu (tableau 11 et tableau 12).

Tableau 10 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les tortues marines exposées à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore pondérés cumulés sur 24 h (LE,p,TU,24h) sont exprimés en dB re 1 µPa².s. Les niveaux de pression sonore (Lp,0-pk) sont exprimés en dB peak re 1 µPa (d'après NMFS, 2023).

Son impulsionnel	TTS		PTS	
	LE,p,TU,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)	LE,p,TU,24h (pondéré)	Lp,0-pk,flat (non pondéré)
Tortues marines	189	226	204	232

Tableau 11 : Seuils de perte d'audition temporaire (TTS) et permanente (PTS) pour les tortues marines exposées à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore pondérés cumulés sur 24 h (LE,p,TU,24h) sont exprimés en dB re 1 µPa².s (d'après NMFS, 2023).

Son continu	TTS	PTS
	LE,p,TU,24h (pondéré)	LE,p,TU,24h (pondéré)
Tortues marines	200	220

Chez les tortues, aucune étude n'a à ce jour pu établir un lien entre émission sonore et blessure mortelle. Popper *et al.* (2014) ont toutefois établi des seuils théoriques à partir desquels des tortues seraient susceptibles d'être tuées ou de subir des blessures mortelles. Ces seuils, détaillés dans le tableau 13, dépendent du type de sources sonores et présentent une variabilité importante, notamment pour le Lp,0-pk flat dont les valeurs proposées sont relativement basses et en contradiction avec celles présentées dans les tableau 11 et tableau 12. Ils conviennent dès lors de considérer le caractère expérimental de ces résultats, basés sur un très faible nombre d'observations.

Tableau 12 : Seuils de mortalité ou de risque de blessure létale pour les tortues marines (chéloniens). Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h (LE,p,24h) sont exprimés en dB re 1 µPa².s. Les niveaux de pression sonore (Lp,0-pk,flat) sont exprimés en dB peak re 1 µPa (d'après Popper *et al.*, 2014).

Son impulsionnel	Mortalité ou risque de blessure mortelle	
	LE,p,24h	Lp,0-pk,flat
Explosion sous-marine	-	229-234
Battage de pieux	210	207
Canon à air	210	207

3.1.1.1. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des poissons

Les poissons n'ont pas tous la même sensibilité concernant la réception et la perception du son. Les poissons dépourvus de vessie natatoire (poissons plats, élasmobranches, thons, etc.), notamment, ne sont donc pas capables de percevoir les variations de pression générées par les ondes sonores. Ces poissons ne perçoivent les sons que par les mouvements de particules induits par les ondes sonores et sont réputés moins sensibles au son (Popper *et al.*, 2019).

D'autres espèces, telles que le congre ou le bar commun, possèdent une vessie natatoire mais celle-ci est située loin de l'oreille interne et ne semble pas jouer un rôle majeur dans l'audition de ces espèces. Le mouvement de particule semble être pour ces poissons le mode de perception des ondes sonores le plus efficace. Ainsi, ces espèces perçoivent les sons sur une faible bande de fréquences (< 300Hz), et uniquement en basse fréquence.

Chez certains poissons à l'inverse, la vessie natatoire est située à proximité immédiate de l'oreille interne, sans toutefois y être directement connectée. Cette proximité permet toutefois à ces poissons (ex. : tacaud commun, lieu jaune) d'être sensible aux variations de pression et de percevoir les sons sur une plus large bande de fréquences (~ 500 Hz).

Enfin, certaines espèces de poissons, à l'instar des clupéidés (aloses, sardines, sprat, notamment) disposent de mécanismes anatomiques qui connectent leur vessie natatoire directement à leur oreille interne, ce qui leur confère une meilleure audition et la capacité de percevoir les sons au-delà de 1 kHz.

Le tableau 14 ci-dessous synthétise les informations disponibles concernant la sensibilité auditive des espèces de poissons présente sur l'aire d'étude.

Tableau 13 : Sensibilité auditive des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée (d'après Popper *et al.*, 2019).

Groupe d'audition		Plage d'audition	Sensibilité maximum
T1	Poissons dépourvus de vessie natatoire	10-200 Hz	90 dB re 1 µPa entre 100 et 200 Hz
T2	Poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition	10-300 Hz	100 dB re 1 µPa entre 100 et 200 Hz
T3	Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition mais sans connexion directe avec l'oreille interne	10-500 Hz	70 dB re 1 µPa entre 50 et 400 Hz
T4	Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	10-5000 Hz	< 80 dB re 1 µPa entre 10 et 1000 Hz

La liste des espèces considérées pour l'étude acoustique est issue de l'étude réalisée sur la ressource halieutique pour ce projet.

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 14 : Liste des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée regroupés par groupe d'audition (d'après Popper et al., 2019).

Nom commun	Nom latin	Enjeu AE immédiate	Enjeu AE élargie	Type d'audition	Sensibilité à l'échelle de l'AE élargie
GROUPE T1 – Poissons dépourvus de vessie natatoire					
Dragonnet lyre	<i>Callionymus lyra</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Gobie buhotte	<i>Pomatoschistus minutus</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Sole commune	<i>Solea solea</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Petite sole jaune	<i>Buglossidium luteum</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Arnoglosse lanterne	<i>Arnoglossus laterna</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Cardine franche	<i>Lepidorhombus whiffiagonis</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Limande sole	<i>Microstomus kitt</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Plie	<i>Pleuronectes platessa</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Sole commune	<i>Solea solea</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Barbue	<i>Scophthalmus rhombus</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Torpille marbrée	<i>Torpedo marmorata</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Grande roussette	<i>Scyliorhinus stellaris</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Petite roussette	<i>Scyliorhinus canicula</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Raie brunette	<i>Raja udulata</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Raie douce	<i>Raja montagui</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Raie lisse	<i>Raja brachyura</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Raie bouclée	<i>Raja clavata</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Requin pèlerin	<i>Cethorinus maximus</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	Faible	Moyen	T1	Faible
Lamproie fluviatile	<i>Lampetra fluviatilis</i>	Faible	Faible	T1	Faible
GROUPE T2 – Poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition					
Congre d'Europe	<i>Conger conger</i>	Moyen	Moyen	T2	Moyenne
Vieille commune	<i>Labrus bergylta</i>	Moyen	Moyen	T2	Moyenne
Chinchard commun	<i>Trachurus trachurus</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Prêtre	<i>Atherina presbyter</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Bar européen	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Gronchin perlon	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Merlan	<i>Merlangius merlangus</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Merlu	<i>Merluccius merluccius</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Rouget de roche	<i>Mullus surmuletus</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Saint-Pierre	<i>Zeus faber</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Pageot commun	<i>Pagellus erythrinus</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
Anguille européenne	<i>Anguilla anguilla</i>	Faible	Moyen	T2	Moyenne
GROUPE T3 – Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition mais sans connexion directe avec l'oreille interne					
Tacaud commun	<i>Trisopterus luscus</i>	Moyen	Moyen	T3	Moyenne
Eglefin	<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	Faible	Moyen	T3	Moyenne
Lieu jaune	<i>Pollachius pollachius</i>	Faible	Moyen	T3	Moyenne
Saumon atlantique	<i>Salmo salar</i>	Faible	Faible	T3	Moyenne
Truite de mer	<i>Salmo trutta trutta</i>	Faible	Faible	T3	Moyenne
GROUPE T4 – Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne					
Sprat	<i>Sprattus sprattus</i>	Faible	Moyen	T4	Forte
Sardine	<i>Sardina pilchardus</i>	Faible	Moyen	T4	Forte
Grande alose	<i>Alosa alosa</i>	Faible	Moyen	T4	Forte

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Nom commun	Nom latin	Enjeu AE immédiate	Enjeu AE élargie	Type d'audition	Sensibilité à l'échelle de l'AE élargie
Alose feinte	<i>Alosa fallax</i>	Faible	Faible	T4	Moyenne

L'enjeu prend en compte le statut de conservation de l'espèce, sa valeur économique et son abondance à l'échelle de l'aire d'étude considérée.

Des seuils de tolérance au bruit (seuils TTS) ont été proposés ces dernières années pour les poissons (tableau 16). Cependant, ces seuils sont à prendre avec précaution dans la mesure où ils se basent sur des études menées en laboratoire et/ou en milieu confiné et dont les résultats ne reflètent pas forcément la réalité (Popper & Hawkins, 2019). En l'absence de données plus adaptées, ces seuils ont été retenus pour la présente étude.

Aucun cas de PTS n'a, à l'heure actuelle, été rapporté chez les poissons et aucun seuil PTS n'a été proposé pour le moment. Le tableau 16 présente également, à titre indicatif, des seuils de mortalité ou de blessure potentiellement mortelle.

Tableau 15 : Seuils de perte temporaire (TTS) d'audition pour chaque groupe de poissons exposé à un bruit impulsionnel de type pile driving ou à un bruit continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulés (SEL_{cum}) sont exprimés en dB re $1 \mu Pa^2 s^{-1}$. Les niveaux de pression sonore (SPL_{pk} et SPL_{RMS}) sont exprimés en dB re $1 \mu Pa$ (d'après Popper & Hawkins, 2019).

Groupe d'audition	Bruit impulsionnel (type battage de pieux)		Bruit continu	
	TTS	Mortalité/ Blessure mortelle	TTS	Mortalité/ Blessure mortelle
Poissons dépourvus de vessie natatoire	$>>186$ dB SEL_{cum}	>219 dB SEL_{cum} >213 dB SPL_{pk}	Risque faible à modéré	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire non-impliquée dans l'audition	>186 dB SEL_{cum}	210 dB SEL_{cum} >207 dB SPL_{pk}	Risque faible à modéré	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition	186 dB SEL_{cum}	207 dB SEL_{cum} >207 dB SPL_{pk}	158 dB SPL_{RMS} pour 12 h	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	186 dB SEL_{cum}	<207 dB SEL_{cum} <213 dB SPL_{pk}	158 dB SPL_{RMS} pour 12 h	Risque faible

3.1.1.2. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des invertébrés

Il existe très peu d'information concernant la sensibilité auditive des invertébrés. Les mollusques bivalves seraient capables de percevoir les sons basse fréquence (<1 kHz) de l'ordre de 120 dB re $1 \mu Pa$ (Charifi *et al.*, 2017), mais ces résultats demandent à être étayés par d'autres études.

L'audition des céphalopodes est plus documentée. Ces mollusques sont capables de percevoir les sons basse fréquence ($50-1500$ Hz) à des niveaux de l'ordre de $120-130$ dB re $1 \mu Pa$ également (Kaifu *et al.*, 2008 ; Mooney *et al.*, 2012).

La sensibilité auditive des crustacés est comparable à celle des céphalopodes. Certaines espèces de crevettes seraient toutefois capables de percevoir les sons jusqu'à 3000 Hz (Edmonds *et al.*, 2016).

La sensibilité auditive des invertébrés présents sur l'aire d'étude est résumée dans le tableau 33 ci-dessous.

Tableau 33 : Sensibilité auditive des invertébrés présents sur l'aire d'étude.

	Espèce/groupe d'espèces	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Céphalopode	Calamar	$50-1500$ Hz	$125-130$ dB re $1 \mu Pa$ autour de 600 Hz

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

	Poulpe commun		
	Seiche commune		
Bivalves	Coquille Saint-Jacques	10-1000 Hz	~120 dB re 1 μ Pa pour les fréquences < 200 Hz
	Mactre épaisse		
	Moule commune		
Crustacés	Araignée de mer	50-3000 Hz	< 110 dB re 1 μ Pa entre 100 et 300 Hz
	Crevette bouquet		
	Étrille		
	Tourteau dormeur		
	Homard		

Il n'existe pas de seuil de tolérance au bruit établis pour les invertébrés marins à l'heure actuelle. Pour cette étude, considérant leur affinité pour les basses fréquences et l'absence de cavité gazeuse chez ces espèces, nous avons appliqué aux invertébrés les seuils de tolérance définis pour les poissons dépourvus de vessie natatoire.

3.1.1.3. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des plongeurs

Dans l'air, l'humain est capable de percevoir les sons compris entre 20 Hz et 20 kHz. Cependant, l'audition dans l'eau diffère fortement de l'audition dans l'air, et la perception du son sous l'eau par l'Homme est encore assez mal connue. Si la plage d'audition dans l'eau est sensiblement identique à celle perceptible dans l'air, les seuils d'audition sont plus élevés de 35 à 40 dB et la sensibilité maximale est décalée vers les basses fréquences (avec un maximum autour de 800 Hz). Ainsi, l'oreille humaine est capable de percevoir des sons sous-marins de l'ordre de 60 dB re 1 μ Pa entre 600 et 1000 Hz (tableau 34). Cependant, le port d'une cagoule en néoprène peut fortement atténuer la perception du son par les plongeurs (Anthony *et al.*, 2009).

Tableau 34 : Sensibilité auditive des plongeurs (d'après Parvin *et al.*, 2002).

	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Plongeurs	20 Hz-20 kHz	<60 dB re 1 μ Pa entre 600 et 1000 Hz

Un seuil TTS pour la plongée récréative a été fixé à un niveau d'exposition sonore de 176 dB ref 1 μ Pa².s pour un plongeur sans cagoule exposé au bruit pendant 15 min (Parvin *et al.*, 2002 - tableau 35). Ce seuil entraîne une perte d'audition temporaire de 10 dB. Pour les plongeurs équipés de cagoule en néoprène, la tolérance au bruit est plus élevée (10 à 15 dB supérieure).

Tableau 35 : Seuils de perte temporaire (TTS) d'audition pour les plongeurs sans cagoule. Les niveaux de pressions sonores (SPL) sont exprimés en dB re 1 μ Pa (d'après Parvin *et al.* 2002).

	Seuil TTS (perte de 10 dB d'audition)
Plongeurs	176 dB SPL (15 min d'exposition en continu)

3.2. Les espèces marines potentiellement présentes sur la zone d'étude et leur sensibilité auditive

Les groupes d'audition ainsi que les capacités auditives (plage d'audition et sensibilité maximale) propres à chacune de ces espèces retenues pour cette étude sont résumés dans le tableau 17 ci-dessous.

Tableau 16 : Groupes d'audition et capacités auditives des mammifères marins retenus pour l'étude (d'après Southall et al., 2019).

Espèce	Groupe d'audition	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Petit rorqual	Cétacés basse fréquence (LF)	10 Hz-30 kHz	~60 dB re 1 µPa entre 1 et 8 kHz
Dauphin de Risso	Cétacés haute fréquence (HF)	100 Hz-180 kHz	~60 dB re 1 µPa entre 10 et 100 kHz
Dauphin commun			
Grand dauphin			
Dauphin bleu et blanc			
Globicéphale noir			
Marsouin commun	Cétacés très haute fréquence (VHF)	100 Hz-180 kHz	<50 dB re 1 µPa autour de 100 kHz
Phoque gris	Phocidés dans l'eau (PCW)	100 Hz-100 kHz	<60 dB re 1 µPa entre 2 et 30 kHz

Les capacités auditives des tortues marines (plage d'audition et sensibilité maximale) retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau 18 ci-dessous

Tableau 17 : Groupes d'audition et capacités auditives des espèces de tortues présentes aux alentours de la Baie du Pouliguen (d'après Southall et al., 2019).

Groupe d'audition	Espèces	Plage d'audition	Sensibilité maximum	Seuil d'audition minimum
Chéloniens dans l'eau (CHW)	Tortue caouanne (<i>Caretta caretta</i>) Tortue luth (<i>Dermochelys coriacea</i>)	30 Hz-2000 Hz	200 à 600 Hz	~ 100 dB re 1 µPa

4. Traitement des données en acoustique sous-marine

4.1. Logiciel de traitement des données en acoustique sous-marine

Pour le traitement des données collectées, CREOCEAN utilise l'outil SEAc. SEAc est une solution innovante développée dans le cadre de ses programmes de R&D pour répondre aux problématiques des études en acoustique sous-marine. Cet outil intègre un logiciel d'analyse spectrale en bande fine, *Surveillance*, et un logiciel de modélisation (figure 7).

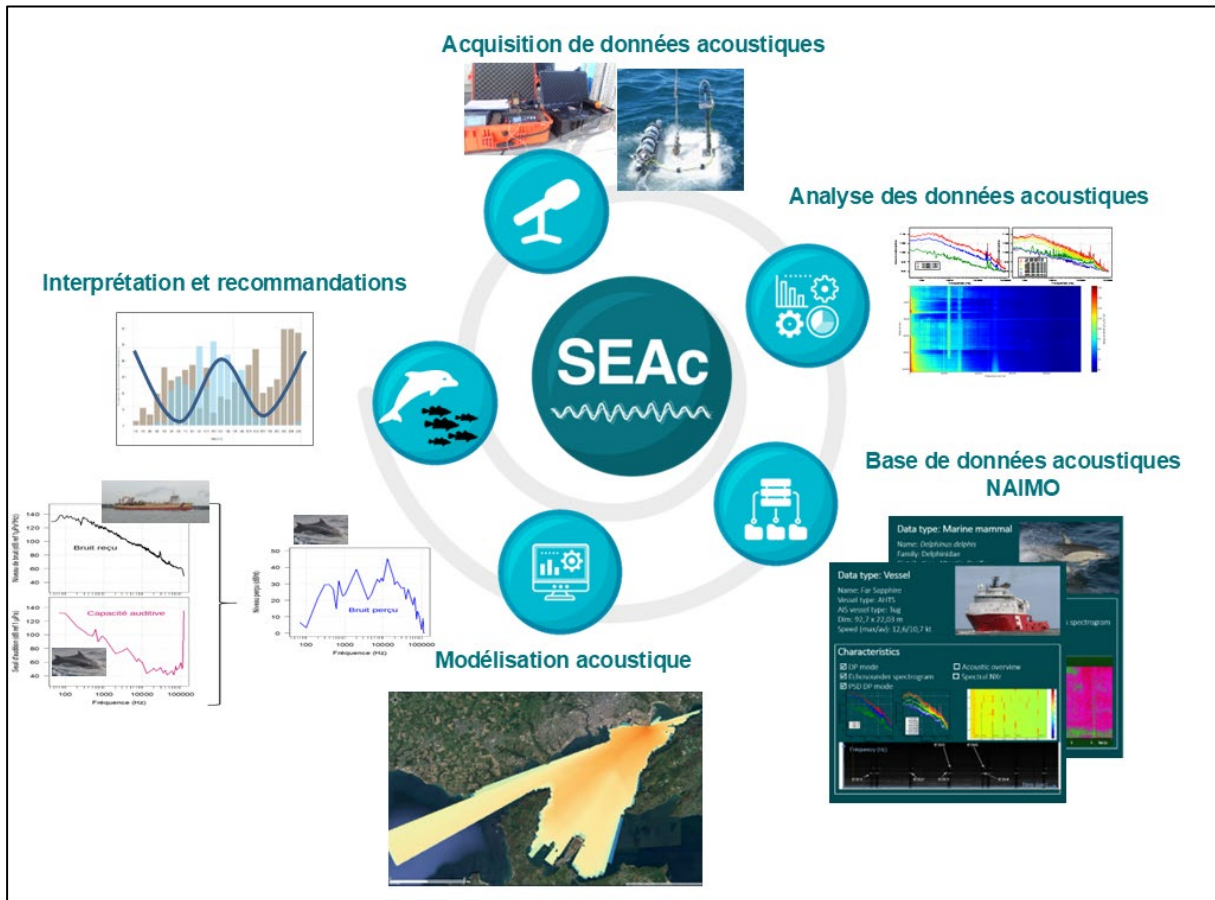
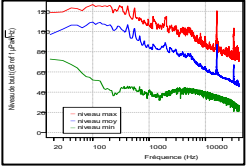
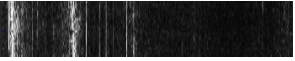

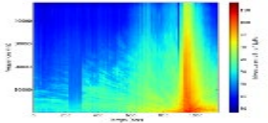


Figure 7. SEAc, solution innovante développée par CREOCEAN pour la réalisation d'étude en acoustique sous-marine.

Les différents traitements en analyse spectrale appliqués aux données acoustiques sont décrits dans le tableau 19 ci-dessous.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 18 : Traitements en analyse spectrale appliqués à l'étude.

Type de traitement	Objectif	Indicateur acoustique établi	Données en sortie de traitement	Source sonore ciblée	Remarque
<p style="text-align: center;">DSP</p> 	Etablir un spectre acoustique représentatif d'une situation acoustique environnementale	Mesure des indicateurs de bruit et de l'émergence sonore	Spectre de bruit par tiers d'octave / percentiles / min,max,moy (en dB ref 1µPa/√Hz) / bande fine (en dB ref 1µPa²/Hz)	Tout type de source impulsionnelle ou continue	Couplage indispensable avec le lofargramme pour identifier les périodes représentatives des phénomènes à caractériser
<p style="text-align: center;">Lofargramme</p> 	Analyse acoustique permettant d'identifier les sources sonores caractéristiques d'une ambiance sonore	Relevé fréquentiel du spectre acoustique	Synthèse de l'ensemble des sources sonores constituant le spectre acoustique.	Privilégie les sources continues Permet la classification des sources sonores constituant un spectre acoustique.	Outil essentiel dans la classification acoustique car il permet la caractérisation fréquentielle des sources sonores constituant le bruit ambiant C'est le seul outil d'analyse qui permet la séparation des sources sonores
<p style="text-align: center;">DEMON</p> 	Démodulation de l'amplitude d'un signal sonore	Relevé fréquentiel des fondamentaux de rotation de machine tournante	Identification des caractéristiques spectrales des sources sonores prédominantes	Privilégie les sources sonores continues	Outil essentiel dans l'imagerie acoustique pour identifier les fondamentaux de machines tournantes et ainsi caractériser les spectres acoustiques
<p style="text-align: center;">Spectrogramme</p> 	Classifier les sources sonores dites transitoires ou impulsionnelles	Caractéristique fréquentielle d'une source sonore	Description des phénomènes acoustiques transitoires / impulsionnels	Privilégie les sources sonores impulsionnelles ou transitoires	Détermination des caractéristiques de sources sonores de type impulsionnel et/ou transitoire.

5. Particularités acoustiques liées à un environnement portuaire

Le paysage sonore sous-marin dans un contexte portuaire est très spécifique dans sa composition d'une part et dans sa répartition spatiale d'autre part.

Il est composé dans sa contribution anthropique par le bruit rayonné des navires transitant dans et à proximité immédiate du port et présente ainsi une forte hétérogénéité spatiale. La contribution météoro-océanique est localement importante par les vagues et le ressac sur la côte dans le cas de bassin d'échouage en particulier. Enfin une contribution de la biophonie au travers de la faune benthique est attendue ponctuellement sur des sites d'intérêt écologique ou à proximité des ouvrages maritimes.

La complexité dans l'évaluation du paysage acoustique et de son intensité sonore réside dans la spécificité des ouvrages maritimes comme les digues ou bassins qui modifient la propagation des ondes sonores et donc influent sur l'anisotropie du bruit.

De ce fait les modèles de prédiction du bruit ambiant sous-marin décrits par Wenz (1962), Ross (1987) ou Knudsen (1987) sont difficilement applicables dans l'aire d'étude immédiate que constitue le périmètre du port de Pornichet. Les raisons sont directement liées :

- ▶ Aux infrastructures portuaires qui modifient :
 - Les relations entre l'état de mer ou de vent avec le niveau de bruit ambiant sous-marin. Les modèles prédictifs sont applicables aux milieux ouverts et non aux milieux fermés ou semi-fermés par des ouvrages maritimes ;
 - La propagation des ondes sonores par les phénomènes de barrières acoustiques ;
- ▶ A l'évolution de la bathymétrie sur la zone d'étude qui est marquée par une très faible hauteur d'eau modulée par le marnage. Les modèles prédictifs considèrent le petit fond pour une bathymétrie inférieure à 100 mètres ou à 200 mètres selon les modèles ;
- ▶ Aux phénomènes ponctuels tels que la contribution de la houle, le déferlement des vagues et du ressac sur la côte (Deane, 1999), qui ne sont pas considérés dans les modèles prédictifs ;
- ▶ A l'évolution des pertes acoustiques sur l'aire d'étude immédiate, fortement conditionnée par le marnage. Les variations de la hauteur d'eau engendrent une modification des conditions de propagation des ondes sonores et influent sur la fréquence de coupure du milieu.

5.1. Analyse de l'ambiance en acoustique sous-marine d'un port

Bien qu'aucune mesure in situ n'a été réalisée dans le cadre de cet état initial, l'ambiance sonore sous-marine attendue sur les ports de Pornichet repose sur les retours d'expérience des suivis acoustiques précédemment réalisés. Ainsi plusieurs suivis acoustiques ont été réalisés par CREOCEAN dans le cadre de projet d'aménagement portuaire, avec une grande diversité en termes de dimensionnement des ouvrages portuaires et de localisation géographique :

- ▶ Ports de commerce (PALR, Haropa Port le Havre -PNA Caen Ouistreham), de pêche (La Cotinière) et de plaisance – (Marina Baie des Anges, Cannes) ;
- ▶ Façade Atlantique, Manche et en Méditerranée.

Les mesures acoustiques réalisées ont permis de mettre en évidence :

- ▶ L'évolution du niveau de bruit ambiant mesuré, en fonction du temps, au point de mouillage du dispositif acoustique ;
- ▶ La contribution acoustique des différentes composantes au bruit ambiant sous-marin ;
- ▶ Les spécificités géo acoustiques de la zone d'étude et leurs incidences sur la propagation des ondes sonores.

5.1.1. Suivis acoustiques portuaires

L'ambiance sonore sous-marine mesurée dans une enceinte portuaire varie en fonction du type de port : de plaisance, de pêche ou de commerce. Ainsi en fonction des types de port et de la typologie des navires qui transitent, une variation plus ou moins marquée du niveau de bruit est notamment observée en fonction du cycle nycthéral. Ces mouvements de navires sont donc principalement observés :

- De jour dans le cas de ports de plaisance (figure 8) ce qui se rapproche de l'ambiance sonore attendue dans le bassin à flot ;
- En lien avec les cycles de marée dans le cas des ports de pêche (figure 9) ;
- Sur toute la journée dans le cas des grands ports de commerce (figure 10).

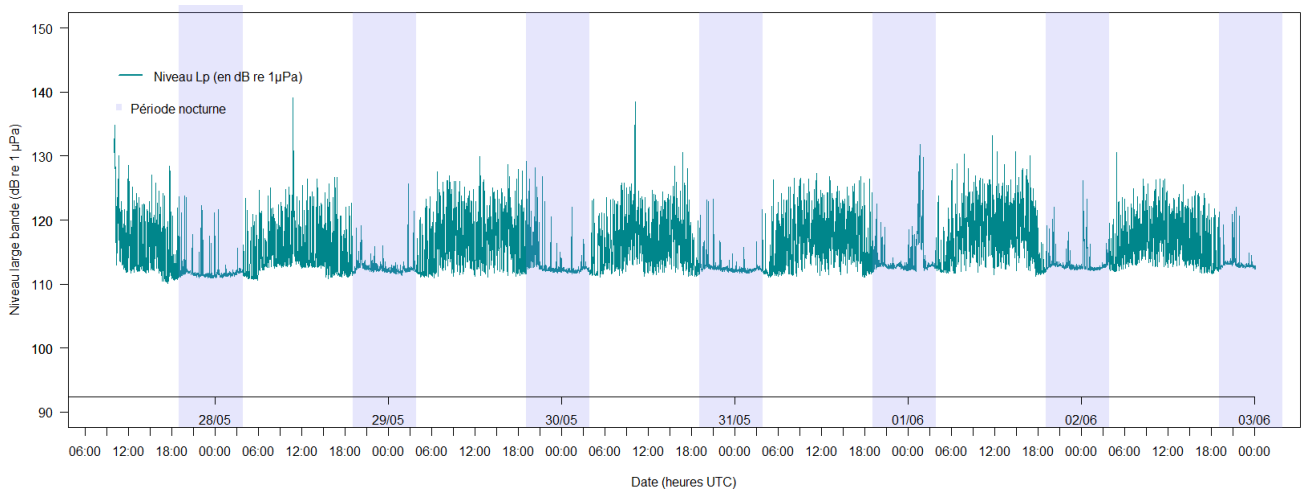


Figure 8 : Evolution du Lp (en dB re 1 µPa) par l'enregistreur entre le 27/05/2025 à 10h00 UTC et le 03/06/2025 à 00h00 UTC – Bande passante 7Hz-100 kHz. Bathymétrie moyenne au point de mesure :12 mètres. Suivi acoustique dans le port de Cannes entre le 27/05/2025 à 10h00 UTC et le 03/06/2025 à 00h00 UTC (CREOCEAN, 2025).

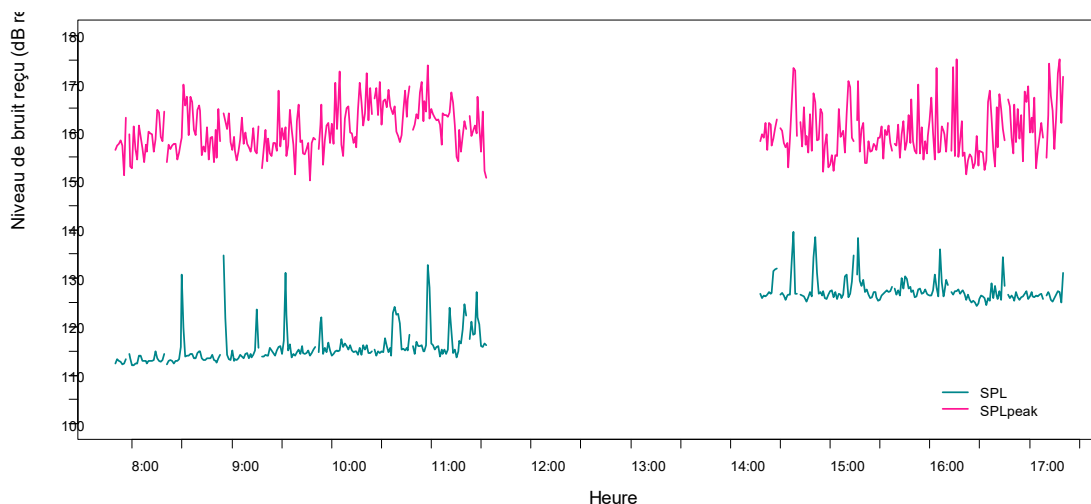


Figure 9 : Evolution du Lp ou SPL (en dB re 1 µPa) et du Lp peak ou SPL peak par l'enregistreur OSEAN le 12/09/2019 à 07h48 17h17 heure locale – Bande passante 7Hz-100 kHz. Suivi acoustique devant le port de La Cotinière entre le 12/09/2025 (Néréis environnement, 2019).

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

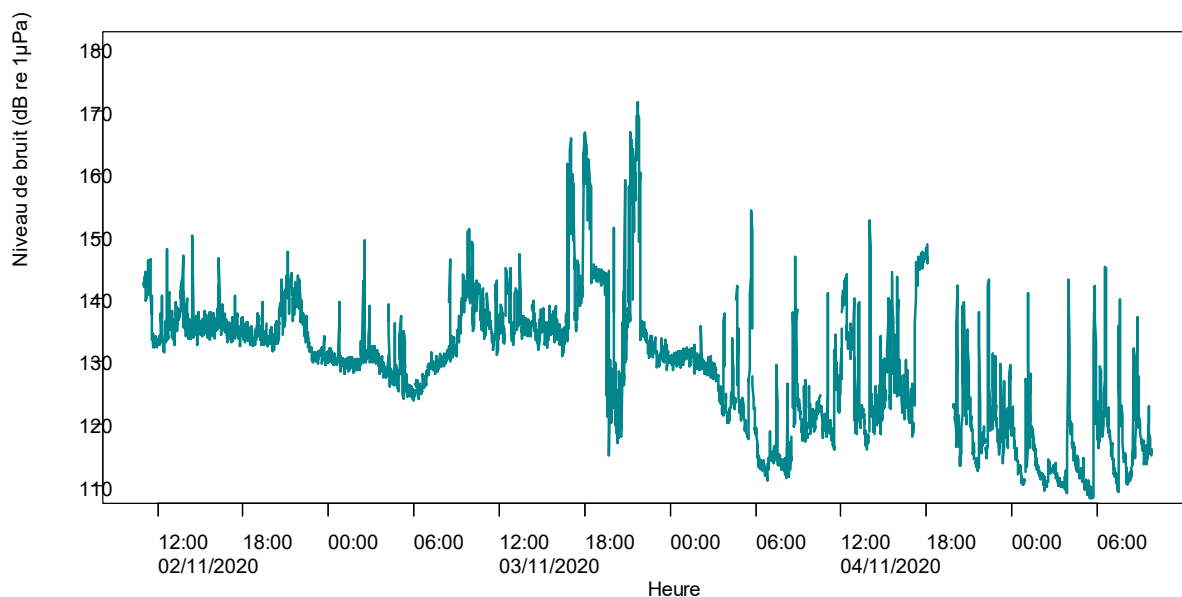


Figure 10 : Evolution du Lp (en dB re 1 µPa) par l'enregistreur entre le 02/11/2020 à 10h00 et le 05/11/2020 à 09h50 – Bande passante 7Hz-100 kHz. Suivi acoustique réalisé dans le bassin T. Ducrocq de Haropa Port du Havre (Néréis environnement, 2020).

De plus les conditions météo-océaniques ont une incidence sur la densité de mouvements portuaires de façon plus directe sur les ports de plaisance, par le type de navire associé.

Enfin une saisonnalité est observée en priorité sur les ports de plaisance avec une densité de mouvements de navire plus importante en période estivale, durant les vacances scolaires ou le weekend (Néréis environnement, 2024).

Le tableau 20 présente une synthèse des indicateurs acoustiques associés aux différentes périodes de suivi acoustique de cette étude.

Tableau 19 : Synthèse des différents indicateurs acoustiques mesurés.

Type de port	Contraintes d'accès liée à la marée	Variation de hauteur d'eau au point de mouillage de l'enregistreur durant les mesures	Niveau Lp moyen (en dB re 1µPa) - bande 7 Hz – 100 kHz	Lp peak (en dB re 1µPa) – bande 7 Hz – 100 kHz
Port de plaisance (Port de Cannes)	non	12 m	117,7 dB	141,9 dB
Port de pêche (Port de la Cotinière)	oui	Entre 3,5 mètres (à 08h00) et 6,1 mètres (à 14h00)	Entre 115,2 dB (période de 07h48 à 11h23) et 125,8 dB (période de 14h18 et 17h17)	Entre 160,4 dB (période de 07h48 à 11h23) et 160,5 dB (période de 14h18 et 17h17) sur les valeurs maximales
Port de commerce	non	10,6 mètres en moyenne (min 7,29 mètres au	129,2 dB	171,5

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

(Haropa Port le Havre)		minimum – 13,37 mètres au maximum)		
------------------------	--	--	--	--

5.1.2. Cas spécifique du port d'échouage

Dans le cas spécifique du port d'échouage, l'ambiance sonore à l'intérieur de ce bassin est conditionnée par l'évolution de la bathymétrie donc directement corrélée au cycle de marée. Cela signifie que la propagation des ondes acoustiques et donc l'évolution du paysage sonore varient avec le cycle de marée. L'incidence acoustique de l'activité du bassin d'échouage est maximale à l'étalement de pleine mer ou l'activité nautique est privilégiée. A l'étalement de pleine mer la hauteur d'eau étant maximale, la propagation des ondes sonores sera privilégiée avec notamment une fréquence de coupure plus faible que celle attendue à l'étalement de basse mer.

5.1.3. Classification des sources sonores anthropiques attendues en phase d'exploitation

La majorité des sources sonores anthropiques associées au paysage sonore sous-marin, en phase d'exploitation du port, est directement liée aux navires de plaisance navigant avec un moteur de propulsion. Le bruit généré est de type continu avec une large plage fréquentielle de signature. Les niveaux sont compris entre 120 et 190 dB re 1 µPa/√Hz @1m, avec un maximum d'énergie à des fréquences inférieures à 2000 Hz (dans le cas spécifique des jet-skis). Plus généralement la plage de fréquence est comprise entre 100 Hz et 1000 Hz.

Tableau 20 : Caractéristiques acoustiques des embarcations motorisées à usage récréatif (MTES, 2020).

Type d'engin	Taille	Motorisation	Vitesse	Niveau $L_{p,rms}$ (en dB re 1 µPa/√Hz @ 1 m)	Fréquences de max. d'énergies	Référence
Zodiac	5 m	25 CV	-	152	100 et 1000 Hz	Richardson et al., 1995
Zodiac	-	2x175 CV	30 nds	169	100 et 1000 Hz	Erbe, 2011
Zodiac	-	2x175 CV	5 nds	147	100 et 1000 Hz	Erbe, 2011
Hors-bord	7 m	2x80 CV	-	156	100 et 1000 Hz	Richardson et al., 1995
Jet-ski	-	1235 cm ³	35 nds	Entre 120 et 190	< 2000 Hz	Miksis-Olds et al., 2007

5.1.4. Ambiance sonore sous-marine sur les ports de Pornichet

6. Modélisation en acoustique sous-marine des travaux d'aménagement

6.1. Logiciel de modélisation

Un logiciel de propagation des ondes sonores a été utilisé pour modéliser le bruit ambiant sur la zone d'étude, sur la base des données disponibles. Les modèles réalisés répondent aux critères définis par le Laboratoire CMST (Centre for Marine Science and Technology) de l'Université de Curtin (Perth, Australie) et décrits par Jensen *et al.*, 2011. Les algorithmes de modélisation utilisés sont définis en fonction des caractéristiques géoacoustiques du milieu et des caractéristiques acoustiques des sources sonores (algorithmes adaptés notamment à la hauteur d'eau et à la nature du fond).

6.1.1. Algorithmes de propagation sonore utilisé en fonction des caractéristiques de la zone d'étude

Au regard des spécificités de la zone d'étude — notamment le petit fond (profondeurs généralement inférieures à quelques dizaines de mètres) et une bathymétrie variable —, différents algorithmes de propagation sonore ont été envisagés pour modéliser le comportement des ondes dans ce milieu :

- ▶ Théorie des rayons sonores classique : Basée sur les algorithmes du modèle de propagation KRAKEN, utilisés pour les environnements marins par petit fond et/ou pour les basses fréquences des spectres acoustiques à modéliser.
- ▶ Méthode par approximation parabolique : Basée sur les algorithmes RAM/RAMS, utilisés dans le cadre d'un environnement marin à petit fond.
- ▶ Méthode de tracé des rayons sonores : Basée sur les algorithmes BELLHOP, utilisés pour modéliser la propagation acoustique de sources sonores en milieu océanique par grand fond.

Dans le cadre de la présente étude, l'ajustement du modèle acoustique s'est appuyé sur des algorithmes décrits par Jensen *et al.* (2011). Ces algorithmes ont été spécifiquement adaptés aux propriétés géo acoustiques locales, en tenant compte des recommandations de Farcas *et al.* (2016) afin de garantir une modélisation cohérente, en particulier sur les interactions entre les ondes acoustiques et le milieu marin. Cette approche, réalisée en prenant en considération la morphologie sous-marine et les caractéristiques sédimentaires de la zone, assure une représentation fiable de la propagation sonore, tant en termes de distance couverte que d'atténuation des ondes acoustiques.

6.1.2. Données d'entrée du modèle

Les données utilisées en entrée de modèle sont présentées dans le tableau 22. Ces informations proviennent de sources bibliographiques et de données internes à CREOCEAN.

Tableau 21 : Données d'entrée du scénario de propagation et leurs sources.

Type de données	Format	Source
Nature du substrat	Cartographie Rapport d'étude géotechnique	Charier - Fondouest
Bathymétrie moyenne	Carte en xyz compatible QGIS	Données SHOM Litto3D®

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Bathycélérimétrie	Profil CTD	CREOCEAN
Descriptif des ateliers du chantier	Données sur les opérations : types d'engin, planning des opérations, positions des ateliers	Équipe technique / Suite analyse des données acoustiques collectées in situ
Conditions météorologiques et océaniques	CSV	SHOM
Audiogramme des espèces à enjeux	Courbe niveau/fréquence	Southall <i>et al.</i> , 2019 - NMFS, 2023 – NMFS 2024
Seuils de risque de perte d'audition	Niveaux en dB pondérés et non pondérés	Southall <i>et al.</i> , 2019 - NMFS, 2023 – NMFS, 2024
Seuils acoustiques	Niveaux en dB pondérés et non pondérés	Arrêté préfectoral

6.2. Définition des scénarios acoustiques

Le projet d'aménagement comprend dans sa composante maritime :

- ▶ La modernisation des bassins portuaires (à flot et à échouage) ;
- ▶ Le renforcement de la digue de protection du port d'échouage ;
- ▶ L'extension du terre-plein central du port à flot ;
- ▶ La réparation de la darse.

Les principaux ateliers de modernisation du bassin d'échouage consistent au :

- ▶ Le renforcement de la digue Nord de protection du bassin ;
- ▶ La réalisation d'un épi de protection (dans le prolongement du terre-plein centrale du port à flot) de protection de la passe d'entrée du bassin d'échouage ;
- ▶ La mise en œuvre des appontements du bassin d'échouage.

A travers ces travaux d'aménagement, plusieurs scénarios acoustiques ont été définis. Ces travaux se veulent représentatifs de l'empreinte sonore sous-marine générée, par la traduction en acoustique de la réalisation technique des ateliers considérés. 4 ateliers ont ainsi été retenus concernant :

- ▶ Une opération de terrassement au niveau du musoir de la digue Nord de protection du bassin ;
- ▶ Une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue, dans le prolongement de l'extension du terre-plein central du port à flot ;
- ▶ Une opération d'installation de pieu n°PA13 ;
- ▶ Une opération d'installation de pieux PH01

Le marnage a été pris en compte dans la modélisation, en se basant sur les contraintes techniques exprimées par Charier concernant les hauteurs d'eau minimales exigées pour la réalisation des travaux maritimes.

Enfin les scénarios acoustiques simulés prennent en compte une durée effective de l'atelier modélisé, basée sur les suivis de chantiers similaires.

6.2.1. Travaux associés à l'épi de protection – Extension du terre-plein

L'étude considèrera dans sa phase maritime les opérations de pose des enrochements et les opérations de terrassement sur l'interface maritime au niveau de l'épi de protection.

6.2.1.1. Gabarits associés aux opérations de pose des enrochements et de terrassement

Le chantier associé à l'épi de protection et à l'extension du terre-plein est situé en bordure directe du chenal d'accès au port. Des mesures en acoustique sous-marine sur un chantier de terrassement d'une digue portuaire ont été réalisées par NEREIS Environnement (2019-2020) à une distance de 76 mètres au plus près du chantier (avec un niveau mesuré Lp peak à 129,8 dB re 1µPa). Le niveau d'émission maximal associé à cette opération est estimé à 161,7 dB re 1µPa @1m (figure 11).

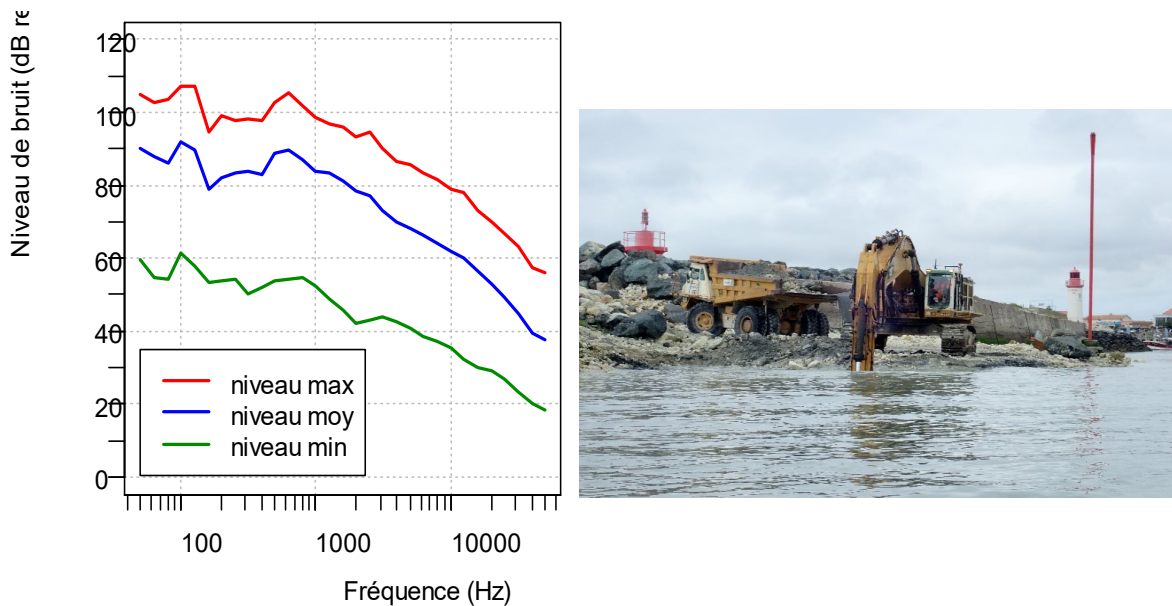


Figure 11 : Spectres acoustiques liés aux opérations de terrassement sur le chantier de la digue. Distribution par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche). Niveaux mesurés à 76 mètres du chantier (source Néréis Environnement 2019 -2022).

Le tableau 25 suivant présente une synthèse spectrale des opérations de terrassement observée sur un chantier portuaire (NEREIS Environnement, 2019)

Un scénario maximaliste sur une durée de 1 heure en continu à une même position a été considéré pour chaque atelier de pose des enrochements et de terrassement.

Tableau 22. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de terrassement.

Source	Plage de fréquence	Fréquences prédominantes	Durée d'impulsion observée	Niveau d'émission max large bande
Terrassement de la digue (NEREIS Environnement 2019)	50 Hz et 2000 Hz	300 Hz	Variable 1,3 s et 4 s	161,7 dB re 1µPa@1m

6.2.2. Travaux de renforcement des digues Nord et d'extension du terre-plein

Les opérations de renforcement de la digue Nord seront considérées au niveau du musoir compte tenu des données bathymétriques à cet emplacement. De même une position est proposée au droit de la digue associée à l'extension du terre-plein du bassin à flot.

6.2.2.1. Gabarits associés aux opérations de pose des enrochements et de terrassement

Ces travaux sont considérés sur le même principe que ceux associés à l'épi de protection et à l'extension du terre-plein (§5.2.1.1).

6.2.3. Travaux de pose de pieux de guidage et pontons

Cette étude ne considère que la phase d'installation des pieux de guidage de la zone du bassin qui seront réalisés par voie maritime avec :

- ▶ La mise en station de l'atelier nautique depuis le coffre d'amarrage du ponton à l'extérieur du port ;
- ▶ Le travail sur la période d'étape proche de la pleine mer ;
- ▶ Le repli de l'atelier à marée descendante.

Les travaux sont limités aux périodes de marée entraînant un niveau d'eau autour d'une hauteur d'eau à +4,4 CM.

Les opérations de d'installation des pieux de guidage seront réalisées selon la méthode Dinardaise, présentées dans la figure 12. Cette méthode consiste à pré-forer le rocher grâce à l'utilisation d'un mat de forage breveté.

Ainsi la procédure de forage à la Dinardaise repose sur :

- ▶ Une première phase de vibrofonçage (étape 1) ;
- ▶ L'emploi de la Dinardaise pour une phase de forage avec injection d'air sous pression (étapes 2 et 3) ;
- ▶ Une phase de battage au marteau hydraulique (étape 4).

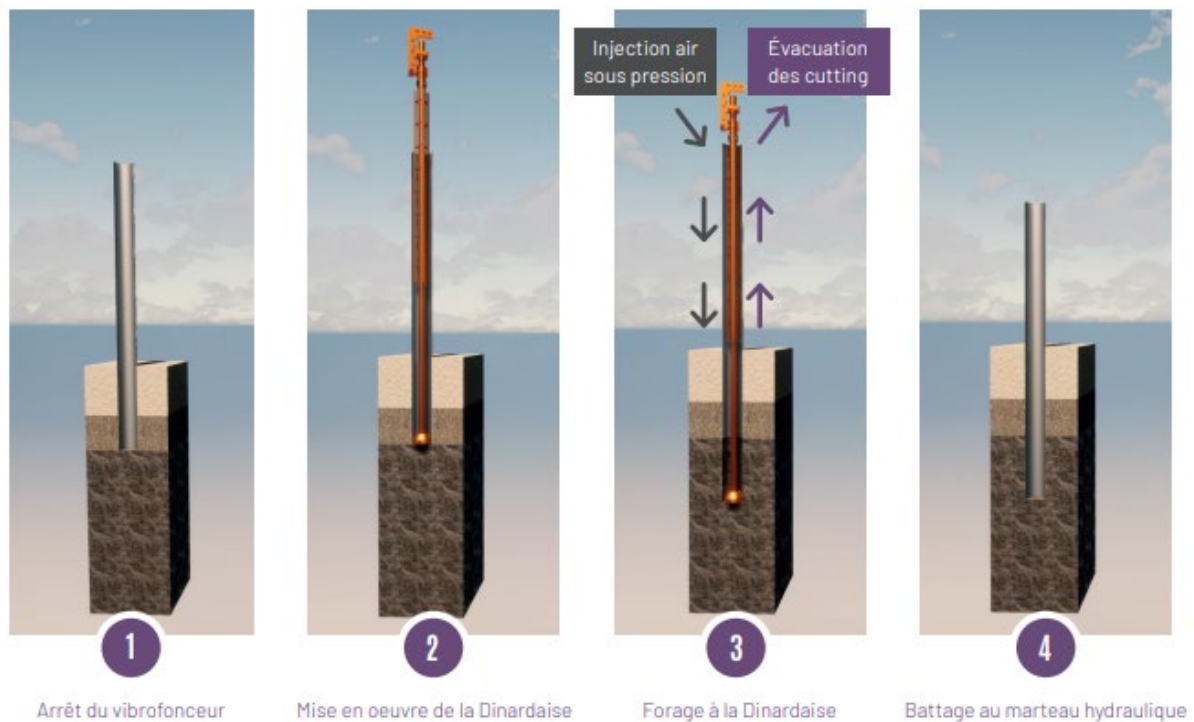


Figure 12. Procédure de forage à la Dinardaise (d’après Charier).

6.2.3.1. Gabarit acoustique associé à la phase de vibrofonçage

Le gabarit retenu et proposé pour cette phase est associé à une opération de vibrofonçage d’un pieu d’un diamètre de 711 mm avec un vibrateur de type 30 H1. L’atelier de vibrofonçage des pieux est simulé en considérant l’emploi d’un vibrateur type 30H1. Les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau 24.

Tableau 23. Caractéristiques du vibrateur 30H1.

Fréquence max d’oscillation	1680 rpm
Force centrifuge max.	946 kN
Poids du vibrateur	2350 kg
Poids total	3900 kg
Diamètre du pieu ciblé	Min 250 mm – max 1950 mm

Un spectre acoustique associé à la phase de vibrofonçage est proposé en fonction du diamètre du pieu (figure 13). Ce gabarit est issu de suivi de chantiers durant lesquels le monitoring acoustique a permis d’identifier les gabarits acoustiques associés aux opérations de vibrofonçage avec des équipements similaires au vibrateur 30H1.

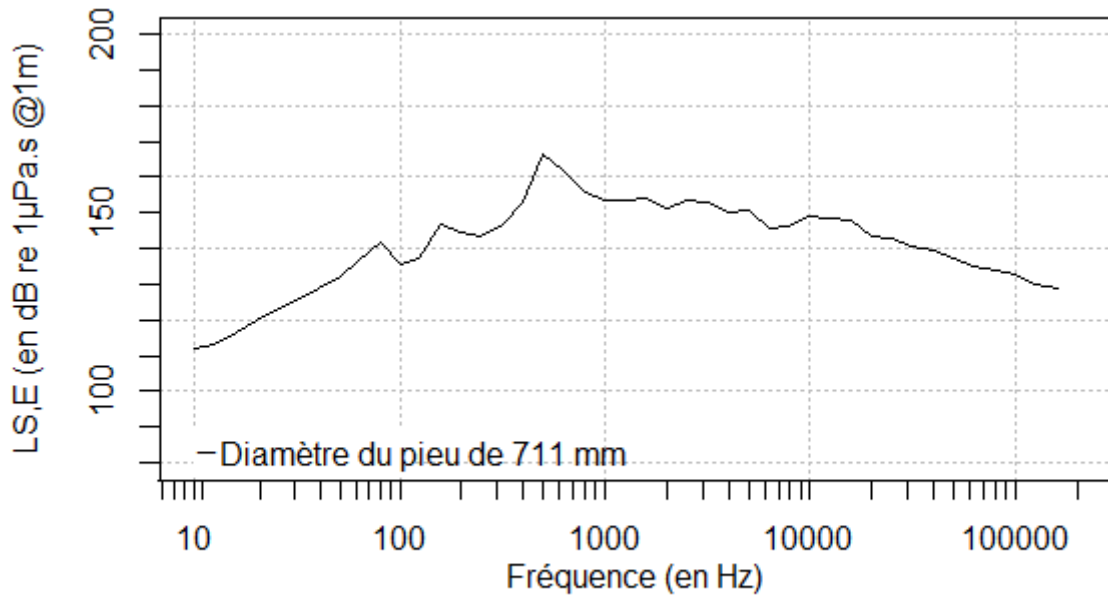


Figure 13. Gabarits acoustiques (en dB re 1µPa.s @1m) associés à un atelier de vibrofonçage en fonction du diamètre du pieu (d'après une compilation de données issues des études de Créocéan).

Un scénario maximaliste sur une durée de 45 minutes a été considéré pour chaque atelier de vibrofonçage.

6.2.3.2. Gabarit acoustique associé à la phase de forage

L'atelier de forage a été simulé en considérant une phase de forage au symétrix, procédé techniquement proche de la Dinardaise dans sa phase de forage. La figure 14 présente le gabarit retenu pour cette phase.

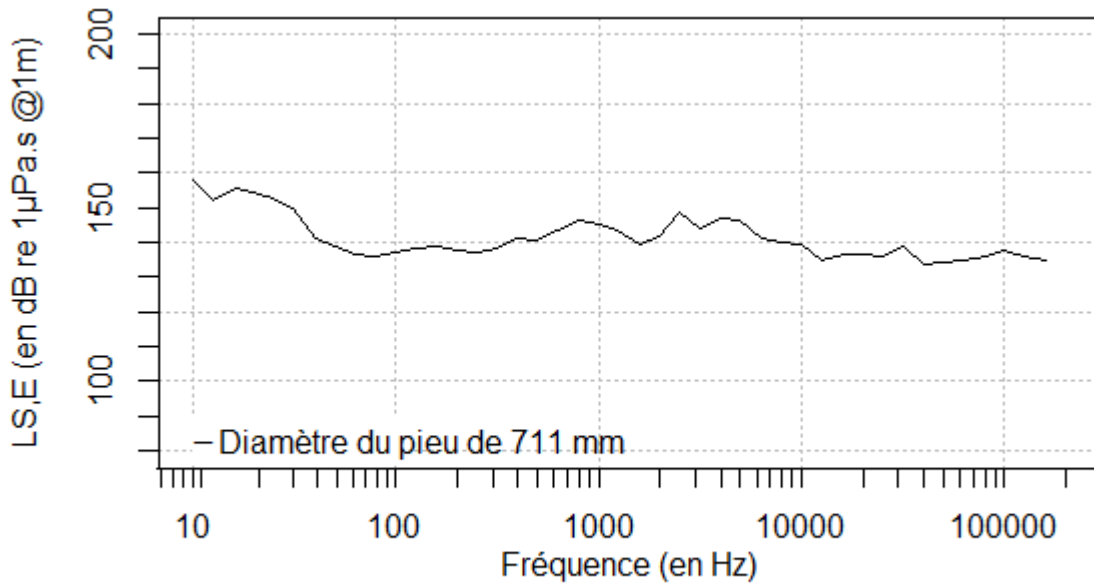


Figure 14. Gabarits acoustiques (en dB re 1µPa².s @1m) associés à un atelier de forage en fonction du diamètre du pieu (d’après une compilation de données issues des études de Créocéan).

Un scénario maximaliste sur une durée maximale de 30 minutes de forage a été considéré pour chaque atelier de forage.

6.2.3.3. Gabarit acoustique associé à la phase de battage

Les gabarits acoustiques associés à une opération de battage de pieu ont été définis à partir d’un modèle simplifié mettant en relation le niveau d’émission estimé à 1 mètre de la source d’une opération de battage de pieu, avec le diamètre du pieu en mètre. Le modèle est dérivé de celui proposé par Bellmann *et al.* (2014). La répartition de l’énergie dans le spectre acoustique associé est basée sur les données fournies par Bellman *et al.* (2020) qui proposent en fonction du diamètre du pieu enfoncé un ajustement des bandes de tiers d’octave présentant le maximum d’énergie.

Le marteau utilisé est un DELMAG type 30-32. Les principales caractéristiques sont présentées ci-dessous.

Tableau 24. Caractéristiques du DELMAG type 30-32.

Poids du marteau à l’impact	3000 kg
Cadence / nbre de coups à la minute	Entre 36 et 52 en fonction de l’énergie
Energie associé à un coup de marteau	Entre 48 et 103 KJ
Poids total	3900 kg
Diamètre du pieu ciblé	Min 250 mm – max 1950 mm

La puissance maximale du marteau associée au cadencement a été prise en compte pour proposer un scénario maximaliste sur une durée de 30 minutes de battage par pieu.

Les spectres acoustiques associés aux opérations de battage de pieux, en fonction du diamètre du pieu, sont présentés sur la figure 15.

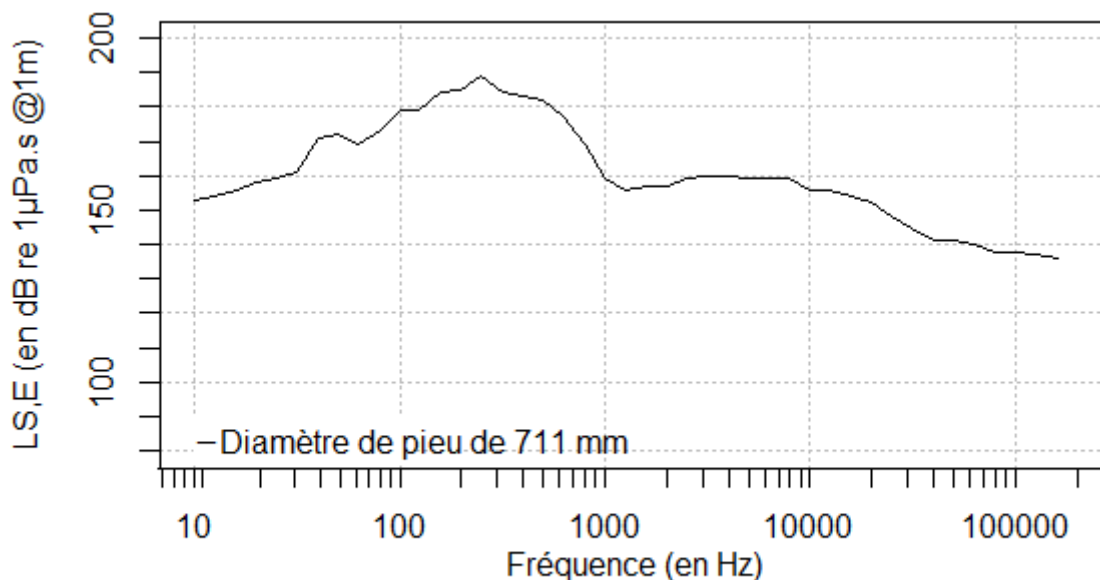


Figure 15. Gabarits acoustiques (en dB re 1µPa².s @1m) associés à un atelier de battage de pieu par marteau hydraulique en fonction du diamètre du pieu (d'après Bellmann et al., 2014 - 2020 et compilation de données issues des études de Créocéan).

6.2.3.4. Positions des différents ateliers modélisés

Les positions des différents ateliers sont présentées dans le tableau 26.

Tableau 25 : Positions des différents ateliers.

Scénario acoustique	Position de la source sonore associée - coordonnées en L93 RGF93 EPSG 2154	
	X	Y
Opération de terrassement au niveau du musoir	295848,6	6698119,4
Opération de terrassement au niveau de l'extension du terre-plein	295948,6	6698105,4
Au Pieu PA13	296068,52	6698076,59
Au Pieu PH01	296092,28	6698097,12

6.3. Résultats de la modélisation acoustique

Les résultats de la modélisation mettent en évidence une directivité dans les empreintes sonores générées associées aux travaux. Cette particularité est liée à la position géographique des travaux dans une enceinte portuaire, par petit fond (cas du bassin d'échouage). Ainsi en fonction des positions des ateliers qui ont été simulés et des niveaux d'émission associés, une directivité de l'empreinte sonore est ainsi observée :

- ▶ Soit concentrée dans la zone du bassin d'échouage ;
- ▶ Soit en direction du chenal d'accès au bassin d'échouage.

6.3.1. Evaluation des effets sonores potentiels

L'effet se définit comme la conséquence objective d'un projet ou d'une activité sur son environnement (MEEDM, 2010). Cet effet peut être positif ou négatif, direct ou indirect, temporaire ou permanent, à court, moyen ou long terme.

Le degré d'effet varie selon l'espèce considérée et le type d'activité : ces effets pourront être nuls ou négligeables, faibles, moyens ou forts.

Pour évaluer l'effet du bruit sur la faune marine, nous avons considéré l'étendu du périmètre à l'intérieur duquel un individu est susceptible de subir un dommage physiologique (TTS ou PTS) afin d'évaluer le niveau d'effet selon la grille présentée dans le tableau 26 ci-dessous. Ce périmètre est défini par la valeur du rayon, en mètres, qui détermine cette zone de risque auditif autour de la source émettrice.

Tableau 26 : Grille d'évaluation des effets liés aux bruits sous-marins générés par les opérations.

Effet	Absence de TTS	TTS uniquement	PTS ≤ 500 m	PTS > 500 m
Niveau d'effet	Négligeable	Faible	Moyen	Fort

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 niveau de pression acoustique susceptibles d'engendrer des réactions comportementales ont déjà été proposés dans la littérature (Southall ,2023, NMFS 2023, NMFS 2024), mais nécessitent d'être approfondis pour proposer un consensus. En effet il est très difficile de relier une réaction comportementale à une cause en particulier et une forte variabilité interindividuelle existe (Nowacek et al., 2007).

A 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.

Ainsi l'évaluation des effets sonores de type TTS ou PTS ne doit pas sous-estimer l'existence de périmètres associés à des réactions d'évitement plus ou moins marquées voir des réactions de fuite. Ce facteur est d'autant plus plausible lorsqu'il y a une mise en évidence par la modélisation d'un périmètre TTS qui suppose la très forte probabilité d'existence d'un périmètre plus important associé à une réaction comportementale d'une espèce.

De même l'absence de périmètre TTS ne doit pas occulter la probabilité d'existence d'un périmètre associé à un risque de réaction comportementale d'une espèce.

Le logiciel de modélisation en acoustique sous-marine a été utilisé afin d'estimer, en fonction des données acoustiques disponibles, le niveau de bruit perçu en dB SEL pondéré cumulé (LE, p, HG 24 heures) pour chaque espèce précédemment identifiée et regroupée par groupe d'audition. L'analyse des niveaux d'exposition cumulés permet de prendre en compte la possibilité d'un cumul d'effets sonores associés à plusieurs ateliers successifs de vibrofonçage ou de battage de pieux (sur une unité d'observation de 24 heures). **Cette stratégie suppose que pour valider l'existence d'un effet sonore TTS ou PTS, l'animal doit rester à l'intérieur du périmètre mis en évidence durant toute la durée effective de l'atelier simulé.**

Les tableaux 28 à 33 présentent les résultats de la modélisation en fonction des scénarios acoustiques, avec la mise en évidence des effets sonores potentiels. **Les scénarios acoustiques ont été simulés sans considérer une mesure de réduction de type rideau de bulles. De même aucune mesure de type soft-start n'a été considérée.**

L'ensemble des cartes acoustiques, issues de la modélisation acoustique en fonction des scénarios acoustiques, est présenté en annexe

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 27 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de terrassement en mer – Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines.

Scénario acoustique	Groupe d'audition des espèces marines	LE,p, HG 24h pondéré (en dB re 1µPa².s)				Effet sonore
		Seuil TTS		Seuil PTS		
		Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	
Opération de terrassement Musoir	Cétacés basse fréquence (LF)	168	20	183	Non atteint	Faible
	Cétacés haute fréquence (HF)	178	<10	193	Non atteint	Faible
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	144	<10	159	Non atteint	Faible
	Phocidés (PW)	168	20	183	Non atteint	Faible
	Chéloniens (TM)	189	Non atteint	204	Non atteint	Négligeable
Opération de terrassement Extension de la digue associée au terre-plein	Cétacés basse fréquence (LF)	168	25	183	Non atteint	Faible
	Cétacés haute fréquence (HF)	178	<10	193	Non atteint	Faible
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	144	20	159	Non atteint	Faible
	Phocidés (PW)	168	25	183	Non atteint	Faible
	Chéloniens (TM)	189	Non atteint	204	Non atteint	Négligeable

Les résultats des simulations associées aux opérations de terrassement au niveau du musoir et l'extension de la digue associée au terre-plein mettent en évidence :

- ▶ Un effet sonore potentiel faible pour les cétacés LF, HF, VHF et les phocidés. Pour ces groupes d'audition seul un périmètre TTS est mis en évidence d'un rayon compris entre 25 mètres au maximum (cas des cétacés LF et phocidés) à moins de 10 mètres (cas des cétacés HF et VHF en fonction du scénario) ;
- ▶ Un effet sonore potentiel négligeable pour les tortues marins dans les deux scénarios acoustiques modélisés. Aucun périmètre TTS et PTS n'est mis en évidence.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 28 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de terrassement en mer – Evaluation des effets sonores sur les poissons.

Scénario acoustique	Groupe d'audition des espèces marines	Seuil TTS			Effet sonore
				Mortalité / blessure mortelle	
		Seuil cumulé	Rayon max (mètre)		
Opération de terrassement Musoir	T1				Négligeable
	T2				Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint		Négligeable
	T4		Non atteint		Négligeable
	Invertébrés marins				Négligeable
Opération de terrassement Extension de la digue associée au terre-plein	T1				Négligeable
	T2				Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint		Négligeable
	T4		Non atteint		Négligeable
	Invertébrés marins				Négligeable

Dans le cas des poissons et invertébrés marins, les résultats des simulations acoustiques dans le cas des opérations de terrassement mettent en évidence un effet sonore négligeable. Aucun périmètre TTS n'est mis en évidence dans les 2 scénarios acoustiques modélisés.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 29 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PA13– Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines.

Scénario acoustique	Groupe d'audition des espèces marines	LE,p, HG 24h pondéré (en dB re 1µPa².s)				Effet sonore
		Seuil TTS		Seuil PTS		
		Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	
Pieu PA13 Opération de vibrofonçage	Cétacés basse fréquence (LF)	177	495	197	70	Moyen
	Cétacés haute fréquence (HF)	181	100	201	25	Moyen
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	161	235	181	40	Moyen
	Phocidés (PW)	175	285	195	25	Moyen
	Chéloniens (TM)	200	25	220	Non atteint	Faible
Pieu PA13 Opération de forage	Cétacés basse fréquence (LF)	177	30	197	Non atteint	Faible
	Cétacés haute fréquence (HF)	181	30	201	Non atteint	Faible
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	161	30	181	Non atteint	Faible
	Phocidés (PW)	175	30	195	Non atteint	Faible
	Chéloniens (TM)	200	Non atteint	220	Non atteint	Négligeable
Pieu PA13 Opération de battage	Cétacés basse fréquence (LF)	168	1480	183	455	Moyen
	Cétacés haute fréquence (HF)	178	90	193	30	Moyen
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	144	525	159	165	Moyen
	Phocidés (PW)	168	595	183	135	Moyen
	Chéloniens (TM)	189	275	204	60	Moyen

Dans le cas d'une simulation acoustique associée à une opération d'installation du pieu PA13 par la méthode « dinardaise », les résultats mettent en évidence :

- ▶ **Dans le cas des opérations de battage un effet sonore moyen pour toutes les espèces considérées (mammifères marins et tortues marines), avec la présence de périmètres TTS et PTS** qui varient en fonction pour les TTS entre 1480 mètres au maximum pour les cétacés LF à 90 mètres au minimum pour les cétacés HF. Dans le cas des périmètres PTS, les rayons varient au maximum de 455 mètres (pour les cétacés LF) à 30 mètres pour les cétacés HF ;

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

- ▶ **Dans le cas des opérations de vibrofonçage un effet sonore qui varie de faible pour les tortues marines à moyen pour tous les mammifères marins. En effet dans le cas des tortues marines, seul un périmètre TTS est mis en évidence avec un rayon maximum de 25 mètres. Dans le cas des mammifères marins, des périmètres associées à des risques TTS et PTS sont mis évidence :**
 - **Pour les périmètres TTS : avec un rayon maximum de 495 mètres pour les cétacés LF et un rayon minimum de 100 mètres pour les cétacés HF ;**
 - **Pour les périmètres PTS : avec un rayon maximum de 70 mètres pour les cétacés LF et un rayon minimum de 25 mètres pour les cétacés HF et les phocidés.**

- ▶ Dans le cas des opérations de forage, un effet sonore qui varie de négligeable pour les tortues marines (avec l'absence de périmètre TTS et PTS) à faible pour tous les mammifères marins avec la seule présence de périmètre TTS. Ces périmètres TTS sont au maximum de 30 mètres.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Scénario acoustique	Groupe d'audition des poissons et des poissons et invertébrés marins	Lp non pondéré (en dB re 1µPa)				Effet sonore
		Seuil TTS		Mortalité / blessure mortelle		
		Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)			
Pieu PA13 : Opération de vibrofonçage	T1					Négligeable
	T2					Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	30			Faible
	T4	158 dB rms pour 12 heures	30			Faible
	Invertébrés marins					Négligeable
Pieu PA13 : Opération de forage	T1					Négligeable
	T2					Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint			Négligeable
	T4	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint			Négligeable
	Invertébrés marins					Négligeable
Scénario acoustique	Groupe d'audition des poissons et des poissons et invertébrés marins	LE,p, cum non pondéré (en dB re 1µPa².s)				Effet sonore
		Seuil TTS		Mortalité		
		Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)	Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)	
Pieu PA13 : Opération de battage	T1	>>186 dB SELcum	<<440	>219 dB SELcum	<25 mètres	Moyen
	T2	>186 dB SELcum	<440	210 dB SELcum	<25 mètres	Moyen
	T3	186 dB SELcum	440	207 dB SELcum	25 mètres	Moyen
	T4	186 dB SELcum	440	<207 dB SELcum	>25 mètres	Moyen
	Invertébrés marins					Moyen ²

CHARIER
**PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET**

Tableau 30 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PA13– Evaluation des effets sonores sur les poissons et les invertébrés marins.

Dans le cas d'une simulation acoustique associée à une opération d'installation du pieu PA13 par la méthode « dinardaise », les résultats mettent en évidence pour les poissons et les invertébrés marins ;

- ▶ Dans le cas des opérations de vibrofonçage et de forage, un effet sonore qui varie de négligeable à faible. L'effet faible est observé uniquement pour les poissons des groupes d'audition T3 et T4 durant l'opération de vibrofonçage, avec un rayon au maximum de 30 mètres associé à un risque TTS.
- ▶ Dans le cas des opérations de battage, un effet moyen sur tous les groupes d'audition des poissons et les invertébrés marins est observés avec la mise en évidence de périmètres TTS et PTS. Les rayons associés aux périmètres TTS sont au maximum de 440 mètres (groupes d'audition T3 et T4). Les rayons associés aux périmètres PTS sont au maximum de l'ordre de 25 mètres (groupe d'audition T4).

² En l'absence de données approfondis sur les effets sonores associés aux invertébrés, les seuils de tolérance appliqués sont ceux des poissons dépourvus de vessie natatoire.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 31 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PH01– Evaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines.

Scénario acoustique	Groupe d'audition des espèces marines	LE,p, HG 24h pondéré (en dB re 1µPa ² .s)				Effet sonore
		Seuil TTS		Seuil PTS		
		Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	Seuil pondéré	Rayon max (mètre)	
Pieu PH01 Opération de vibrofonçage	Cétacés basse fréquence (LF)	177	210	197	20	Moyen
	Cétacés haute fréquence (HF)	181	60	201	10	Moyen
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	161	210	181	20	Moyen
	Phocidés (PW)	175	180	195	20	Moyen
	Chéloniens (TM)	200	65	220	20	Moyen
Pieu PH01 Opération de forage	Cétacés basse fréquence (LF)	177	25	197	Non atteint	Faible
	Cétacés haute fréquence (HF)	181	Non atteint	201	Non atteint	Négligeable
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	161	25	181	Non atteint	Faible
	Phocidés (PW)	175	25	195	Non atteint	Faible
	Chéloniens (TM)	200	Non atteint	220	Non atteint	Négligeable
Pieu PH01 Opération de battage	Cétacés basse fréquence (LF)	168	210	183	155	Moyen
	Cétacés haute fréquence (HF)	178	65	193	25	Moyen
	Cétacés très haute fréquence (VHF)	144	275	159	100	Moyen
	Phocidés (PW)	168	155	183	25	Moyen
	Chéloniens (TM)	189	100	204	25	Moyen

Dans le cas d'une simulation acoustique associée à une opération d'installation du pieu PH01 par la méthode « dinardaise », les résultats mettent en évidence :

- ▶ **Dans le cas des opérations de battage un effet sonore moyen pour toutes les espèces considérées (mammifères marins et tortues marines), avec la présence de périmètres TTS et PTS** qui varient en fonction pour les TTS entre 275 mètres au maximum pour les cétacés VHF à 65 mètres au minimum pour les cétacés HF. Dans le cas des périmètres PTS, les rayons varient au maximum de 155 mètres (pour les cétacés LF) à 25 mètres pour les cétacés les phocidés et les tortues marines ;

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

- ▶ **Dans le cas des opérations de vibrofonçage un effet sonore moyen pour toutes les espèces considérées (mammifères marins et tortues marines), avec la présence de périmètres TTS et PTS** qui varient en fonction pour les TTS entre 210 mètres au maximum pour les cétacés LF et VHF à 60 mètres au minimum pour les cétacés HF. Dans le cas des périmètres PTS, les rayons varient au maximum de 20 mètres (pour les cétacés LF, VHF, les phocidés et les tortues marines) à 10 mètres pour les cétacés HF ;
- ▶ Dans le cas des opérations de forage, un effet sonore qui varie de négligeable pour les cétacés HF et les tortues marines (avec l'absence de périmètre TTS et PTS) à faible pour les autres mammifères marins avec la seule présence de périmètre TTS dont le rayon est de 25 mètres.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Scénario acoustique	Groupe d'audition des poissons et des poissons et invertébrés marins	Lp non pondéré (en dB re 1µPa)				Effet sonore
		Seuil TTS		Mortalité / blessure mortelle		
		Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)			
Pieu PH01 : Opération de vibrofonçage	T1					Négligeable
	T2					Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	30			Faible
	T4	158 dB rms pour 12 heures	30			Faible
	Invertébrés marins					Négligeable
Pieu PH01 : Opération de forage	T1					Négligeable
	T2					Négligeable
	T3	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint			Négligeable
	T4	158 dB rms pour 12 heures	Non atteint			Négligeable
	Invertébrés marins					Négligeable
Scénario acoustique	Groupe d'audition des poissons et des poissons et invertébrés marins	LE,p, cum non pondéré (en dB re 1µPa².s)				Effet sonore
		Seuil TTS		Mortalité		
		Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)	Seuil non pondéré	Rayon max (mètre)	
Pieu PH01 : Opération de battage	T1	>>186 dB SELcum	<<135	>219 dB SELcum	<20	Moyen
	T2	>186 dB SELcum	<135	210 dB SELcum	20	Moyen
	T3	186 dB SELcum	135	207 dB SELcum	35	Moyen
	T4	186 dB SELcum	135	<207 dB SELcum	>35	Moyen
	Invertébrés marins					Moyen ³

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Tableau 32 : Résultats de la modélisation en acoustique sous-marine des opérations de mise en place de pieu PH01– Evaluation des effets sonores sur les poissons et invertébrés marins.

Dans le cas d'une simulation acoustique associée à une opération d'installation du pieu PH01 par la méthode « dinardaise », les résultats mettent en évidence pour les poissons et les invertébrés marins :

- ▶ Dans le cas des opérations de vibrofonçage et de forage, un effet sonore qui varie de négligeable à faible. L'effet faible est observé uniquement pour les poissons des groupes d'audition T3 et T4 durant l'opération de vibrofonçage, avec un rayon au maximum de 30 mètres associé à un risque TTS.
- ▶ Dans le cas des opérations de battage, un effet moyen sur tous les groupes d'audition des poissons et les invertébrés marins est observés avec la mise en évidence de périmètres TTS et PTS. Les rayons associés aux périmètres TTS sont au maximum de 135 mètres (groupes d'audition T3 et T4). Les rayons associés aux périmètres PTS sont au maximum de l'ordre de 35 mètres (groupe d'audition T4).

6.4. Evaluation du risque d'impact acoustique

L'impact se définit comme la transposition de l'effet sur une échelle de valeur (MEEDM, 2010). Il s'évalue en croisant l'effet et la sensibilité. Ainsi, le croisement des sensibilités, précédemment définies pour chaque espèce, avec les effets déterminés pour chacune des phases de travaux a permis d'évaluer les risques d'impact du bruit généré par les travaux d'aménagement sur les mammifères marins potentiellement présents sur la zone d'étude. Pour cela, la matrice suivante a été appliquée (tableau 40) :

Tableau 40. Matrice d'évaluation des impacts en fonction de la sensibilité et des effets.

Effet \ Sensibilité	Sensibilité			
	Nulle ou négligeable	Faible	Moyenne	Forte
Nul ou négligeable	Nul	Négligeable	Nul	Négligeable
Faible	Nul	Négligeable	Faible	Moyen
Moyen	Nul	Négligeable	Faible	Fort
Fort	Nul	Négligeable	Moyen	Fort

³ En l'absence de données approfondis sur les effets sonores associés aux invertébrés, les seuils de tolérance appliqués sont ceux des poissons dépourvus de vessie natatoire.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Cette matrice donne un poids plus important à la sensibilité par rapport à l'effet. Celle-ci apparait effectivement plus importante, puisqu'elle définit le niveau de risque. Ainsi, même si l'effet est fort (ex. : risque de perte d'audition permanente), si l'espèce n'y est pas sensible (parce qu'elle n'est pas présente sur la zone par exemple), l'impact sera faible ou nul.

Les résultats du croisement des sensibilités et des effets pour les espèces potentiellement présentes sur la zone d'étude et pour chaque phase de travaux sont présentés dans les tableau 34 et tableau 35.

Tableau 33 : Synthèse des risques d'impact pour les espèces considérées (mammifères marins et chéloniens).

Groupes d'audition	Petit rorqual	Dauphin commun, grand dauphin, dauphin bleu et blanc, globicéphale noir	Marsouin commun	Phoque gris	Tortue luth et tortue caouanne
	Cétacés LF	Cétacés HF	Cétacés VHF	Phocidés dans l'eau PW	Chéloniens TM
Opération de terrassement Musoir	Faible	Faible	Faible	Faible	Négligeable
Opération de terrassement Extension de la digue	Faible	Faible	Faible	Faible	Négligeable
Pieu PA13 Opération de vibrofonçage	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Pieu PA13 Opération de forage	Faible	Faible	Faible	Faible	Négligeable
Pieu PA13 Opération de battage	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Pieu PH01 Opération de vibrofonçage	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Pieu PH01 Opération de forage	Faible	Négligeable	Faible	Faible	Négligeable
Pieu PH01 Opération de battage	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Dans les cas des mammifères marins et des tortues marines, le risque d'impact acoustique est considéré en fonction des groupes d'audition :

- ▶ Pour les cétacés LF, VHF et les phocidés comme faible. Bien que le niveau d'effet sonore soit moyen, la matrice d'impact privilégie le niveau de sensibilité qui est faible ;
- ▶ Pour les cétacés HF et les tortues marines entre négligeable et faible. Ce résultat est aussi lié à la construction de la matrice du risque d'impact.

Tableau 34 : Synthèse des risques d'impact pour les poissons.

	T1 : Poissons dépourvus de vessie natatoire	T2 : Poissons avec vessie natatoire non-impliquée dans l'audition	T3 : Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition	T4 : Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	
				Alose feinte	Sprat, sardine, grande alose
Opération de terrassement Musoir	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Opération de terrassement Extension de la digue associée au terre-plein	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pieu PA13 Opération de vibrofonçage	Négligeable	Négligeable	Moyen	Moyen	Moyen
Pieu PA13 Opération de forage	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pieu PA13 Opération de battage	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Fort
Pieu PH01 Opération de vibrofonçage	Négligeable	Négligeable	Moyen	Moyen	Moyen
Pieu PH01 Opération de forage	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Pieu PH01 Opération de battage	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Fort

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Dans le cas des poissons, le risque d'impact varie entre négligeable et fort en fonction des groupes d'audition de poissons considérés.

En fonction des effets sonores associés aux différentes opérations simulées le risque d'impact est donc :

- ▶ Négligeable pour tous les groupes d'audition des poissons dans le cas des opérations de terrassement, et de forage ;
- ▶ Négligeable à moyen dans le cas des opérations de vibrofonçage : négligeable pour les groupes d'audition T1 et T2 (compte tenu d'un effet négligeable et d'une sensibilité faible à moyenne), et moyen pour les groupes d'audition T3 et T4 (compte tenu d'une effet sonore faible combiné à une sensibilité moyenne) ;
- ▶ Faible à fort dans le cas des opérations de battage de pieux sur les positions PA13 et PH01 : faible pour le groupe d'audition T1, moyen pour les groupes d'audition T2, T3 et T4 à l'exception des spart, sardine et grande alose pour lesquelles le risque d'impact est considéré comme fort (compte tenu d'une sensibilité forte).

6.4.1. Cas des plongeurs loisirs

Dans le cas de l'évaluation du risque d'impact acoustique sur le plongeur loisir, deux scénarios acoustiques ont été considérés avec un plongeur équipé ou non d'une cagoule en néoprène. Les seuils acoustiques retenus sont issus de Parvin et al.(2002). Les résultats sont présentés dans le tableau 36.

Tableau 35 : Synthèse des effets des travaux d'aménagement sur les plongeurs loisirs.

Groupes d'audition	Plongeur Loisir sans cagoule	Plongeur Loisir avec cagoule
Phase de travaux		
Opération de terrassement Musoir	Non atteint	Non atteint
Opération de terrassement Extension de la digue associée au terre-plein	Non atteint	Non atteint
Pieu PA13 Opération de vibrofonçage	< 30 mètres	Non atteint
Pieu PA13 Opération de forage	Non atteint	Non atteint
Pieu PA13 Opération de battage	45 mètres	25 mètres
Pieu PH01 Opération de vibrofonçage	< 25 mètres	Non atteint
Pieu PH01 Opération de forage	Non atteint	Non atteint
Pieu PH01 Opération de battage	25 mètres	< 25 mètres

Seuls des périmètres associés à un risque de traumatisme auditif, dans le cas des opérations de vibrofonçage et de battage de pieux, sont mis en évidence :

- ▶ Pour un plongeur sans cagoule dans le cas des opérations de vibrofonçage et de battage avec un rayon maximum de 45 mètres dans le cas du scénario de battage de pieu sur PA13 ;
- ▶ Pour un plongeur équipé d'une cagoule uniquement dans le cas des opérations de battage de pieu sur PA13 et PH01 avec un rayon maximum de 25 mètres dans le cas du battage de pieu sur PA13.

Ces rayons restent concentrés dans un périmètre immédiat autour du chantier et permettent ainsi de considérer que le risque pour les plongeurs loisirs est faible. En effet il est fort probable que des mesures de sécurité seront mises en place pour empêcher l'accès proche du chantier à toute personne étrangère aux entreprises mandatées pour les travaux.

Cette modélisation ne considère pas l'effet « de surprise » sur les plongeurs loisirs qui pourrait être induit par les travaux d'aménagement. En ce sens une communication des travaux auprès du public permettra de sensibiliser sur cet aspect.

6.5. Proposition de mesures de mitigation

Dans le cadre des futurs travaux, des mesures de mitigation sont à considérer pour éviter et réduire les effets sonore potentiels sur la faune marine. Ces mesures peuvent être de plusieurs types :

- ▶ (1) **Des mesures d'évitement liées au planning des travaux en adaptant le calendrier aux cycles biologiques des espèces marines ciblées ;**
- ▶ (2) **Des mesures de réduction en définissant une zone d'exclusion autour du ou des ateliers de sorte que la présence éventuelle d'une espèce ciblée à l'intérieur de ce périmètre déclenchera l'arrêt des travaux, selon une stratégie de suivi de type logigramme (figure 16). Cette stratégie inclut une phase de pré-watch avant travaux et une série de réaction durant la phase travaux dans le cas d'une détection visuelle d'un mammifère marin. Au vu des résultats des simulations acoustiques une zone d'exclusion de 750 mètres autour du chantier est préconisée.**
- ▶ (3) En définissant plus largement en cohérence avec les standards et recommandations actuels :
 - **Une stratégie globale de surveillance du plan d'eau autour du chantier avec la mise en place d'une période de pré watch (avant travaux) et de surveillance de la zone d'exclusion autour des ateliers pendant la première phase de travaux en particulier durant les phases de certification acoustique. Cette surveillance sera opérée par du personnel MMO certifié dans un premier temps (notamment lors des phases de certification acoustique) puis dans un second temps par du personnel du chantier ayant suivi une sensibilisation face aux enjeux liés aux effets sonores sur la faune marine ;**

Le protocole chantier

Phase travaux

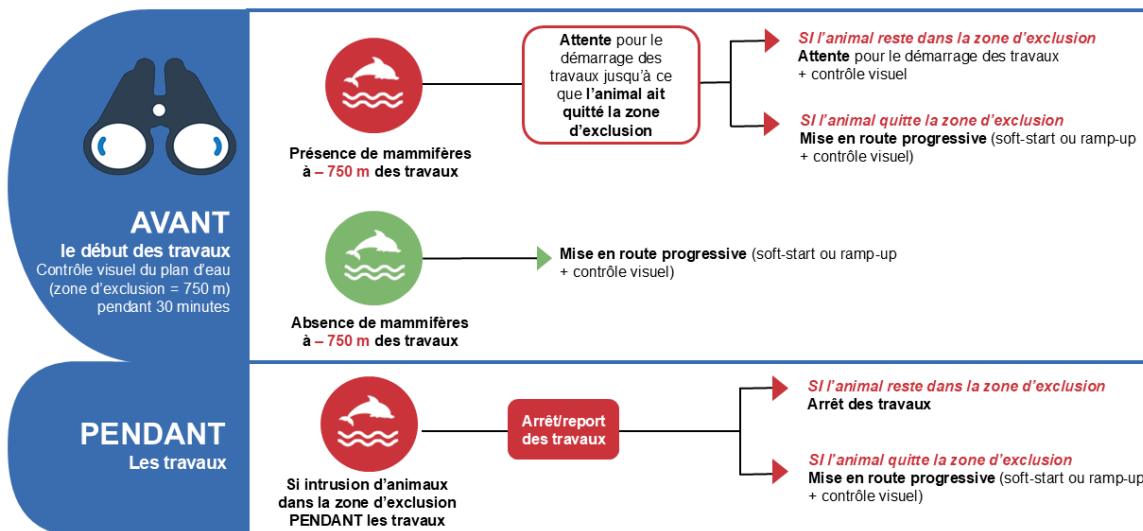


Figure 16. Logigramme associé à la surveillance du plan d'eau par MMO et du périmètre d'exclusion de 750 mètres pour les mammifères marins.

- Des procédures de soft start ou de ramp up lors des phases de vibrofonçage et de battage.

▶ (4) En définissant une stratégie de contrôle acoustique des premiers ateliers afin de vérifier la robustesse de la modélisation et les empreintes sonores générées. Cette stratégie permet de contrôler la cohérence et le dimensionnement des mesures mises en place. En ce sens une stratégie d'application des seuils acoustiques de référence (réglementation allemande BSH⁴) est recommandée afin de contrôler l'application des seuils :

- LE,p 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ à 750 mètres de la source sonore associée à un atelier maritime ;
- Lp,peak 190 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ à 750 mètres de la source sonore associée à un atelier maritime.
-

Tous les ateliers maritimes mis en jeu dans le cadre du chantier feront l'objet d'une certification acoustique (phases de forage, battage, vibrofonçage ainsi que les opérations de terrassement).

Cette certification acoustique portera sur chaque atelier maritime par :

- Des mesures en acoustique sous-marine en temps réel durant les premières phases de l'atelier à certifier. Le fonctionnement de l'atelier monitoré doit être représentatif de l'activité considérée ;
- La comparaison avec les seuils acoustiques retenus ;
- Un arrêt immédiat de l'atelier monitoré en cas de dépassement des seuils acoustiques considérés.

L'instrumentation acoustique déployée doit permettre :

- D'acquérir des données acoustiques représentatives du bruit sous-marin générées par l'atelier durant toute sa phase de fonctionnement (par exemple sur une opération complète d'installation d'un pieu) ;

- D'établir les niveaux de bruit mesurés LEp et Lp,peak et de les comparer avec les valeurs seuils d'une part, et d'ajuster le cas échéant les modélisations acoustiques initialement réalisées.
- De justifier en cas de dépassement des seuils acoustiques préconisés l'emploi de mesures de réduction telles que l'usage d'un rideau de bulles, la limitation de la puissance du marteau ou l'emploi de techniques alternatives.

Les premiers suivis acoustiques des différents ateliers ainsi que des premiers ateliers mis en œuvre seront réalisés avec la présence d'un MMO certifié afin de vérifier l'absence de mammifères marins à l'intérieur du périmètre d'exclusion de 750 mètres.

- ▶ (5) En définissant suite à la campagne géotechnique réalisée, la puissance maximale nécessaire pour les ateliers de battage de pieux. Cette mesure d'ajustement de la puissance du marteau dans les phases de battage permet de réduire l'empreinte sonore de cet atelier.

7. Conclusion

Cette étude vise à établir le risque d'impact acoustique des travaux d'aménagement du port de Pornichet sur la faune marine (mammifères marins, tortues marines, poissons et invertébrés marins). Plusieurs scénarios acoustiques ont été simulés dans le cadre des travaux d'aménagement du port en particulier concernant :

- ▶ Les opérations de terrassement au niveau du musoir de la digue Nord de protection du bassin d'échouage et au niveau de l'extension de la digue, dans le prolongement de l'extension du terre-plein central du port à flot ;
- ▶ Les opérations d'installation des pieux en considérant deux positions de pieux notés PA13 et PH01. Ces pieux se situent dans le bassin d'échouage (pour PH01) ou dans le prolongement du chenal d'accès (pour PA13), et présentent donc un intérêt en termes de représentativité des empreintes sonores générées par les travaux.

L'évaluation des effets sonores potentiels sur la faune marine a été réalisée sur la base des travaux et publications récentes qui font consensus auprès de la communauté scientifique (NMFS, 2023 & 2024 - Popper et al., 2019). Le risque d'impact acoustique a été évalué en croisant l'effet sonore avec la sensibilité des différentes espèces.

L'évaluation de la sensibilité des mammifères marins et tortues marines identifiées pour cette étude a été réalisée en s'appuyant sur la méthodologie développée par l'OFB pour l'évaluation des enjeux et appliquée notamment dans le cadre des synthèses de connaissances pour les futurs projets de parcs éoliens. Huit espèces de mammifères marins et deux espèces de tortues marines ont été considérées regroupées par groupes d'audition :

- ▶ Les cétacés LF : avec le Petit rorqual ;
- ▶ Les cétacés HF : avec le Dauphin de Risso, le Dauphin commun, le Grand dauphin, le Dauphin bleu et blanc et le Globicéphale noir ;
- ▶ Les cétacés VHF : avec le Marsouin commun ;
- ▶ Les phocidés PW : avec le Phoque gris.
- ▶ Les chéloniens CHW : avec la Tortue caouanne et la Tortue luth.

Pour l'ensemble de ces espèces, le niveau de sensibilité établi est faible.

Une évaluation de la sensibilité des poissons a été réalisée en se basant sur l'étude halieutique réalisée, en considérant les espèces potentiellement présentes à l'échelle de l'aire d'étude éloignée que constitue la Baie du Pouliguen. Les espèces ont été regroupées par groupes d'audition selon Popper et al (2019). L'évaluation de la sensibilité des poissons repose sur des critères et une stratégie proche de celle utilisée pour l'évaluation des mammifères marins. **En fonction des groupes d'audition des poissons, le niveau de sensibilité varie de faible à fort.**

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

L'évaluation des effets sonores sur les mammifères marins et les tortues marines met en évidence :

- ▶ Pour les cétacés LF : un niveau d'effet faible dans les cas des opérations de terrassement. Dans le cas des installations des pieux par la méthode « dinardaise », le niveau est faible dans le cas des opérations de forage et moyen dans le cas des opérations de battage avec la présence d'un rayon associé à un seuil TTS au maximum de 1480 mètres, et un rayon PTS de 455 mètres (cas des opérations d'installation du pieu PA13). La directivité de l'empreinte sonore associée à cet atelier est marquée en restant orientée sur le chenal d'accès au port d'échouage ;
- ▶ Pour les cétacés HF : un niveau d'effet faible dans les cas des opérations de terrassement. Dans le cas des installations des pieux par la méthode « dinardaise », le niveau est faible dans le cas des opérations de forage et moyen dans le cas des opérations de vibrofonçage avec la présence d'un rayon associé à un seuil TTS au maximum de 100 mètres et un rayon associé à un seuil PTS de 30 mètres (cas des opérations d'installation du pieu PA13 sur la phase de battage) ;
- ▶ Pour les cétacés VHF : un niveau d'effet faible dans les cas des opérations de terrassement. Dans le cas des installations des pieux par la méthode « dinardaise », le niveau est faible dans le cas des opérations de forage et moyen dans le cas des opérations de battage avec la présence d'un rayon associé à un seuil TTS au maximum de 525 mètres et un rayon associé à un seuil PTS de 165 mètres (cas des opérations d'installation du pieu PA13) ;
- ▶ Pour les phocidés PW : un niveau d'effet faible dans les cas des opérations de terrassement. Dans le cas des installations des pieux par la méthode « dinardaise », le niveau est faible dans le cas des opérations de forage et moyen dans le cas des opérations de battage avec la présence d'un rayon associé à un seuil TTS au maximum de 595 mètres et un rayon associé à un seuil PTS de 135 mètres (cas des opérations d'installation du pieu PA13) ;
- ▶ Pour les tortues marines : un niveau d'effet négligeable dans les cas des opérations de terrassement et de forage. Dans le cas des installations des pieux par la méthode « dinardaise », le niveau est moyen dans le cas des opérations de battage avec la présence d'un rayon associé à un seuil TTS au maximum de 275 mètres et un rayon associé à un seuil PTS de 60 mètres (cas des opérations d'installation du pieu PA13).

L'évaluation du risque d'impact acoustique sur les mammifères marins et les tortues marines met en évidence :

- ▶ Un risque d'impact faible pour tous les scénarios acoustiques concernant les cétacés LF, VHF et les phocidés ;
- ▶ Un risque d'impact négligeable à faible en fonction des scénarios acoustiques pour les cétacés HF et les tortues marines :
 - Pour les cétacés HF : le risque d'impact est négligeable à faible pour les opérations de forage et faible pour tous les autres scénarios acoustiques ;
 - Pour les tortues marines ; le risque d'impact est négligeable pour les opérations de terrassement et de forage, et faible pour les opérations de battage.

L'évaluation des effets sonores sur les poissons et les invertébrés marins met en évidence :

- ▶ Dans le cas des opérations de terrassement un niveau d'effet négligeable pour l'ensemble des espèces regroupées par groupes d'audition ;
- ▶ Dans le cas des opérations d'installation des pieux par la méthode « dinardaise » un niveau d'effet sonore potentiel qui varie de négligeable à moyen en fonction de l'atelier considéré et des groupes d'audition :
 - Pour les groupes d'audition T1 et T2 concernant les poissons et les invertébrés marins le niveau d'effet est négligeable dans le cas des opérations vibrofonçage et de forage puis moyen dans le cas des opérations de battage de pieux avec des rayons associés à un risque TTS inférieur à 440 mètres et des rayons associés à un risque de blessure mortelle autour 20 mètres.
 - Pour les groupes d'audition T3 et T4 concernant les poissons, le niveau d'effet est faible dans le cas des opérations vibrofonçage (avec un rayon associé à un périmètre TTS au maximum de 30 mètres), négligeable dans le cas des opérations de forage puis moyen dans le cas des opérations de battage de pieux avec des rayons associés à un

risque TTS au maximum de 440 mètres et des rayons associés à un risque de blessure mortelle autour 35 mètres.

L'évaluation du risque d'impact acoustique sur les poissons met en évidence :

- ▶ Un risque d'impact négligeable pour tous les groupes de poissons dans le cas des scénarios acoustiques associés aux opérations de terrassement et de forage ;
- ▶ Un risque d'impact négligeable à moyen pour les opérations de vibrofonçage : négligeable pour les groupes T1 et T2, puis moyen pour les groupes T3 et T4 ;
- ▶ Un risque d'impact faible à fort pour les opérations de battage : faible pour le groupe de poisson T1, moyen pour les groupes T2, T3 et T4 à l'exception des sprat, sardine et grande alose pour lesquelles le risque d'impact est fort

Une série de mesure de mitigation est proposée afin d'éviter et de réduire l'impact acoustique sur la faune marine :

- ▶ Au travers des mesures d'ajustement par rapport du planning du chantier en fonction des cycles biologiques des espèces ;
- ▶ **En définissant une zone d'exclusion de 750 mètres** autour du chantier, **une surveillance du plan d'eau ainsi qu'une stratégie d'arrêt des travaux en cas de présence de mammifères marins à proximité immédiate du chantier**. Cette stratégie inclut une phase de pré-watch avant travaux et une série de réaction durant la phase travaux dans le cas d'une détection visuelle d'un mammifère marin ;
- ▶ En définissant plus largement en cohérence avec les standards et recommandations actuels :
 - **Une stratégie globale de surveillance du plan d'eau autour du chantier avec la mise en place d'une période de pré watch (avant travaux) et de surveillance d'une zone d'exclusion autour des ateliers pendant la phase de travaux.**
 - **Des procédures de soft start ou de ramp up lors des phases de vibrofonçage et de battage.**
- ▶ En définissant une stratégie de contrôle acoustique des premiers ateliers afin de vérifier la robustesse de la modélisation et les empreintes sonores générées. **Durant ces mesures acoustiques réalisées sur lors des premiers ateliers, du personnel MMO certifié sera présent afin de contrôler le périmètre d'exclusion de 750 mètres. Le cas échéant des mesures de réduction seront définies telles que l'usage d'un rideau de bulles, la limitation de la puissance du marteau ou l'emploi de techniques alternatives ;**
- ▶ En définissant un ajustement de la puissance maximale du marteau dans les phases de battage, ce qui permet de réduire l'empreinte sonore de cet atelier.

Bibliographie

Anthony, T. G., Wright, N. A. & Evans, M. A., 2009. Review of diver noise exposure. QinetiQ, RR735 Research Report, 55 p.

Bellmann, M. A., 2014. Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Inter.noise 2014, Melbourne, Australia.

Bellmann, M. A., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., Remmers, P. & Brinkmann, J., 2020. Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values - Experience report on piling-driving noise with and without technical noise mitigation measures. ITAP GmbH, ERa Technical Report, 137 p.

Charifi, M., Sow, M., Ciret, P., Benomar, S. & Massabuau, J.-C., 2017. The sense of hearing in the Pacific oyster, *Magallana gigas*. PLoS ONE 12 (10), e0185353.

Créocéan, 2025. Suivi environnemental des travaux de la Jetée Albert Edouard du Vieux Port de Cannes – Acoustique. Suivi en acoustique sous-marine des opérations de déroctage – phase test. V1 du 04 août 2025. 44 p.

Deane, G. B. (1999), Acoustic hot-spots and breaking wave noise in the surf zone, J. Acoust. Soc. Am. 105, 3151–3167.

Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C. & Wood, D. T., 2016. A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. Marine Pollution Bulletin 108 (1), 5-11.

Erbe, C., 2011. Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals - A Pocket Handbook. JASCO Applied Sciences, Brisbane, Australia, 64 p.

Farcas, A., Thompson, P. M., & Merchant, N. D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. Env. Impact Assessment Review, 57, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>

Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. & Schmidt, H., 2011. Computational Ocean Acoustics. Springer, New York, 794 p.

Johnson, C.S., 1967. Sound detection thresholds in marine mammals. *In*: Tavolga, W.N. (Ed.), Marine Bio-Acoustics II. Pergamon Press, Oxford, pp 247-260.

Kaifu, K., Akamatsu, T. & Segawa, S., 2008. Underwater sound detection by cephalopod statocyst. Fisheries Science 74 (4), 781-786.

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

Knudsen, V. O., Alford, R. S. and Emling, J. W. (1948), Underwater ambient noise, *J. Mar. Res.* 7, 410-429.

Lenhardt, M., 2002. Sea turtle auditory behaviour. *Journal of the Acoustical Society of America* 112(5), 2314

MEEDDM, 2010. Guide d'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000 - 2. Guide méthodologique. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 198 p.

Miksis-Olds, J. L., Donaghay, P. L., Miller, J. H., Tyack, P. L. & Reynolds Iii, J. E., 2007. Simulated vessel approaches elicit differential responses from manatees. *Marine Mammal Science* **23** (3), 629-649.

Mooney, T. A., Hanlon, R., Madsen, P. T., Christensen-Dalsgaard, J., Ketten, D. R. & Nachtigall, P. E., 2012. Potential for Sound Sensitivity in Cephalopods. *In: The Effects of Noise on Aquatic Life*. A. N. Popper & A. Hawkins (Eds). Springer, New York, pp 125-128.

MTES, 2020. Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. 209 p.

National Marine Fisheries Service (NMFS), 2023. Summary of Endangered Species Act Acoustic Thresholds (Marine Mammals, Fishes, and Sea Turtles). National Marine Fisheries Service, 10 p.

National Marine Fisheries Service (NMFS), 2024. Update to : Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 3.0) : Underwater and In-Air Criteria for Onset of Auditory Injury and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMF-OPR-71, 182p

Néréis environnement, 2019. Mesures en acoustique sous-marine Chantier de La Cotinière des opérations de déroctage terrestre et maritime - Mesures acoustiques réalisées le 12 juillet 2019. V1 du 19 août 2019. 57 p.

Néréis environnement, 2022. Evaluation des effets sonores associés aux travaux d'aménagement de HAROPA Port de le Havre. V1 du 25 novembre 2022. 180 p.

Nereis environnement, 2024. Etat initial du bruit ambiant sous-marin et évaluation des impacts sonores sur les espèces marines – Fort Boyard. 113 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.

Parvin, S. J., Cudahy, E. A. & D.M., F., 2002. "Guidance for diver exposure to underwater sound in the frequency range from 500 to 2500 Hz. *Proceedings of Undersea Defence Technology*, La Spezia, Italy.

CHARIER

PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

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., Zeddis, D. G. & Tavolga, 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. Springer International Publishing, 73 p.

Popper, A. N. & Hawkins, A. D., 2019. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology* 94 (5), 692-713.

Richardson, W. J., Greene, C. R. J., Malme, C. I. & Thomson, D. H., 1995. *Marine Mammals and Noise*. Academic Press, San Diego, 576 p.

Ross, D. (1987), *Mechanics of Underwater Noise*, Los Altos, CA, Peninsula Publishing

Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J. A. & Tyack, P. L., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33 (4), 411-521.

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., Tollit, D., Amaral, J., Clark, C. W. & Ellison, W. T., 2023. Managing human activity and marine mammals: A biologically based, relativistic risk assessment framework. *Frontiers in Marine Science* 10, 1-15.

Wenz, G. M., 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America* 34 (12), 1936-1956.

ANNEXE

ANNEXE 1: CARTES ACOUSTIQUES ISSUES DE LA MODÉLISATION DES
SCÉNARIOS DE TRAVAUX.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

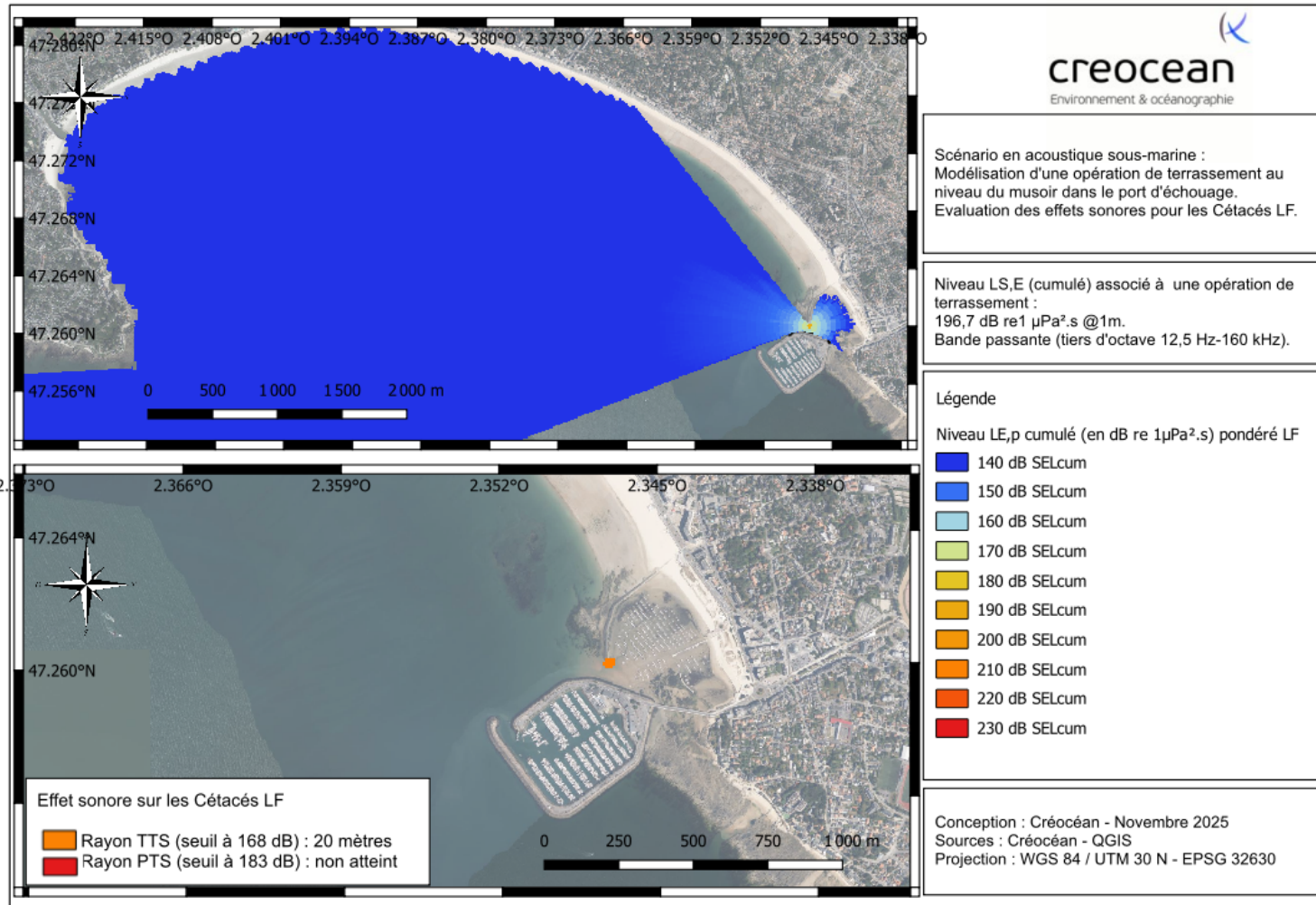


Figure 17-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

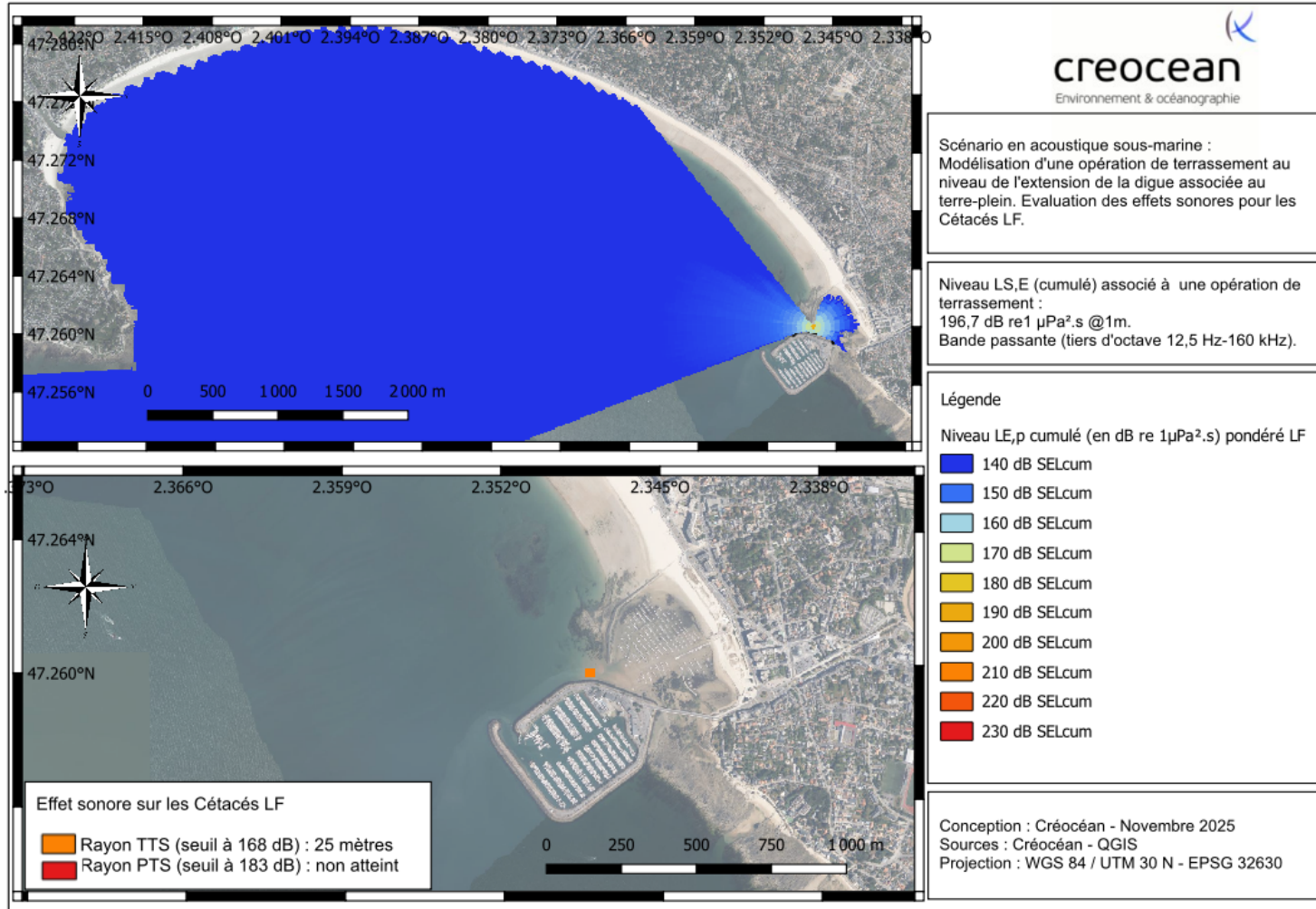


Figure 18-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

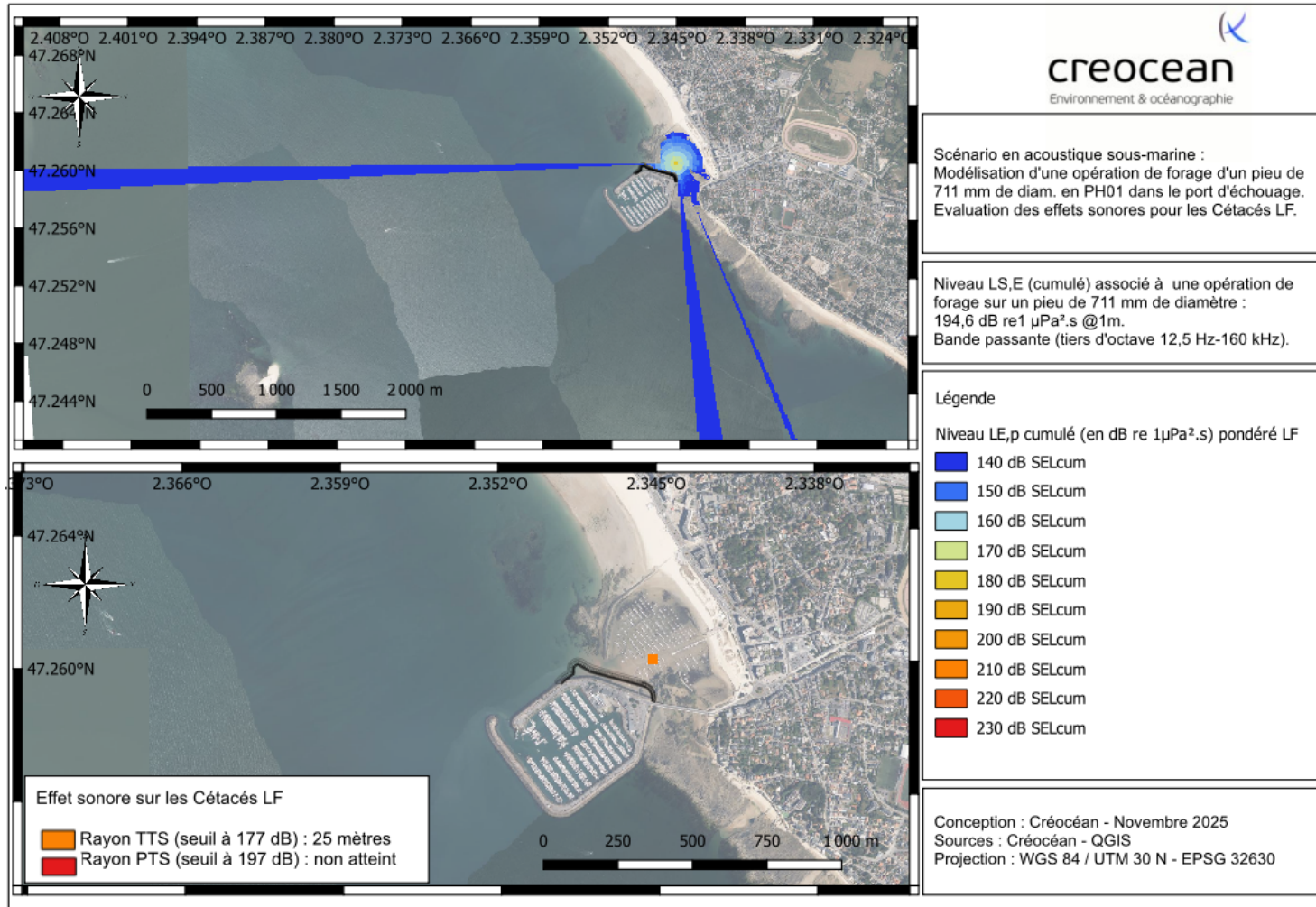


Figure 19-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

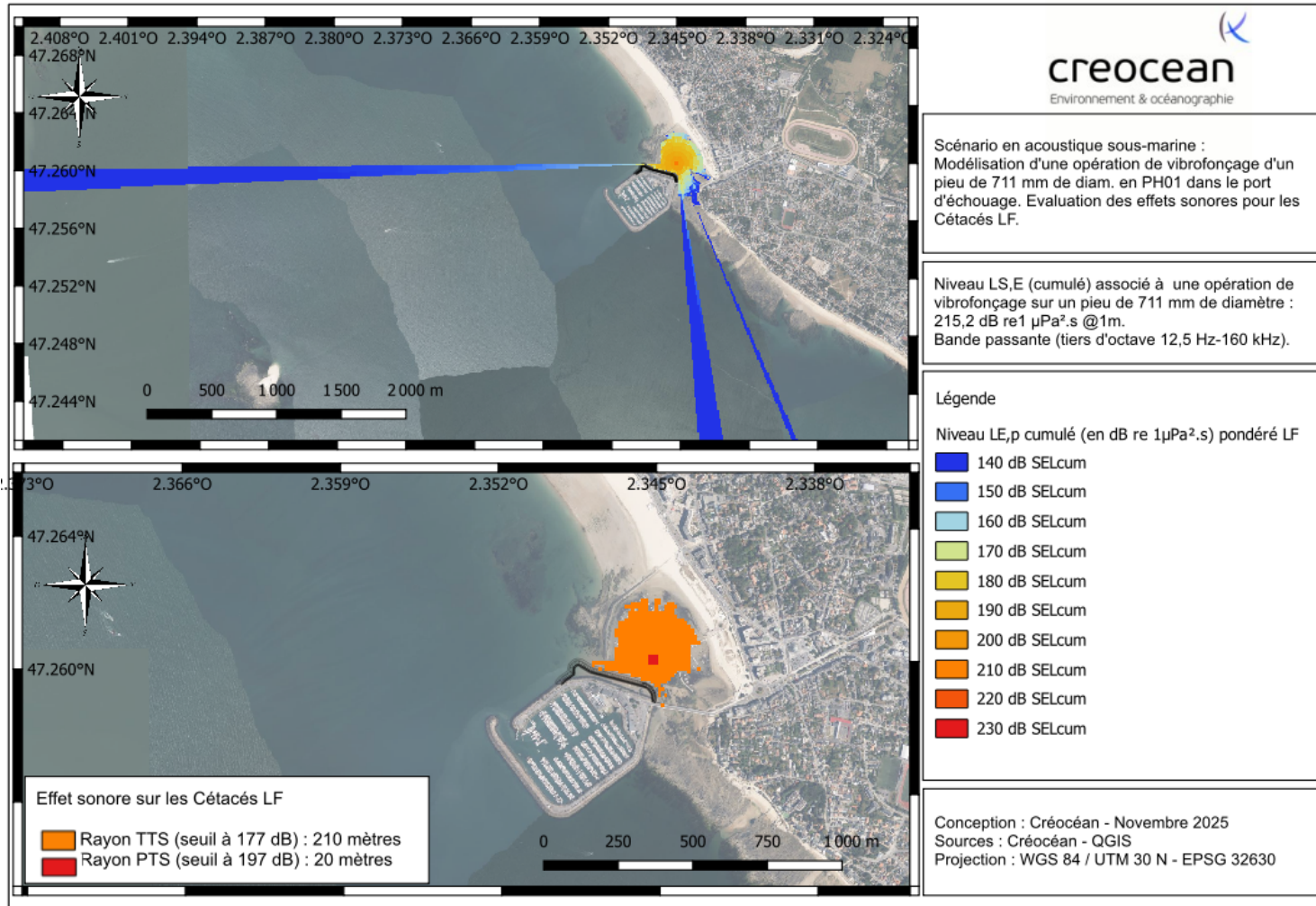


Figure 20-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

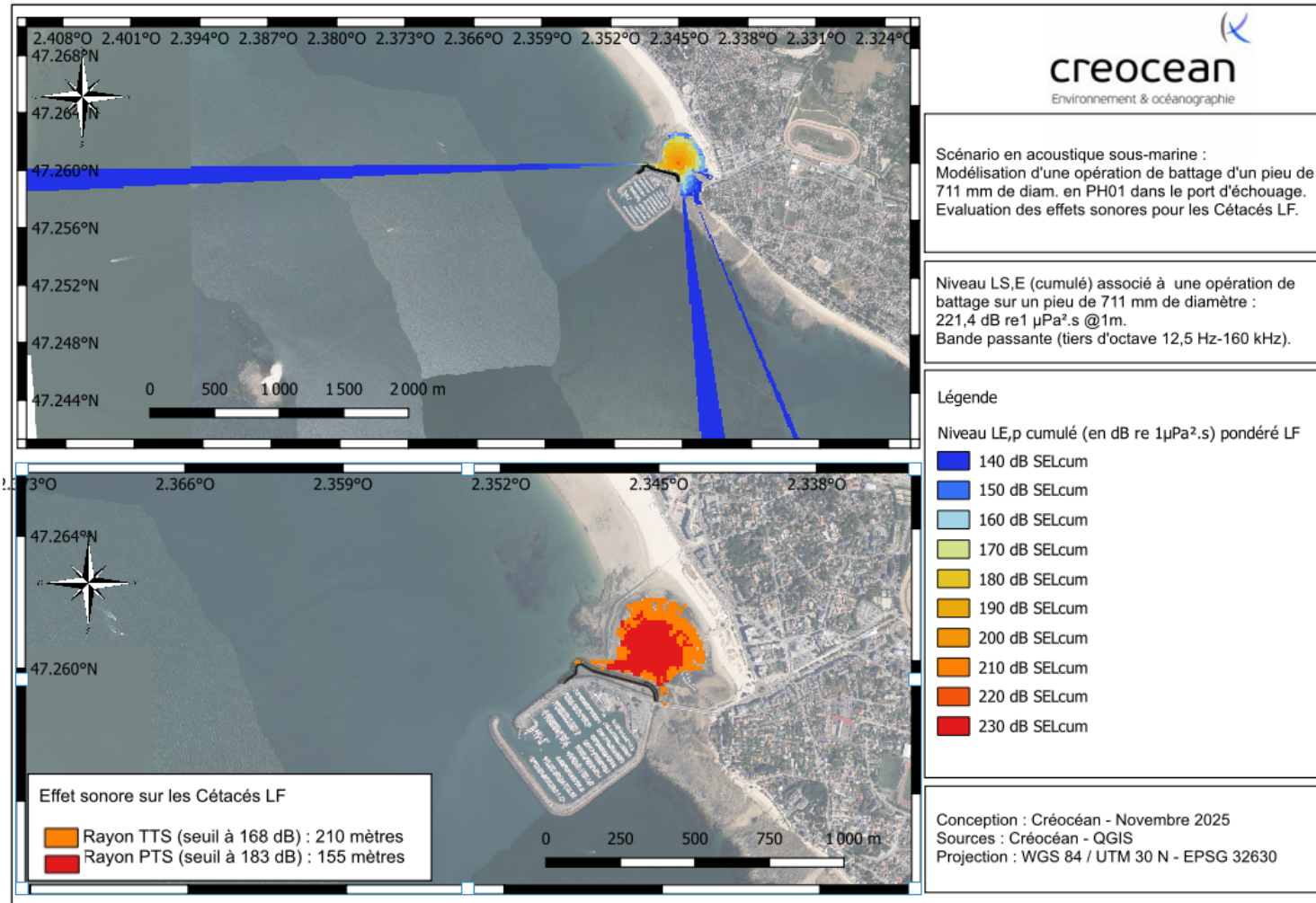


Figure 21-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

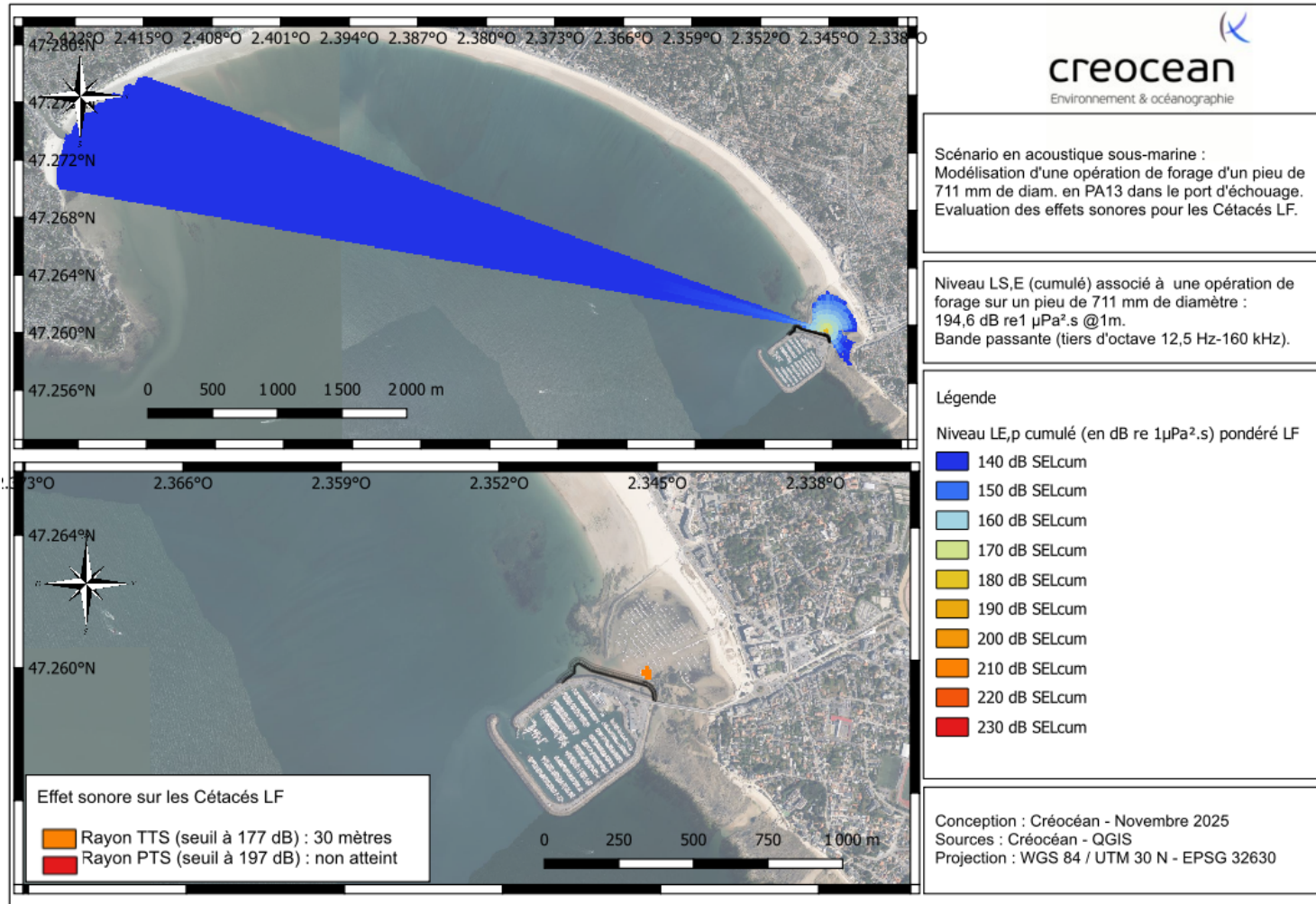


Figure 22-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

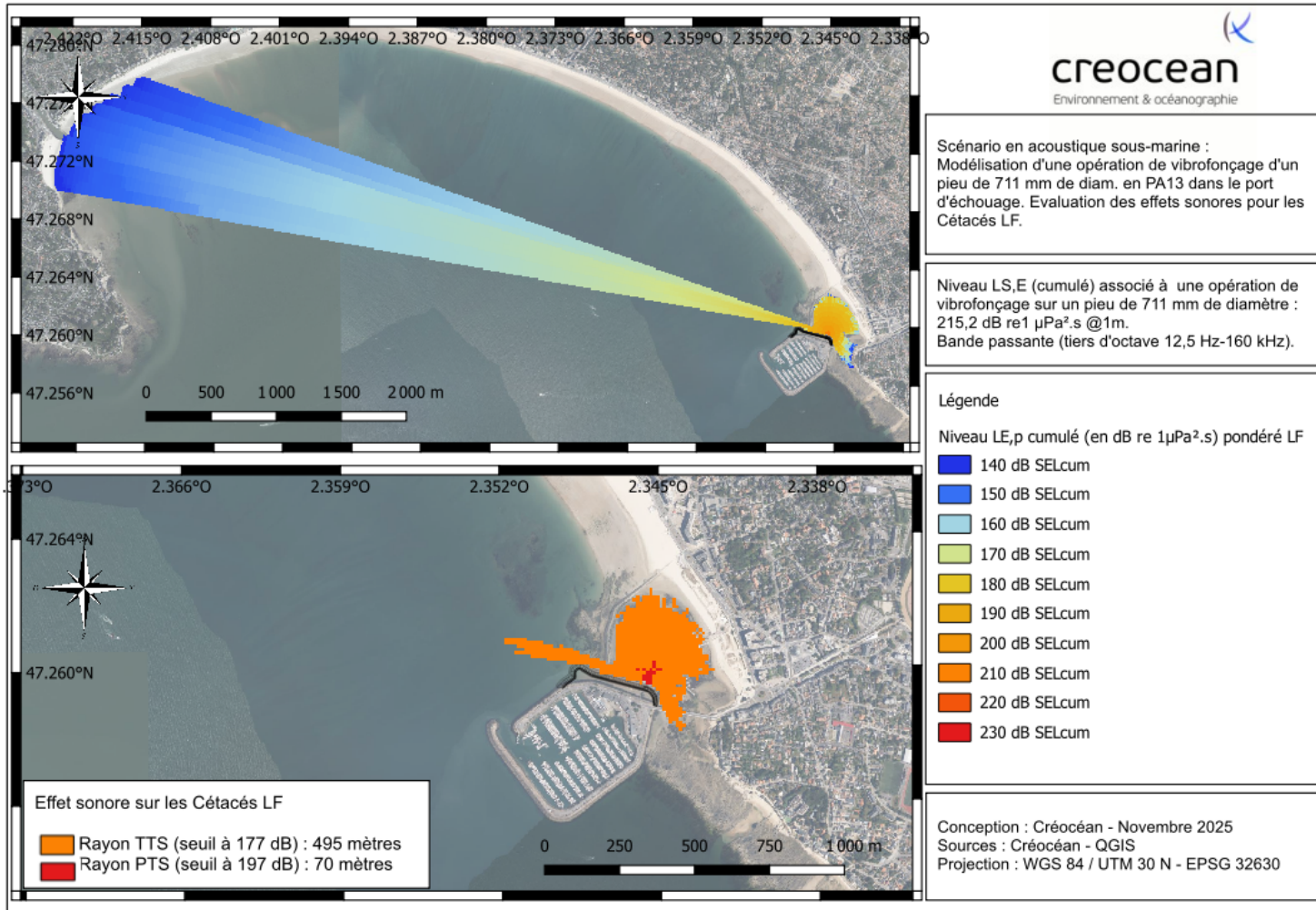


Figure 23-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

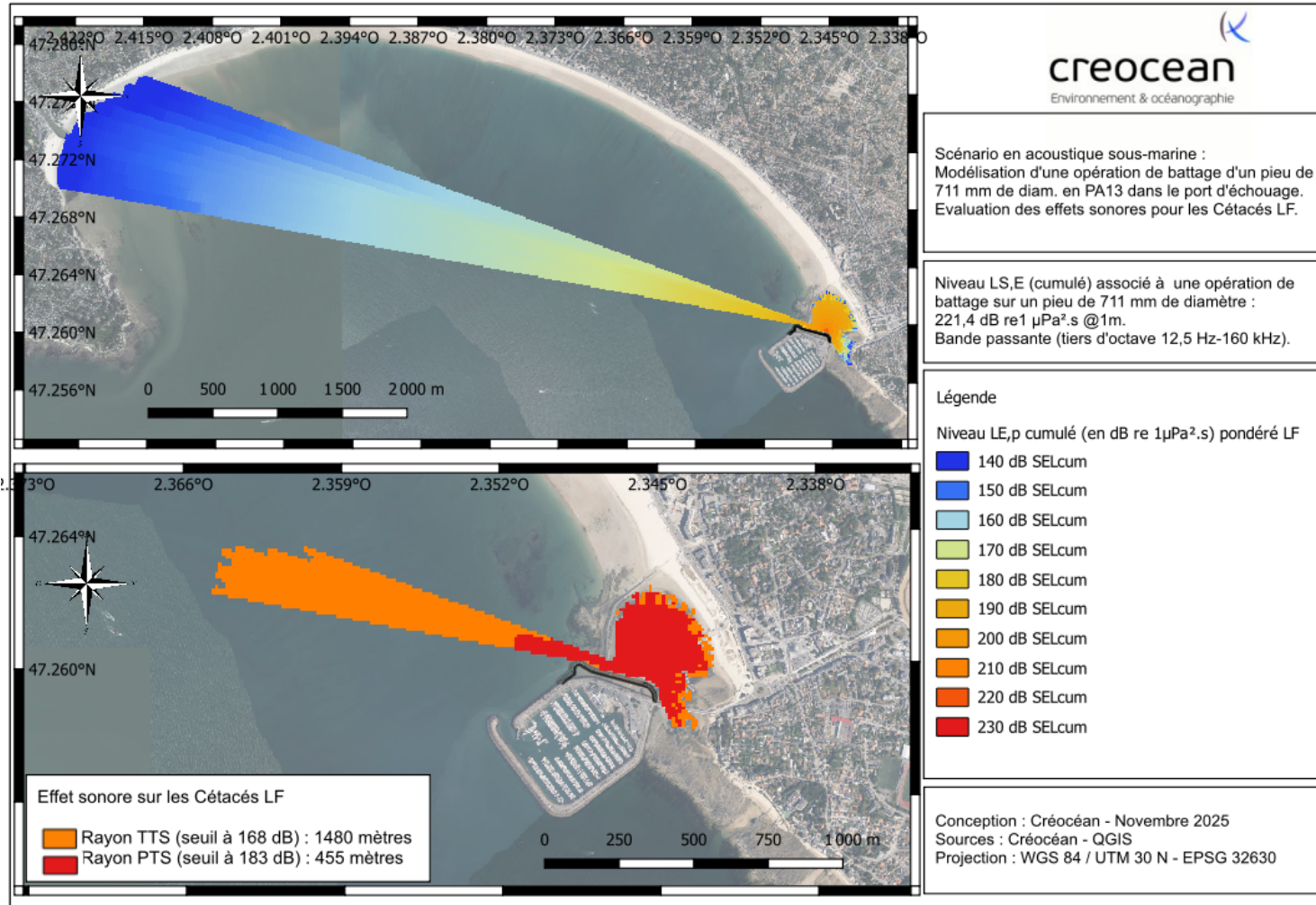


Figure 24-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés LF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

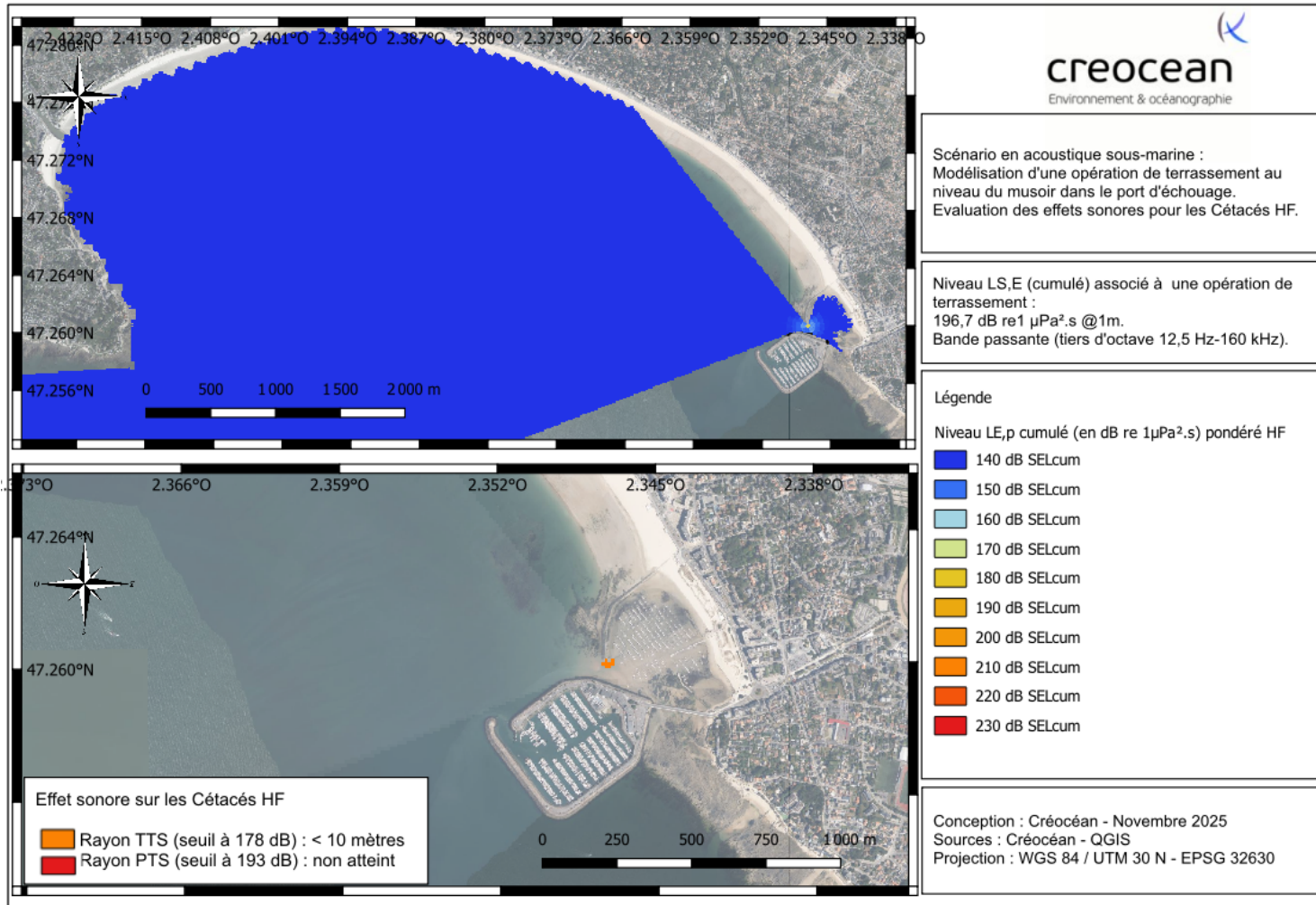


Figure 25-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

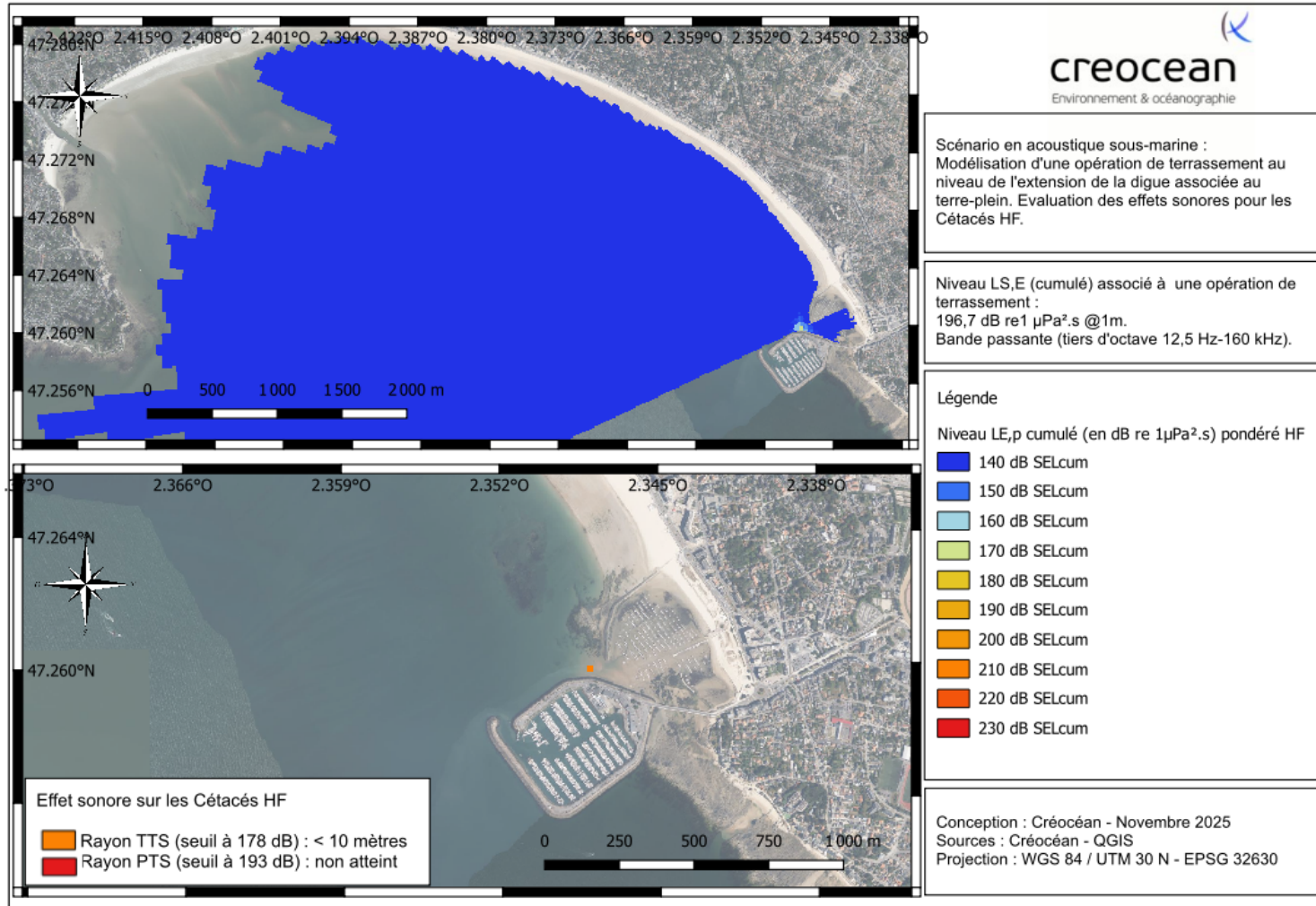


Figure 26-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

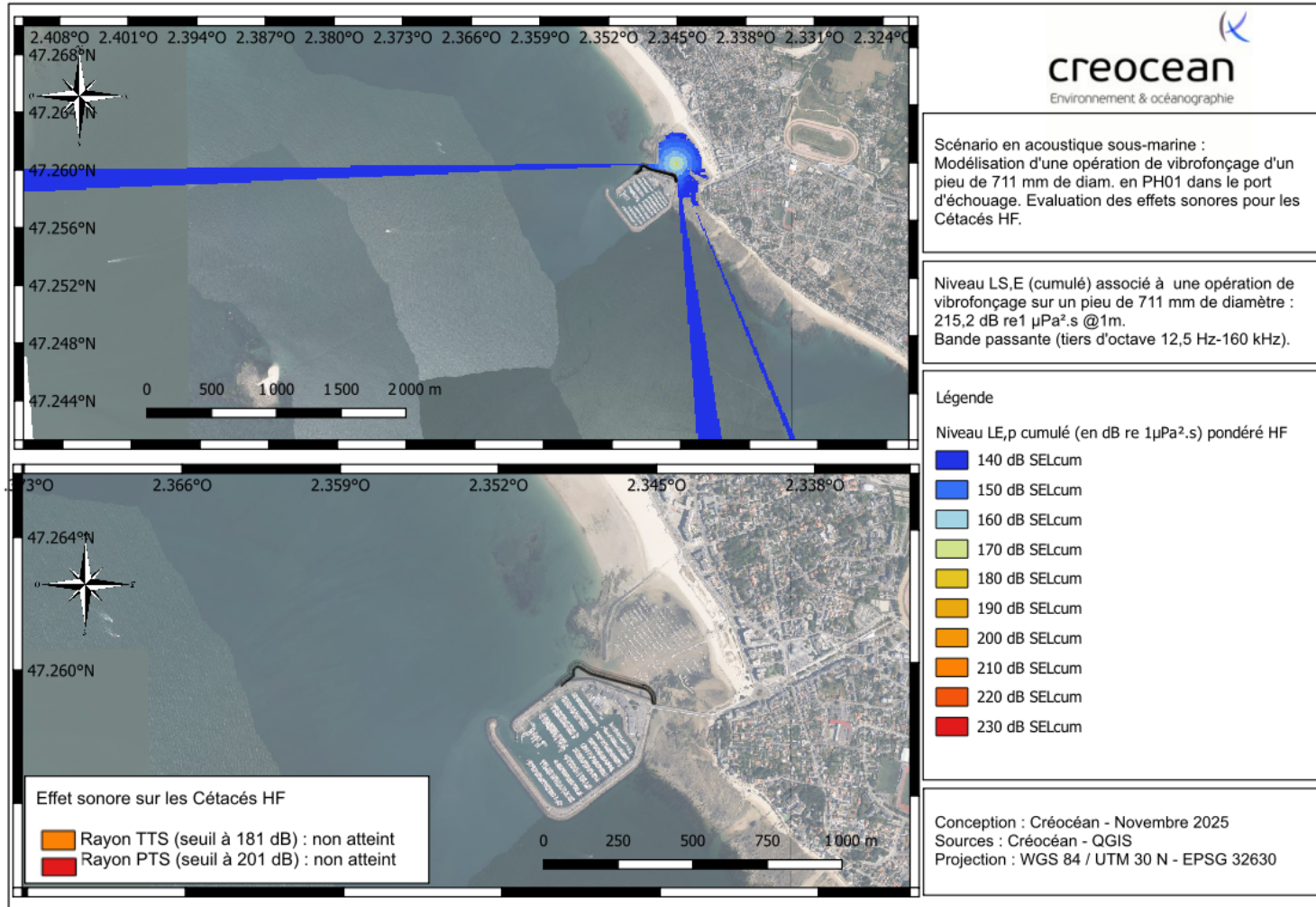


Figure 27-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

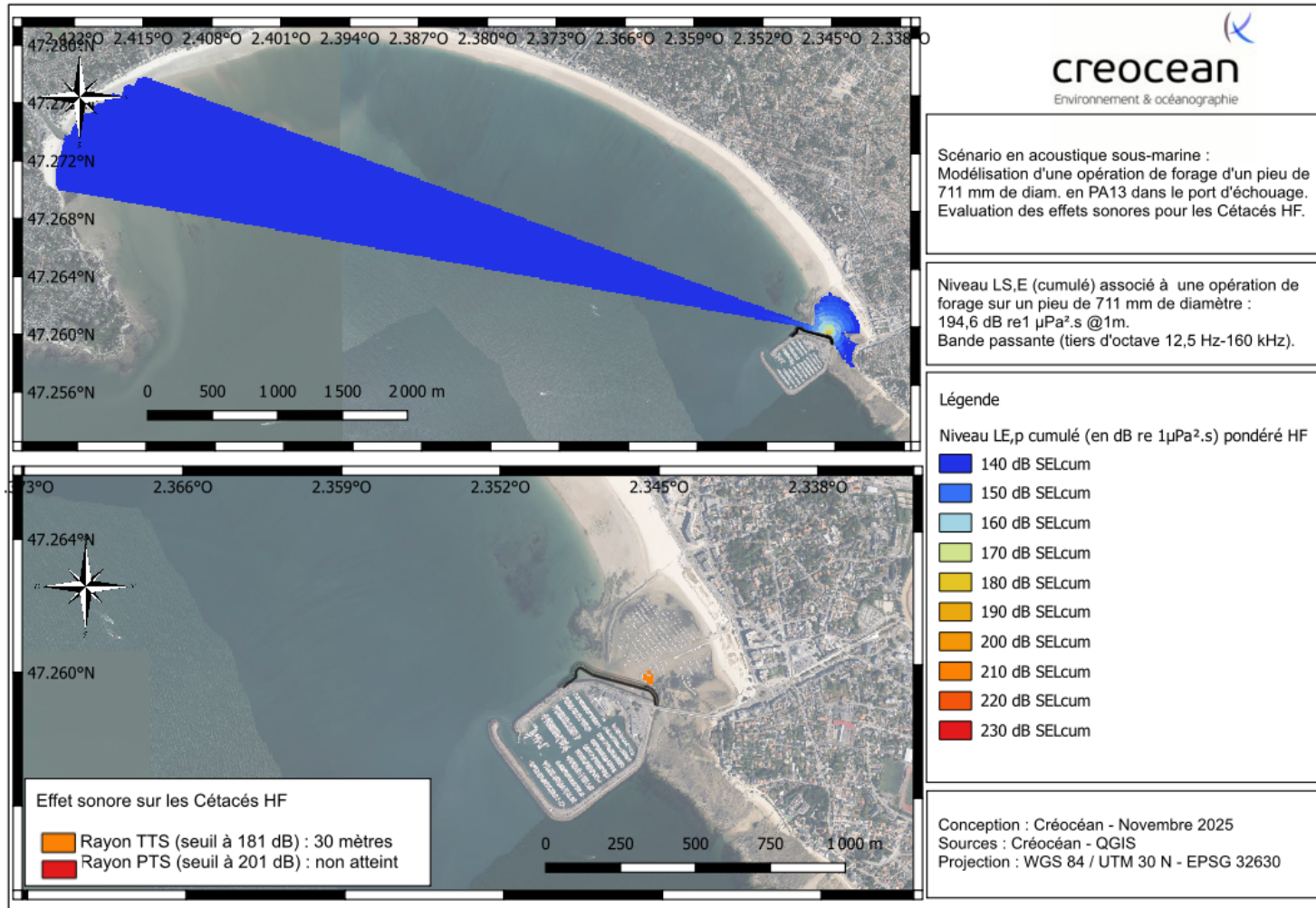


Figure 28-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

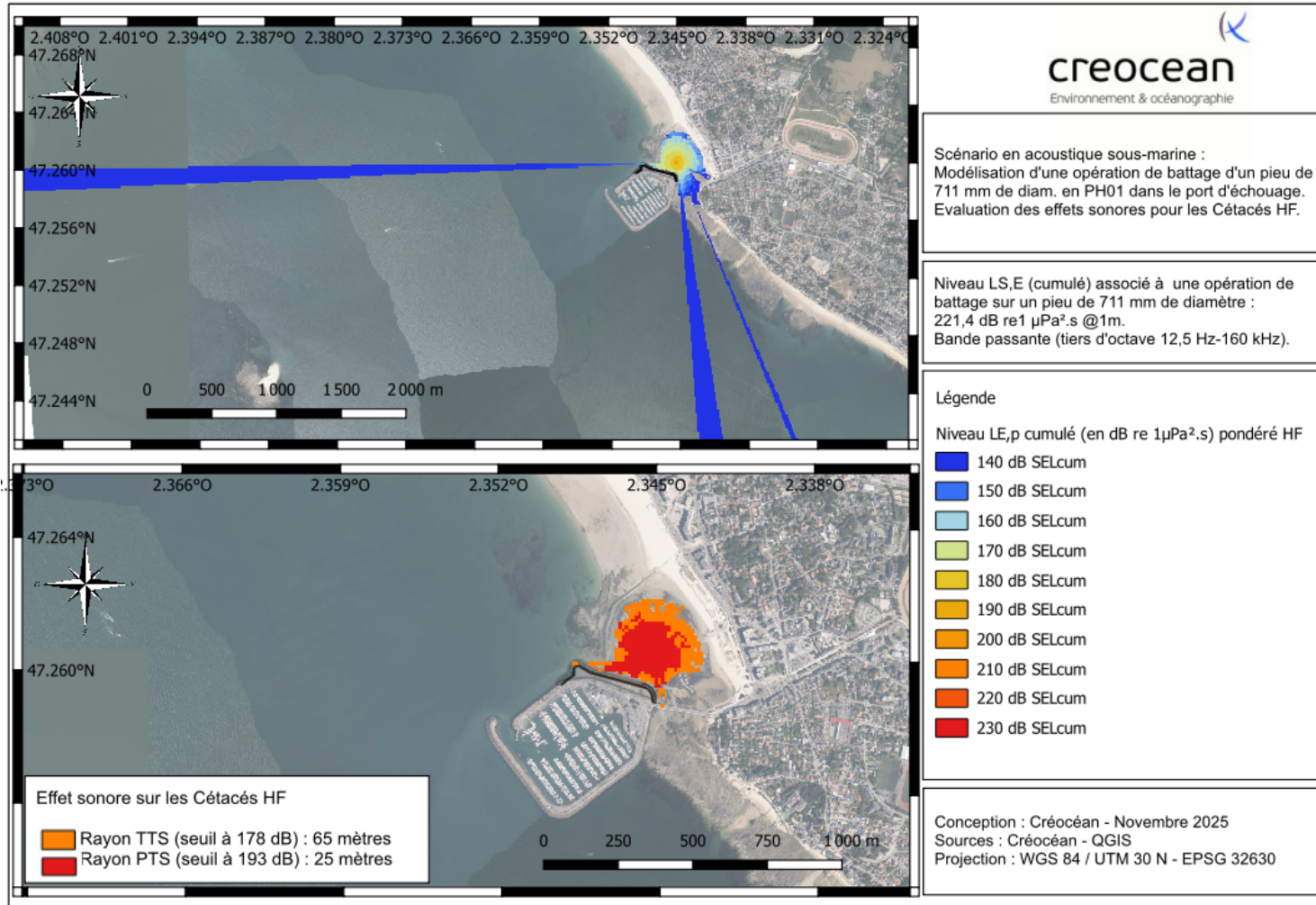


Figure 29-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

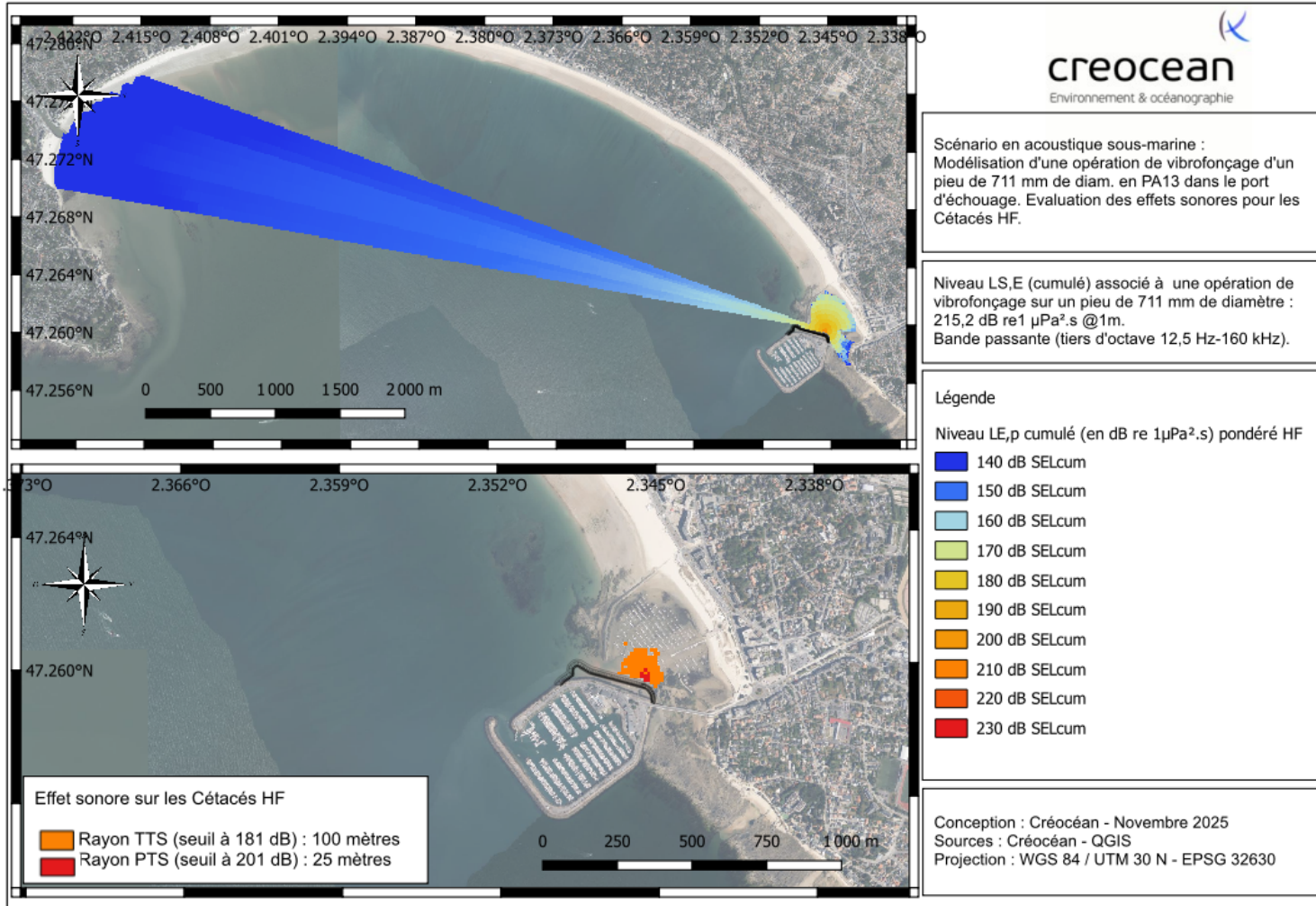


Figure 30-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

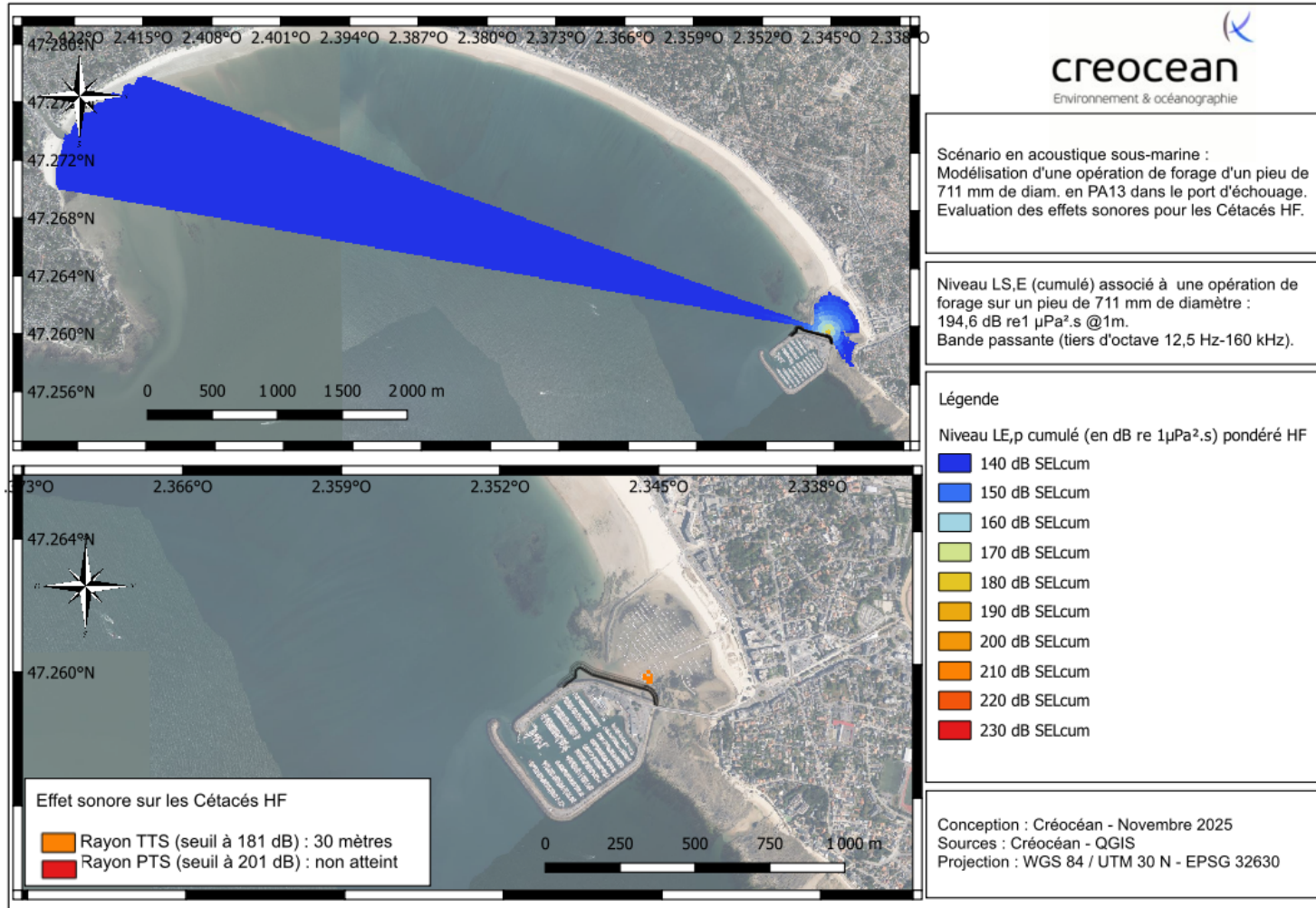


Figure 31-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

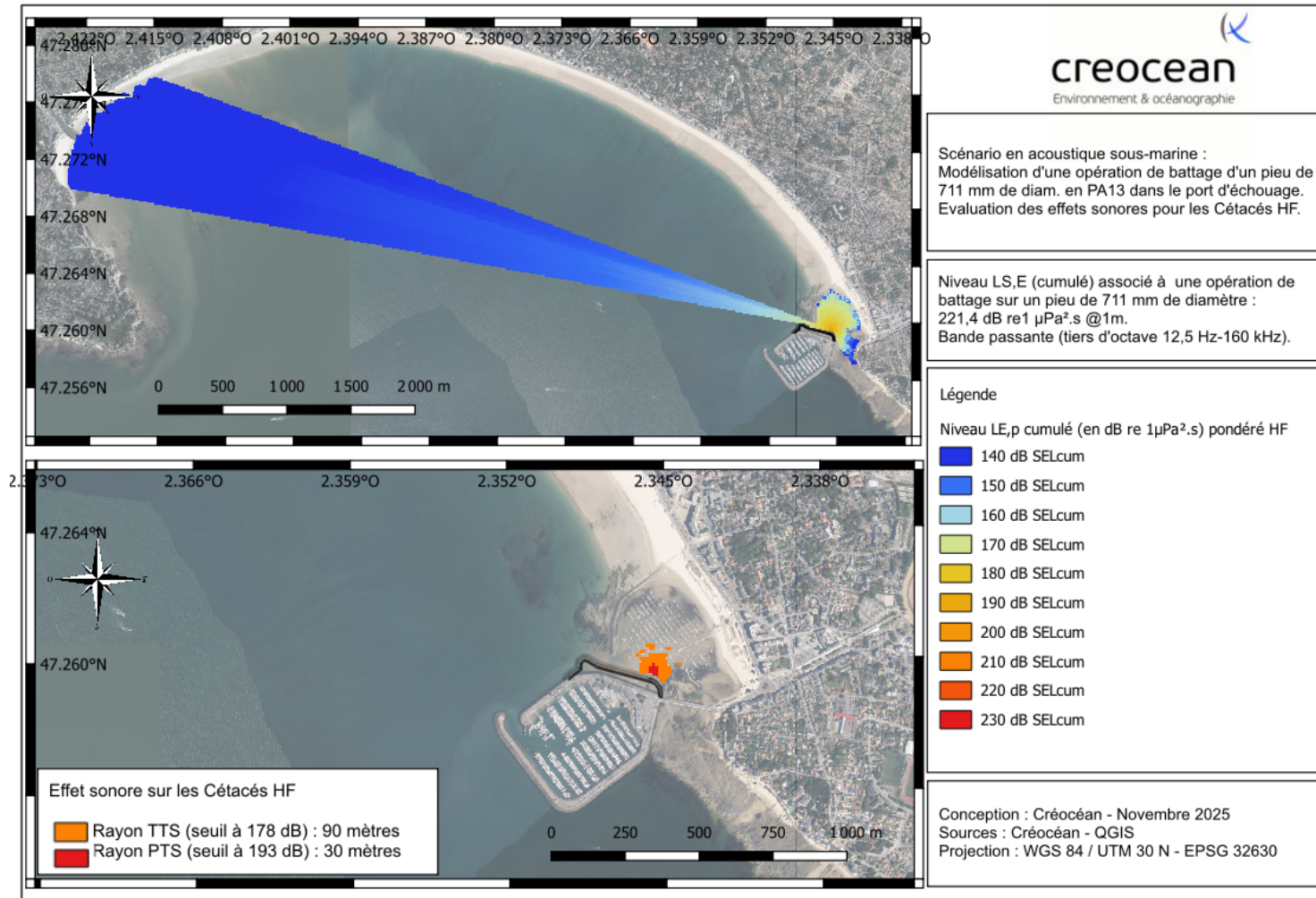


Figure 32-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés HF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

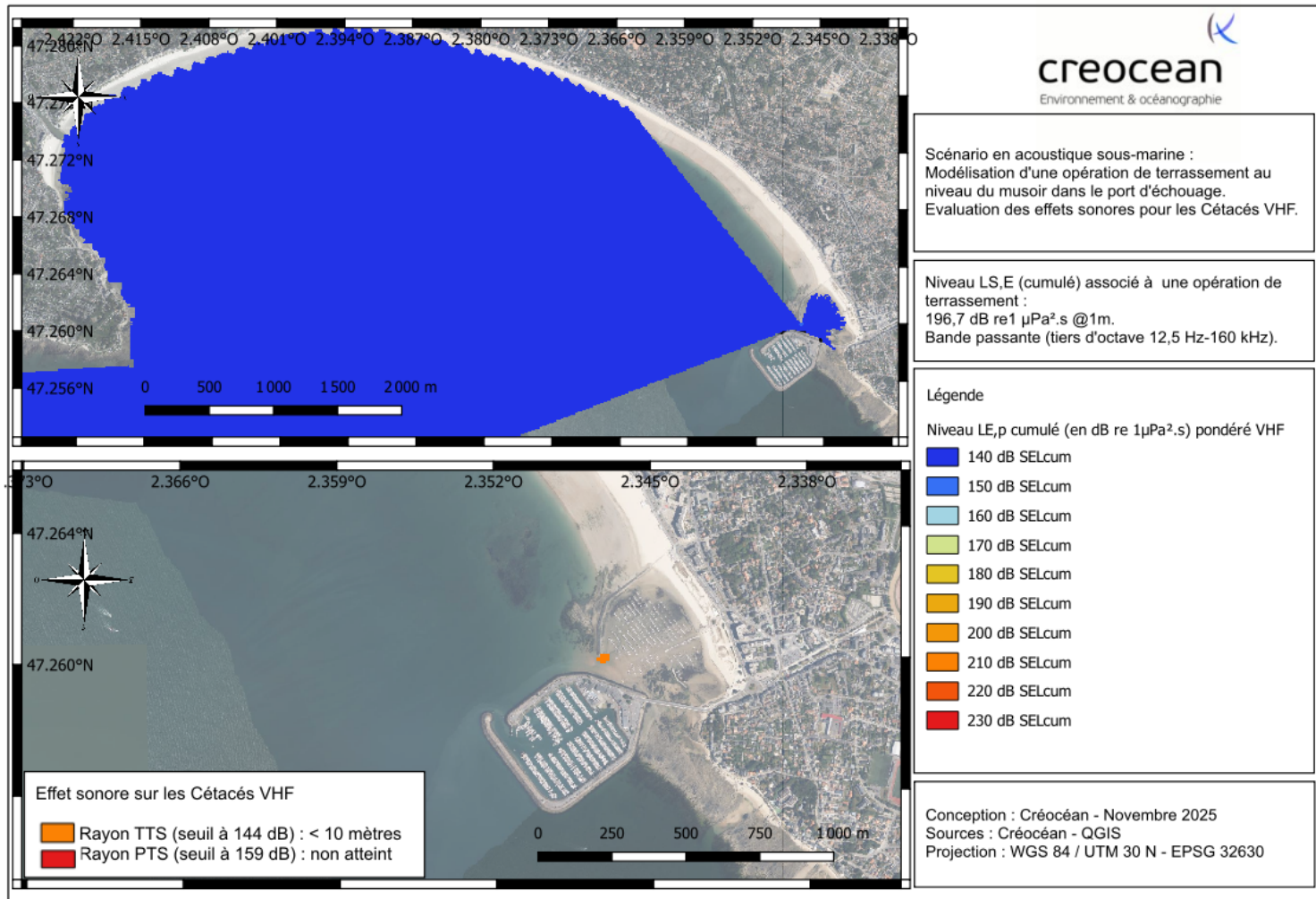


Figure 33-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

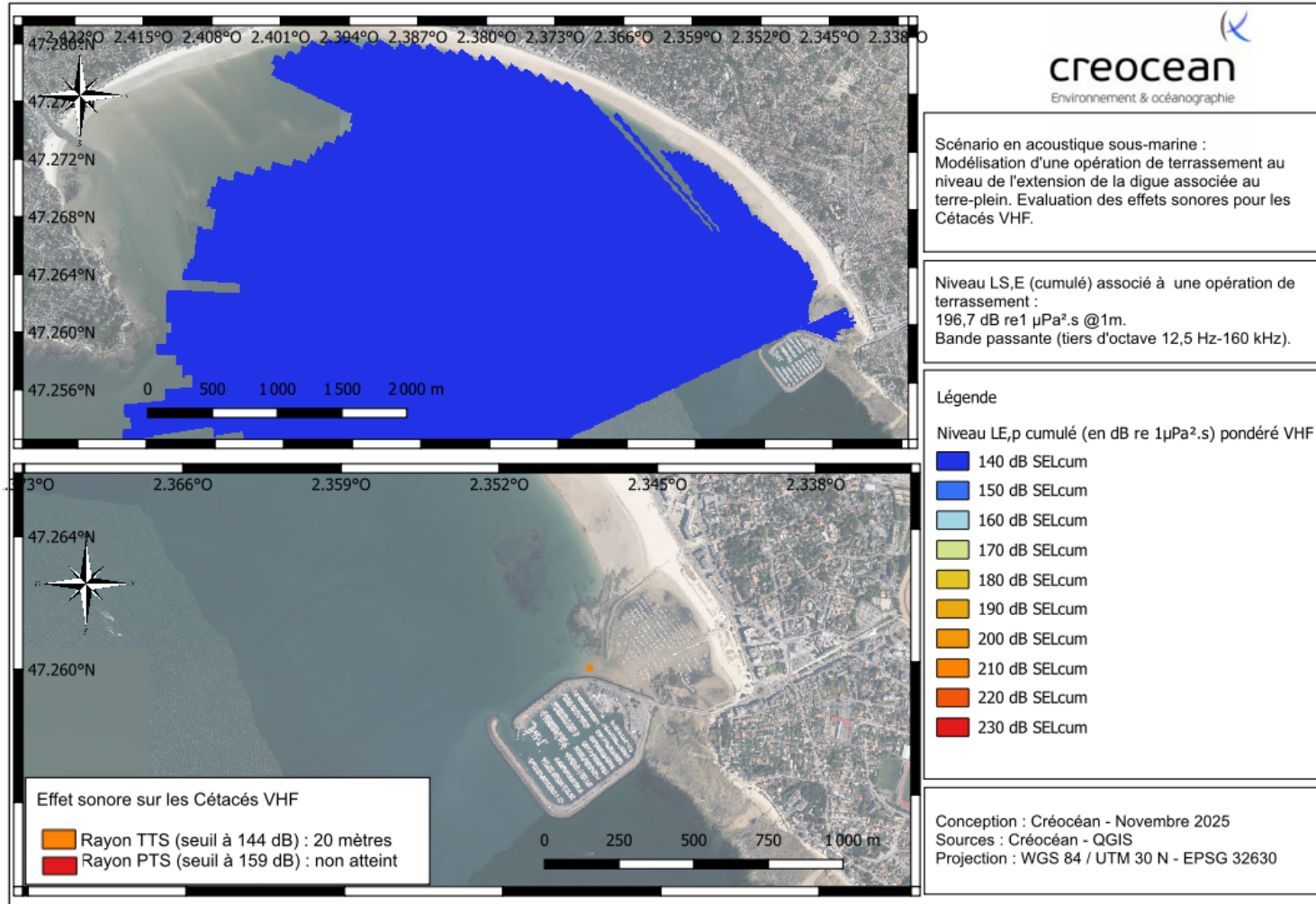


Figure 34-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

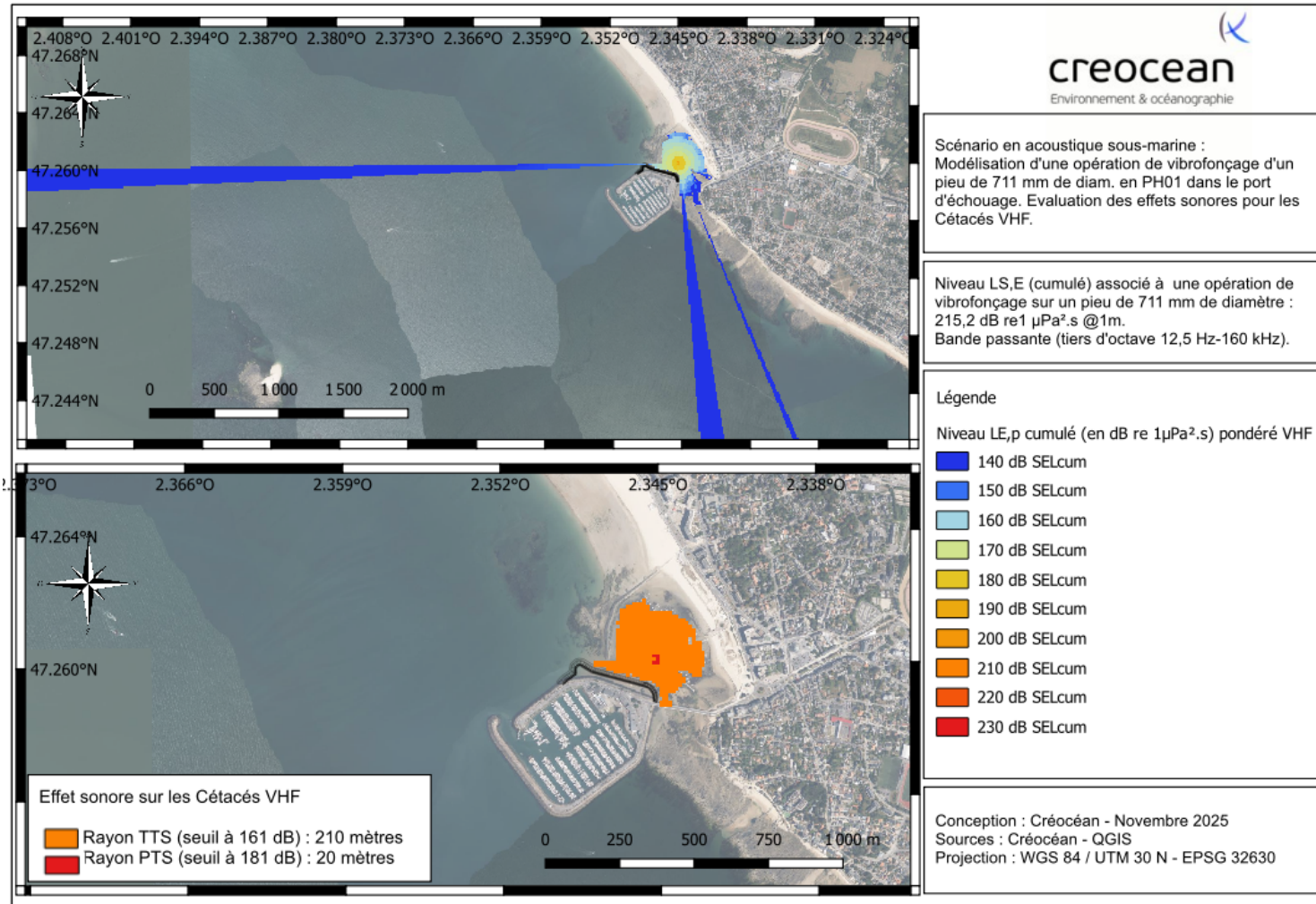


Figure 35-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

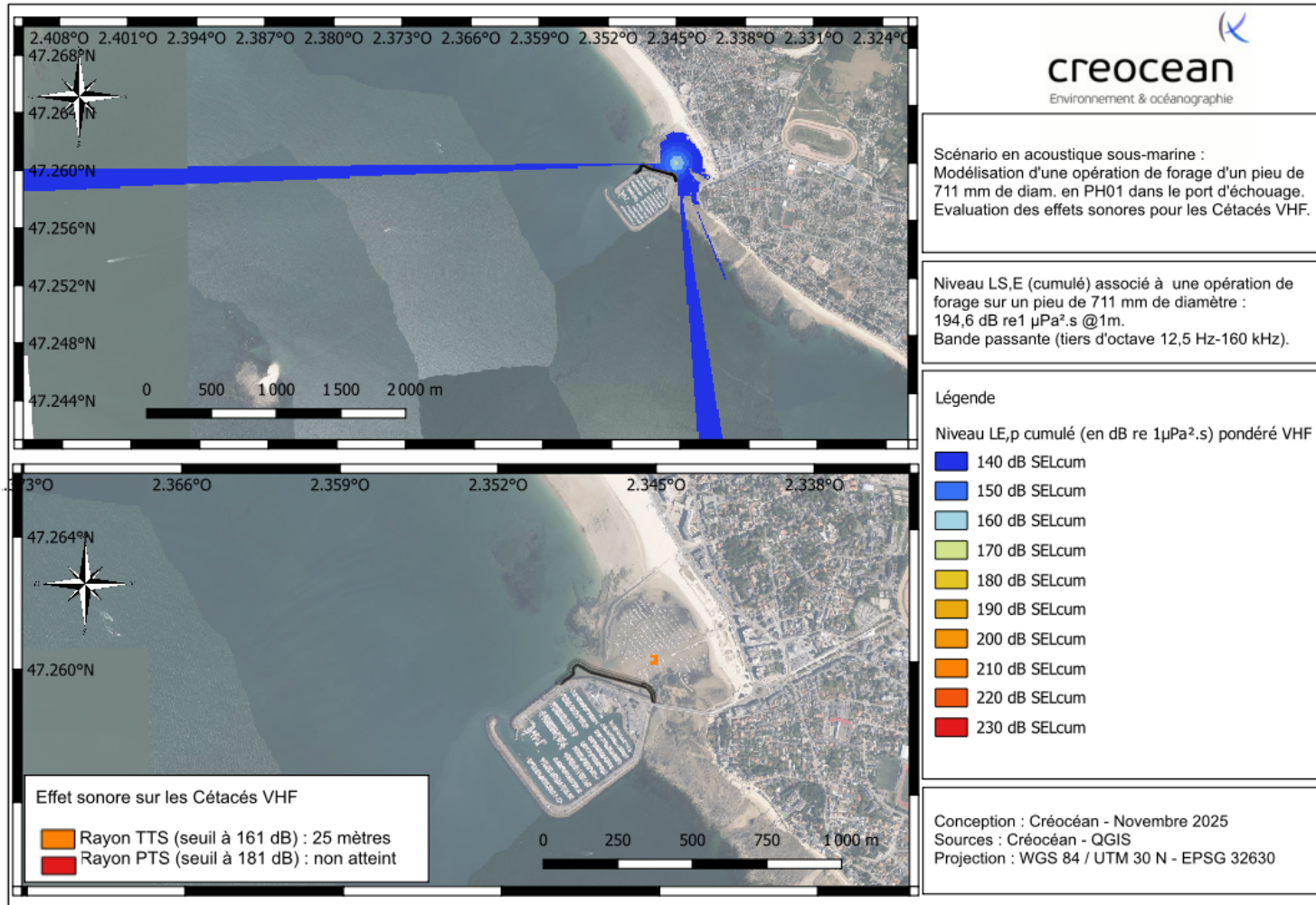


Figure 36-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

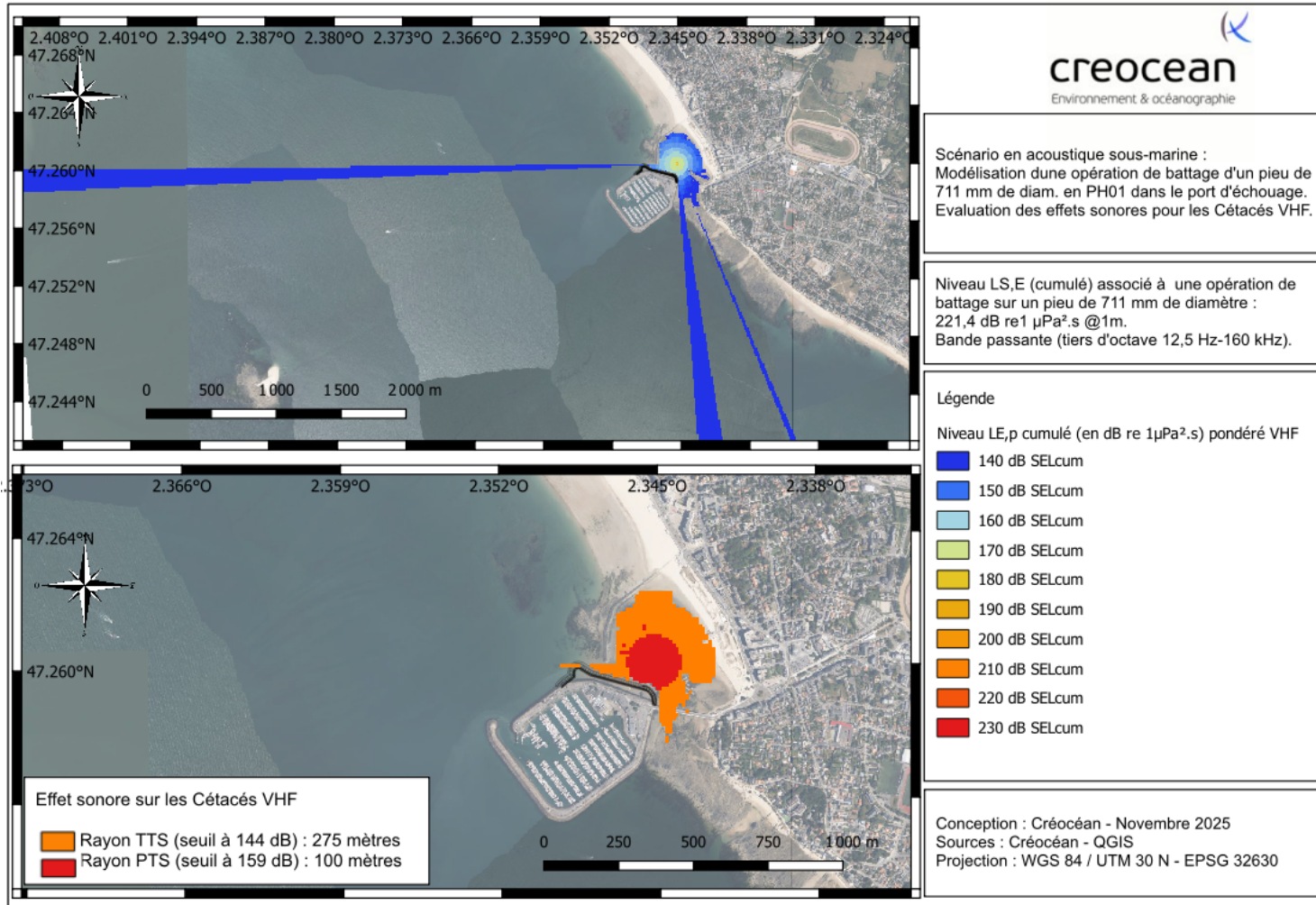


Figure 37-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

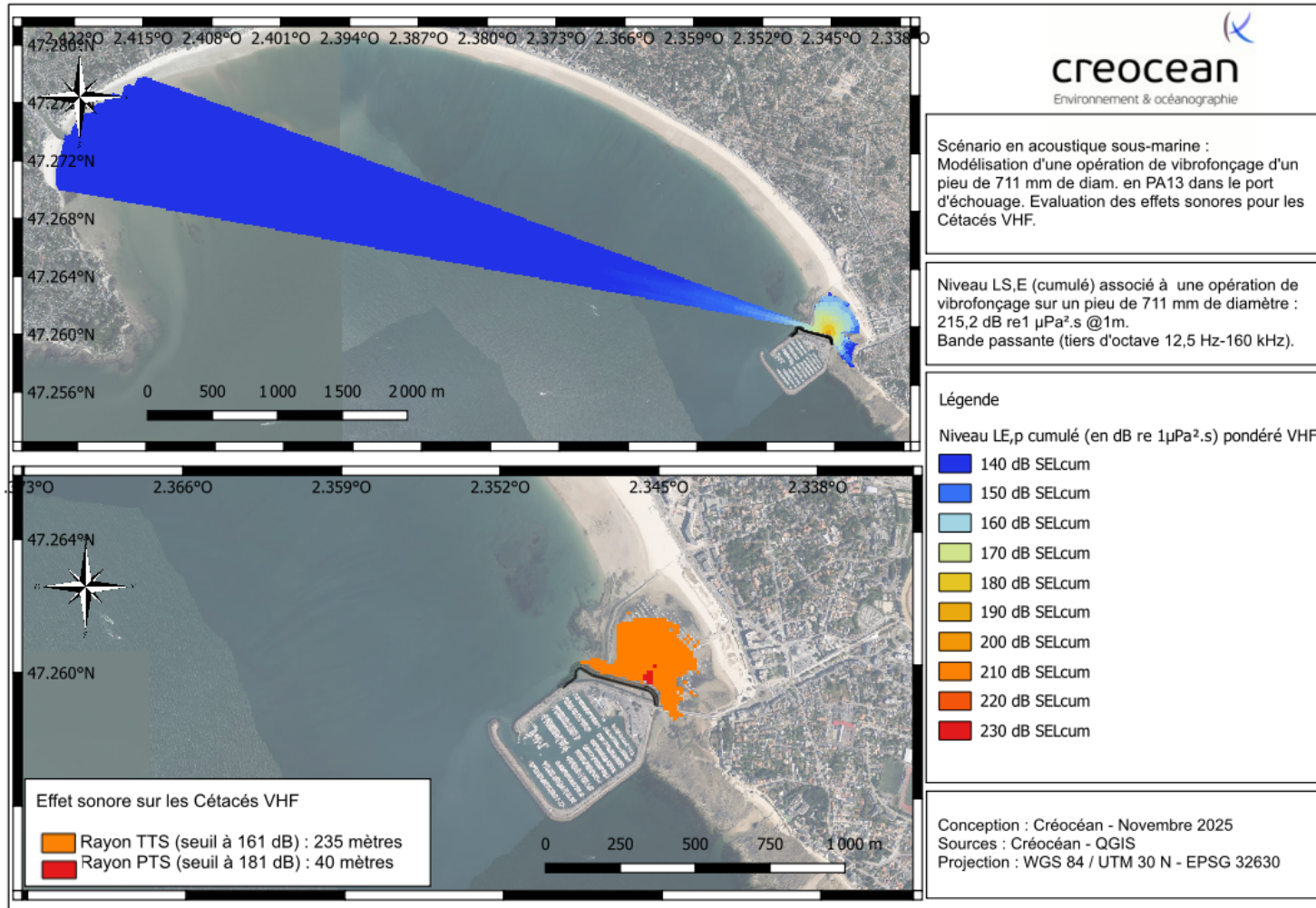


Figure 38-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

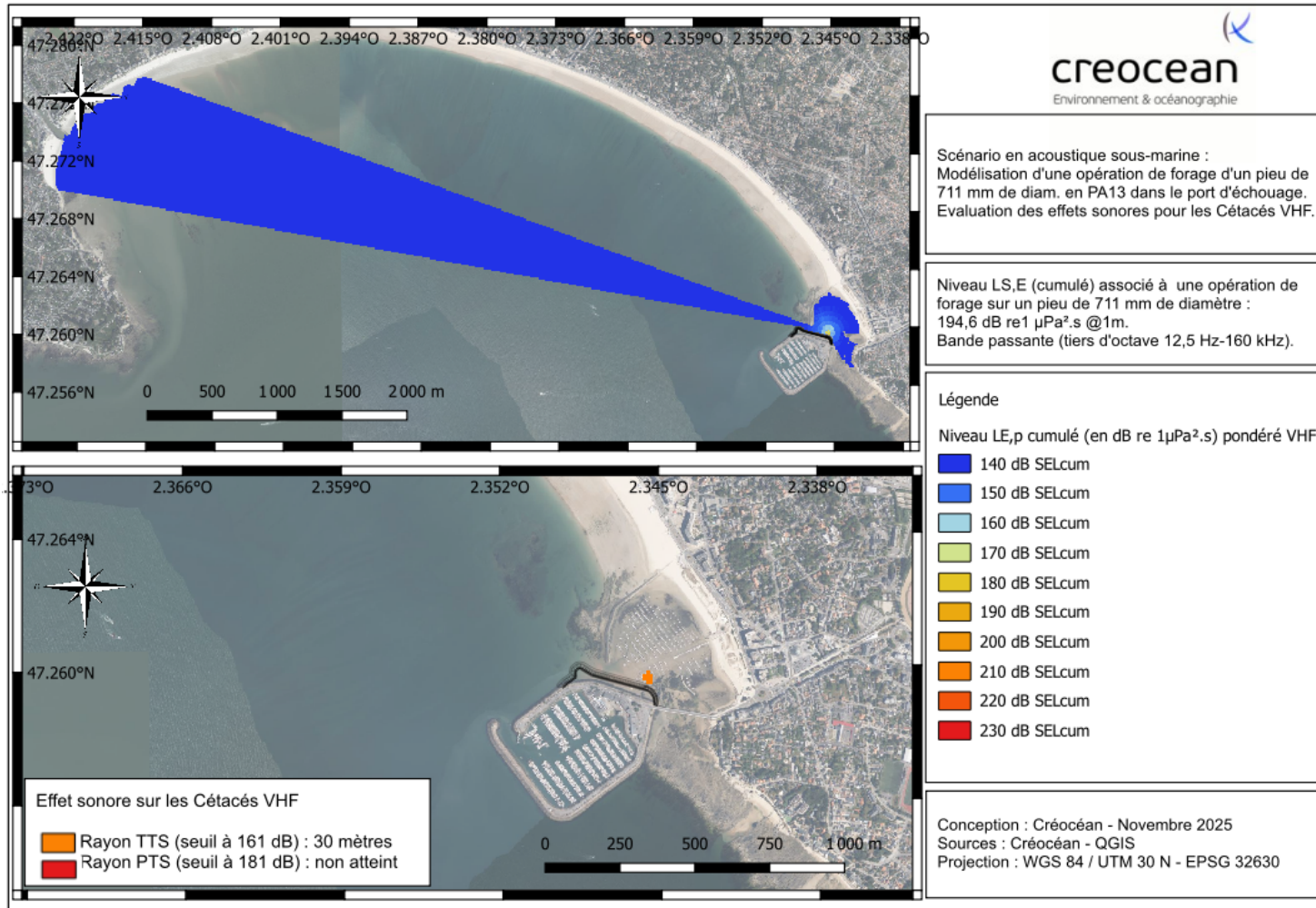


Figure 39-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

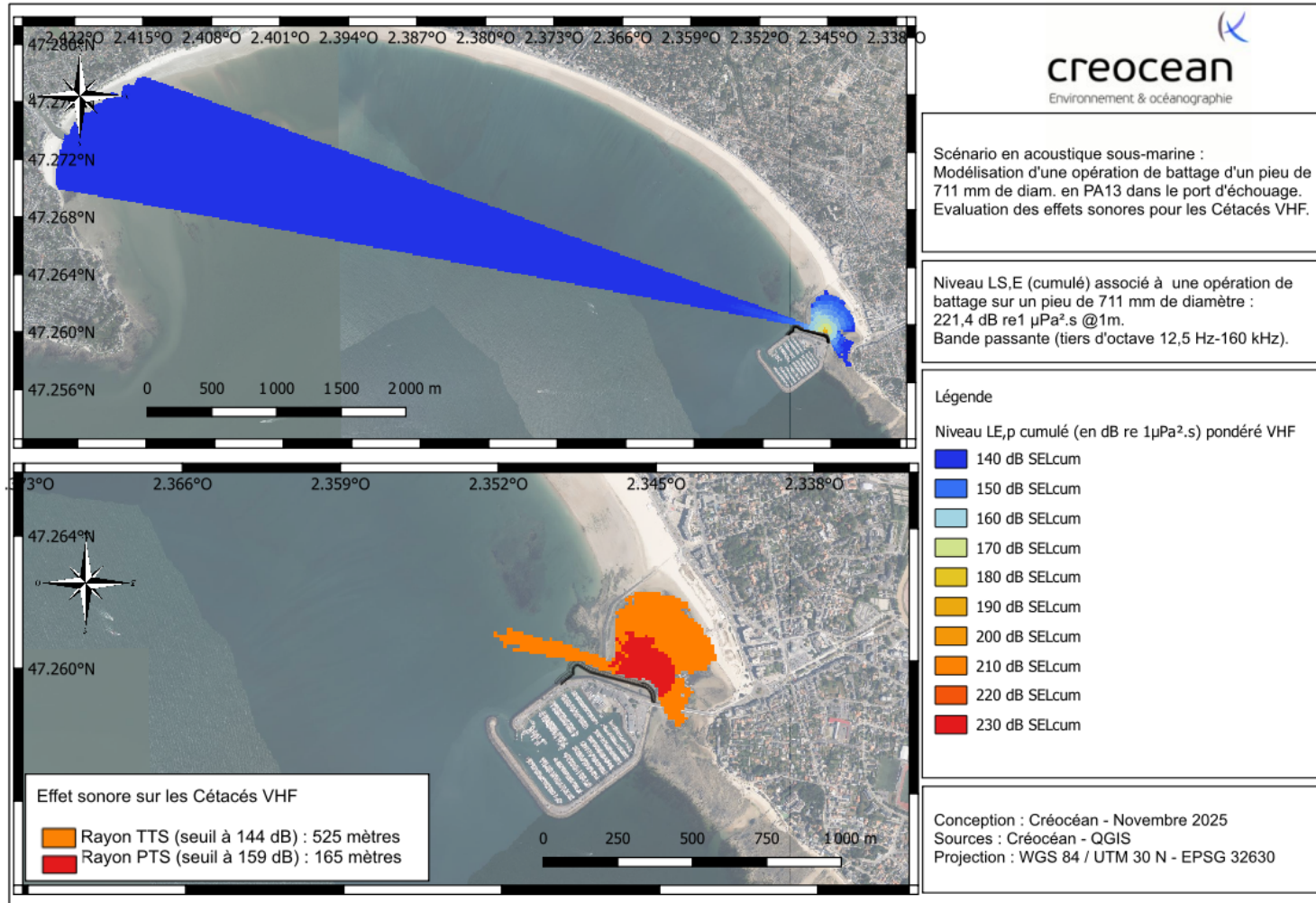


Figure 40-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Cétacés VHF.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

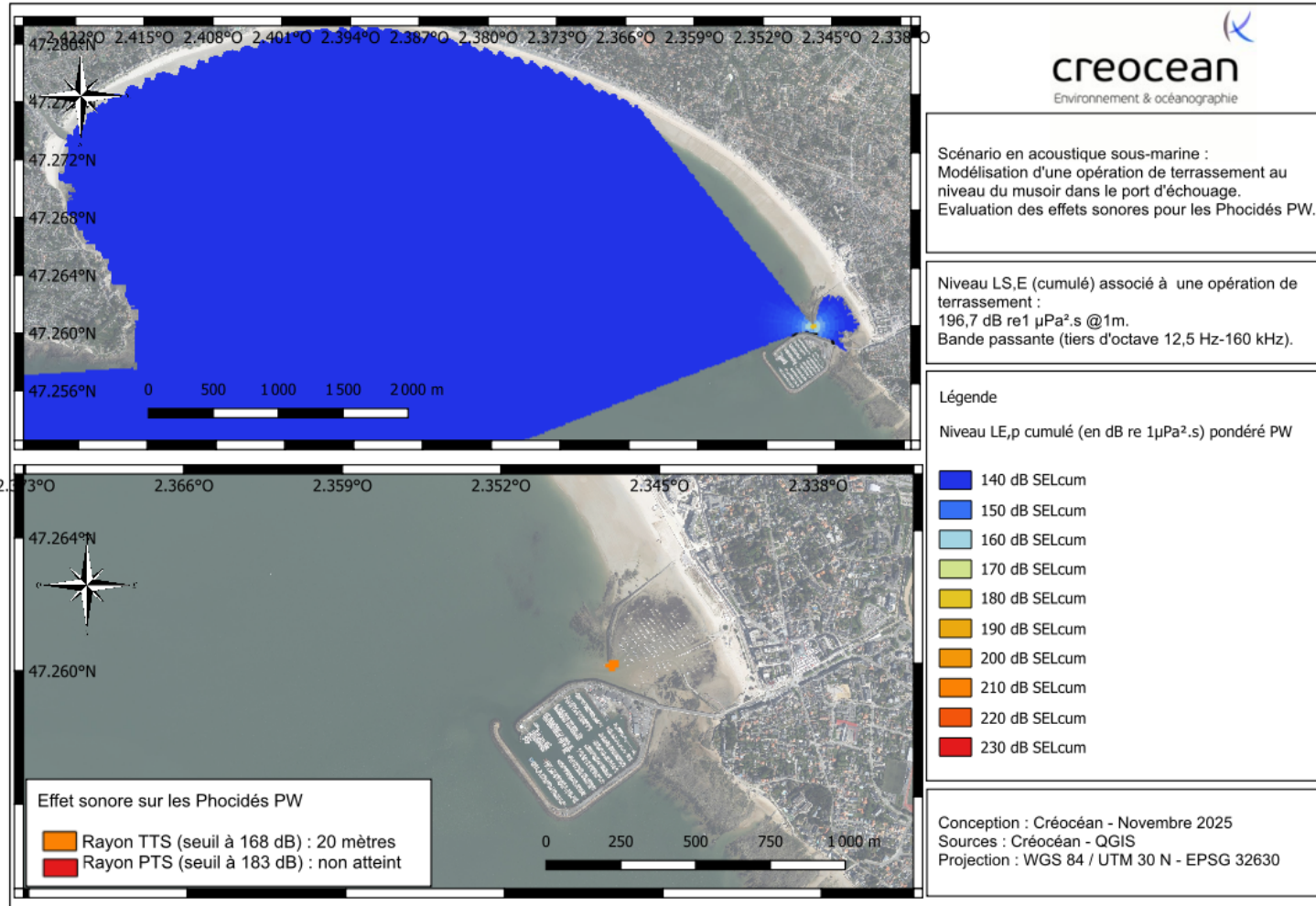


Figure 41-A : Modélisation d'une opération de terrassement du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

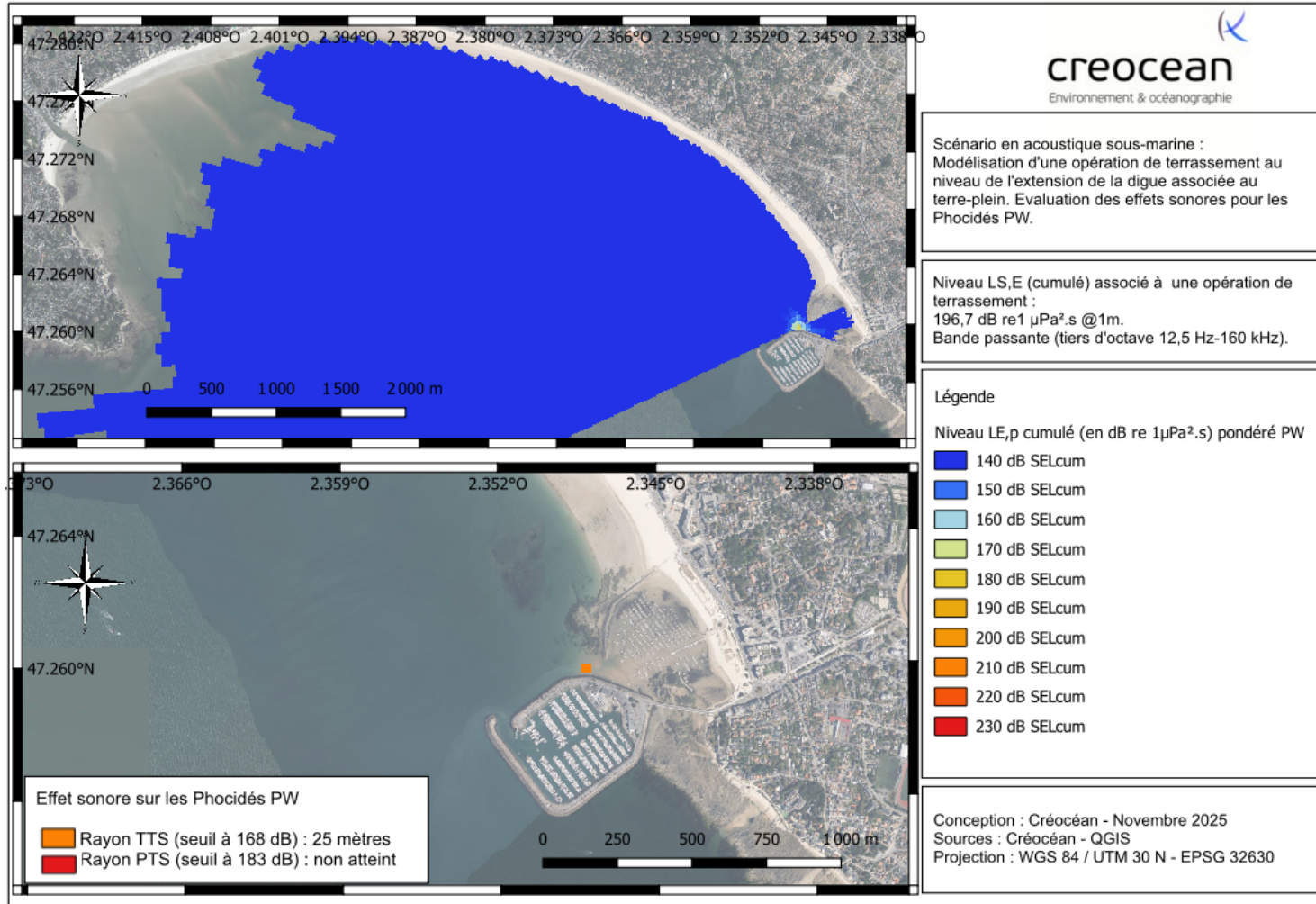


Figure 42-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

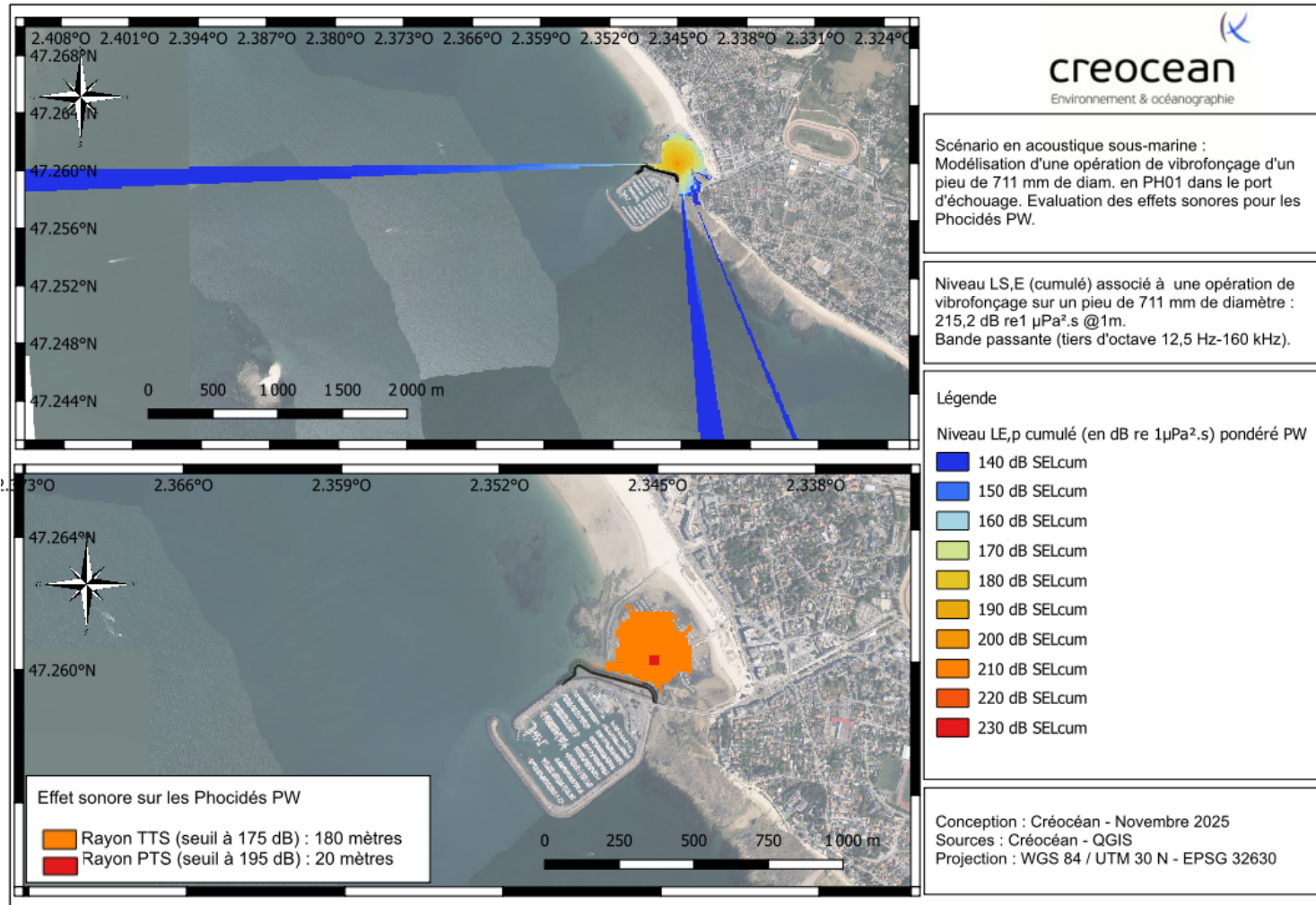


Figure 43-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

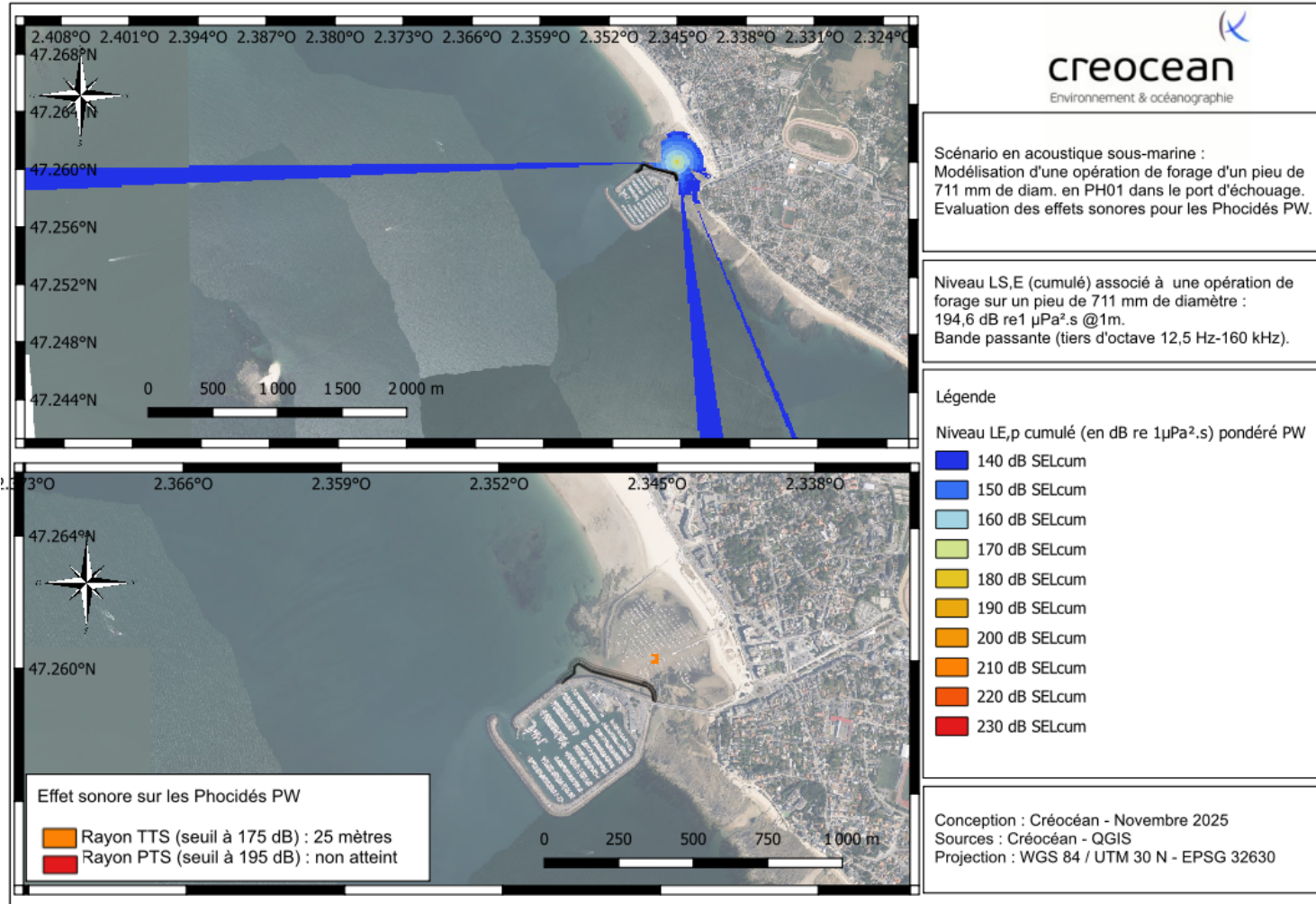


Figure 44-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

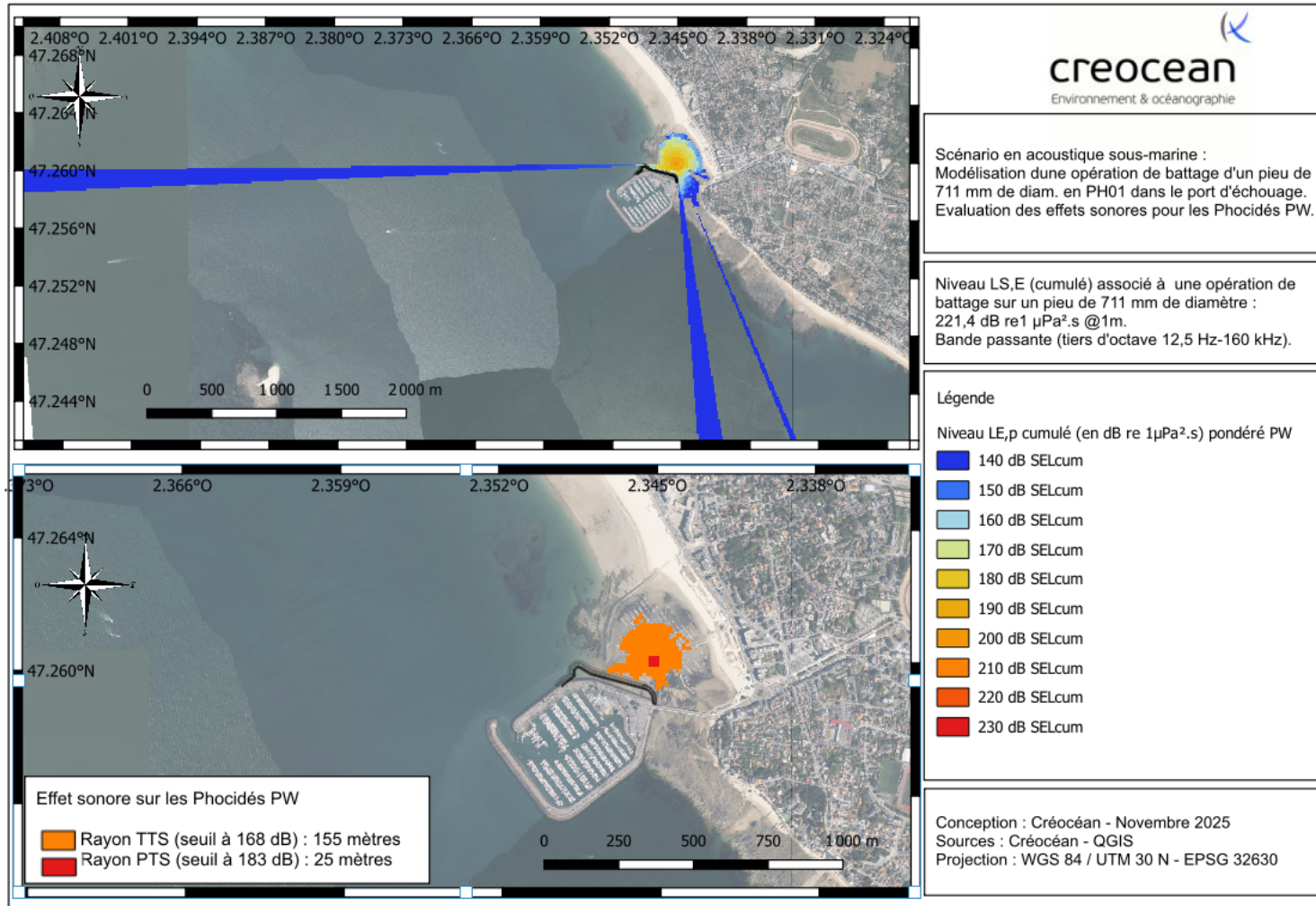


Figure 45-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

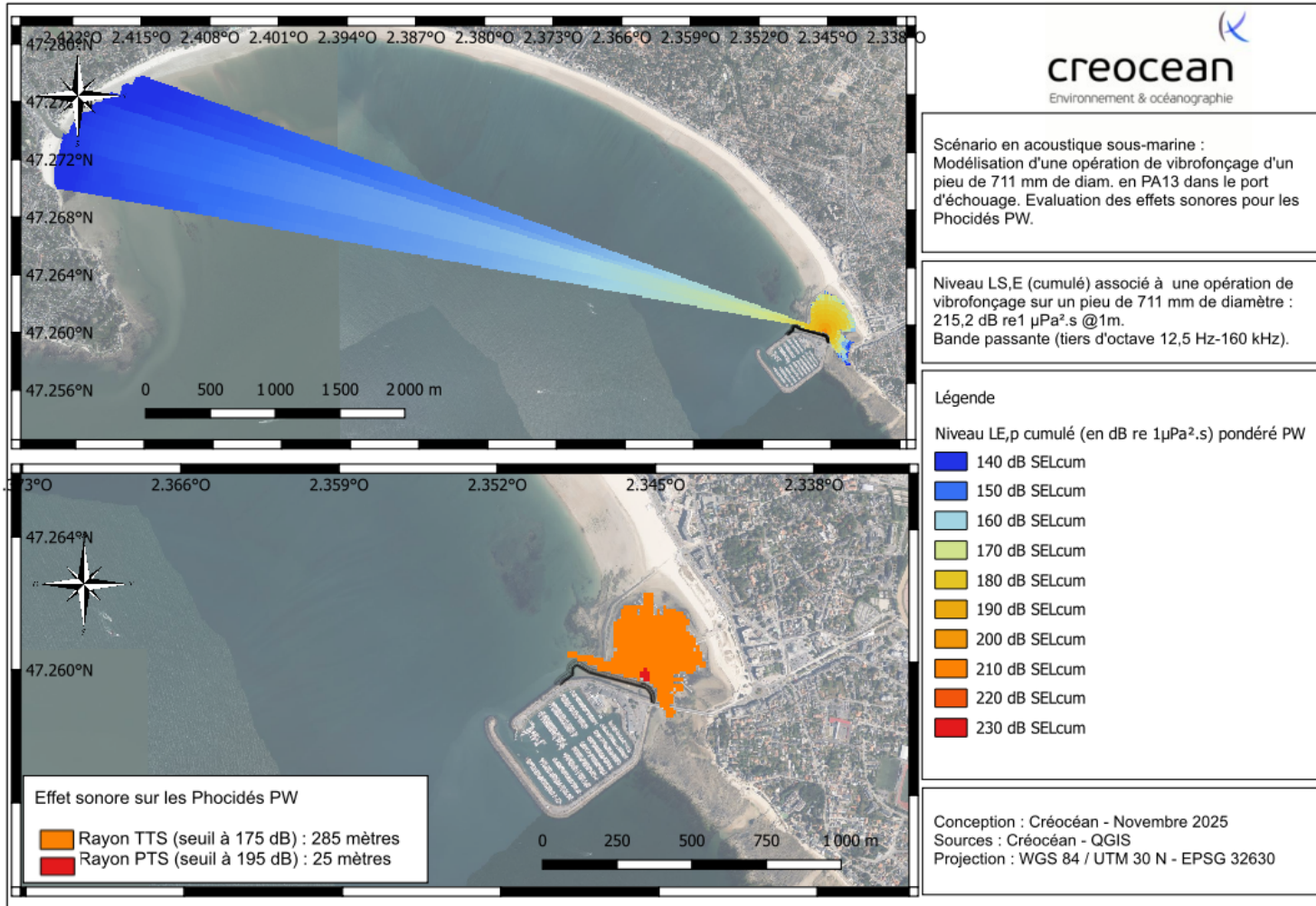


Figure 46-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

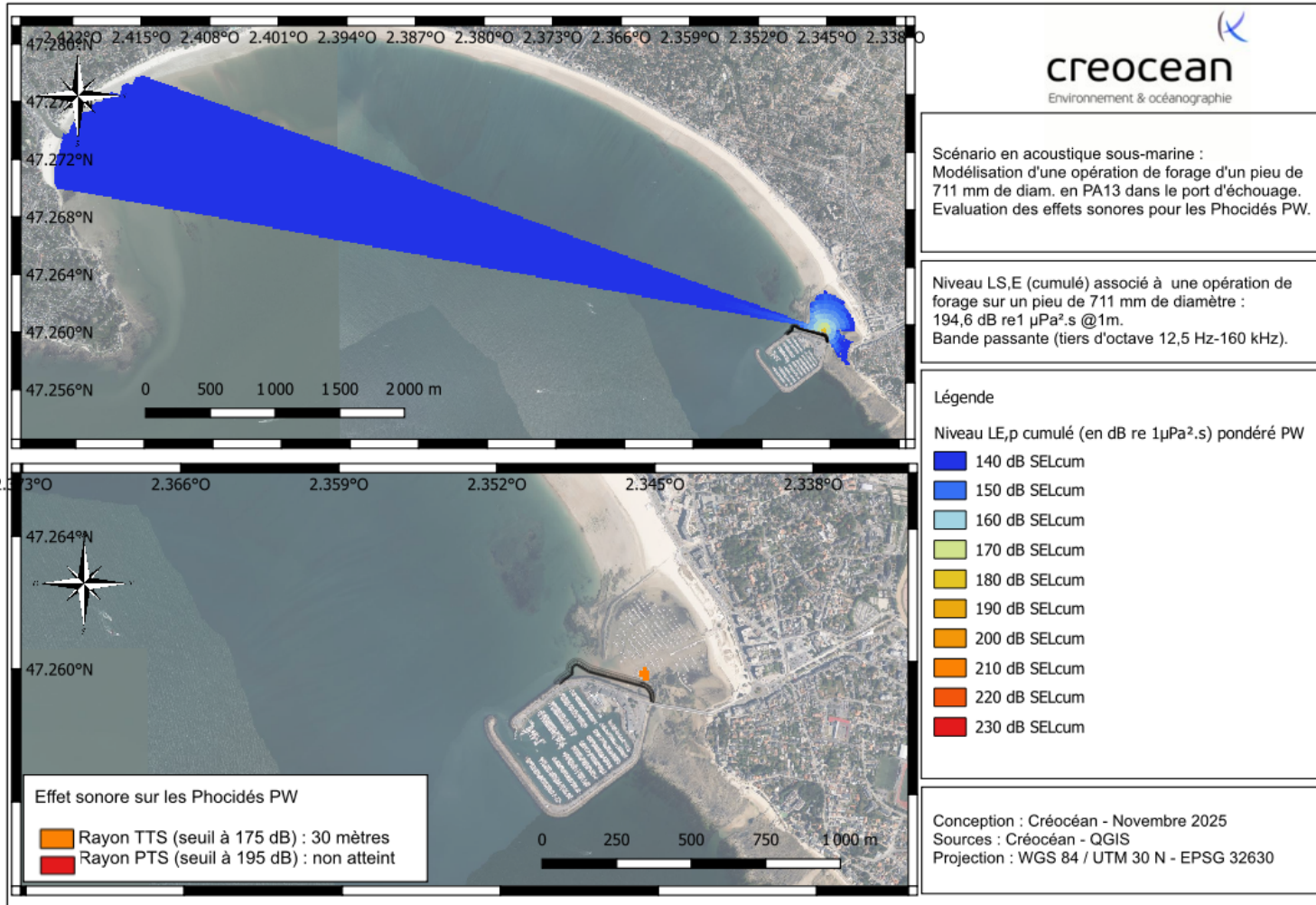


Figure 47-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

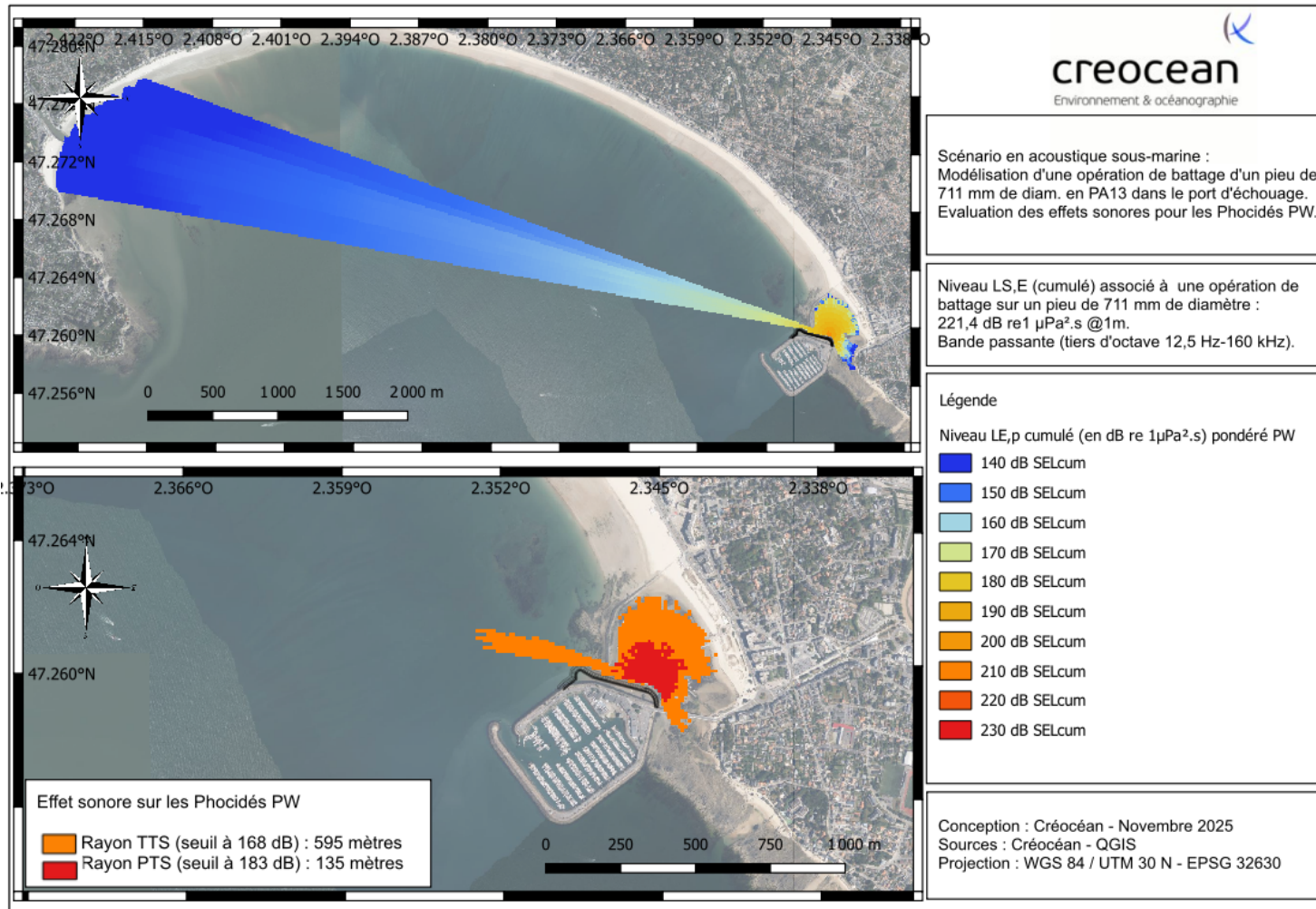


Figure 48-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Phocidés PW.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

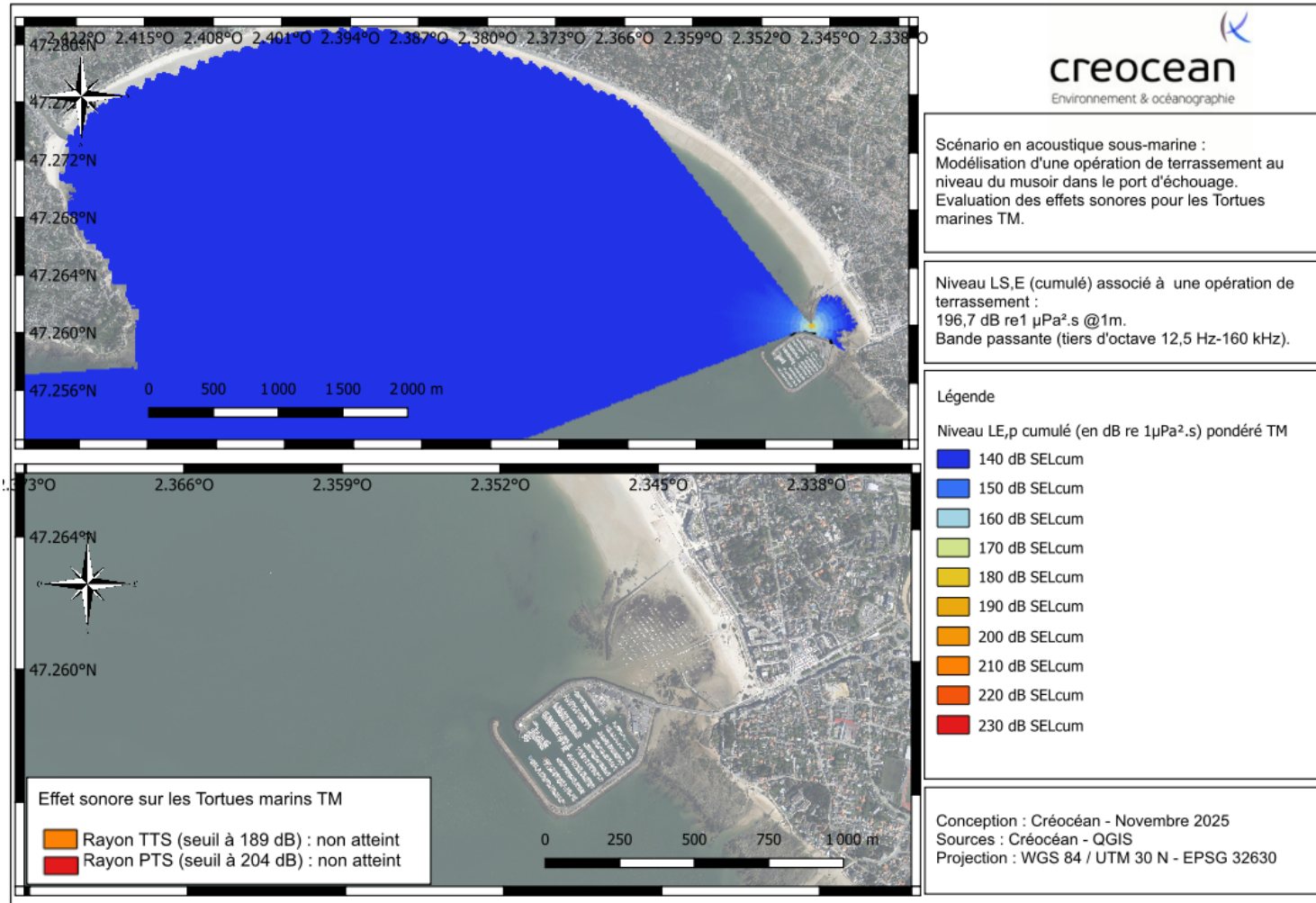


Figure 49-A : Modélisation d'une opération de terrassement du musoir. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

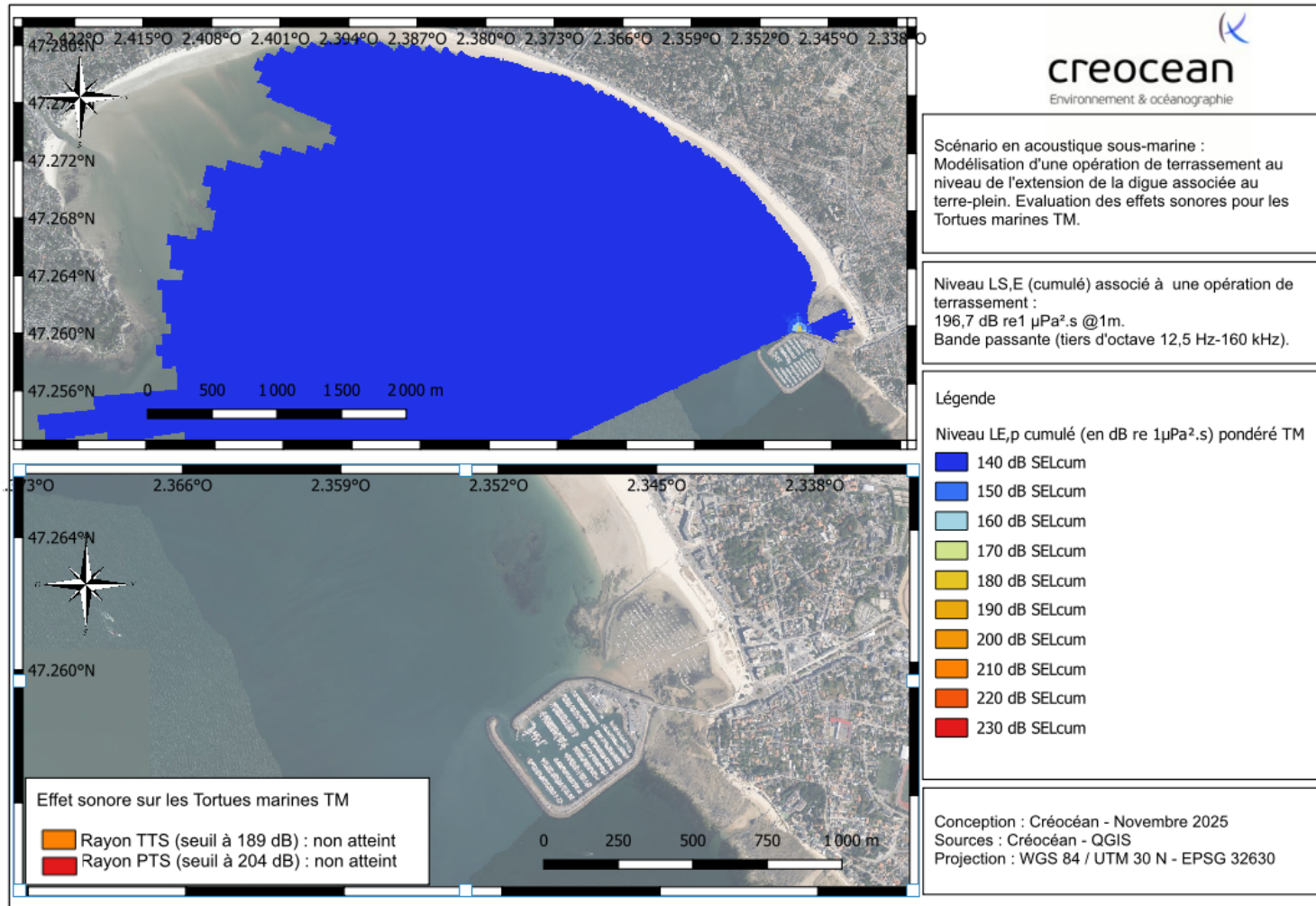


Figure 50-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

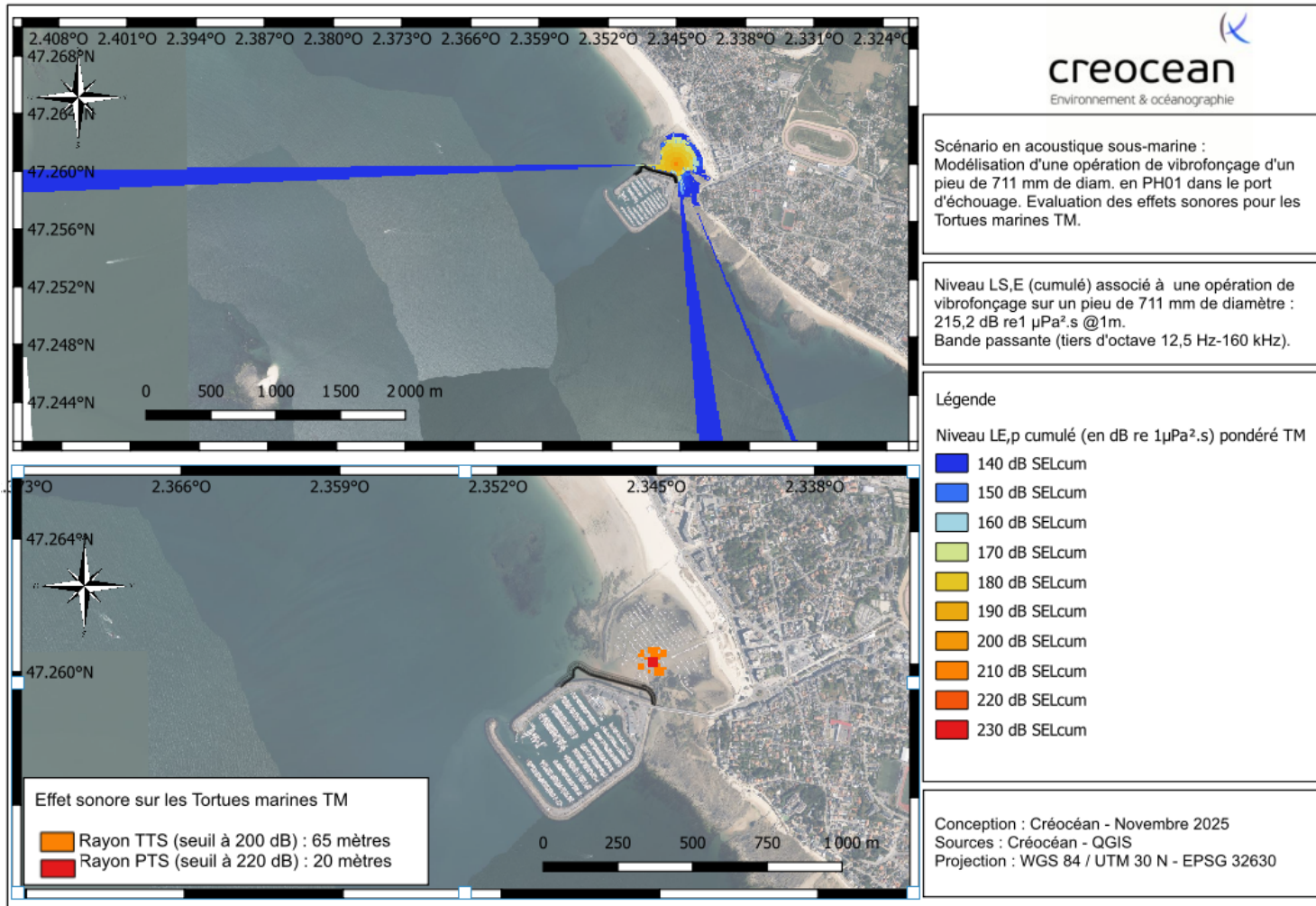


Figure 51-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

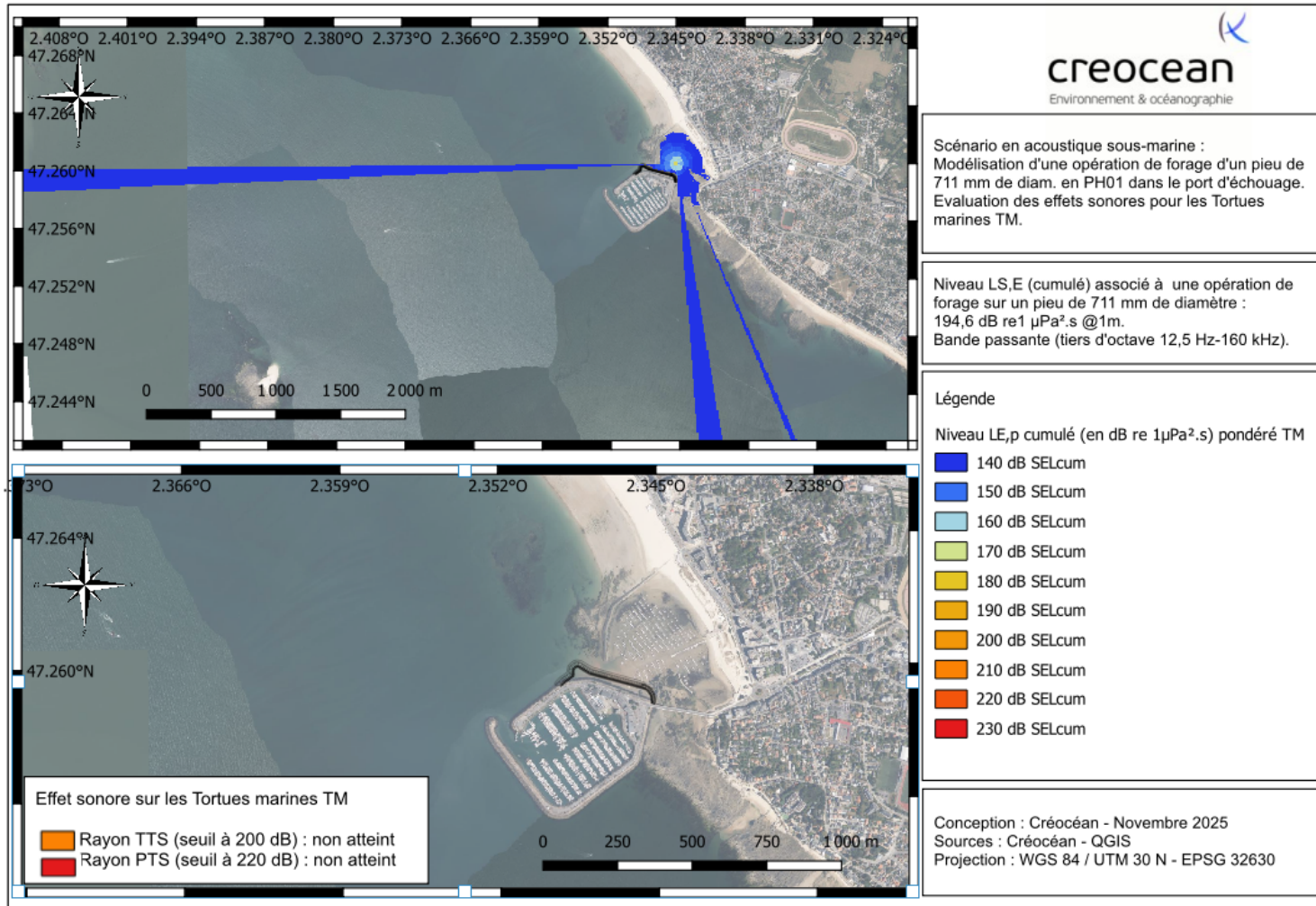


Figure 52-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

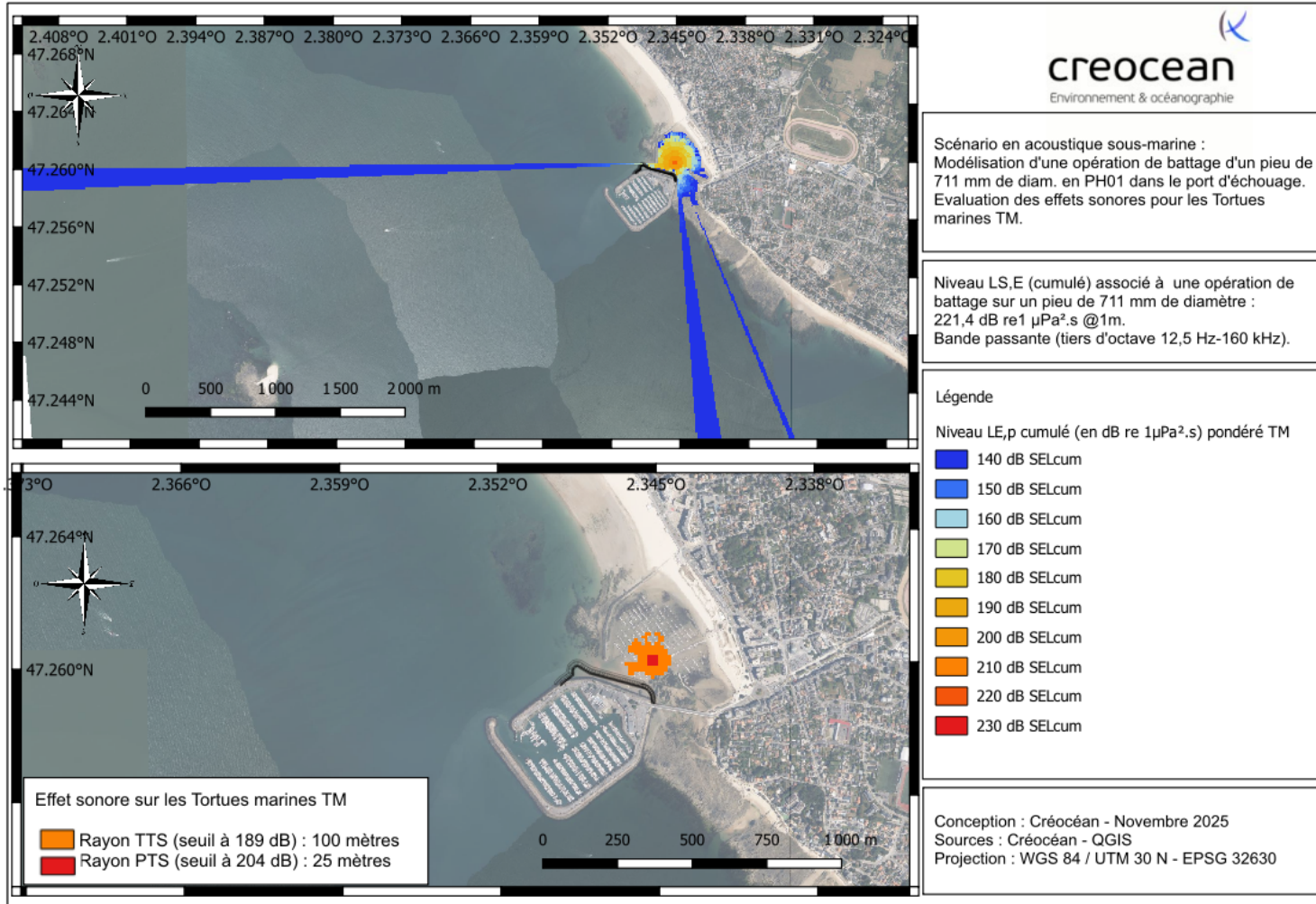


Figure 53-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

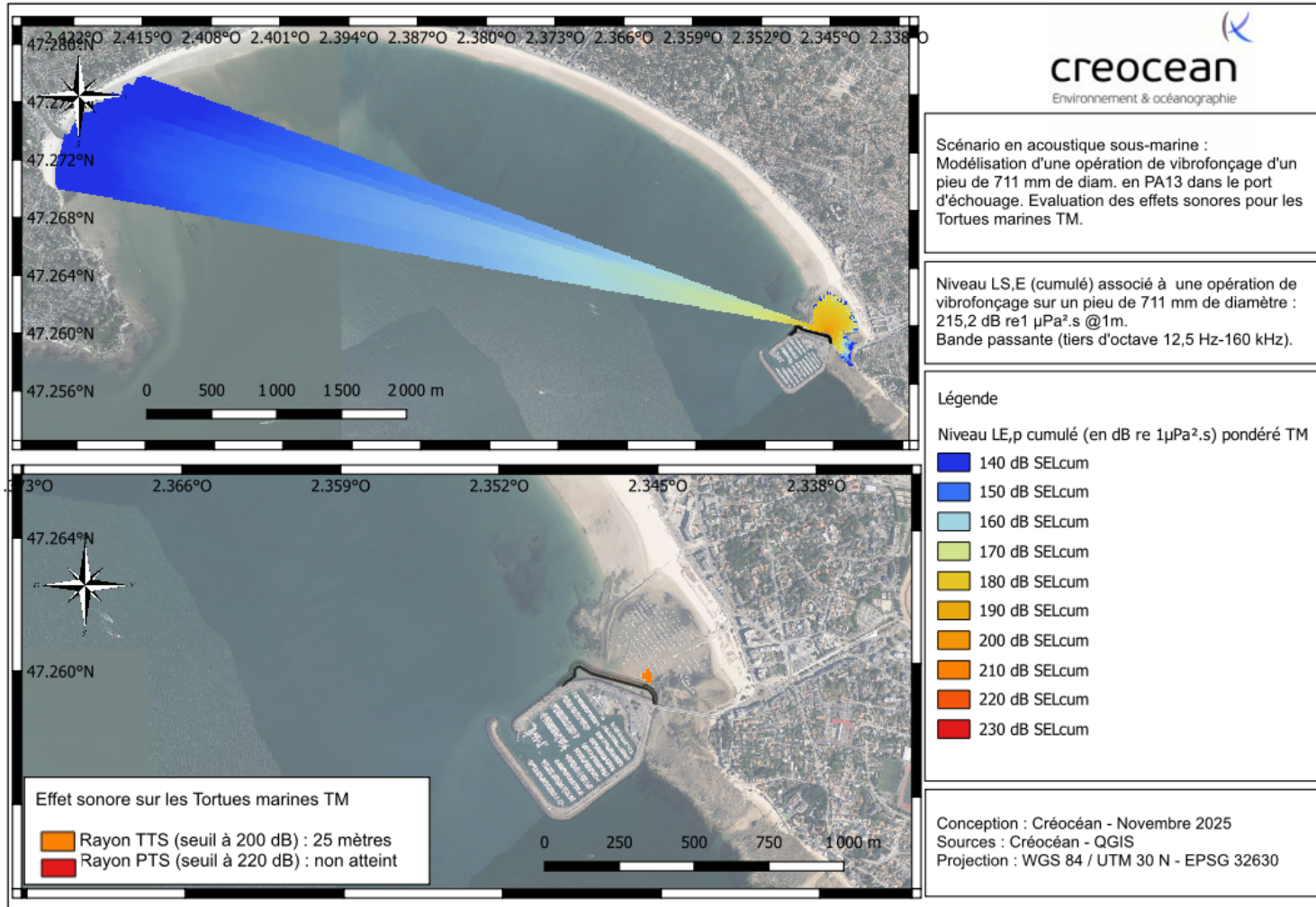


Figure 54-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

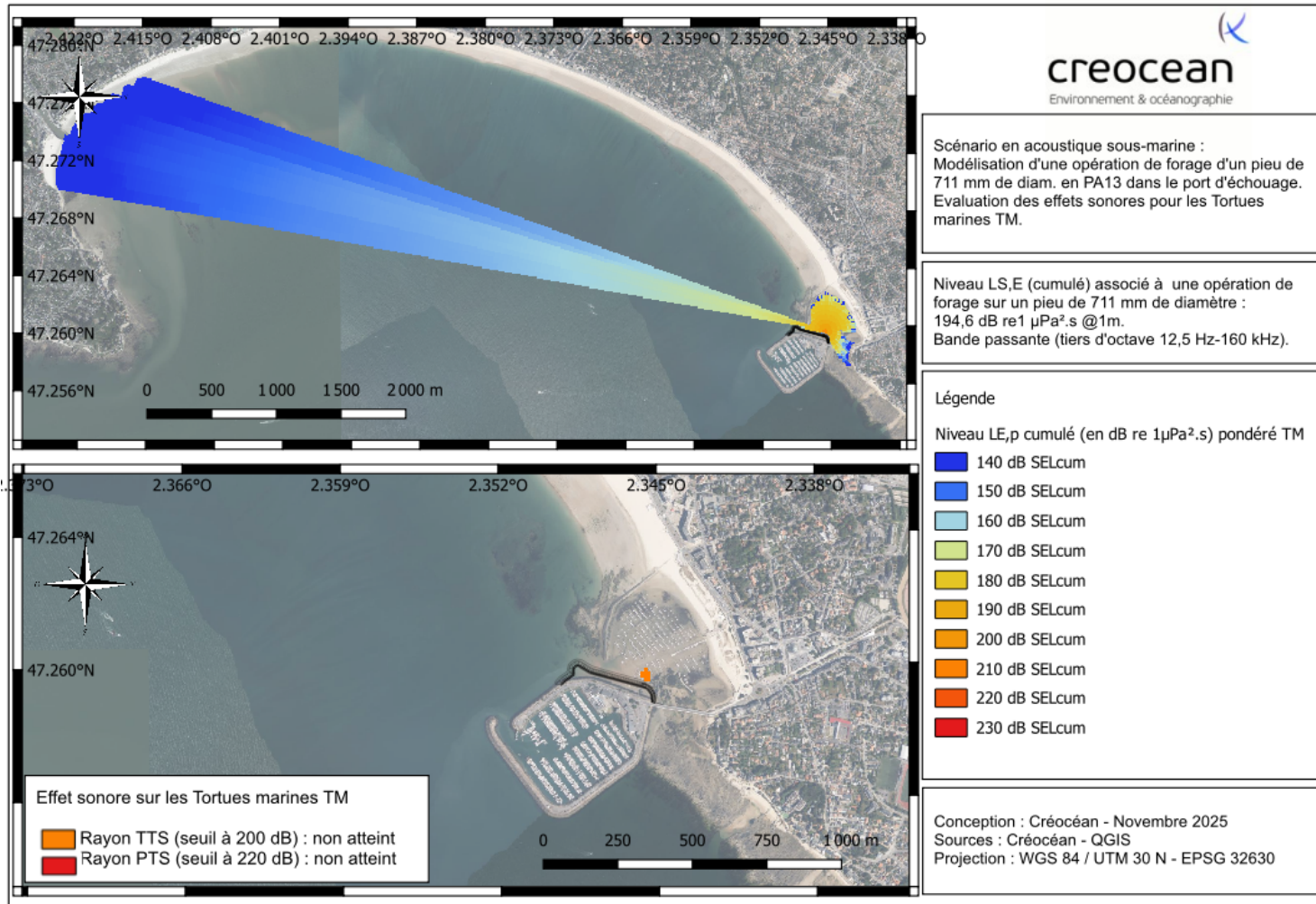


Figure 55-A : Modélisation d'une opération de foage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

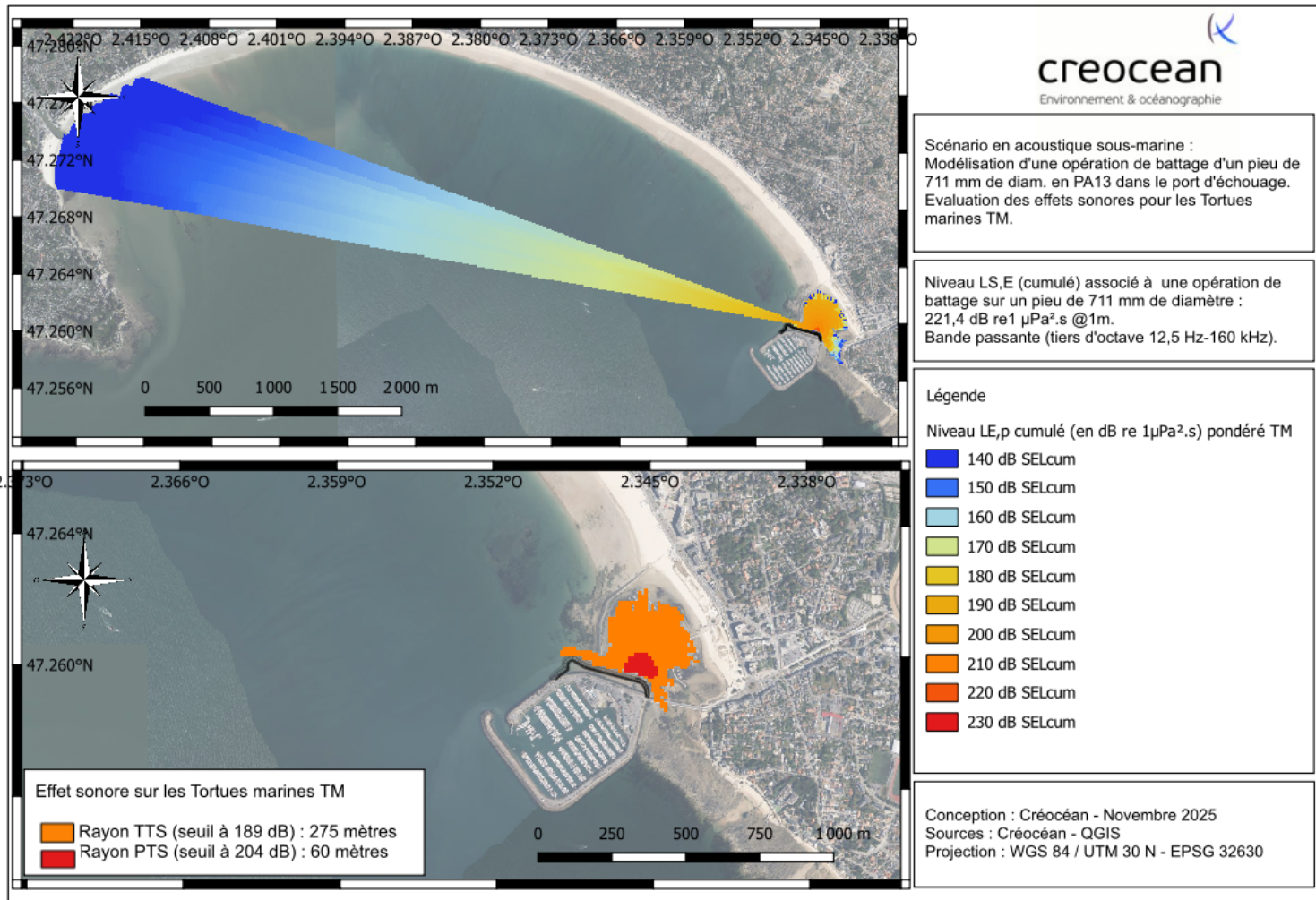


Figure 56-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13. Evaluation des effets sonores sur les Tortues marines TM.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

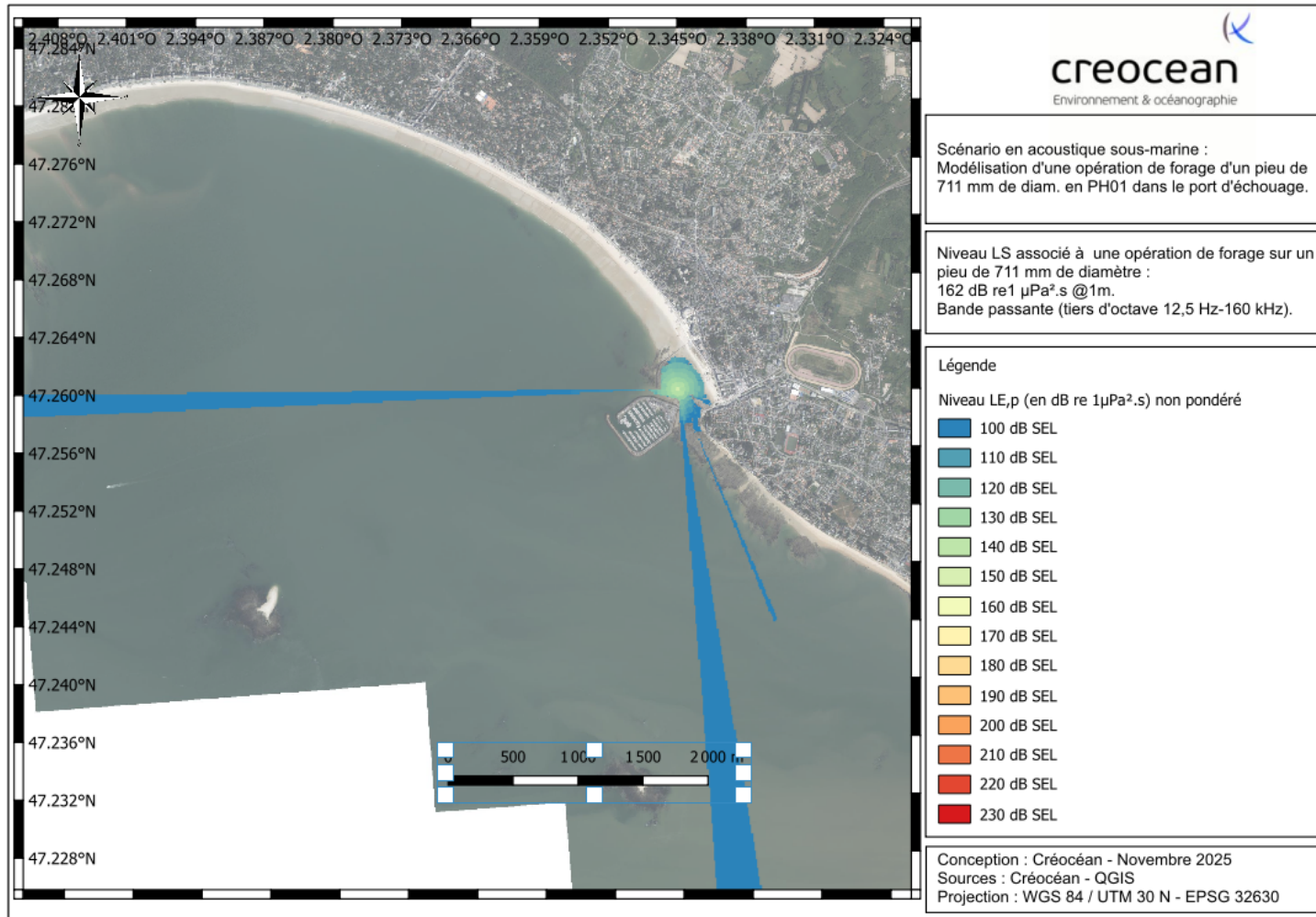


Figure 57-A : Modélisation d'une opération de forage en PH01.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

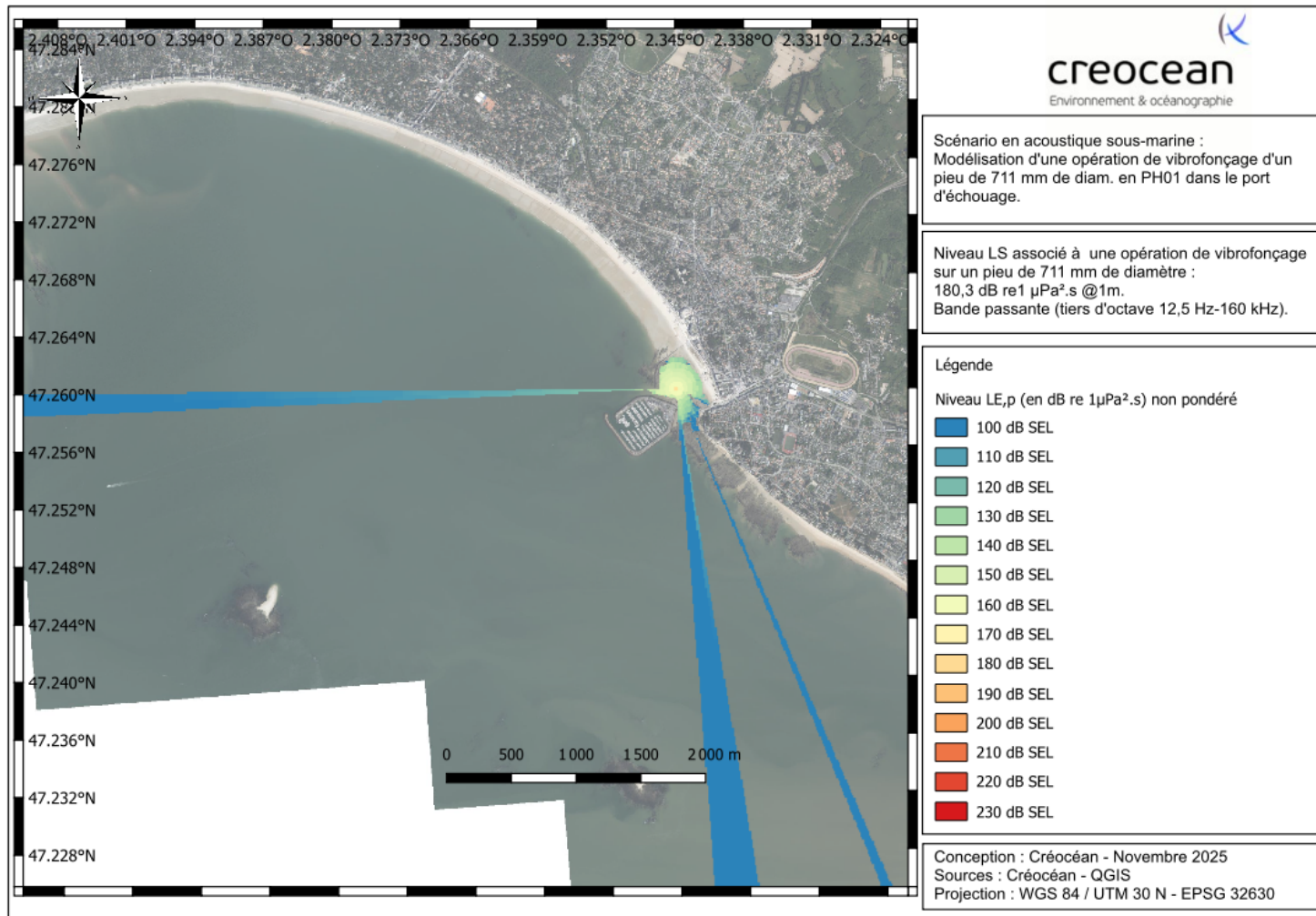


Figure 58-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PH01.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

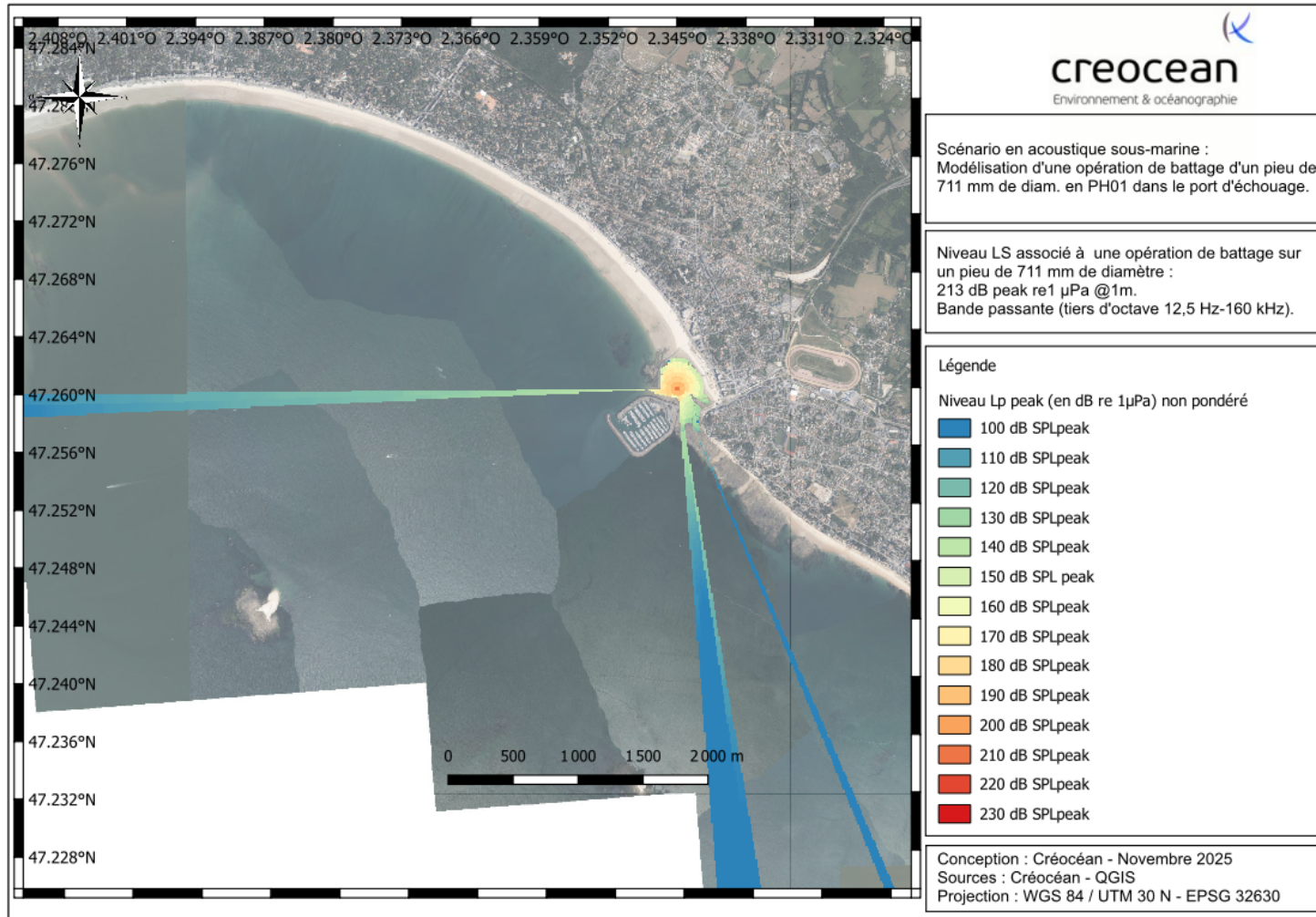


Figure 59-A : Modélisation d'une opération de battage en PH01.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

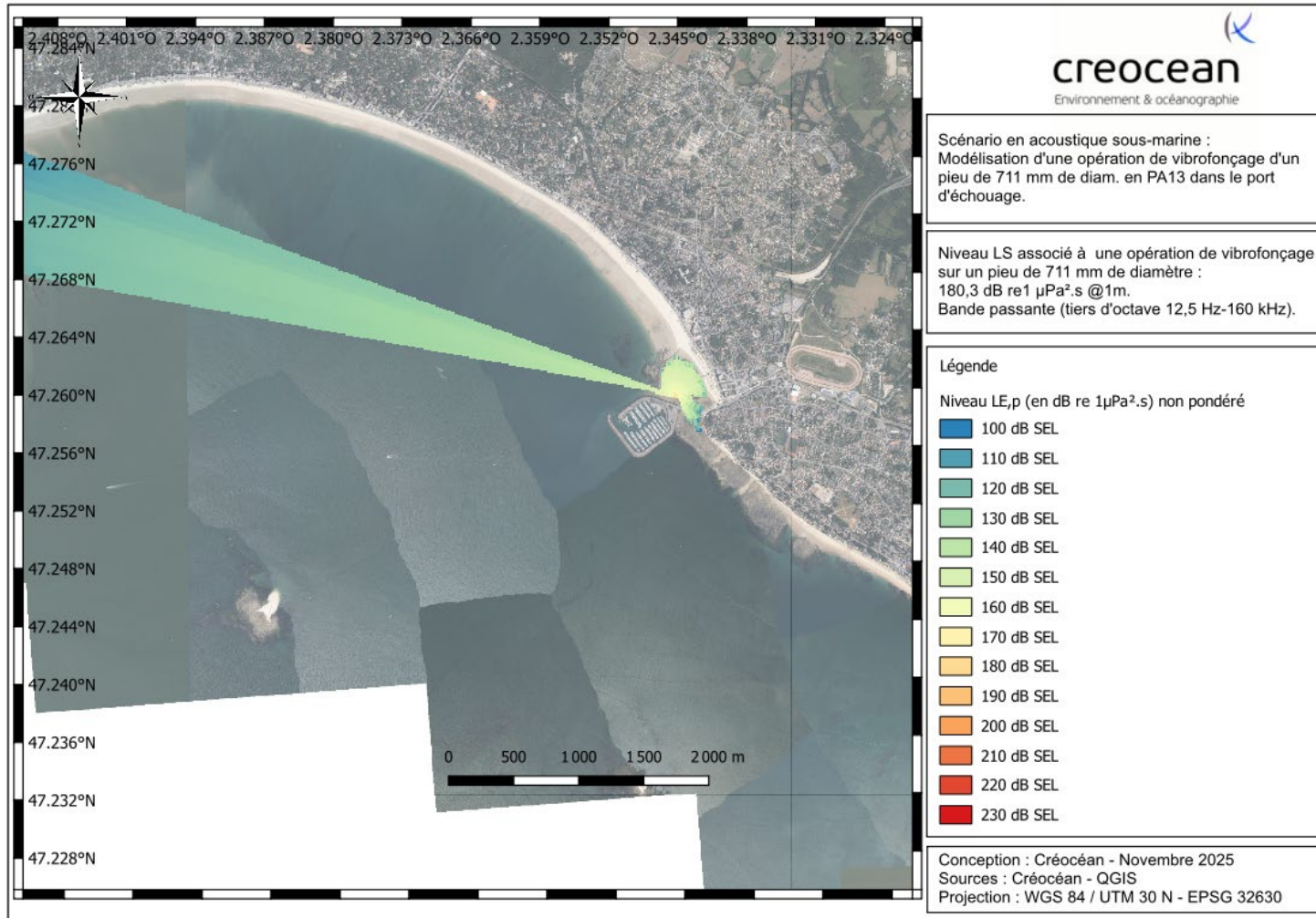


Figure 60-A : Modélisation d'une opération de vibrofonçage en PA13.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

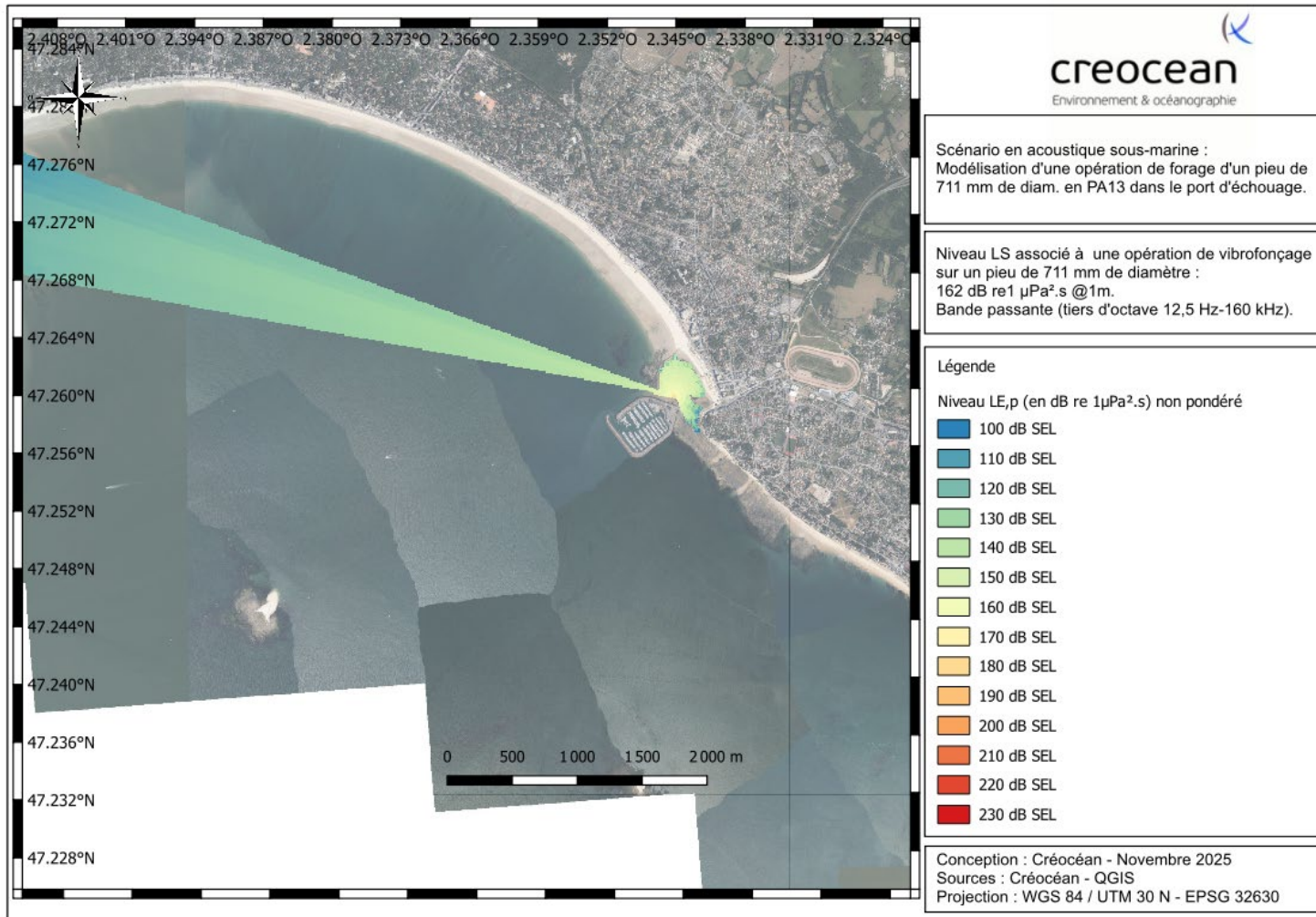


Figure 61-A : Modélisation d'une opération de forage en PA13.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

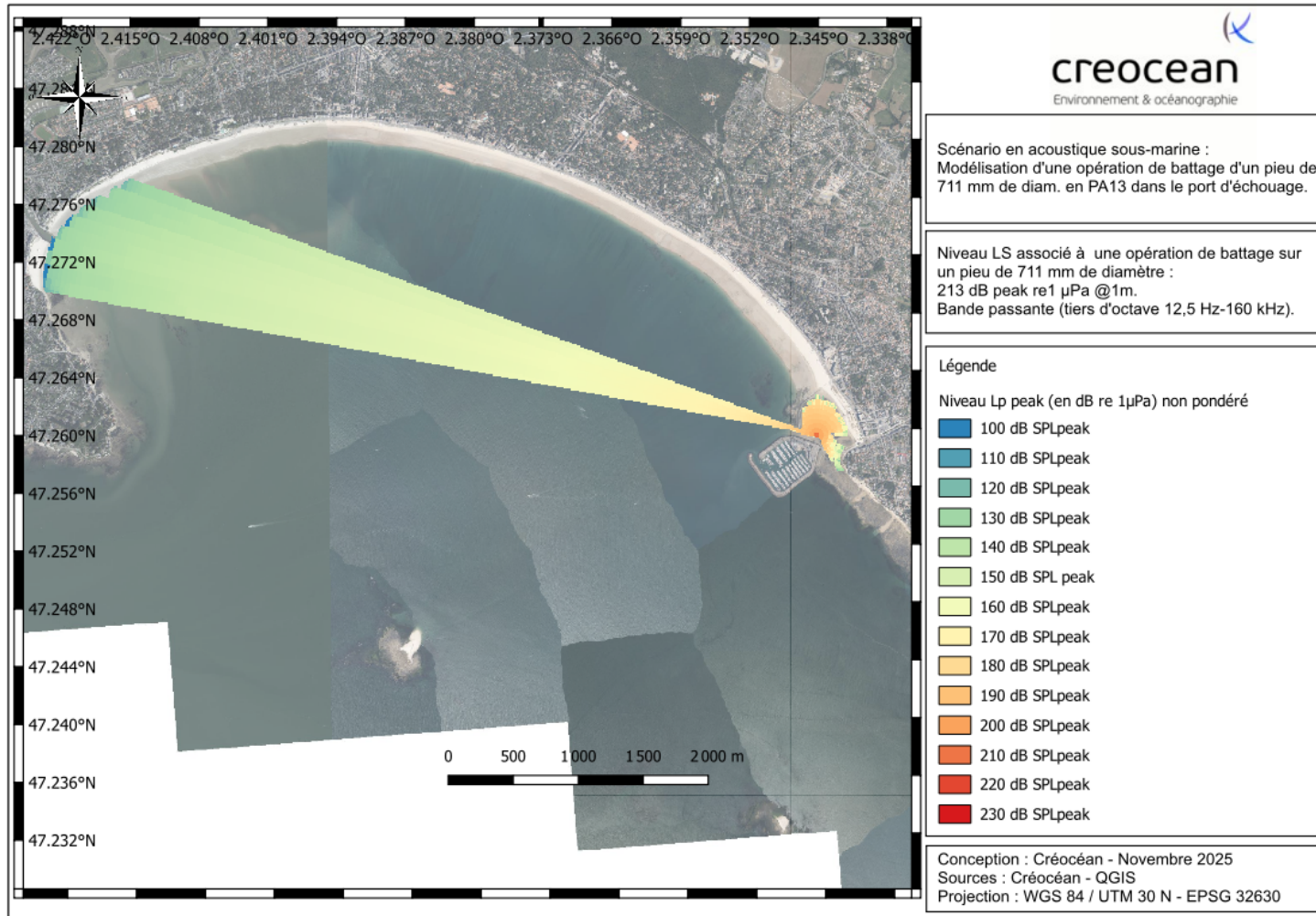


Figure 62-A : Modélisation d'une opération de battage en PA13.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

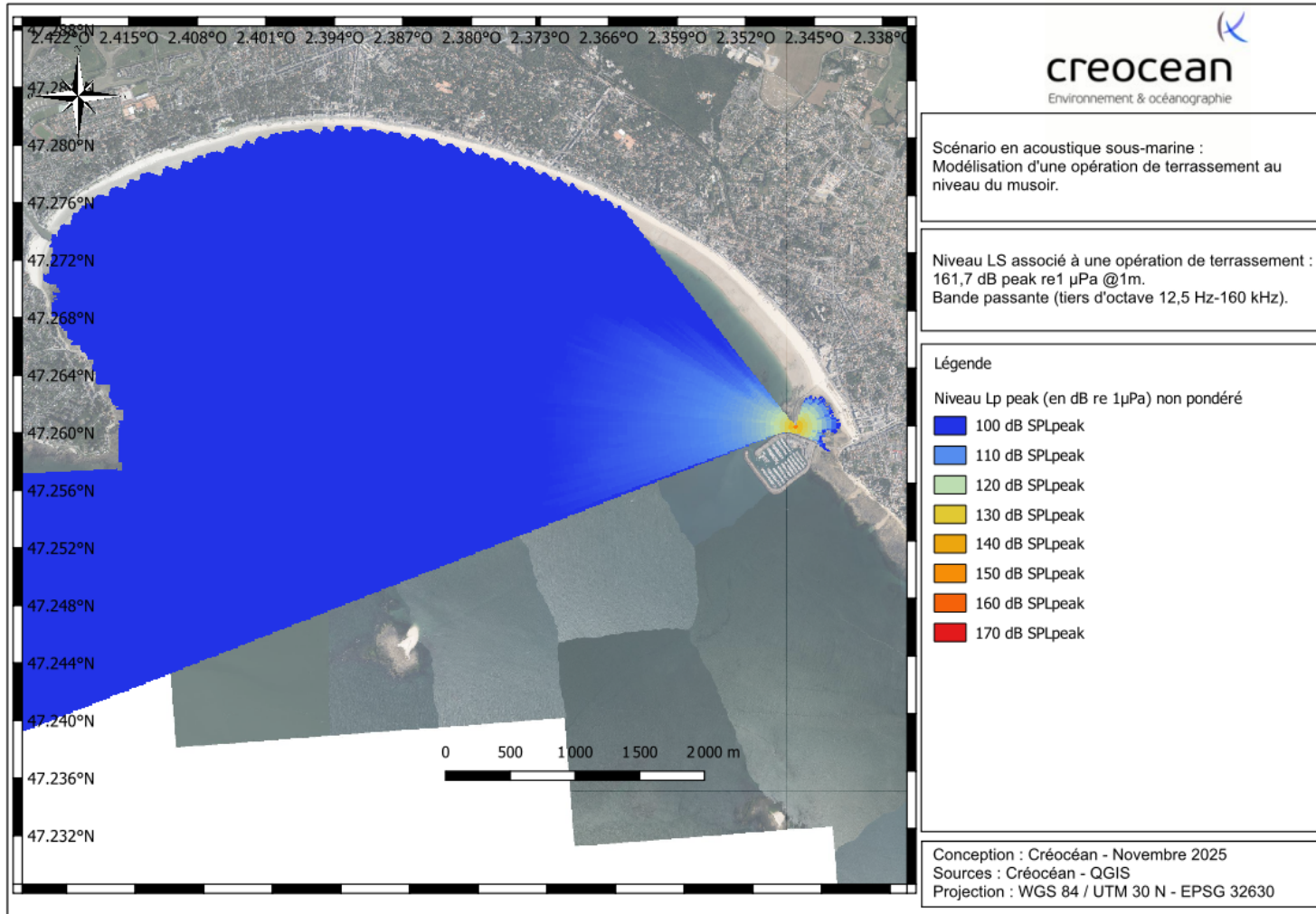


Figure 63-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau du musoir.

CHARIER
PROJET D'AMENAGEMENT ET DE MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES ET DU TERRE-PLEIN
CENTRAL DES PORTS DE PORNICHET

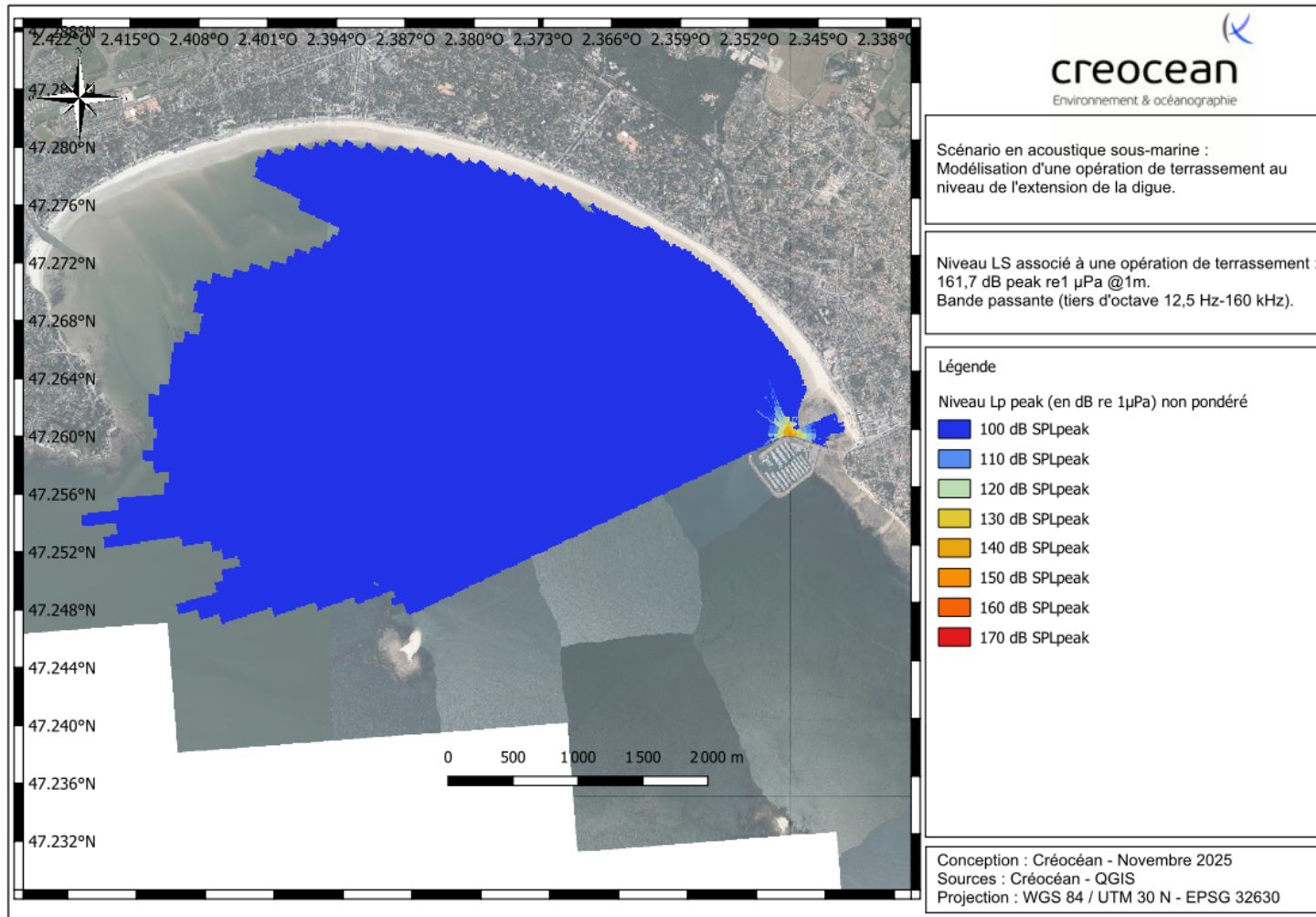


Figure 64-A : Modélisation d'une opération de terrassement au niveau de l'extension de la digue.



www.creocean.fr



[GROUPE KERAN](#)