

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Impacts acoustiques et vibratoires négatifs des travaux sur les écosystèmes aquatiques



Impacts acoustiques et vibratoires négatifs des travaux sur les écosystèmes aquatiques

Directeur de recherche : Laurent PHILIPPE
Auteure : Emmanuelle WAGUETTE

Année 2023-2024

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je tiens à remercier Laurent Philippe ainsi que toutes l'équipe de Biotope Tours pour m'avoir accueillie, permis de travailler sur ce magnifique sujet et pour m'avoir aidé à finir ce rapport. Je tiens également à remercier Jules Leguern et Sébastien Rodrigues pour m'avoir aidée à comprendre la propagation du son dans les milieux fluviaux ainsi que de m'avoir fourni des pistes de travail.

Sommaire

1.	Introduction	6
2.	Contexte de l'étude	8
3.	Matériel et méthode	8
3.1.	L'évolution de la connaissance entre 2004 et aujourd'hui	8
3.2.	Une recherche bibliographique	8
4.	Résultats.....	9
4.1.	L'évolution de la connaissance entre 2004 et aujourd'hui.....	9
4.2.	Le son et la vibration du substrat, une histoire d'onde	10
4.3.	Les paysages acoustiques, une nouvelle dimension pour l'étude de la biodiversité	12
4.4.	Une pollution sonore et vibratoire impactant la faune.....	19
4.5.	La réglementation en milieu marin.....	21
4.6.	Les séquences ERC en milieux marins.....	22
5.	Discussion.....	24
5.1.	Un intérêt grandissant pour l'étude des paysages acoustiques et de la pollution sonore	24
5.2.	L'impact des ondes sur le milieu	25
5.3.	L'impact des ondes sur la faune	26
5.4.	Les besoins de réglementations en milieu fluvial	29
5.5.	L'adaptation des séquences ERC en milieu fluvial	29
5.6.	Les suivis	31
5.7.	Des pistes de protocole.....	31
	Conclusion	32
	Bibliographie	32
	Annexes	36

1. Introduction

Les sons présents dans l'environnement jouent un rôle primordial dans le cycle de vie de la plupart des espèces piscicoles, que cela soit pour communiquer, se reproduire ou détecter des prédateurs (Sueur, 2020). L'étude de ces sons est une science ancienne appelée « bioacoustique ». Aujourd'hui, les nouvelles études s'intéressent à l'éco-acoustique, c'est-à-dire aux sons émis par les grandes structures écologiques. Tous ces sons forment de véritables paysages sonores. Ces paysages, ou « soundscape », comprennent tous les sons (biotiques ou non) présents dans un milieu : la biophonie (ensemble des sons produits par les organismes vivants), la géophonie (assemblage des sons abiotiques comme le vent ou les courants par exemple) et l'anthropophonie (ensemble des sons produits par les activités humaines).

Actuellement, de nombreuses méthodes acoustiques sont utilisées afin de suivre les espèces en milieu terrestre et aquatique. Elles peuvent être utilisés pour confirmer la présence d'une espèce dans un milieu défini (comme chez les oiseaux (Sueur, 2020)), mais aussi pour mieux comprendre la sélection d'un habitat particulier par une espèce (comme chez les poissons (Zaccaria, 2019)) ou encore pour voir la biomasse instantanée (toutes espèces confondues) présente dans une zone définie (Djemali, 2005). Pour le milieu terrestre, les méthodes acoustiques sont principalement utilisées pour la détection des chauves-souris et des oiseaux. Aujourd'hui, les techniques acoustiques en milieu aquatique sont de plus en plus utilisées pour obtenir des informations comme la bathymétrie, l'estimation d'abondance des stocks de populations piscicoles ou l'étude de la recolonisation des bassins versants (Daroux *et al.*, 2014).

Mais retournons au commencement. Qu'est-ce qu'un son ? Il s'agit d'un phénomène physique. Le son est généré par des vibrations, ou ondes acoustiques, qui résultent du mouvement de compression-dilatation des molécules du milieu. Elles créent sur leur passage une variation de pression qui se transmet de proche en proche. Il s'agit donc d'un transfert d'énergie entre les molécules sans transfert de matière. L'onde acoustique peut être caractérisée par deux composantes :

- a) La pression acoustique se référant aux variations de pression générée par l'onde mesurée en pascal (Pa) ;
- b) Le mouvement des particules qui renseigne sur l'intensité du son et sa direction. Lors de l'étude des sons, ces composantes sont caractérisées par :
 - i. Leur fréquence (en Hz), correspondant au nombre de cycles (ou ondes) par seconde ;
 - ii. Leur niveau, déterminé par l'amplitude de la variation de pression maximum par rapport à une pression de référence (1 μ Pa) ;
 - iii. Leur durée d'apparition. La quantification du niveau d'énergie acoustique des sons se mesure par une échelle logarithmique appelée décibel (dB).

Les milieux aquatiques continentaux sont des milieux sensibles (Office Français pour la Biodiversité, 2020). Ces milieux sont caractérisés :

- a) Par plusieurs types d'habitats (habitat en berges, sur ou dans le substrat et/ou dans la colonne d'eau) ;
- b) Par la présence de populations végétales et animales spécifiques ;

- c) Par la qualité physico-chimique de l'eau. Cet ensemble est influencé par le climat, la géologie, la végétation et les activités anthropiques.

Les milieux humides sont donc très divers (tourbière, mares, forêts alluviales, cours d'eau, etc...), accueillent une biodiversité intéressante et assurent des fonctions écologiques importantes comme la lutte contre la pollution diffuse (Office Français pour la Biodiversité, 2020). Ces milieux sont particulièrement menacés, dégradés ou en régression (87% des zone humide ont disparu depuis le XVIIIe siècle). Les habitats présents dans les cours d'eau font face à de nombreuses pressions comme la présence d'ouvrages transversaux, la modification des régimes hydrologiques ou encore la pratique et les travaux dus aux usages à l'échelle du cours d'eau et du bassin versant (Office Français pour la Biodiversité, 2020). Ces facteurs altèrent le bon état écologique des masses d'eau. S'ajoute alors à ces pressions les sons d'origines anthropiques qui sont de plus en plus présent, que cela soit dans les milieux continentaux et marins. L'aménagement du territoire, notamment des milieux aquatiques, a conduit à l'augmentation des niveaux de bruit ambiant sous-marin. Ces bruits viennent s'ajouter aux paysages sonores naturels et peuvent donc avoir un impact sur la faune aquatique.

Pourtant la pollution sonore n'est pas prise en compte dans les réglementations environnementales des milieux aquatiques continentaux. Depuis les années 1999, l'impact du bruit, lors de travaux terrestres par exemple, est de plus en plus pris en compte. Au départ, il s'agissait de protéger les habitants vivant autour des zones de travaux. En 2004, une directive cadre européenne est adoptée afin d'évaluer et gérer le bruit dans l'environnement. Dès 2008, des réglementations pour limiter les impacts sonores sur les milieux marins sont mises en place. Cependant, les milieux fluviaux ne bénéficient pas de telles préconisations ou réglementations.

Il est donc possible de se demander pourquoi ces impacts ne sont pas pris en compte, alors qu'ils sont bien étudiés dans les milieux terrestres et marins et s'intègrent dans les nouvelles réglementations. Ce rapport a pour objectif principal d'étudier les impacts acoustiques et vibratoires sur la faune (piscicole et des mollusques) et sur le milieu fluvial lors des travaux en rivière. Nous supposons que :

- Hypothèse 1 : Les travaux en rivière vont générer des ondes acoustiques et vibratoires dans le milieu. Nous supposons que ces ondes vont avoir des impacts différents selon les caractéristiques abiotiques du milieu et les types de travaux générant ces ondes. Nous supposons également que ces impacts se limiteront à des zones circonscrites autour des travaux.
- Hypothèse 2a : Nous supposons que le premier impact sur les poissons est celui de la fuite et que des travaux prolongés peuvent impacter les routes migratoires et l'accès à des milieux favorables.
- Hypothèse 2b : Nous supposons que les invertébrés fixés comme les moules seront plus sensibles aux travaux que les poissons puisqu'elles sont incapables de fuir la perturbation.

Cette étude va permettre de dresser un état des lieux des connaissances sur les impacts des ondes acoustiques et vibratoires sur l'ichtyofaune et sur les bivalves ainsi que d'apporter une première vision sur les séquences Eviter-Réduire-Compenser, ou ERC, mises en place dans les milieux marins qui pourraient s'adapter dans les milieux fluviaux.

2. Contexte de l'étude

Depuis plusieurs années, Biotope souhaite se placer sur l'évaluation de la bonne santé des écosystèmes aquatiques par l'analyse acoustique. Cette ambition provient des observations réalisées en plongée sur des zones proches de travaux de battage de pieux. A cette époque, les plongeurs de Biotope travaillaient à proximité d'une zone de travaux. Ils ont été affectés par le bruit généré par le battage de pieux se propageant sous l'eau et ont été gênés dans leur inventaire par la remise en suspension des sédiments (Philippe, communication personnelle).

Aujourd'hui, de telles évaluations sont déjà mises en place dans les milieux marins mais pas dans les milieux fluviaux. L'idée est de pouvoir aboutir au développement d'un partenariat de recherche afin de monitorer plusieurs types de cours d'eau, décrire les paysages sonores aquatiques, juger des impacts des activités humaines (navigations, travaux en berges, construction en berges, restauration, etc...) et de parvenir à intégrer ces évaluations acoustiques dans les études d'impacts.

3. Matériel et méthode

3.1. L'évolution de la connaissance entre 2004 et aujourd'hui

L'évolution du nombre d'étude traitant des sujets des paysages acoustiques, de la pollution sonore et vibratoire sur la faune a été déterminée à partir de plusieurs mots clés (Tableau 1) sur Google Scholar. Les recherches ont été réalisées sur Google scholar afin d'avoir accès à une grande base de données de publications. Les mots clés ont été choisis pour paramétrer au mieux la recherche.

Tableau 1 : Mots clés utilisés pour les recherches bibliographiques

Sujet recherché	Mots clés	Date de la recherche
Etude sur les paysages acoustiques (biodiversité ou sédimentologie)	Acoustic, landscape, biodiversity, sediment	11 janvier 2024
Impact des vibrations et du son sur les bivalves marins	Vibration*, impact*, marine*, bivalve*, sound*	
Impact des vibrations et du son sur les bivalves d'eau douce	Vibration*, impact*, freshwater*, bivalve*, sound*	
Impact du son sur la faune piscicole marine	Noise, impact*, marine*, fish*, sound*	
Impact du son sur la faune piscicole fluviale	Noise, impact*, freshwater*, fish*, sound*	

Il est important de noter que les chiffres relevés lors de ces recherches ne sont que des estimations et sont très probablement surestimés. En effet, le système de recherche de Google Scholar permet de trouver les publications contenant les mots clés donnés. Ces mots peuvent se trouver n'importe où dans la publication. Il n'est donc pas sûr que la publication traite réellement du sujet qui est recherché. De ce fait, il est possible de trouver la même publication dans plusieurs recherches.

3.2. Une recherche bibliographique

Afin de comprendre la pollution sonore dans les milieux fluviaux et son impact sur la faune piscicole et les bivalves, une recherche bibliographique a été réalisée. Elle s'est portée sur :

- Le comportement des ondes acoustiques et vibratoire dans l'eau et dans les substrats ;
- Les sources de bruits présents dans l'environnement et les indicateurs pour évaluer leur intensité ;

- Les impacts du son sur la faune piscicole en milieu marin et fluvial afin de comparer les résultats ;
- Les impacts du son et des vibrations sur les bivalves en milieu marin principalement puisqu'il n'existe qu'une seule étude à ce jour sur les espèces d'eau douce ;
- La réglementation et les préconisations mises en place en mer afin d'ouvrir les réflexions sur leur adaptation dans les cours d'eau.

Ces recherches ont permis de construire un état de l'art sur le sujet de la pollution sonore et vibratoire dans les milieux fluviaux et de mettre en évidence les lacunes dans les connaissances actuelles. Suite à cela, des pistes seront proposées afin de construire un protocole d'évaluation des impacts sonores et vibratoires générés lors de travaux en cours d'eau. Cette réflexion se base sur les études réalisées en milieux naturels afin de proposer une ébauche de protocole qui pourra être suivie lors des études d'impacts ou lors des travaux.

4. Résultats

4.1. L'évolution de la connaissance entre 2004 et aujourd'hui

4.1.1. Les recherches sur les paysages acoustiques

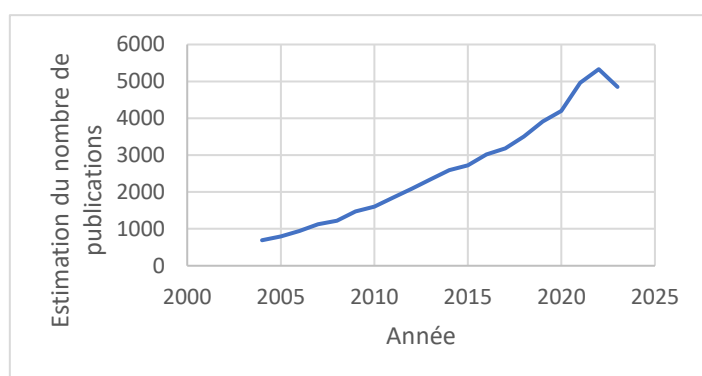


Figure 1 : Evolution du nombre de publications étudiant les paysages acoustiques

Depuis 2004, le nombre de publications traitant des paysages acoustiques a fortement augmenté (Figure 1), passant d'environ 690 en 2004 à 5330 en 2022. En 2023, environ 4850 publications sont sorties de la recherche réalisée sur Google Scholar.

4.1.2. Les recherches sur les impacts sonores et vibratoires sur la faune

4.1.2.1. Les impacts sur la faune piscicole

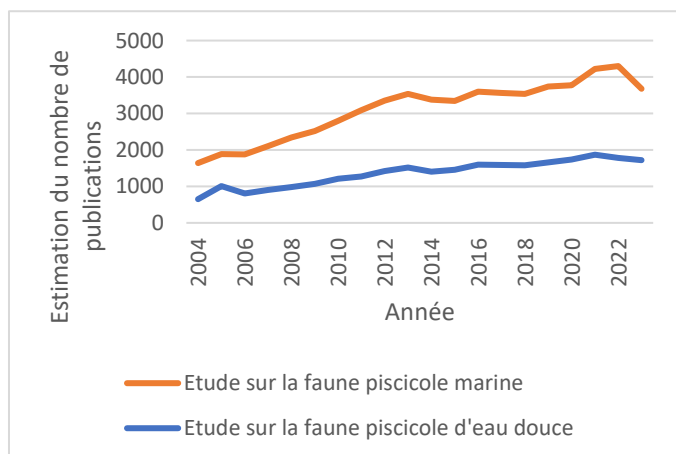


Figure 2 : Evolution du nombre de publications étudiant les impacts de la pollution sonore sur l'ichtyofaune.

Le nombre d'études sur les impacts de la pollution sonore sur les poissons a augmenté durant ces 20 dernières années (Figure 2). Que cela soit dans les milieux marins ou fluviaux, le nombre d'étude a plus que doublé en 20 ans : passant de 1640 études en milieu marin en 2004 à 3680 en 2023 et de 650 études en milieu fluvial en 2004 à 1720 en 2023.

L'étude des impacts de la pollution sonore sur l'ichtyofaune marine est largement plus développée que celle sur

l'ichtyofaune d'eau douce. En effet, sur les 20 ans étudiés, le nombre d'études réalisées sur la faune piscicole marine est en moyenne 2 à 3 fois plus important que le nombre de d'études réalisées sur les poissons d'eau douce.

4.1.2.2. Les impacts sur les bivalves

L'étude du son sur les bivalves est largement moins développée. Le nombre de publications traitant des impacts vibratoires sur les bivalves et les mécanismes leur permettant de détecter les ondes, que cela soit sur les bivalves d'eau douce ou marin, n'excède pas les 70 publications en 2023 (Figure 3). Comme pour les poissons, le nombre d'étude traitant des impacts sonores et vibratoires a augmenté en 20 ans : multiplié par 4 en milieu marin et par 3 en milieu fluvial. De même, le nombre d'étude en milieu marin est plus important qu'en eau douce : 5 études de plus en milieu marin en 2004 et 25 en plus en 2023.

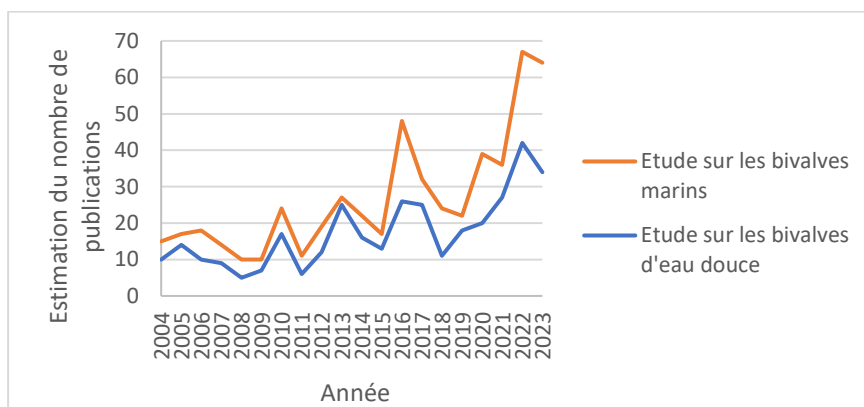


Figure 3 : Evolution du nombre de publications étudiant les impacts de la pollution sonore sur les bivalves.

Les résultats fournis par Google scholar ne correspondent que très peu au sujet recherché, surtout quand il s'agit bien d'une étude sur les impacts vibratoires. De plus, ces études sont généralement sur les bivalves marins. Dans les recherches réalisées, une seule publication traitant des impacts sonores sur une moule d'eau douce a été identifiée (Kowalewski *et al.*, 1993).

4.2. Le son et la vibration du substrat, une histoire d'onde

4.2.1. Les ondes acoustiques dans l'eau

Pour comprendre l'impact du son sur la faune, il est déjà important de comprendre le son en lui-même. Le son est l'ensemble des ondes, dites ondes acoustiques, produites par un émetteur ou une source sonore. La propagation de ces ondes, ainsi que leur vitesse appelée aussi célérité, dans un milieu donné dépend des caractéristiques de ce milieu (Persohn *et al.*, 2020) : la température (la vitesse est corrélée positivement au changement de température), la salinité et la pression. La vitesse d'une onde se déplaçant dans l'eau ne sera donc pas homogène. Dans l'eau, la vitesse d'une onde acoustique varie entre 1 450 m/s à 1 550 m/s, ce qui est quatre fois plus rapide que dans l'air (Persohn *et al.*, 2020).

L'onde va également se réfléchir, se réfracter, se diffracter, se diffuser ou encore être absorbée au niveau des interfaces eau/air et eau/sédiment, au niveau des obstacles ou au niveau des limites de strates dans la colonne d'eau (Figure 4, Persohn *et al.*, 2020). Chacun de ces phénomènes entraîne plus ou moins de perte d'énergie de l'onde. Par exemple, la vase aura plus tendance à absorber les ondes

acoustiques alors qu'une roche aura plus tendance à les réfléchir. La perte d'énergie de l'onde sera plus forte en cas d'absorption.

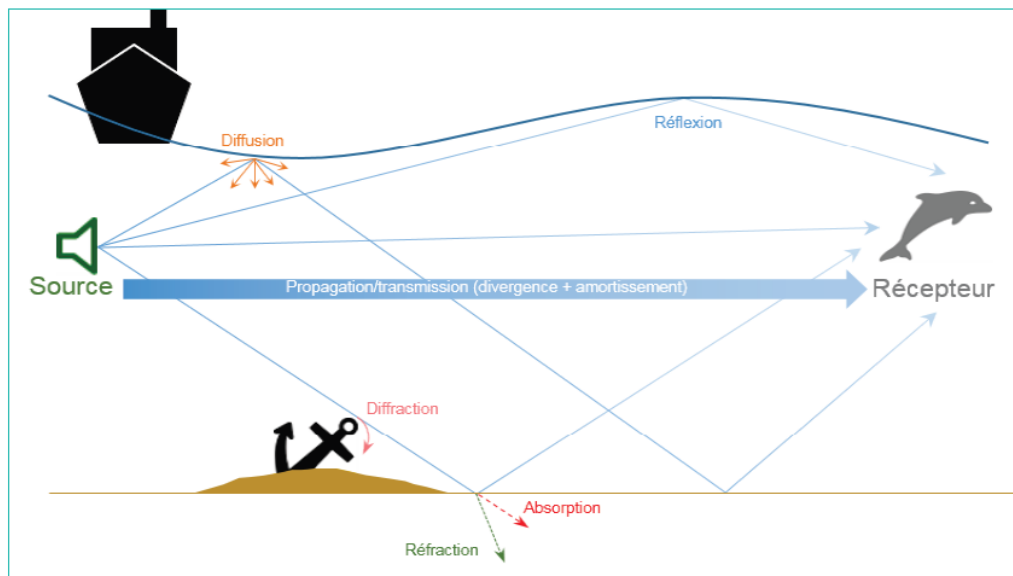


Figure 4 : Phénomènes contribuant à atténuer l'intensité d'une onde acoustique entre la source et le récepteur (source : Persohn et al, 2020)

4.2.2. Les vibrations dans le substrat

L'onde acoustique ne se propage pas uniquement dans l'eau. En effet, les changements de pression engendrés par le passage de l'onde ainsi que le déplacement des particules peuvent se transmettre au substrat par contact (interface eau/substrat) ou par les ondes de surfaces (Robert & Elliott, 2017).

Des vibrations, aussi appelée dans la littérature « particule motion », sont également produites lorsque des travaux, comme un battage de pieux, impactent le substrat. Il existe plusieurs types d'ondes se déplaçant dans le substrat (Figure 5) : les ondes P ou de compressions, les ondes S ou de Shear et les ondes de surface (Aicher & Tautz, 1990 ; Hazelwood & Macey, 2016 ; Markl, 1983). Ces ondes se déplacent perpendiculairement au sens de propagation et/ou longitudinalement. Les ondes P ne se propagent que dans les solides. Les ondes de surface sont utilisées par la faune pour repérer les perturbations du milieu (Brownell & Farley, 1979 ; Brownell, 1977, 1984) comme la présence d'un

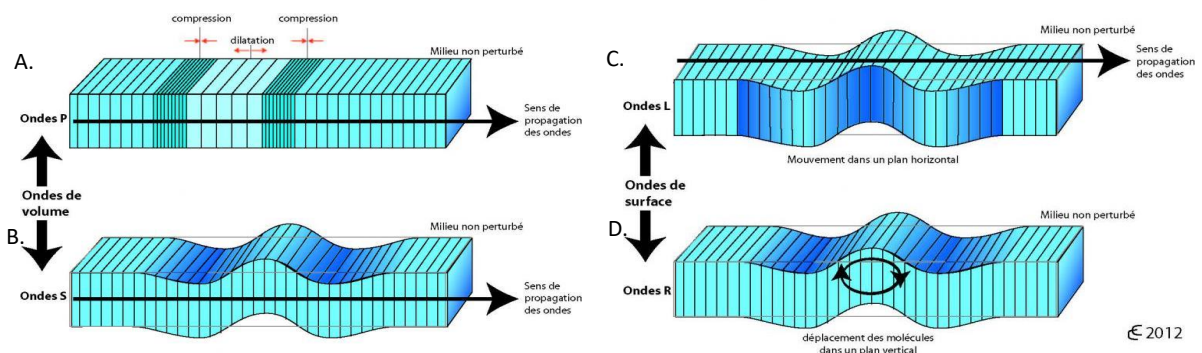


Figure 5 : Diagramme des différents types d'onde en vue 3D. Le sens de propagation est schématisé par les flèches minces (Source : Séismes et ondes sismiques, 2021)

prédateur ou d'un changement dans l'environnement. La propagation des ondes dépend du type de substrat et des limites/type de couches (Aicher & Tautz, 1990 ; Lowrie, 2010) du fait des différents phénomènes vu dans la partie précédente. L'annexe 1 décrit plus précisément les caractéristiques de ces ondes.

4.2.3. L'atténuation des ondes

Lors de leur propagation dans un milieu, les ondes perdent de l'énergie. Le milieu va atténuer l'intensité des ondes/vibrations (Nasr, 2023) par étalement sphérique (étalement de l'énergie au fur et à mesure de sa progression) et par amortissement (absorption de l'énergie par viscosité et interactions chimique). C'est pour cela que les sons aigus, ondes acoustiques de hautes fréquences et donc de forte énergie, se propagent plus loin que les sons graves qui sont de plus faible énergie. L'atténuation des ondes acoustiques sera plus importante dans une eau de faible profondeur, turbulente, turbide et lorsque la pente est forte (Nasr, 2023 ; Annexe 2a et 2d).

De même, le niveau ou l'amplitude de la vibration va dépendre du type de solide, des couches de solide, de la distance de la source et du type de propagation des ondes (Svinkin, 2004). Plus la distance à la source est grande, plus la vibration sera faible (Nars, 2023). Geay *et al.* (2018) ont calculé le coefficient d'atténuation des vibrations à différentes fréquences ainsi que dans des rivières de granulométrie diverses (Annexe 2 b et c). Ils démontrent que plus la taille de grain est importante, plus le coefficient d'atténuation est fort. La nature de la roche a également un impact sur l'atténuation des ondes. Plus la roche est dense, moins elle atténuera les ondes (Athanasopoulos & Pelekis, 2000). Ce résultat est dû aux phénomènes de diffraction qui sont plus important dans les milieux graveleux. L'annexe 3 récapitule les différents facteurs physiques influençant l'atténuation des ondes.

4.3. Les paysages acoustiques, une nouvelle dimension pour l'étude de la biodiversité

4.3.1. Les sources de bruits présents dans l'environnement

Les sons contribuant le plus au bruit ambiant sont des sons de la composante géophonie comme l'hydrologie ou le vent et de la composante anthropophonie comme les sons produits par le trafic maritime (Leguern, com. pers.). En milieu marin, le bruit ambiant est caractérisé principalement par les basses fréquences (Persohn et al, 2020). Les sons de la géophonie ont des fréquences inférieures à 10 Hz. Les sons générés par les conditions météorologiques influençant l'état de l'eau sont quant-à-eux dans des gammes de fréquences supérieures à 100 Hz. La mesure du bruit ambiant avant des travaux est donc primordial afin de connaître l'état initial du paysage acoustique d'un milieu.

4.3.2. Mesurer le son et les vibrations dans le milieu

Les vibrations générées dans un substrat par des travaux ou autres activités anthropiques sont évaluées à l'aide d'accéléromètre piézoélectrique comme celui de Brüel & Kjaer (Roberts *et al.*, 2015). Cet outil permet d'évaluer l'intensité des vibrations du substrat sur l'axe verticale en m.s⁻². Il existe peu d'indicateur pour évaluer les ondes vibratoires puisque les recherches sont encore peu développées.

L'évaluation du niveau des ondes acoustiques est plus complexe. En effet, il est nécessaire de différencier les bruits émis, reçus et perçus (Persohn *et al.*, 2020) :

- Le bruit émis correspond au niveau sonore généré par une source émettrice ;

- Le bruit reçu correspond au niveau sonore reçu par un récepteur à une distance donnée de la source ;
- Le bruit perçu correspond au niveau sonore perçu par le récepteur. Le bruit reçu est pondéré par les capacités auditives de l'espèce réceptrice. Ces capacités sont propres à chaque espèce. Elles modifient le signal et ne conservent que certaines fréquences. « Par exemple, l'oreille humaine ne capte que les fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz en moyenne, avec une plus grande sensibilité pour la gamme 200-5 000 Hz » (Persohn *et al.*, 2020).

Les indicateurs pour les ondes acoustiques sont plus nombreux que ceux pour les ondes vibratoires. Pour les bruits évalués à la source, nommés « bruits émis », deux indicateurs sont utilisés (Persohn *et al.*, 2020) :

- Le niveau d'émission de la source L_s quantifie le niveau sonore à 1 mètre de la source et est mesuré en dB re 1 μPa @ 1m ;
- La densité spectrale de puissance, qui correspond à la répartition de la puissance acoustique émise en fonction de la fréquence dans une bande de 1 Hz, en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

Quatre indicateurs sont utilisés pour évaluer le bruit à une distance donnée de la source :

- Le niveau de pression sonore L_p ou SPL, quantifiant « l'énergie reçue par un récepteur à une distance donnée de la source », est exprimé en dB re 1 μPa @ X m (X étant la distance entre la source et le récepteur). Il peut être mesuré de différentes façons (Figure 6) :
 - En mesurant la valeur absolue maximale de pression acoustique $L_{p,pk}$ par rapport à la pression de référence de 1 μPa (aussi noté $L_{p,0-pk}$, SPL peak, SPL pic, SPL crête, SPL zero to peak ou SPL z-p) ;
 - En mesurant la différence entre la valeur maximale et minimale de pression acoustique notée $L_{p,pk-pk}$, SPL peak-peak, SPL pic-pic ou SPL crête-crête ;
 - « En calculant la valeur efficace, qui correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période donnée ». Cette valeur est notée $L_{p,rms}$ ou SPL RMS. Cet indicateur est très utilisé pour évaluer le bruit continu ;

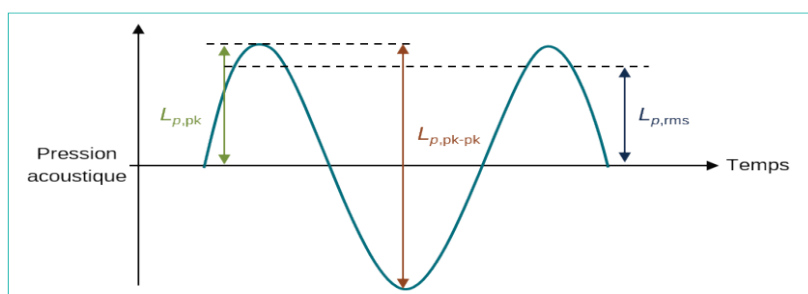


Figure 6 : Les différents indicateurs de mesure du niveau de pression sonore (Persohn *et al.*, 2020)

- La densité spectrale de puissance (DSP ou PSD), exprimé en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, « représente la répartition de puissance acoustique reçue par un hydrophone en fonction de fréquence, dans une bande de 1 Hz » (Persohn *et al.*, 2020) ;
- Le niveau équivalent continu $L_{eq,T}$ qui « correspond au niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement » (Persohn *et al.*, 2020). Il est mesuré en dB re 1 μPa .

- Le niveau d'exposition sonore $L_{E,p}$ ou SEL. Cet indicateur est principalement utilisé pour les sons impulsionnels et permet d'intégrer le niveau d'émission d'une impulsion ainsi que sa durée. Il permet donc d'intégrer « toute l'énergie reçue pendant la durée t d'une impulsion en la ramenant sur une seconde : $L_{E,p} = L_p + 10 \log_{10} t$. Le niveau d'exposition ainsi mesuré est exprimé en dB re $1 \mu Pa^2.s$. Il peut par ailleurs être calculé pour une impulsion ($L_{E,p,ss}$ ou SEL_{ss} , « ss » pour single strike) ou pour plusieurs impulsions ($L_{E,p,cum}$, SEL cumulé ou SEL_{cum}) sachant que $L_{E,p,cum} = L_{E,p,ss} + 10 \log_{10} n$ (n étant le nombre d'impulsions) » (Persohn *et al.*, 2020).

Il existe également deux indicateurs permettant d'évaluer le bruit perçu par une espèce. Un des indicateurs, mise au point en 2007 par Southall *et al.* et nommé « niveaux d'exposition sonore pondéré », est réservé à l'étude des impacts acoustiques sur les mammifères marins. L'indicateur dB_{ht} développé par Nedwell *et al.* (2005) est applicable du moment que l'audiogramme de l'espèce considéré est connu et fiable. Cette méthode permet de corriger le niveau sonore reçu à une fréquence donnée en fonction des capacités auditives de l'espèce (Annexe 4). Cet indicateur, bien que peu utilisé en milieu fluvial du fait du manque de connaissances précises sur la plupart des espèces, est intéressant, car il permettrait d'établir des seuils au-delà desquels les niveaux sonores perçus peuvent impacter plus ou moins fort les espèces cibles.

4.3.3. Les sources de bruits générés lors de travaux

Selon les travaux mis en place, les sons générés peuvent être de deux types (Persohn *et al.*, 2020):

- Les sons impulsionnels : il s'agit d'impulsion sonore transitoire, de courte durée, avec une augmentation brutale de la pression acoustique. Ces sons sont caractérisés par leur fréquence et leurs paramètres temporels comme la durée et le niveau d'émission.
- Les sons continus : ces sons ne sont pas caractérisés par leur durée et ils n'ont pas de variation brutale de leur pression acoustique. Cependant, ils sont caractérisés par le niveau spectral (densité spectrale de puissance) et de leur fréquence.

Par exemple, les bruits générés par les moteurs de bateaux sont de type continu alors que ceux générés par un battage de pieux sont de type impulsionnel. Lors de ce type de travaux, les ondes produites sont acoustiques et vibratoires. Elles se propagent autour de la pile depuis la pointe et depuis les côtés sous forme d'ondes de surface, S et P (Athanasopoulos & Pelekis, 2000 ; Kim & Lee, 2000 ; Nedwell & Edwards, 2004 ; Svinkin, 2004 ; Thandavamoorthy, 2004). L'énergie de ses ondes peut repasser dans la colonne d'eau (Nedwell & Howell, 2004). Par ailleurs, le niveau des vibrations produites dépendra des caractéristiques de la pile (dimension, matériel, puissance du hammermarteau), du substrat (type, hétérogénéité) et de la durée de l'opération (Blondel *et al.*, 2014 ; Svinkin, 2004).

Les travaux génèrent dans les milieux, différents types d'ondes dont le niveau variera selon le type de travaux. Si les études portent principalement sur les ondes acoustiques, il ne faut pas oublier que les ondes vibratoires impactent également les milieux. Il est communément admis que les sons continus sont moins impactants que les sons impulsionnels (Persohn *et al.*, 2020).

Les publications scientifiques se sont principalement focalisées sur les impacts sonores. Les caractéristiques sonores des machines réalisant les travaux sont donc relativement bien connues contrairement à leurs impacts vibratoires.

4.3.3.1. Renforcement et artificialisation des berges, installation de structure portuaires, rénovation ou création de pont

Afin de renforcer ou d'artificialiser les berges, d'installer des structures portuaires, de rénover ou de créer des ponts, plusieurs techniques sont disponibles : le bétonnage, le dynamitage, l'utilisation de marteau piqueur, le battage de pieux, le vibrofonçage, le fonçage, le trépannage ou encore le forage (Figure 7A et 7C). Ces techniques génèrent des ondes acoustiques et vibratoires de différents niveaux et fréquences.



Figure 7 : Exemples de travaux pouvant être menés en rivière. A : Vibrofonçage (Source : Biotope). B : Dragage (Source : Les altérations anthropiques du transport solide, Office Français pour la Biodiversité). C : Fonçage de palplanches (Source : SGC Travaux Spéciaux)

Le battage de pieux permet d'enfoncer un pieu en acier dans le substrat à l'aide d'un marteau (Persohn *et al.*, 2020). Ce marteau est généralement hydraulique. Ces travaux sont générateurs de forts niveaux de bruits et de vibrations et font partie des travaux les plus bruyants (plus de 200 dB re μPa @ 1m, Tableau 2). Les ondes générées sont de type impulsionnel et leur intensité dépend de plusieurs facteurs : la nature du sol, la bathymétrie, la profondeur à laquelle le pieu doit être enfoncé dans le sol, le type de marteau dont dépend l'énergie transmise par ce dernier et la vitesse d'enfoncement. Le facteur influençant le plus la génération de bruit est le diamètre du pieu (Nedwell *et al.*, 2007) : plus le diamètre est grand, plus le niveau de bruit généré l'est également. La profondeur et la nature du substrat vont influencer la propagation des ondes acoustiques et vibratoires générées lors des travaux qui peuvent se propager jusqu'à des dizaines de kilomètres en milieu marin (Nedwell *et al.*, 2007).

Il existe des méthodes alternatives aux battages de pieux par marteau hydraulique (Persohn *et al.*, 2020) :

- Le vibrofonçage (Figure 7A) : Cette technique permet d'enfoncer les pieux par vibrations. Le type d'onde produite est continue. Le niveau de bruit généré est généralement moins

important que le battage de pieu par marteau hydraulique (en moyenne, le niveau de bruit est diminué de 15 à 20 dB, Tableau 2). Aucune donnée n'est disponible par rapport aux ondes vibratoires générées ;

- Le battage "HiLo" : la fréquence de battage est plus élevée ce qui permet de frapper moins fort et donc de générer moins d'ondes ;
- Le forage : cette activité génère des ondes acoustiques et vibratoires de type continu à large bande fréquentielle (Tableau 2). La transmission de ces ondes dans le milieu dépend de la structure d'équipement du forage et de la surface d'échange avec le milieu. Les ondes générées dépendront du type de forage utilisé (marteau fond trou, havage, etc....).
- Le trépanage est une technique de forage rotatif à l'aide d'un trépan (Drira, 2022). Cette technique est aussi bruyante que le battage de pieux (Tableau 2). Sa fréquence maximum d'énergie se situe à de plus basses fréquences.
- Le fonçage de palplanches (pieux profilés aplatis, Figure 7C) sert à renforcer les berges des cours d'eau ou à construire des digues, brise-lames ou pontons (Persohn *et al.*, 2020). Leur enfoncement dans le sol est réalisé à l'aide d'un marteau (fonçage) ou d'un vibreur (vibrofonçage). Le fonçage génère un bruit impulsionnel moindre que le battage de pieux (Tableau 2).

Le dynamitage ou déroctage « consiste à fragmenter et à déblayer les débris d'un substrat rocheux. Il peut être réalisé à l'aide d'explosifs, d'un brise-roche hydraulique ou d'une dent de déroctage » (Persohn *et al.*, 2020). Il s'agit de la méthode la plus bruyante parmi les travaux présentés (Tableau 2). Cela est d'autant plus vrai s'il s'agit d'un déroctage explosif. Ce bruit généré peut se propager jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. Deux types d'ondes sont générées : les ondes de choc et les ondes sonores. Le bruit généré est de type impulsionnel (Richardson *et al.*, 1995). L'estimation du bruit généré dépend de la charge explosive utilisée, du nombre de charges, de l'enfouissement ou non de ces charges et de la nature de la roche dure à creuser. Le déroctage par brise-roche hydraulique serait similaire au bruit généré par un battage de pieux de petit diamètre par marteau hydraulique alors que le bruit généré par déroctage par dent de déroctage pourrait être assimilée à celui d'une drague CSD (Barham, 2017).

4.3.3.2. *Elargissement et approfondissement des voies d'eau*

Le dragage (Figure 7B) permet d'élargir et/ou d'approfondir les chenaux et d'extraire les sédiments (Persohn *et al.*, 2020). Le bruit généré dépend du type de sédiment creusé, de la phase de travaux (dragage, transit, clapage) et de la drague utilisée (Annexe 5). Le niveau sonore produit est généralement compris entre 150 et 190 dB re $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m (Tableau 2). La phase de dragage est la phase la plus bruyante du fait des prélèvements de sédiments. Ce bruit peut se propager jusqu'à 25km en milieu marin dans le cas des navires les plus bruyants (Richardson *et al.*, 1995). Il ne faut toutefois pas oublier les bruits générés par les navires accompagnant le dragage qui peuvent parfois générer plus de bruit que le dragage en lui-même.

La pelle mécanique permet également d'élargir les cours d'eau. Les ondes acoustiques et vibratoires qu'elles produisent, sont de type continu. Le niveau d'émission est compris entre 85 et 110 dB re μPa @ 1m avec une fréquence maximum d'énergie de 1000 Hz (Technisim Consultant, 2019).

4.3.3.3. Activités pendant les travaux nécessitant l'utilisation de navire et activité de suivi

Certains travaux peuvent nécessiter l'intervention de navire que cela soit avant, pendant ou après les activités de travaux. Or, les moteurs sont générateurs de bruits continus. Les navires de plus de 12m contribuent fortement au bruit ambiant présent dans l'eau, que cela soit en champ lointain ou en champ proche (Persohn *et al.*, 2020). En basse fréquence, entre 5-500 Hz, la principale source de bruit contribuant au champ lointain du bruit ambiant, provient de la navigation motorisée. L'augmentation du nombre de navires est corrélée à l'augmentation du bruit sous-marin : jusqu'à + 3dB par décade (Southall *et al.*, 2019 ; McDonald *et al.*, 2006 ; Andrew *et al.*, 2002). En champ proche, le bruit généré par les navires dépend de leur taille et de leur vitesse de navigation. La source de ce bruit provient majoritairement des systèmes de propulsion et des phénomènes de cavitation autour de l'hélice. Les autres sources sont les auxiliaires (pompes, générateurs, etc...). Ils émettent en généralement un niveau sonore d'environ 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m (Tableau 2).

Les petits hors-bords de dépassant pas les 7m possèdent une signature acoustique qui varie selon la taille du bateau et sa vitesse. Le bruit généré, de type continu (Persohn *et al.*, 2020 ; Tableau 3), provient des appareils propulsifs et des phénomènes de cavitation autour de l'hélice. Le signal acoustique est d'un niveau plus faible et est plus aigu que les navires de plus grandes tailles (Annexe 6). Ils émettent en généralement un niveau sonore d'environ 156 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m (Tableau 3).

Les travaux réalisés en cours d'eau s'accompagnent également d'activités de suivi. Ces activités peuvent utiliser du matériel mesurant l'acoustique comme méthode d'étude et donc avoir un impact acoustique sur la faune. D'autant plus qu'il s'agit généralement de suivi par bateau.

Les sondeurs et sonar permettent de réaliser des mesures de topo-bathymétrie mais également de caractériser la nature des couches superficielles par imagerie par exemple (Persohn *et al.*, 2020). Ils émettent dans les hautes fréquences (de 10 à 1000 kHz) et leur niveau sonore peut atteindre 200 à 240 dB re μPa @ 1m (Tableau 2). Les impulsions sonores générées par ces appareils sont soit monochromatiques ou modulées en fréquence (quelques millisecondes à intervalles réguliers). Plus la profondeur est grande, plus cet intervalle sera grand. Selon le type de données et la résolution attendue, la fréquence d'émission choisie différera : une onde haute fréquence de basse amplitude permet d'obtenir des informations à haute résolution sur une échelle réduite. L'orientation de l'onde dépend du type de sondeur et de sonar. Seuls les animaux passant ou se trouvant dans la proximité immédiate des navires sont donc impactés.

Les ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) sont des appareils de suivis qui évaluent la vitesse de déplacement des particules en suspension, et donc la vitesse du courant, par effet Doppler (Persohn *et al.*, 2020). Ils génèrent des signaux impulsions de hautes fréquences et dont le niveau d'émission peut atteindre 225 dB re 1 μPa @ 1m (Tableau 2).

Le sonar latéral permet d'obtenir une image acoustique des fonds marin et de la partie immergée de structures et/ou ouvrages. L'obtention de l'image n'est pas impactée par la turbidité de l'eau et peut être utilisée sur de grandes étendues (Sonar à balayage latéral - géophysique marine, 2021). Ce type de sonar peut également être utilisé pour étudier les habitats (Ehrhold, 2003). Le niveau d'émission de cette technique de suivi est du même ordre que sondeur multifaisceaux.

Tableau 2 : Caractéristiques sonores des différents types de travaux (Persohn et al., 2020 ; Daroux et al., 2014 ; Orféa Acoustique, 2018 ; Technisim Consultant, 2019 ; Drira, 2022)

Source	Type d'onde	Type de signal	Niveau d'émission (dB re 1 uPa @ 1m)	Bande de fréquence	Fréquence maximum d'énergie	Durée	Direction de l'onde
Renforcement et artificialisation des berges, installation de structure portuaires, rénovation ou création de pont							
Battage de pieux	Acoustique + vibratoire	Impulsionnel	200-250	10 Hz - 20 kHz	100-1000 Hz	ms	Omnidirectionnel
Bétonnage	Bruit masqué par ceux généré par les autres machines						
Dynamitage (environ 1kg TNT/plusieurs millier de kg)	Acoustique + vibratoire	Impulsionnel	260-300	2 Hz - 1kHz	500Hz		Omnidirectionnel
Fonçage	Acoustique + vibratoire	Impulsionnel	200-210	10 Hz - 100 kHz	50-1000	-	Omnidirectionnel
Forage	Acoustique + vibratoire	Continu	120-190 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m	10Hz-10kHz	10-1000 Hz	-	Omnidirectionnel
Trépanage	Acoustique + vibratoire	Impulsionnel	210	Jusqu'à 16kHz	100 à 200 Hz	-	-
Vibrofonçage	Acoustique + vibratoire	Continu	165-185	10 Hz - 100 kHz	25 et 2000 Hz		Omnidirectionnel
Elargissement et approfondissement des voies d'eau							
Creusement, dragage	Acoustique + vibratoire	Continu	150 à 190 (selon la drague)		20-500		
Pelle mécanique	Acoustique + vibratoire	Continu	85 à 110	60 à 8000 Hz	1000Hz	-	-
Activités pendant les travaux nécessitant l'utilisation de navire et activité de suivi							
ADCP (acoustic doppler current profiler)	Acoustique	Impulsionnel	220-225	38-300 kHz	Variables	ms	20°
Caméra acoustique	Acoustique	Absence d'étude mais similaire aux sondeurs multifaisceaux					Monodirectionnel
Navire (12m de long, 7nd)	Acoustique	Continu	Environ 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m	10 Hz - 20 kHz	100 - 2000 Hz	-	Omnidirectionnel
Petit hors-bord (7m de long)	Acoustique	Continu	Environ 156 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m	10 Hz - 20 kHz	100-1000 Hz	-	Omnidirectionnel
Sonar civil	Acoustique	Impulsionnel	200-240	>10kHz	Variables	<1s	Variable
Sondeurs monofaisceaux	Acoustique	Impulsionnel	210-240	1-500 kHz	Variables	<2ms	Vertical
Sondeurs multifaisceaux	Acoustique	Impulsionnel	210-240	10-500 kHz	Variables	ms	Vertical
Suivi latéral	Acoustique	Impulsionnel	Même ordre que le sondeur multifaisceaux			ms	Vertical

4.3.3.4. Les répulsifs acoustiques

Les techniques utilisant le son comme répulsif sont en cours de développement (Popper *et al.*, 2020). Elles utilisent les basses fréquences pour modifier le comportement migratoire de certaines espèces comme les lamproies ou les saumons. Dans certains cas, les répulsifs servent à prévenir des espèces invasives de remonter les cours d'eau et dans d'autres, de guider en dehors des zones à risques comme les barrages hydroélectriques. Si certaines études montrent des résultats, l'efficacité ne dépasse pas les 50%. Heath *et al.* (2021) ont montré que les lamproies ont tendance à éviter les antennes émettant dans les basses fréquences (+30% de passages au niveau des antennes contrôle). Popper *et al.* (2020) ont, quant à eux, montré que les anguilles atteignaient plus rapidement la passe à poisson lorsque le répulsif sonore est accompagné d'une grille de protection. Cette expérience a été réalisée en condition de laboratoire. De même, Maes *et al.* (2004) ont montré que les salmonidés s'éloignaient du répulsif sonore avec une efficacité inférieure à 50%. Le seul répulsif sonore ayant obtenu des résultats satisfaisants est celui utilisant les ultrasons (Kynard and O'Leary, 1990 ; Ross *et al.*, 1996). Cependant, dans les poissons migrateurs, seul l'aloise est capable de capter les ultrasons.

4.4. Une pollution sonore et vibratoire impactant la faune

Les impacts sonore et vibratoire sur la faune peuvent être distingués selon différents facteurs : impact sur le long (supérieure à plusieurs jours) ou sur le court terme, impact sur le comportement de l'individu ou sur sa physiologie.

4.4.1. Les impacts chez les poissons

Les poissons perçoivent les sons à l'aide de différents organes : les organes otolithiques et la ligne latérale des poissons permettent de détecter les mouvements des particules induites par l'onde sonore (Persohn *et al.*, 2020). Chez certaines espèces, la vessie natatoire et d'autres cavités gazeuses participent également à la détection des sons. Ces organes détectent les variations de pressions qui sont induites par les ondes sonores. Toutes les espèces n'ont donc pas les mêmes capacités auditives. Par exemple, le seuil d'audition du Saumon atlantique est de 90 dB re μ Pa alors que celui du Hareng est de 75 dB re μ Pa (Annexe 7). La majorité des espèces capte les sons entre 50 et 300 Hz à des niveaux inférieurs à 100 dB re μ Pa. Lorsque la vessie natatoire sert également à détecter les sons, ces poissons peuvent capter les sons jusqu'à plusieurs milliers de Hz (exemple des cyprinidés).

Les ondes sonores vont avoir des impacts sur la physiologie de l'ichtyofaune. Soumis à des ondes continues de plus de 130 dB re μ Pa sur une courte durée, le taux de cortisol (hormone du stress) et le rythme cardiaque (jusqu'à 68% plus rapide) augmentent chez les poissons d'eau douce (Wysocki *et al.*, 2006 ; Johansson *et al.*, 2016 ; Crovo *et al.*, 2015 ; Graham & Cooke, 2008). Le taux de cortisol chez *Cyprinella venusta* reste stable si l'exposition à la pollution sonore dure plusieurs jours (Crovo *et al.*, 2015). Les poissons semblent donc être capables de s'habituer à l'émission d'une onde continue, qui les stress aux premiers abords. *Cyprinella venusta* a également montré une perte d'audition en milieu contrôlé (Crovo *et al.*, 2015). En présence de travaux émettant des sons impulsionnels en milieu contrôlé, Casper *et al.* (2013) ont montré que les individus de l'espèce *Oreochromis mossambicus* subissaient des barotraumatismes (dommage cellules ciliées, rupture vessie natatoire, hernie) à partir de niveaux sonores supérieurs à 174 dB re μ Pa. Certains individus sont morts à des niveaux sonores

compris entre 186 et 216 dB re μPa . Des impacts similaires ont été observés chez les poissons marins (Carroll et al, 2017 ; Popper et al, 2014 ; Smith et al, 2004 ; Weilgart, 2018). Les lésions létales étaient plus observées chez les espèces possédant une vessie natatoire et lorsque les individus étaient proches de la source (Dahl et al, 2015 ; Erbe, 2009 ; Popper et al, 2013).

Le premier changement de comportement observé en milieu fluvial face à une source sonore continue est la fuite (Draštk & Kubečka, 2005). Des expériences menées dans des aquariums ont montré que des ondes sonores de 164 dB re μPa diminuaient l'efficacité de recherche de nourriture avec notamment une diminution de la discrimination alimentaire. La fitness de l'individu peut alors être grandement affectée car son risque de consommer des aliments nocifs et/ou des particules non consommables augmente. De plus, l'individu peut augmenter son temps de recherche et donc être plus sensible face aux prédateurs (Purser & Radford, 2011). Par ailleurs, Bruintjes & Radford (2013) ont montré que l'espèce *Neolamprologus pulcher* se défendait moins contre ses prédateurs en présence d'une onde continue de 115 dB re μPa et, d'après Simpson et al. (2015), l'espèce *Anguilla anguilla* est plus facile à attraper lorsqu'elle est soumise à un bruit continu de 140 dB re μPa . D'autres études en milieu contrôlé ont également montré que les poissons avaient tendance à augmenter leurs vitesses de nage sur le court terme, à plonger plus en profondeur pour fuir le bruit et à augmenter la cohésion des bancs lorsque l'espèce est grégaire (Sabet et al., 2016 ; Neo et al., 2016). Ces changements de comportement ne sont toutefois mis en place que si le poisson capte le son émis. En effet, certains salmonidés n'ont eu aucune réaction face au bruit du fait de leurs capacités auditives peu sensibles (Lovell & Edwards, 2006 ; Harding et al., 2016). En milieu marin, les impacts sonores sur le comportement des poissons est similaire à ceux observés chez les espèces d'eau douce (Carroll et al., 2016). Un phénomène d'habituation a été montré en milieu marin : les poissons ne présentaient plus de comportement de surprise après une heure d'exposition à un bruit impulsionnel (Carroll et al., 2017 ; Beale & Monaghan, 2004). L'annexe 8 récapitule les impacts sonores sur les poissons.

4.4.2. Les impacts chez les bivalves

Les bivalves captent les mouvements des particules grâce à leurs statocystes (organe sensoriel sensible à la gravité). Ces organes permettent aux bivalves de capter les vibrations, notamment celles produites par les ondes sonores mais aussi celles transmises dans le substrat. Robert et al. (2015) ont montré que l'espèce *Mytilus edulis* réagissait à un stimulus vibratoire entre 0.06 et 0.55 m.s^{-2} (mouvement des particules) dans une bande de fréquence entre 5 et 410 Hz. Il existe très peu d'étude sur les impacts sonores et vibratoires sur les bivalves d'eau douce (une seule trouvée pour ce rapport). De plus, toutes sont réalisées en milieux contrôlés et une seule en milieu semi-contrôlé.

Dans la littérature, de nombreux impacts physiologiques ont été démontrés chez les bivalves soumis à une onde sonore. En 1993, Kowalski et al. ont testé le son pour limiter le recrutement de *Dreissena polymorpha*, espèce invasive dans de nombreux pays. Soumises à un son entre 8 000 Hz et 10 000 Hz, 75% des juvéniles sont morts. Au-delà de 10 000 Hz, 100% des larves de *D. polymorpha* sont mortes. Il semble donc que les ondes hautes fréquences peuvent impacter très négativement le recrutement des juvéniles de bivalves. Preslawski et al. (2016) n'ont pas observé de mortalité chez les adultes de *Pecten maximus* sur le court comme sur le long terme (plusieurs mois). Wale et al. (2019) ont, quant à eux, démontré qu'un son continu pouvait endommager l'ADN de *Mytilus edulis* lorsque

cette dernière est exposée au son pendant 6h. Comme chez les poissons, les bivalves ont également montré des signes physiologiques de stress : augmentation du taux de lactate, diminution du taux de filtration (Solan *et al.*, 2016), augmentation du stress oxydatif et diminution de la consommation de dioxygène (Wale *et al.*, 2019). Ces réponses à une situation de stress peuvent mener à une diminution de la survie. En effet, l'accumulation de lactate dans les tissus est toxique pour les bivalves (acidose tissulaire, dissolution de la coquille). Si le taux de filtration change, la performance écologique des individus peut être impactée négativement. Spiga *et al.* (2016) ont montré à l'aide d'une expérience en milieu semi-contrôlé que les moules de l'espèce *M. edulis* augmentaient leurs taux de filtration. Les individus ont été exposés à 50 min d'ondes acoustiques et vibratoires de type impulsif en milieu semi-naturel. A l'inverse, Wales *et al.* (2019) ont montré que cette même espèce réduisait son taux de filtration lorsqu'elle était exposée à 3 heures d'onde acoustique de type continue uniquement. Przeslawski *et al.* (2016) n'ont pas observé de signes de stress physiologique plusieurs mois après des expositions à des sons impulsifs produits par des pistolets airguns. Aucun effet sur la qualité et la taille de la chair des individus de *Pecten fumatus* et *Mimachlamys asperrima*, situés entre 30 et 60 m de la source, n'a été observé deux mois après l'exposition aux mêmes sons précédents (Harrington *et al.*, 2010 ; Przeslawski *et al.*, 2016)

Les bivalves ont également montré des changements de comportement face à une pollution sonore et/ou vibratoire. Ils ont en effet tendance à mettre en place des comportements d'évitement ou de protection comme se déplacer dans le substrat, fermer leurs valves ou diminuer leurs activités écologiques. Ces comportements sont similaires lorsque les bivalves sont soumis à des ondes de type continu ou impulsif : fermeture des valves (Solan *et al.*, 2016 ; Robert *et al.*, 2015) et diminution de l'activité de bio-irrigation (Solan *et al.*, 2016). Cependant, ils diffèrent selon l'espèce : si *R. philippinarum* a tendance à sortir du substrat en présence d'un impact sonore (Solan *et al.*, 2016), *M. edulis* aura tendance à s'enfouir (Robert *et al.*, 2015) lorsqu'elle se trouve sur un substrat tel que du sable. Wale *et al.* (2019) ont également montré que *M. edulis* augmentait l'amplitude d'ouverture de ses valves lors d'une exposition d'une heure à un son continu. Les auteurs ont interprété ce résultat comme étant la réponse à une situation de stress ou comme étant une diminution des dépenses énergétiques. L'annexe 9 récapitule les impacts sonores et vibratoires sur les bivalves.

4.5. La réglementation en milieu marin

Il n'existe pas actuellement de réglementation sur les impacts sonores en milieu marin au niveau mondial. Toutefois, plusieurs conventions internationales, dont la France est signataire, les intègrent et visent à les évaluer ainsi qu'à les réduire : la Commission baleinière internationale, l'Organisation maritime internationale, la Conférence des parties de la convention sur la diversité biologique et de la CMS (Convention on the Migratory Species of Wild Animals), la convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, la convention pour la protection de la mer méditerranée contre les pollutions et l'accord intergouvernemental ACCOBAMS (Agreement on the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area).

Au niveau de l'Union Européenne, l'impact du bruit sous-marin est intégré dans la directive-cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM) adoptée en 2008. L'objectif principal de cette directive est de

« maintenir la diversité biologique et de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité ». Les Etats membres ont l'obligation de mettre en place des stratégies maritimes comprenant :

- Un état des lieux sur le bon état écologique national des eaux marines ;
- Un diagnostic de l'état écologique des eaux marines et des pressions qui s'y exercent ;
- Un programme de surveillance de l'évolution de cet état ;
- Des objectifs environnementaux pour la limitation et la réduction des pressions pour atteindre le bon état écologique ;
- Un programme de mesures permettant d'atteindre ces objectifs et de maintenir le bon état écologique.

L'atteinte du bon état écologique est estimée à travers onze descripteurs parmi lesquels figure l'introduction de sources sonores sous-marines. Cette introduction doit s'effectuer à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin. Dans le descripteur 11 (D11), deux critères permettent d'évaluer les niveaux sonores en matière de bruits impulsifs (D11C1) et de bruits continus à basse fréquence (D11C2). Les Etats membres coopèrent afin de définir des valeurs seuils relatives à ces deux critères au niveau de l'Union européenne, en prenant en compte les particularités régionales.

La DCSMM a été transposée en France par les articles L. 219-7 à L. 219-18 et R. 219-2 à R. 219-10 du Code de l'environnement. Elle ne s'applique qu'en métropole. La transposition de cette directive a conduit la France à intégrer l'évaluation des impacts sonores dans les études d'impacts des futurs projets et à intégrer également l'établissement de mesures ERC. Les mammifères marins ainsi que les tortues et autres espèces sont protégés au niveau national par des arrêtés interministériels qui interdisent notamment la perturbation intentionnelle des individus et l'altération de leurs habitats prévu par l'article L.411-1 du Code de l'Environnement. « Le Code de l'environnement dispose également, au titre de son article L. 122-1, que « *les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés, qui par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation, sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine sont précédés d'une étude d'impact* », ce qui inclut l'évaluation des impacts sonores » (Persohn *et al.*, 2020).

En 2020, le « Guide de préconisations pour limiter l'impact des bruits marins sur la faune marine » (Persohn *et al.*) est publié et devient un outil permettant d'intégrer pollution sonore dans les études d'impact environnemental en milieu marin.

4.6. Les séquences ERC en milieux marins

Comme la pollution sonore est de plus en plus intégrée dans les études d'impacts en milieux marins, des méthodes ERC ont été mises en place afin de les éviter et/ou de les réduire (Figure 8).

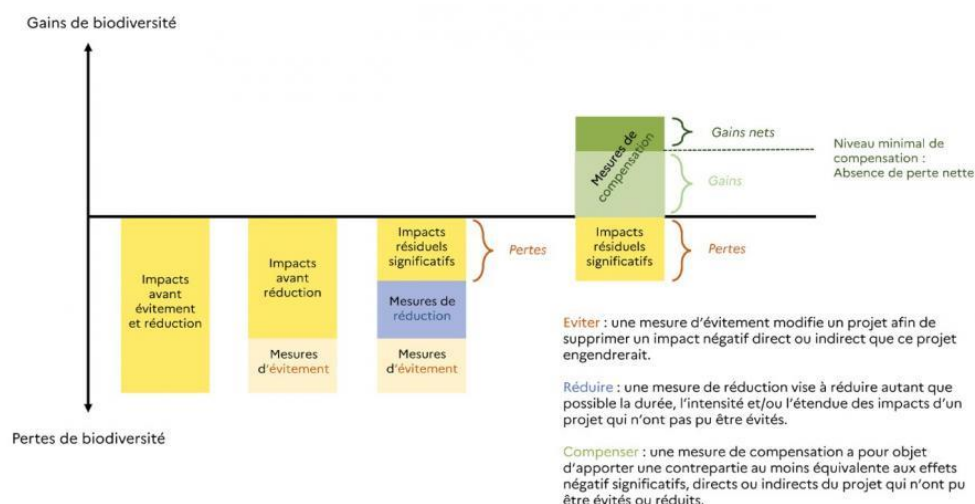


Figure 8 : Principe de la séquence Eviter-Réduire-Compenser (Source : OFB & Cerema, 2021)

Ces mesures sont décrites dans le guide de préconisation publié par Persohn *et al.* (2020). La pollution vibratoire n'étant pas prise en compte actuellement dans les projets, seul des exemples pour la pollution sonore seront donnés. Toutefois, certaines solutions peuvent être adaptées autant à la pollution sonore que vibratoire.

4.6.1. Eviter

Plusieurs adaptations peuvent être apporter au projet afin d'éviter la pollution sonore lors des travaux sur des espèces cibles. En effet, on parle d'évitement par rapport à un objectif précis qui vise par exemple à protéger une ou plusieurs espèces cibles d'un impact négatif produit lors de la réalisation d'un projet. Pour cela, l'adaptation du projet tant dans sa planification spatiale et/ou temporelle, dans son dimensionnement ou dans ses caractéristiques peut être mise en place. Ces mesures permettent d'adapter le projet par rapport aux enjeux environnementaux en supprimant les impacts négatifs directs et/ou indirects du projet sur les espèces cibles. Toutes les activités de travaux sont concernées. Par exemple, le projet peut être mené en dehors des périodes essentielles des espèces ciblées (période de reproduction par exemple) ou il est possible de changer l'emplacement du projet pour éviter un habitat d'intérêt ou les techniques utilisées en faveur de techniques de travaux non impactantes. Ces mesures passent en catégorie de réduction lorsque tous les impacts négatifs ne peuvent pas être éliminés.

De même, il est possible de suspendre les travaux lors des périodes écologiquement importantes. La mise en place de telles mesures implique d'avoir de bonnes connaissances sur les cycles biologiques des espèces cibles et sur les niveaux sonores générés par les différents scénarios proposés dans les phases projets. Afin de pouvoir planifier au mieux le projet, l'existence d'une réglementation fixant des périodes et/ou des zones de fermeture dans le cadre d'une protection d'espèces est d'une grande aide.

Ces solutions permettant d'éviter les impacts sur une espèce peuvent en impacter une autre. Dans ces cas-là, il faut alors trouver des compromis.

4.6.2. Réduire

Lorsque les impacts négatifs ne peuvent être éviter, des mesures de réductions doivent être mises en place. Il peut être par exemple possible de définir une zone d'exclusion où aucune espèce sensible

ne doit se trouver. En cas de présence, les travaux doivent s'arrêter et ne reprendre que lorsqu'elles ont quitté la zone. Cette technique est notamment utilisée en mer pour protéger les mammifères marins. Cependant, cette mesure dépend des coûts économiques engendrés par les mesures ou outils de monitoring ainsi que de l'acceptation de la mise en œuvre de ces mesures par le maître d'ouvrage. Pour ces mesures, il faut donc mettre en place une surveillance permettant de détecter les espèces présentes dans la zone d'exclusion. En milieu marin, le pre-watch permet de surveiller visuellement ou acoustiquement les mammifères marins et les poissons dans la zone d'exclusion et ses alentours.

Une autre mesure de réduction est le soft-start/ramp-up : le son généré par les travaux est augmenté progressivement afin de laisser le temps aux espèces de quitter la zone impactée. L'efficacité de telles méthodes n'a pas encore été démontrée d'autant qu'il est difficile de définir une séquence d'augmentation efficiente en fonction des espèces. Dans la même veine, les répulsifs acoustiques sont des méthodes très prometteuses. Cependant, et comme déjà présenté précédemment, l'efficacité de telles méthodes reste limitée.

Il est également possible de modifier les techniques de travaux initialement prévues pour des techniques moins bruyantes (vibrofonçage au lieu d'un battage de pieux classique par exemple) ou d'ajouter des techniques visant à isoler la source du bruit de l'environnement. La première mesure a déjà montré de bons résultats dans le milieu marin et la seconde est en cours d'étude (Persohn *et al.*, 2020).

4.6.3. Compenser

Il n'existe pas de mesures compensatoires directes pour les impacts sonores et vibratoires puisqu'ils impactent principalement des individus et non des habitats. Cependant, il est possible de réaliser des actions inscrites dans des plans nationaux d'actions afin de participer à la protection et la conservation d'espèces protégées.

L'annexe 10 récapitule les différentes mesures ERC pouvant être menées en milieux marins.

5. Discussion

5.1. Un intérêt grandissant pour l'étude des paysages acoustiques et de la pollution sonore

L'intérêt grandissant pour l'étude des paysages acoustiques ainsi que pour les pollutions sonores et vibratoires est soutenu par la volonté de mieux comprendre la biodiversité pour mieux la protéger. Cependant, malgré cet engouement, certains groupes taxonomiques sont bien mieux étudiés que d'autres. En effet, les connaissances sur ce sujet foisonnent sur les oiseaux, les chauves-souris et dans le domaine aquatique sur les mammifères marins. Si l'étude des impacts sonores sur les poissons est de plus en plus riche, l'étude de ces impacts est en retard sur le milieu fluvial. Ce constat est d'autant plus alarmant lorsqu'il s'agit de l'étude de ces impacts sur les bivalves d'eau douce. Il est vrai que l'attraction pour les milieux marins semble plus forte : l'esthétisme des poissons est plus grand et les mammifères marins sont majestueux. Calvi (2022) a d'ailleurs montré que les espèces considérées comme « belles » sont plus enclines à être étudiées et à être protégées. De même, les espèces présentant un intérêt économique seront mieux étudiées. Pourtant, ce ne sont pas forcément les plus

importantes écologiquement parlant. Il est donc rassurant de voir que les connaissances s'améliorent petit à petit.

Aujourd'hui, les milieux, riches en paysages sonores, sont soumis à la pollution sonore. Les bruits naturels peuvent être masqués par les bruits anthropiques et impacter la faune environnante lors des travaux ou autres activités humaines. Il devient donc urgent de bien caractériser ces impacts sur le milieu, l'ichtyofaune et les bivalves.

5.2. L'impact des ondes sur le milieu

5.2.1. L'atténuation des ondes selon le milieu

Les ondes générées lors de travaux se comportent différemment selon le milieu dans lequel elles se propagent. Les phénomènes physiques de réflexion et autres vont avoir un impact sur l'intensité et la propagation des ondes et sont d'autant plus forts dans les milieux de faible profondeur. Plus l'onde s'éloigne de sa source, plus elle s'atténue : elle perdra en intensité avec la distance et ne perdura donc pas dans le temps.

Il est donc important de bien comprendre les facteurs participant à l'atténuation des ondes puisqu'ils permettront une première évaluation des impacts potentielles de travaux sur un milieu. De nombreux facteurs participent à l'atténuation des ondes (Figure 9).

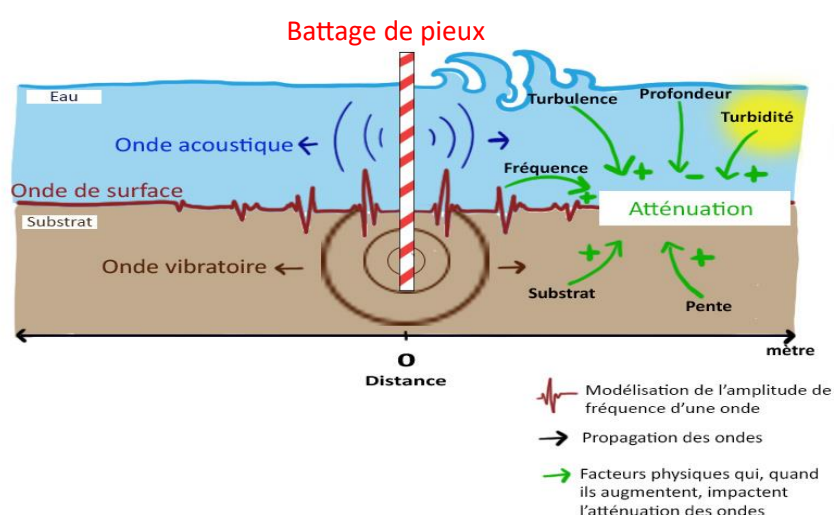


Figure 9 : Récapitulatif des facteurs physiques pouvant atténuer les ondes

Leur compréhension est d'autant plus importante en cours d'eau. En effet, il est possible de sectoriser ces derniers d'amont en aval (Annexe 11) : les sections supérieures (les plus en amont) ont généralement des pentes et des vitesses d'écoulement fortes alors que les sections inférieures (les plus en aval) auront des pentes et des vitesses d'écoulement plus faibles. Ainsi, l'intensité de l'atténuation est plus forte en amont et diminue vers l'aval (Tableau 3). Il est possible de supposer que l'atténuation sera plus forte en amont qu'en aval et donc que les impacts sonores et vibratoires le seront tout autant. Cette matrice ne permet que d'avoir une idée globale approximative sur les phénomènes d'atténuation qui peuvent avoir lieu dans une certaine zone. Chaque milieu est différent du fait de ses caractéristiques physiques mais aussi par son évolution dans le temps (saisonnalité).

Tableau 3 : Intensité de l'atténuation des ondes en fonction du secteur du cours d'eau. "+" l'onde est très atténuée, "±" l'onde est moyennement atténuée, "-" l'onde est peu atténuée.

	Section supérieure	Section moyenne	Section inférieure
Pente	+	-	-
Taille de grains	+	±	-
Vitesse d'écoulement	+	±	-
Intensité de l'atténuation sur la section	+	±	-

5.2.2. L'impact des travaux

Plus les caractéristiques sonores et vibratoires des travaux en rivière sont connues, plus les impacts qu'ils vont engendrer sont simples à quantifier. Par exemple, si les bruits anthropiques sont plus forts (en termes de fréquence d'onde par exemple), il sera déjà possible de savoir si les sons générés seront masqués ou non par le bruit naturel ambiant. Le cas échéant, il est possible de supposer que les travaux auront peu d'impacts sur la faune en termes de pollution sonore.

Chaque type de travaux présentes des caractéristiques sonores différentes. Cependant, il existe très peu d'études sur leurs caractéristiques vibratoires. Une recherche est en cours en Outre-Mer pour étudier la propagation des ondes dans des enrochements générées par un forage (T. Menut, *comm. pers.*). Il apparaît qu'un battage de pieux produira plus d'impacts sonores qu'un vibrofonçage puisqu'il est admis que les ondes impulsionnelles sonores sont plus impactantes que les ondes continues. Cependant, il est impossible de l'affirmer pour les ondes vibratoires. Est-ce que les ondes vibratoires impulsionnelles sont plus impactantes que les ondes vibratoires continues comme c'est le cas pour les ondes acoustiques ? Il faudra déjà répondre à cette question pour choisir au mieux une technique pour réaliser les travaux.

La mise en place de travaux en rivière va donc générer des ondes acoustiques ainsi que des ondes vibratoires. Ces dernières sont peu caractérisées et nécessitent la mise en place d'étude pour améliorer les connaissances actuelles, mais elles seront bien présentes. Le milieu sera donc impacté par ces ondes comme ces dernières le seront également par le milieu. Lors de leur propagation, elles subiront des phénomènes de propagations et d'atténuations qui, par conséquent, limiteront leurs impacts dans l'espace et le temps. L'hypothèse 1 est donc validée.

5.3. L'impact des ondes sur la faune

5.3.1. L'impact sur les poissons

Les impacts sonores observés chez les poissons marins et d'eau douce sont similaires : changement de comportement pour fuir la perturbation, stress physiologiques, barotraumatismes temporaires ou non, mortalité (Figure 10). Sur le long terme, la fitness des individus et leurs survies peuvent être remises en cause. Cela est d'autant plus alarmant lorsqu'il s'agit d'espèces en danger ou en voie critique d'extinction comme les Anguilles, les Aloses ou encore les Lamproies marines en France. Certaines espèces font l'objet de plan de gestion national de préservation.

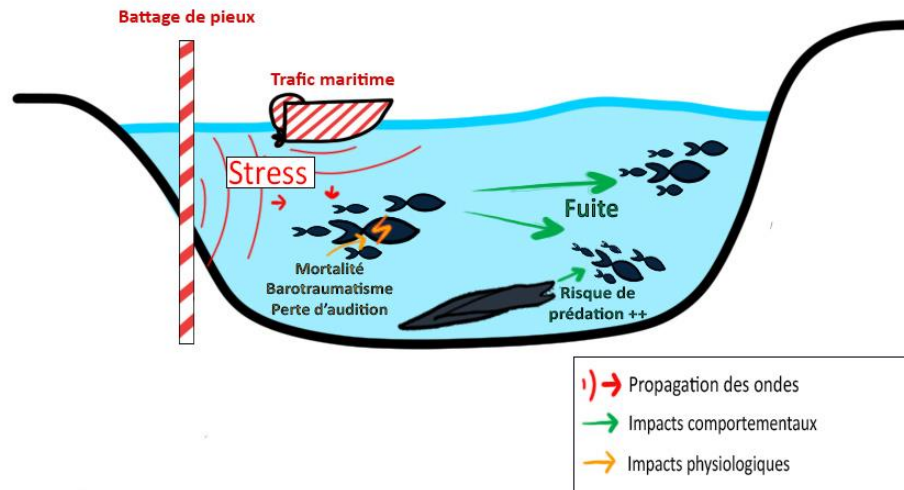


Figure 10 : Récapitulatif des différents impacts de la pollution sonore sur les poissons

Comme chaque espèce possède des capacités auditives différentes, les impacts le seront tout autant : l'Alose présente une sensibilité auditive beaucoup plus importante que les salmonidés. Il est donc possible que pour un même son émis, l'Alose soit plus impactée que les salmonidés. Lors des études d'impacts, il sera donc possible de hiérarchiser les espèces cibles en termes de priorité. Le type d'impact varie également avec le type d'onde et le temps d'exposition.

Il est également important de noter que très peu d'études en milieu fluvial ont été réalisées en milieu naturel. Or, les ondes ne se propagent pas, ni ne se comportent ou s'atténuent, de la même façon que dans un aquarium. En effet, les vitres vont générer plus de phénomènes de réflexion, réfraction et autres que dans le milieu naturel. De plus, les poissons ne peuvent pas fuir dans les aquariums alors que les études en milieux naturels montrent que c'est leur première réaction. De même, il est possible que les poissons captifs ne réagissent pas comme ils le feraient dans leur habitat d'origine. Il faut alors prendre avec précaution les résultats des impacts, souvent physiologiques, des études en laboratoires.

Le manque de connaissances en milieu naturel est préjudiciable, notamment pour comprendre les impacts sonores sur le long terme après une exposition. Certaines études en milieux marins montrent que les poissons finissent par s'habituer aux sons anthropiques. Cependant, ces sons peuvent en masquer d'autres et pénaliser la survie des espèces. Par exemple, certains poissons pourraient ne plus être capables de repérer leurs proies ou leurs prédateurs. De même, quelle sera l'impact sur les espèces territoriales : est-ce qu'ils resteront sur place lors des impacts ou fuiront vers d'autres habitats s'ils sont favorables ? Est-ce qu'ils reviendront dans leur habitat d'origine après les travaux ? A ce jour, aucune étude ne permet de répondre à ces questions.

En milieu naturel, le premier comportement adopté par les espèces face à une perturbation sonore est celui de la fuite. Cependant, au vu du manque de données en milieu naturel, il est nécessaire de prendre avec précaution les impacts démontrés dans les différentes études puisqu'il n'est pas sûr que leurs résultats reflètent ce qu'il se passerait en milieu naturel. Les études actuelles ne permettent également pas de savoir si des travaux en rivières peuvent impacter les routes migratoires des poissons sur le long terme. Toutefois, comme le comportement premier est celui de la fuite, il est possible de

penser que ces routes pourront être impactées au moins sur le court terme. L'hypothèse 2a ne peut donc ni être validée ni invalidée.

5.3.2. L'impact sur les bivalves

En milieu fluvial, les bivalves sont de plus en plus intégrés dans les études d'impacts des projets d'aménagement (Cucherat *et al.*, 2022). Cependant, les lacunes dans les connaissances sur les impacts vibratoires et sonores sont très importantes. Il faut donc, comme pour les poissons, prendre avec précaution les résultats observés dans la littérature.

Les impacts sonores et vibratoires sont visibles à plusieurs échelles du vivant : de l'ADN au changement de comportement l'individu en passant par son métabolisme (Figure 11). Sur le long terme, ces impacts peuvent mener à une diminution de la fitness. Certaines études ont montré qu'il n'existait pas d'impacts sur le long terme suite à une exposition à un son impulsif. Cependant, la question se pose pour les impacts vibratoires mais aussi selon la durée de l'exposition (non accessible sur les publications précédentes).

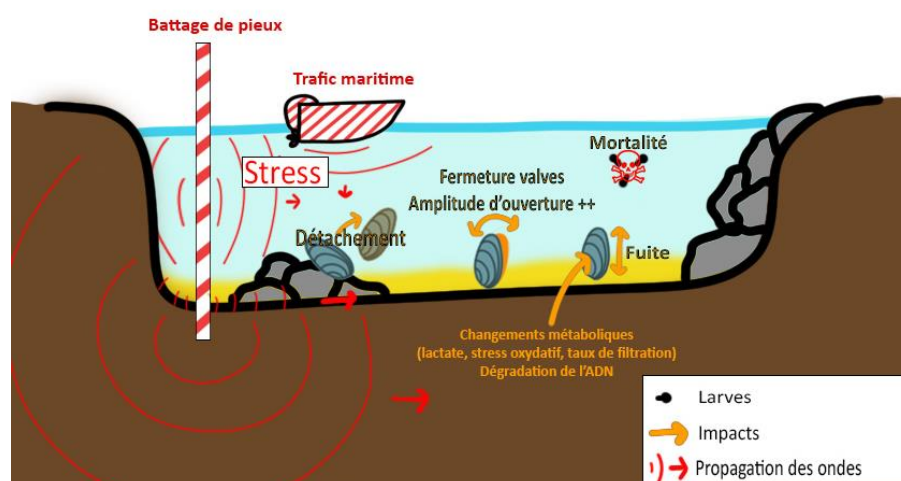


Figure 11 : Récapitulatif des différents impacts de la pollution sonore et vibratoire sur les bivalves

Comme chez les poissons, les impacts diffèrent selon l'espèce, le temps d'exposition, le type d'onde et la distance entre l'émetteur et le récepteur. Il est possible de s'attendre à des impacts différents selon le substrat sur lequel se trouve les bivalves mais aucune idée ne s'est intéressée à ce fait. Il a été également montré que les ondes sonores pouvaient tuer les larves de moules d'eau douce. Il apparaît donc primordial d'éviter de réaliser des travaux lors des périodes de reproduction des bivalves.

D'autres lacunes dans les connaissances sont également présentes : aucune étude n'a essayé de mettre un phénomène d'habituation ni de qualifier les impacts selon la distance à la source générant les ondes sonores et vibratoires. De plus, la littérature n'explique pas si la fermeture des valves a lieu tout au long de l'exposition ou s'il s'agit juste d'un temps global de fermeture plus long. Cette question est importante car si la fermeture des valves est permanente (le temps de l'exposition) et si l'exposition est trop longue, les risques de mortalité peuvent augmenter.

L'hypothèse 2b ne peut pas être validée. Il semble logique que les bivalves soient plus sensibles que les poissons face aux travaux du fait de leur capacité limitée à fuir. Les lacunes pour comprendre

les impacts sonores et vibratoires sur les bivalves d'eau douce en milieu naturel sont très importantes. L'amélioration de ces connaissances est donc urgente et nécessaire.

5.4. Les besoins de réglementation en milieu fluvial

Or, cette pollution n'est pas prise en compte dans les études d'impacts actuelles ni dans la Directive Cadre sur l'Eau mise en place en 2000 dans l'Union Européenne. En effet, aucun des termes « sonore », « acoustique » ou « bruit » n'apparaît dans la DCE. Au vu des impacts potentiels démontrés dans cet état de l'art, les enjeux pour intégrer l'étude des impacts sonores sur la faune fluviale sont majeurs. D'autant plus que plusieurs espèces impactées comme l'Anguille ou la mulette sont sujettes à des plans de gestion nationaux ou encore à des guides techniques pour mettre en place des mesures de conservation.

5.5. L'adaptation des séquences ERC en milieu fluvial

Pouvoir quantifier les impacts sonores et vibratoires potentiels des travaux permet de mettre en place les mesures ERC adéquates. Par exemple, dans le cas d'une création de pont, il sera nécessaire de comprendre les caractéristiques sonores et vibratoires des techniques employées, d'identifier les espèces cibles susceptibles d'être impactées et de quantifier le paysage sonore et vibratoire déjà présent et les impacts sur ces espèces si les ondes générées par les travaux ne sont pas masquées par le milieu.

5.5.1. Eviter

Le plus efficace pour écarter les impacts est de choisir des périodes de travaux en dehors des périodes écologiquement critiques des espèces cibles (reproduction, recrutement, etc...) ou de changer le projet de localisation. Cependant, les périodes critiques des différentes espèces ne sont pas en même temps. Il faudra donc réfléchir à des compromis.

5.5.2. Réduire

Si l'impact ne peut être évité, il peut être possible de le réduire. Dans le milieu marin, des zones d'exclusion permettent, en utilisant les indicateurs de bruit perçu et des seuils de tolérance, de délimiter une zone où les impacts sont trop nocifs pour les espèces cibles. De tels seuils doivent toutefois être définis par des réglementations. Cette mesure est principalement utilisée pour les mammifères marins et semble difficile à mettre en place en cours d'eau. En effet, les audiogrammes des espèces sont bien moins connus chez les poissons d'eau douce et les modélisations de propagations des ondes en cours d'eau plus compliquées. De plus, il faut pouvoir repérer l'espèce dans la zone. S'il est facile de repérer un mammifère marin, cela est plus complexe pour les poissons, surtout en grand cours d'eau. La surveillance visuelle est peu adaptée en cours d'eau pour repérer les poissons. D'autres méthodes sont toutefois possibles comme la détection par caméra acoustique. Par exemple, EDF a mis en place des caméras acoustiques près d'un barrage hydroélectrique permettant de repérer les individus s'approchant des turbines. Lorsque les poissons sont repérés, les turbines sont arrêtées le temps de l'avalaison des poissons (EDF, 2023). Cependant, les mesures de zone d'exclusion et de pre-watch ne sont efficaces que si le maître d'ouvrage accepte de stopper temporairement les travaux lorsqu'un individu des espèces cibles est présent dans la zone d'exclusion. Or, il est compliqué de mettre en place une suspension des travaux (L. Philippe, *comm. pers.*).

La mesure de soft-start semble plus prometteuse même si son efficacité n'est pas connue à ce jour. L'idée d'augmenter peu à peu les fréquences sonores permettrait de faire fuir les espèces, quand celles-ci sont mobiles, avant d'atteindre les fréquences impactantes. Cette augmentation agirait comme un répulsif sonore.

Dans la même idée, les répulsifs sonores semblent également avoir du potentiel. Ils sont faciles à mettre en place, peu coûteux, non invasifs et ne semblent pas sujet au phénomène d'habituation par les poissons dans les infrasons. Cependant, aucun test d'habituation n'a été réalisé en basses fréquences alors que ce sont ces fréquences les plus captées par les poissons. Les impacts sur d'autres espèces n'est également pas connu alors que certains répulsifs comme les pingers émettent des sons impulsionsnels entre 130 et 200 dB re μPa @ 1 m (Persohn *et al.*, 2020). De plus, leurs efficacités restent encore limiter à ce jour. Cette mesure nécessite donc encore des développements.

Il existe également des techniques de confinement du bruit mises en place dans le milieu marin. Ces mesures sont en cours de développement mais semblent montrer de bons résultats (Persohn *et al.*, 2020). Les conditions en cours d'eau sont différentes de celles en milieu marin. Les battages de pieux sont les plus sujets à ces techniques de confinement du bruit : la mise en place de rideaux de bulles permet de réduire le son jusqu'à 18 dB $L_{E,p}$ et la mise en place de blocs isolants ou batardeau peuvent le réduire de 10 à 23 dB $L_{E,p}$. Des études sont nécessaires pour savoir si ces techniques sont adaptables en milieu fluvial.

La réduction des impacts vibratoires est plus compliquée. Il pourrait être possible de confiner les vibrations, comme pour le son, à l'aide de technique de confinement en enfonçant des batardeaux, par exemple, sur une certaine hauteur de substrat. Les ondes seraient alors absorbées et leur propagation limitée. Cependant, il faudrait étudier l'impact de la mise en place de telles techniques.

Pour les bivalves, une pêche de sauvegarde accompagnée d'un déplacement des populations est possible si les impacts générés par les travaux sont considérés comme trop fort. Ces mesures de réduction sont déjà mises en place dans de nombreux projets et un guide technique a été créé en 2021 par Cucherat *et al.* En petit cours d'eau, il est également possible d'abattre les matières en suspension issues des travaux pour limiter l'envasement des bivalves. L'amélioration des connaissances sont les bivalves apparaît ici primordiale puisqu'elles permettraient de choisir s'il est vraiment utile ou non de déplacer les bivalves. Lors des déplacements, il y a souvent de la mortalité. A ce jour, le choix de déplacer ces derniers peut être fait en prévention, s'il est considéré que le risque est trop grand.

5.5.3. Compenser

Il n'est pas possible à ce jour de compenser les impacts provoqués par les ondes acoustiques. Si les ondes vibratoires impactent le milieu, il pourrait être envisageable de mettre en place une compensation en recréant l'habitat détruit ailleurs. Cette mesure est généralement déjà mise en place lorsque les travaux impacts des habitats.

De nombreuses pistes de mesures ERC ont été proposées ici sans pour toutefois être exhaustif. Des connaissances supplémentaires sur les espèces cibles et les techniques sont encore nécessaires pour les rendre plus efficace. La sensibilisation des maîtres d'ouvrages à la problématique des impacts acoustiques et vibratoires est une autre étape pour la prise en compte de ces impacts dans les études d'avant-projets et d'impacts.

5.6. Les suivis

Pour justifier de la mise en place des mesures ERC vues précédemment et d'évaluer leurs efficacités, un suivi doit être mis en place. Il permettra de savoir si les mesures ont eu l'effet attendu. Le protocole de suivi doit être adapté à chaque projet. Selon les caractéristiques du chantier, des espèces présentes et des risques d'impacts potentiels. Il sera alors possible de définir un protocole de suivi. Le suivi ne peut être analysé que si un état initial a été réalisé en amont des travaux. Le suivi prend donc place avant et après les travaux (pour justifier de l'absence d'impact sur le long terme).

5.7. Des pistes de protocole pour intégrer ces études en milieux continentaux

Dans l'optique d'intégrer les impacts sonores et vibratoires dans les études d'impacts de projet, il est nécessaire de mettre en place un protocole permettant de suivre et d'évaluer ces derniers. En premier lieu, il est nécessaire de réaliser un état des lieux de la zone impactée : paysage acoustique initial (hydrophone), peuplements piscicoles et de bivalves. Dans le cas des poissons, la bibliographie est d'une aide précieuse, notamment avec la base de données Naiade de l'OFB. En cas d'absence de bibliographie, il peut être possible de faire des pêches électriques ou un inventaire par surveillance acoustique (sonars, sondeurs ou caméra acoustique). Pour les bivalves, des inventaires en plongées peuvent être réalisés.

Afin de comprendre la propagation des ondes, des hydrophones (étude des ondes acoustiques) et des géophones (étude des ondes vibratoires) sont communément utilisés. Sur les zones impactées, des transects pourraient être mis en place pour étudier l'atténuation des ondes générées par les travaux. Comme il l'a été dit précédemment, des matières en suspension issues des travaux peuvent également être remobilisées. Elles peuvent être remises en suspension lors du passage des ondes. Un suivi de la turbidité pourrait donc également être intéressant, d'autant que l'ensemble des espèces est sensible à l'envasement. Un suivi régulier pourrait ainsi permettre de mettre en œuvre des protocoles de sauvetage si l'espèce est patrimoniale. Toutefois, ce suivi est plus compliqué à mettre en place et n'est pas forcément adapté en grand cours d'eau. Des turbidimètres permettent de suivre en continu la turbidité dans certains cours d'eau de montagne (Némery *et al.*, 2010) mais rien n'a été fait en grand cours d'eau. Une autre solution pourrait être d'installer des caméras étanches comme dans les récifs coralliens. Ces dernières sont utilisées pour suivre la biodiversité (Pelletier *et al.*, 2012) mais elles pourraient également l'être pour suivre le comportement de la faune et la remise en suspensions des particules fines en cours d'eau. Cette technique reste toutefois coûteuse et semble être difficile à mettre en place.

Ces dernières permettront d'étudier le comportement des espèces piscicoles présentes pendant les travaux et de voir si elles auront tendance à revenir par la suite. Après les travaux, une pêche électrique permettrait également d'étudier l'évolution de ces peuplements par rapport à l'état initial.

Ce suivi est plus complexe dans le cas des bivalves, notamment à cause du manque de connaissances. Pour les suivis après travaux, les campagnes de prospections déjà conseillées dans le guide de l'OFB (Cucherat *et al.*, 2022) peuvent être mises en place. Pour l'étude des impacts pendant les travaux, il pourrait être possible d'enregistrer les comportements des moules par vidéo.

Une autre méthode est en développement pour suivre la fréquence d'ouverture/fermeture des valves (Ferreira-Rodriguez *et al.*, 2023 ; Massabau, 2022). Comme les bivalves change de comportement lorsqu'ils font face à une pollution chimique, cette technologie est utilisée pour suivre la qualité à la sortie de station d'épuration ou près d'usine de raffinement de pétrole. Il a été montré que l'une des conséquences des impacts sonores était la fermeture des valves. Cette technique est non invasive et utilise un ensemble de valvomètres hautes fréquences (High Frequency NonInvasive valvometry) pour suivre la qualité des eaux à travers le changement de comportement des bivalves. Sa mise en place est lourde car un certain matériel est nécessaire et il faut au moins 16 individus pour obtenir des résultats sans biais de comportement individuel. Des électrodes sont mises en place sur les deux valves (Figure 12). La manipulation d'espèces patrimoniales avec cette technique peut donc être controversée.



Figure 12 : Groupe de palourdes asiatiques équipé d'électrodes (à gauche). Cage dans laquelle sont protégées les bivalves durant l'expérience (à droite). © molluSCAN-eye®

Conclusion

Les cours d'eau sont soumis à d'importantes pressions anthropiques avec les aménagements réalisés. Les travaux impactent les milieux de différentes manières et produisent notamment une pollution sonore et vibratoire. Si les impacts sonores sur l'ichtyofaune marine sont bien connus, cela est moins le cas pour l'ichtyofaune fluviale. Peu d'étude s'intéresse aux impacts dans le milieu naturel. Cela est d'autant plus flagrant chez les bivalves où il n'existe que très peu d'étude sur les impacts sonores et pratiquement aucune sur les impacts vibratoires. Pourtant, ces impacts, qu'ils soient physiologiques ou comportementaux, existent et menacent la survie des poissons et des bivalves lors de travaux en rivière.

Les impacts sonores sont maintenant intégrés aux réglementations dans les milieux marins. Il ne semble donc pas surprenant de penser qu'ils finiront par être intégrés dans la réglementation en eau fluviale. De même, les projets menés en rivière prennent de plus en plus en compte l'impact des travaux sur les bivalves d'eau douce. Cet intérêt grandissant, tant chez la communauté scientifique que chez les porteurs de projets, suppose que ces impacts seront à l'avenir intégrés dans les études d'impacts.

Bibliographie

Aicher, B., Tautz, J., 1984. 'Peripheral inhibition' of vibration-sensitive units in the leg of the fiddler crab *Uca pugilator*. J. Comp. Physiol. A. 154, 49–52.

- Akberali, H.B., Trueman, E.R., 1979. pO₂, and pCO₂ changes in the mantle cavity of *Scrobicularia plana* (Bivalvia) under normal and stress conditions. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 9, 499–507.
- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., 2000. Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 19, 371–387.
- Blondel, P.B., Borsani, F., Burrows, J., Dobbins, P., Hazelwood, R., Humphrey, V., Lepper, P., Rogers, R., Smith, J., Theobald, P., Thorne, P., Wood, D., 2014. Good practise guide for underwater noise measurement. NPL Good Practise Guide No. 133. National Physical Laboratory.
- Brownell, P., Farley, R.D., 1979. Detection of vibrations in sand by tarsal sense organs of the nocturnal scorpion, *Paruroctonus mesaensis*. *J. Comp. Physiol. A.* 131, 23–30.
- Brownell, P.H., 1977. Compressional and surface waves in sand: used by desert scorpions to locate prey. *Science* 197, 479–482.
- Brownell, P.H., 1984. Prey detection by the sand scorpion. *Sci. Am.* 25186–25197.
- Bruintjes, R., & Radford, A. N. (2013). Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Animal Behaviour*, 85(6), 1343–1349.
- Bui, S., Oppedal, F., Korsøen, Ø. J., Sonny, D., & Dempster, T. (2013). Group behavioural responses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) to light, infrasound and sound stimuli. *PloS one*, 8(5), e63696.
- Calvi, T. (2022). Une étude analyse le lien entre le score esthétique attribué aux poissons coralliens et leur statut de conservation grâce aux CNN. ActuaIA. Consulté le 23 janvier 2024, à l'adresse <https://www.actuia.com/actualite/une-etude-analyse-le-lien-entre-le-score-esthetique-attribue-aux-poissons-coralliens-et-leur-statut-de-conservation-grace-aux-cnn/>
- Carroll, A.-G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B., (2017) A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish and invertebrates. *Mar Pollut Bull* 114 :9–24.
- Casper, B. M., 2006. The hearing abilities of elasmobranch fishes. Graduate Theses and Dissertations, University of South Florida, 146 p.
- Casper, B. M., Smith, M. E., Halvorsen, M. B., Sun, H., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013). Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 166(2), 352–360.
- 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.
- Crovo, J. A., Mendonça, M. T., Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2015). Stress and auditory responses of the otophysan fish, *Cyprinella venusta*, to road traffic noise. *PLoS One*, 10(9), e0137290.
- Cucherat, X., Lamand, F., Prié, V., 2021. Guide technique : Mulette épaisse et autres bivalves : Quels projets doivent les prendre en compte et comment ? DREAL Grand Est, DRIEAT Ile-de-France.
- Daroux, A., Martignac, F., Guillard, J., 2014. Utilisation de la caméra acoustique DIDSON pour le suivi en rivière des poissons migrants. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 83 (3), pp.1-8. (hal-01210252)
- Djemali. (2005). Evaluation de la biomasse piscicole dans les plans d'eau douce tunisiens : approches analytique et acoustique.
- Draštk, V., & Kubečka, J. (2005). Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters. *Fisheries Research*, 72(2-3), 219–228.
- Drira, A., 2022. Etude d'impact sur l'acoustique sous-marine des travaux du Terminal du Naye – Saint Malo – Etude d'impact V2. SINAY Maritime Data Solution.
- Edf. (2023, 18 septembre). Le projet européen D-Hydroflex, ou comment concilier les enjeux environnementaux avec l'optimisation de la production hydroélectrique. EDF FR. Consulté le 28 décembre 2023, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-lavenir-de-lenergie/rd-un-savoir-faire-mondial/toutes-les-actualites-de-la-rd/le-projet-europeen-d-hydroflex-ou-comment-concilier-les-enjeux-environnementaux-avec-loptimisation-de-la-production-hydroelectrique>
- Ehrhold, A., 2003. L'application du Sonar à Balayage Latéral (SBL) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal. IFREMER.
- Enger, P. S., 1967. Hearing in herring. *Comparative Biochemistry and Physiology* 22 (2), 527–538.
- Ferreira-Rodríguez, N., Beggel, S., Geist, J. P., Modesto, V., Österling, M., Riccardi, N., Ronaldo, S. & Urbańska, M. (2023). Freshwater Mussels as Sentinels for Safe Drinking Water Supply in Europe. *ACS Es&t Water*, 3(12), 3730–3735.
- Garstand, M., 2009. Precursor tsunami signals detected by elephants. *Open Conserv. Biol. J.* 3, 1–3.
- Graham, A. L., & Cooke, S. J. (2008). The effects of noise disturbance from various recreational boating activities common to inland waters on the cardiac physiology of a freshwater fish, the largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(7), 1315–1324.
- Harding, H., Bruintjes, R., Radford, A. N. & Simpson, S. D., 2016. Measurement of Hearing in the Atlantic salmon (*Salmo salar*) using Auditory Evoked Potentials, and effects of Pile Driving Playback on salmon Behaviour and Physiology. *Marine Scotland Science, Scottish Marine and Freshwater Science Report Vol 7 No 11*, 47 p.
- Harrington, J. J., McAllister, J., & Semmens, J. (2010). Assessing the short-term impact of seismic surveys on adult commercial scallops (*Pecten fumatus*) in Bass Strait.

- Hazelwood, R.A., Macey, P., 2016. The intrinsic directional information of ground roll waves. In: Popper, A.N., Hawkins, A.D. (Eds.), *The Effects of Noise on Aquatic life II*. Springer New York, NY, pp. 447–453.
- Johansson, K., Sigraý, P., Backström, T., & Magnhagen, C. (2016). Stress response and habituation to motorboat noise in two coastal fish species in the Bothnian Sea. In *The effects of noise on aquatic life II* (pp. 513–521). Springer New York.
- 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.
- Kim, D.-S., Lee, J.-S., 2000. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 19, 115–126.
- Kowalewski, J. J., Patrick, P. H., & Christie, A. E. (1993). Effect of Acoustic Energy on the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*). IN: *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993. p 657–666, 6 fig, 5 ref.
- Lowrie, W., 2010. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press.
- Markl, H., 1983. Vibrational communication. In: Huber, F., Markl, H. (Eds.), *Neuroethology and Behavioral Physiology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 332–353.
- Martignac, F., Le Gonidec, C., Daroux, A., Guillard, J., Baglinière, J. L. J. L., Grimaldi, C., & Crave, A. (2014). A: Biocénose: suivi des flux migratoires de poissons par hydroacoustique (DIDSON) B: Géomorphologie, flux (sédimentaires, hydriques et chimiques) et relation avec les habitats [Rapport d'étape annuel 2014-Programme Sélune Phase pré-arasement] (Doctoral dissertation, Agence de l'Eau Seine-Normandie).
- Massabuau, J.-C. (2022, 15 mars). Surveiller la qualité des eaux à l'aide de mollusques connectés | Techniques de l'Ingénieur (N. Louis). *Techniques de l'Ingénieur*. Consulté le 23 janvier 2024, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/surveiller-la-qualite-des-eaux-a-laide-de-mollusques-connectes-109798/>
- Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W. H., Lovell, J., Parvin, S. J., Workman, R., Spinks, J. A. L. & Howell, D., 2007. A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise. Subacoustech Ltd., Subacoustech Report No. 534R1231, 74 p.
- Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W., Lovell, J. M., & Edwards, B. (2006). An investigation into the effects of underwater piling noise on salmonids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2550–2554.
- Nedwell, J., Edwards, B., 2004. A review of measurements of underwaterman-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993–2003. Subacoustech Ltd. Report Number 534R0109.
- Nedwell, J., Howell, D., 2004. A review of offshore windfarm related underwater noise sources. COWRIE Report No. 544 R 0308, pp. 1–57.
- Némery, J., Mano, V., Navratil, O., Gratiot, N., Duvert, C., Legout, C., Belleudy, P., Poirer, A. & Esteves, M. (2010). Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne. *Techniques, sciences, méthodes*, (1), 61.
- Neo, Y. Y., Parie, L., Bakker, F., Snelderwaard, P., Tudorache, C., Schaaf, M., & Slabbekoorn, H. (2015). Behavioral changes in response to sound exposure and no spatial avoidance of noisy conditions in captive zebrafish. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 9, 28.
- OFB & Cerema (2021), *Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique*. CGDD. 149 p.
- Office Français pour la Biodiversité. (2020, septembre). *Milieux aquatiques continentaux*. Le portail technique de l'OFB. Consulté le 3 novembre 2023, à l'adresse <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/126>
- Orféa Acoustique, 2018. Etude d'impact acoustique – Projet de la ZAC de la Boucardière à Machecoul (44). Loire Atlantique Développement.
- Pelletier, D., Leleu, K., Mallet, D., Mou-Tham, G., Hervé, G., Boureau, M., & Guilpart, N. (2012). Remote high-definition rotating video enables fast spatial survey of marine underwater macrofauna and habitats. *Plos One*, 7(2), e30536.
- Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E., Martinez, L. (2020). Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Direction de l'eau et de la Biodiversité.
- Przeslawski, R., Bruce, D., Anderson, J., Foster, S., Edmunds, M., Durrant, A., Edmunds, M., Foster, S., Huang, Z., Hurt, L., Lansdell, M., Lee, K., Lees, C., Nichols, P. & Williams, S., (2016). Marine seismic survey impacts on fish and invertebrates: Final report for the Gippsland Marine Environmental Monitoring Project. Geoscience Australia.
- Purser, J., & Radford, A. N. (2011). Acoustic noise induces attention shifts and reduces foraging performance in three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *PloS one*, 6(2), e17478.
- Roberts, L., & Elliott, M. (2017). Good or bad vibrations ? Impacts of anthropogenic vibration on the marine epibenthos. *Science of the total environment*, 595, 255–268.
- Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T., & Elliott, M. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, 538, 185–195.
- Sabet, S. S., Wesdorp, K., Campbell, J., Snelderwaard, P., & Slabbekoorn, H. (2016). Behavioural responses to sound exposure in captivity by two fish species with different hearing ability. *Animal Behaviour*, 116, 1–11.
- Séismes et ondes sismiques. (2021). svt4vr. Consulté le 3 novembre 2023, à l'adresse <http://svt4vr.e-monsite.com/pages/premiere/la-tectonique-des-plaques/les-seismes.html>
- Simpson, S. D., Purser, J., & Radford, A. N. (2015). Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Global change biology*, 21(2), 586–593.
- Solan, M., Hauton, C., Godbold, J. A., Wood, C. L., Leighton, T. G., & White, P. (2016). Anthropogenic sources of underwater sound can modify how sediment-dwelling invertebrates mediate ecosystem properties. *Scientific reports*, 6(1), 20540.

- Sonar à balayage latéral - géophysique marine. (2021, 12 juillet). Marine Geophysics. Consulté le 28 décembre 2023, à l'adresse <https://marine.geophysicsgpr.com/fr/techniques-geophysiques-marine/sonar-a-balayage-lateral>
- 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.
- Spiga, I., Caldwell, G. S., & Bruintjes, R. (2016, July). Influence of pile driving on the clearance rate of the blue mussel, *Mytilus edulis* (L.). In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 27, No. 1). AIP Publishing.
- Sueur, J. (2020, 02 13). *L'éco-acoustique, écouter la nature pour mieux la préserver*. Récupéré sur MNHN-CNRS-SU-EPHE-UA: <https://isyeb.mnhn.fr/fr/actualites/leco-acoustique-ecouter-la-nature-pour-mieux-la-preserver-6377>
- Svinkin, M., 2004. Minimizing construction vibration effects. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 9, 108–115.
- Technisim Consultant, 2019. Volet Acoustique – Carrière de VITRAC – Vitrac-Saint-Vincent et Cherves-Châtelars – Rapport d'étude n°3. COMIREM SCOP.
- Thandavamoorthy, T.S., 2004. Piling in fine and medium sand—a case study of ground and pile vibration. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 24, 295–304.
- Wale, M. A., Briers, R. A., Hartl, M. G., Bryson, D., & Diele, K. (2019). From DNA to ecological performance : effects of anthropogenic noise on a reef-building mussel. *Science of the Total Environment*, 689, 126-132. A10
- Wysocki, L. E., Davidson III, J. W., Smith, M. E., Frankel, A. S., Ellison, W. T., Mazik, P. M., ... & Bebak, J. (2007). Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 272(1-4), 687-697.
- Zaccaria. (2019). L'hydrogéomorphologie révèle sa mélodie : sélection de l'habitat acoustique chez l'omble de fontaine. Québec.
- Zhao, X., Sun, S., Shi, W., Sun, X., Zhang, Y., Zhu, L., ... & Liu, G. (2021). Mussel byssal attachment weakened by anthropogenic noise. *Frontiers in Marine Science*, 8, 821019.

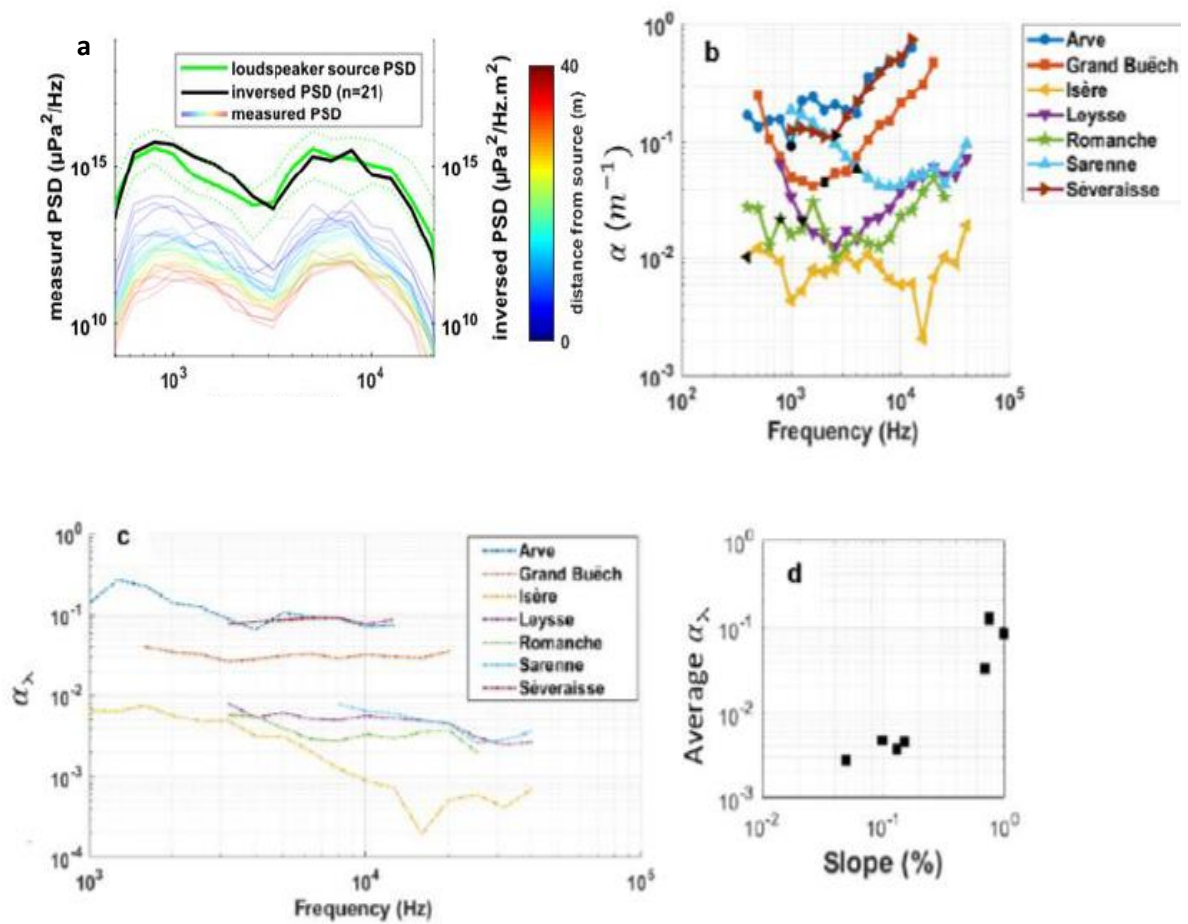
Annexes

ANNEXE 1 : Descriptions détaillées des différents types d'ondes

Les ondes P se propagent longitudinalement, c'est-à-dire que les oscillations de dilation-compression des particules sont dans la direction de la propagation de l'onde. Ces ondes se propagent autant dans les liquides et dans les solides. Les ondes S se propagent, quant-à-elles, transversalement, c'est-à-dire que les oscillations sont perpendiculaires à la propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent que dans les solides et sont 40% moins rapides que les ondes P.

Les ondes de surface se déplacent très loin de la source et au niveau des interfaces comme les interfaces eau/substrat. Il existe deux types d'ondes de surface : les ondes Love ou plates, se propageant perpendiculairement à la direction de l'onde dans une gamme de fréquence entre 1 à 1 000 Hz et à une vitesse pouvant atteindre 19 000 km/h, et les ondes de Rayleigh. Ces dernières se propagent en profondeur à la surface des substrat solide (Lowrie, 2010 ; Markl, 1983). Elles déplacent les particules de façon transversales, longitudinales et elliptiques (Brownell, 1977 ; Lowrie, 2010). Les ondes de Rayleigh peuvent également générer des ondes P dans l'eau se situant au-dessus de leur milieu de propagation (Hazewood & Macey, 2016). Elles peuvent se propager jusqu'à deux kilomètres, principalement dans les basses fréquences, et sont utilisées par la faune pour repérer les perturbations du milieu (Brownell & Farley, 1979 ; Brownell, 1977, 1984) comme la présence d'un prédateur ou d'un changement dans l'environnement.

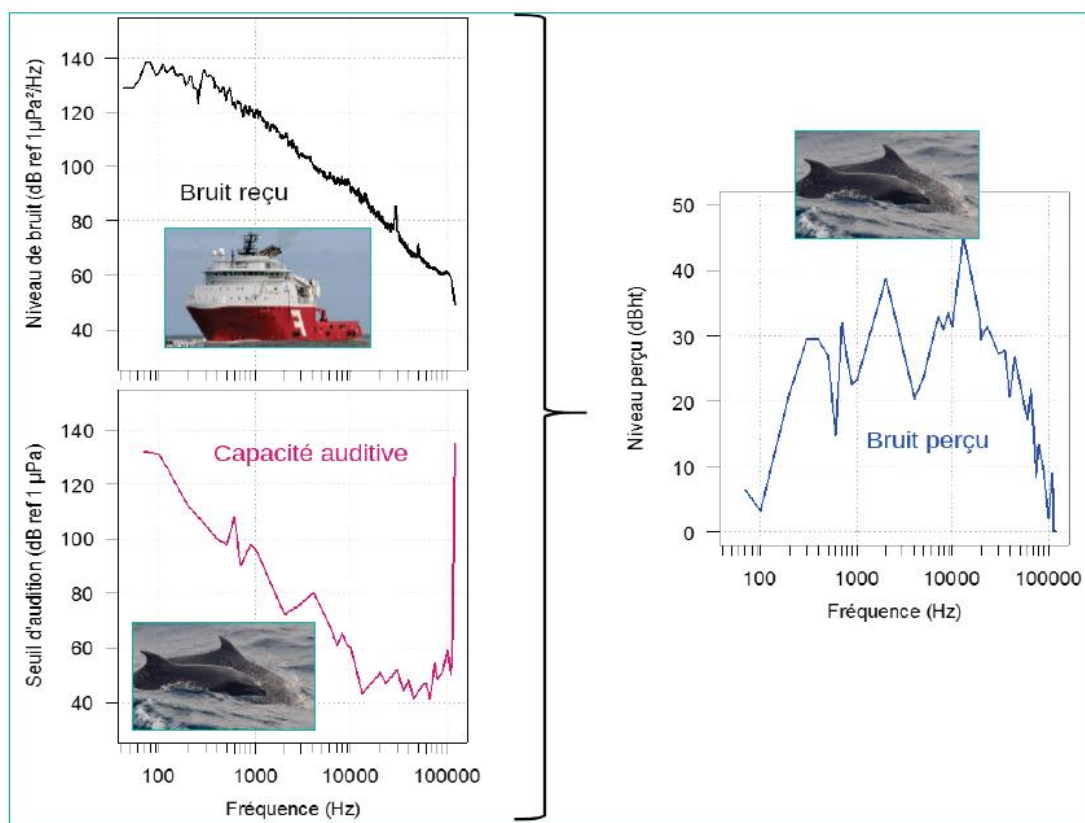
ANNEXE 2 : Résultats de Geay *et al.* (2019). a) Spectre mesuré à chaque position dans la rivière ($\mu Pa^2 \cdot Hz^{-1}$, traits continus). L'indice de couleur indique la distance de la mesure par rapport à la source, qui va du bleu au rouge. Le spectre inversé moyen ($\mu Pa^2 \cdot Hz^{-1} \cdot m^{-2}$, en ligne rouge) correspond au spectre à la position 47-49 m (n=21). Le spectre vert correspond à la médiane du spectre mesuré sur le lac, la ligne pointillée correspondant aux percentiles de 5% et 95% ; b) Coefficient d'atténuation α calculé en fonction de la fréquence pour plusieurs rivières ; c) Coefficient d'atténuation sans dimension $\alpha\lambda$ correspondant pour chaque rivière calculé en fonction de la fréquence ; d) Valeurs de $\alpha\lambda$ moyennées sur la gamme de fréquences en fonction de la pente locale pour chaque rivière.



ANNEXE 3 : Facteurs participant à l'atténuation des ondes. "+" l'onde est très atténuée, "-" l'onde est peu atténuée.

Facteurs	Caractéristiques	Atténuation
Pente	Forte	+
	Faible	-
Substrat	Sable	+
	Rocher	-
Vitesse d'écoulement	Turbulent	+
	Faible	-
Distance à la source	Grande	+
	Proche	-
Taille de grains	Gros	+
	Fin	-
Turbidité	Forte	+
	Faible	-
Profondeur	Forte	-
	Faible	+

ANNEXE 4 : Bruit d'un navire de ravitaillement perçu, en dBht, par un grand dauphin (*Tursiops truncatus*) en fonction de sa capacité auditive (Source : Persohn *et al.*, 2020. Audiogramme d'après Johnson, 1967 ; crédit photo : James D. Paterson/Marine Traffic et COHABYS).



ANNEXE 5 : Description des différents types de dragues et de leurs caractéristiques sonores (Persohn *et al.*, 2020).

Type de drague	Bruit généré	Niveau sonore (dB re $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m)	Fréquences de maximum d'énergie
TSHD	Continu et omnidirectionnel	150-190	100-500 Hz
CSD	Continu et omnidirectionnel	170-185	100-500 Hz
BHD	Transitoire et répétitif	160 – 180	20-300 Hz
GD	Transitoire et répétitif	150-185	< 300 Hz

TSHD : drague aspirante sur un navire naviguant à vitesse réduite.

CSD : drague suceuse à désagrégateur pour fonds durs.

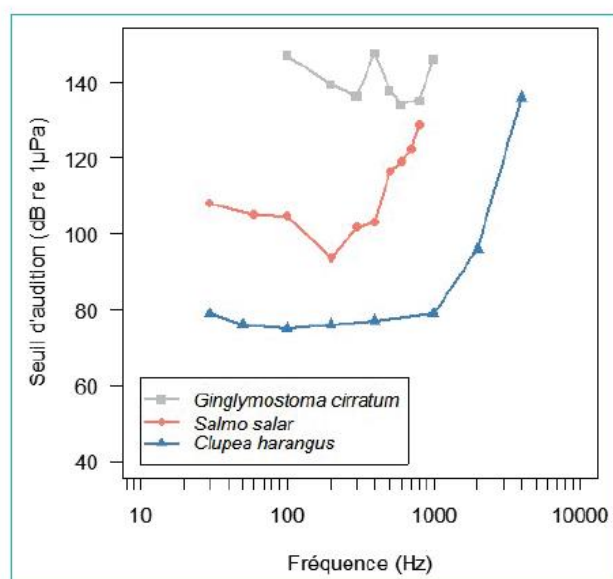
BHD : dragues à pelle mécanique ou à pelle rétrocaveuse.

GD : dragues mécaniques à benne preneuse.

ANNEXE 6 : Exemple de niveaux de bruit générés par des embarcations motorisées (Persohn *et al.*, 2020)

Type d'engin	Taille	Motorisation	Vitesse	Niveau sonore (dB re $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1m)	Fréquences de maximum d'énergie
Zodiac	5m	25 CV	-	152	100-1000 Hz
Zodiac	-	2 x 175 CV	30 nd	169	100-1000 Hz
Zodiac	-	2 x 175 CV	5 nd	147	100-1000 Hz
Hors-bord	7m	2 x 80 CV	-	156	100-1000 Hz

ANNEXE 7 : Audiogrammes du requin nourrice *Ginglymostoma cirratum*, du saumon atlantique *Salmo salar* et du hareng de l'Atlantique *Clupea harengus* (Persohn *et al.*, 2020 ; d'après Casper, 2006 ; Enger, 1967 et Harding *et al.*, 2016)



ANNEXE 8 : Récapitulatif des impacts sonores sur l'ichtyofaune

Espèce(s) cible(s)	Source de l'impact	Type d'onde	Bande de fréquence anthropique	Niveau sonore (dB re μ Pa)	Impact(s) sur l'espèce	Type d'impact	Milieu d'étude	Bibliographie
<i>Cyprinus carpio</i>	Trafic maritime	Continu	/	128 à 162	Augmentation des taux de cortisol (= hormone de stress)	Physiologique	Laboratoire	Wysocki <i>et al.</i> , 2006
<i>Gobio gobio</i>								
<i>Perca fluviatilis</i>								
<i>Perca fluviatilis</i>	Trafic maritime	Continu	150 à 5 000 Hz	147	Court terme (30min) : augmentation du cortisol	Physiologique	Milieu naturel semi-ouvert	Johansson <i>et al.</i> , 2016
<i>Rutilus rutilus</i>			Bruit ambiant : 10 à 300 Hz		Long terme (11 jours) : pas d'augmentation du cortisol			
<i>Cyprinella venusta</i>	Trafic routier	Continu	1 à 14 000 Hz	140	Augmentation du cortisol	Physiologique	Laboratoire	Crovo <i>et al.</i> , 2015
					Diminution de l'audition			
					Seuil auditif en témoin : 300Hz -> seuil à 85dB et à 400Hz -> 82			
					Après traitement : 300Hz -> 92 dB et 400Hz -> 91 dB			
<i>Micropterus salmoides</i>	Paddle	Continu	/	/	Augmentation du rythme cardiaque (+29% pour paddle, 44% moteur électrique, 67% moteur par combustion)	Physiologique	Laboratoire	Graham & Cooke, 2008
	Moteur électrique							
	Moteur à combustion							
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Bruit blanc avec caractéristique sonore du trafic maritime en lac	Continu	100 à 1000 Hz	164,3	Diminution de l'efficacité de recherche de nourriture même après un bruit de 10s	Comportement	Laboratoire	Purser & Radford, 2011
<i>Neolamprologus pulcher</i>	Navire	Continu	0 à 2 000 Hz	60 à 115	Diminution de la défense contre les prédateurs (sauf en présence d'œuf) Moins de création de nid	Comportement	Laboratoire	Bruintjes & Radford, 2013
<i>Salmo salar</i>	Prises d'eau de refroidissement & station nucléaire	Continu	12,5Hz	/	Augmentation de la vitesse de nage Plongé en profondeur	Comportement	Laboratoire	Bui <i>et al.</i> , 2013

					Retour rapide à la fin du stimulus				
<i>Anguilla anguilla</i>	Navire	Continu	0 à 5 kHz	60 à 140	50% moins de comportement de surprise 25% plus lente 2x plus facile à attraper Diminution des déplacements latéraux Augmentation de la ventilation et du taux métabolique	Comportement	Laboratoire	Simpson <i>et al.</i> , 2015	
<i>Abramis brama</i>	Moteur de bateau 15HP	Continu	/	>100	Comportement de fuite surtout pour les poissons de taille inférieure à 22cm dans les 10m de la zone impactée Pas de comportement de fuite au-delà de 10m	Comportement	Milieu naturel (lac et réservoir)	Draštík & Kubečka, 2005	
<i>Rutilus rutilus</i>									
<i>Alburnus alburnus</i>									
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>									
<i>Blicca bjoerkna</i>									
<i>Danio rerio</i>	Bruit blanc	Continu (CS) et impulsif (INT)	100 à 1000 Hz	Son ambiant = 78	Pic sensibilité auditive 800Hz	Comportement	Laboratoire	Sabet <i>et al.</i> , 2016	
<i>Haplochromis piceatus</i>				Son produit = 110 à 130 (moyenne à 110)	Son CS et INT : augmentation de la vitesse de nage dans les 10 premières secondes puis diminution de la vitesse sur une exposition prolongée				
					Pic sensibilité auditive entre 200 et 500 Hz				
					CS et INT : diminution de la vitesse de nage sur exposition prolongée (pas de différence dans les 10 premières secondes) et passe plus de temps au fond				
<i>Danio rerio</i>	Bruit blanc	Continu (CS) et	300 à 2000 Hz	120 à 140	Augmentation de la cohésion	Comportement	Laboratoire	Neo <i>et al.</i> , 2015	

		impulsionnel (INT)			Augmentation de la vitesse de nage Changement de position dans la colonne d'eau Son impulsionnel a plus d'impact			
<i>Salmo trutta</i>	Pile driving	Impulsionnel	300 à 1000 Hz	90	Pas de réaction	Comportement	Laboratoire	Nedwell <i>et al.</i> , 2006
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Son turbine	Impulsionnel	150 à 500 Hz	130	Pas d'impact sur les capacités auditives	Physiologique	Laboratoire	Wysocki <i>et al.</i> , 2007
<i>Oreochromis mossambicus</i>	Battage de pieux	Impulsionnel	/	174 à 216	Barotraumatismes à partir de 174 dB re μ Pa Mortalité (entre 186 et 216 dB re μ Pa) Dommages cellules ciliées, rupture vessie natatoire, hernie	Physiologique	Laboratoire	Casper <i>et al.</i> , 2013
<i>Salmo salar</i>	Battage de pieux	Impulsionnel	0 à 3000 Hz	150	Pas de changement surement dû aux capacités auditives pas assez sensible du saumon	Comportement et physiologique	Laboratoire	Harding <i>et al.</i> , 2016
<i>Salmo trutta</i>	Battage de pieux	Impulsionnel	300 à 1000 Hz	90	Pas de réaction	Comportement	Laboratoire	Nedwell <i>et al.</i> , 2006

Bruintjes, R., & Radford, A. N. (2013). Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Animal Behaviour*, 85(6), 1343-1349.

Bui, S., Oppedal, F., Korsøen, Ø. J., Sonny, D., & Dempster, T. (2013). Group behavioural responses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) to light, infrasound and sound stimuli. *PloS one*, 8(5), e63696.

Casper, B. M., Smith, M. E., Halvorsen, M. B., Sun, H., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2013). Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 166(2), 352-360.

Crovo, J. A., Mendonça, M. T., Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2015). Stress and auditory responses of the otophysan fish, *Cyprinella venusta*, to road traffic noise. *PLoS One*, 10(9), e0137290.

Dražtik, V., & Kubečka, J. (2005). Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters. *Fisheries Research*, 72(2-3), 219-228.

Graham, A. L., & Cooke, S. J. (2008). The effects of noise disturbance from various recreational boating activities common to inland waters on the cardiac physiology of a freshwater fish, the largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(7), 1315-1324.

Harding, H., Bruintjes, R., Radford, A. N., & Simpson, S. D. (2016). Measurement of Hearing in the Atlantic salmon (*Salmo salar*) using Auditory Evoked Potentials, and effects of Pile Driving Playback on salmon Behaviour and Physiology. *Marine Scotland Science*.

Johansson, K., Sigray, P., Backström, T., & Magnhagen, C. (2016). Stress response and habituation to motorboat noise in two coastal fish species in the Bothnian Sea. In *The effects of noise on aquatic life II* (pp. 513-521). Springer New York.

- Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W., Lovell, J. M., & Edwards, B. (2006). An investigation into the effects of underwater piling noise on salmonids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2550-2554.
- Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W., Lovell, J. M., & Edwards, B. (2006). An investigation into the effects of underwater piling noise on salmonids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2550-2554.
- Neo, Y. Y., Parie, L., Bakker, F., Snelderwaard, P., Tudorache, C., Schaaf, M., & Slabbekoorn, H. (2015). Behavioral changes in response to sound exposure and no spatial avoidance of noisy conditions in captive zebrafish. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 9, 28.
- Purser, J., & Radford, A. N. (2011). Acoustic noise induces attention shifts and reduces foraging performance in three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *PloS one*, 6(2), e17478.
- Sabet, S. S., Wesdorp, K., Campbell, J., Snelderwaard, P., & Slabbekoorn, H. (2016). Behavioural responses to sound exposure in captivity by two fish species with different hearing ability. *Animal Behaviour*, 116, 1-11.
- Simpson, S. D., Purser, J., & Radford, A. N. (2015). Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Global change biology*, 21(2), 586-593.
- Wysocki, L. E., Davidson III, J. W., Smith, M. E., Frankel, A. S., Ellison, W. T., Mazik, P. M., ... & Bebak, J. (2007). Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 272(1-4), 687-697.
- Wysocki, L. E., Dittami, J. P., & Ladich, F. (2006). Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological conservation*, 128(4), 501-508.

ANNEXE 9 : Récapitulatif des impacts sonores et vibratoires sur les bivalves

Espèce(s) cible(s)	Source de l'impact	Type d'onde	Bande de fréquence anthropique	Niveau sonore	Impact(s) sur l'espèce	Type d'impact	Milieu d'étude	Bibliographie
<i>Mytilus edulis</i>	Onde se propageant dans le substrat (comme le battage de pieux)	Impulsionnel	5 à 410 Hz	0,07 à 0,55 m.s ⁻²	Fermeture des valves, rétraction des siphons et enfouissement	Comportement	Laboratoire	Roberts <i>et al.</i> , 2015
<i>Mytilus edulis</i>	Battage de petits pieux	Impulsionnel	/	182,11 dB re μ Pa (hydrophone) 10 mV pk/pk (géophone)	Augmentation du taux de filtration -> adaptation à des situation de stress	Physiologique	Milieu naturel semi-ouvert	Spiga <i>et al.</i> , 2016
<i>Dreissena polymorpha</i> (juvenils)	Vibrations dans le substrat et dans l'eau	/	8-14 kHz	/	Détachement du substrat Fermeture des valves 75-95% de mortalité entre 8 et 10 kHz 100% de mortalité > 11 kHz	Comportement	Laboratoire	Kowalewski <i>et al.</i> , 1993
<i>Ruditapes philippinarum</i>	Sons similaires au trafic maritime et à la construction	Impulsionnel et continu	Pour le continu : 10 Hz à 10 kHz avec un max de 400 Hz Pour l'impulsionnel : de 30 Hz à 3 kHz avec un max de 200 Hz	Pour le continu : 135 à 140 dB re 1 μ Pa Pour l'impulsionnel : 150 dB re 1 μ Pa ² s	Fermeture des valves Pas de changement en concentration de glucose mais augmentation du lactate Réduction de l'activité de relocation -> empêche la bioturbation Déplacement au-dessus de l'interface eau/substrat Pas de différences significatives entre les deux types de sons	Comportement et physiologique	Laboratoire	Solan <i>et al.</i> , 2016
<i>Mytilus edulis</i>	Navire	Continu	10 Hz à 20kHz	150 à 175 dB re 1 μ Pa ² .Hz ⁻¹	Dommages sur l'ADN	Physiologique	Laboratoire	Wale <i>et al.</i> , 2019

					Réduction de la consommation d'O2 Augmentation de l'amplitude d'ouverture des valves mais pas de différence entre le temps ouvert cumulé avec bruit ou pas Réduction du taux de filtration Augmentation du stress oxydatif			
<i>Crassostrea gigas</i>	Navire	Continu	10 Hz à 20kHz	135 à 155 dB re 1 µPa	Fermeture entre 10 à 1000 Hz	Comportement	Laboratoire	Charifi <i>et al.</i> , 2017
<i>Pecten fumatus</i>	Airguns	Impulsionnel	/	/	Pas d'effet sur le taux de ROE et sur la qualité de la chair deux mois après l'exposition	Physiologique	Terrain	Harrington <i>et al.</i> , 2010
<i>Pecten fumatus</i> <i>Mimachlamys asperima</i>	Airguns	Impulsionnel	/	Source : 215 dB re 1 µPa Reçu : 146 à 170 dB re 1 µPa	Pas d'effet sur les taux de ROE ni sur la taille de la chair deux et dix mois après l'exposition	Physiologique	Terrain	Przeslawski <i>et al.</i> , 2016

- Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T., & Elliott, M. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series*, 538, 185-195.
- Kowalewski, J. J., Patrick, P. H., & Christie, A. E. (1993). Effect of Acoustic Energy on the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*). IN: *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993. p 657-666, 6 fig, 5 ref.
- Solan, M., Hauton, C., Godbold, J. A., Wood, C. L., Leighton, T. G., & White, P. (2016). Anthropogenic sources of underwater sound can modify how sediment-dwelling invertebrates mediate ecosystem properties. *Scientific reports*, 6(1), 20540.
- Wale, M. A., Briers, R. A., Hartl, M. G., Bryson, D., & Diele, K. (2019). From DNA to ecological performance : effects of anthropogenic noise on a reef-building mussel. *Science of the Total Environment*, 689, 126-132.A10
- 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.
- Harrington, J. J., McAllister, J., & Semmens, J. (2010). Assessing the short-term impact of seismic surveys on adult commercial scallops (*Pecten fumatus*) in Bass Strait.
- Przeslawski, R., Bruce, D., Anderson, J., Foster, S., Edmunds, M., Durrant, A., Edmunds, M., Foster, S., Huang, Z., Hurt, L., Lansdell, M., Lee, K., Lees, C., Nichols, P. & Williams, S., (2016). Marine seismic survey impacts on fish and invertebrates: Final report for the Gippsland Marine Environmental Monitoring Project. Geoscience Australia.
- Spiga, I., Caldwell, G. S., & Brintjes, R. (2016, July). Influence of pile driving on the clearance rate of the blue mussel, *Mytilus edulis* (L.). In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 27, No. 1). AIP Publishing.

ANNEXE 10 : Récapitulatifs des mesures ERC pouvant être mises en place en milieux marins (d'après Persohn *et al.*, 2020)

Séquence	Mesures	Description	Activités concernées	Mise en œuvre en milieu marin	Efficacité	Limite/Difficulté
Evité	Planification spatiale et temporelle	Modification des projets pour supprimer un impact négatif, direct ou indirect, sur l'environnement.	Toutes	Définition des zones et/ou périodes sensibles (liés à l'alimentation, la reproduction ou encore la migration) pour les espèces.	Bonne	Avoir des connaissances sur les cycles biologiques des espèces cibles Avoir une réglementation sur ces espèces qui fixe ces périodes et/ou zones de fermeture
	Dimensionnement/Caractéristiques du projet	Adaptation d'un projet par rapport aux enjeux environnementaux (dimensionnement, emplacement, techniques de réalisation)	Toutes	Analyse des impacts potentiels selon tous les travaux (nombre de fondations et leurs types, type ancrages ou sources acoustiques) et routes envisagées	Bonne	Connaissances des niveaux sonores précis générés par les différents scénarios
	Suspension des travaux lors des périodes écologiquement importantes	Aménagement des périodes de travaux	Toutes	Saisonnalité des travaux	Bonne	Avoir des connaissances sur les cycles biologiques des espèces cibles

	Utilisation de techniques d'exploitation/fonctionnement non impactantes	Utilisation de techniques émettant dans des fréquences non impactantes pour les espèces présentes	Sonar, sondeurs, répulsifs	Choix des techniques évitant les impacts	Variable selon la technique	Non applicables à toutes les espèces en même temps
Réduire	Définition d'une zone d'exclusion	Définition d'une zone où aucune espèce sensible ne doit se trouver.	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Arrêt des travaux en cours en cas de présence d'espèces sensibles dans la zone d'exclusion, reprise quand ils en sont sortis selon une procédure à définir	Bonne	Disponibilité de mesures ou outil de monitoring pour des zones de plus d'un km Coût économique pour le chantier, acceptation par le donneur d'ordre
	Pre-watch	Surveillance visuelle/acoustique de la zone d'exclusion et de ses alentours pour vérifier l'absence d'espèces sensibles. Durée de 30 à 60 min en fonction de la zone.	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Arrêt des travaux en cours en cas de présence d'espèces sensibles dans la zone d'exclusion, reprise quand ils en sont sortis selon une procédure à définir	Bonne	Disponibilité de mesures ou outil de monitoring pour des zones de plus d'un km Coût économique pour le chantier, acceptation par le donneur d'ordre
	Soft-start/ramp-up	Augmenter le son de façon progressive pour permettre aux espèces de fuir	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Augmentation progressive des niveaux sonores pour éloigner les espèces sensibles. Durée de 20 à 40 min.	Inconnue	Connaissance limitée sur la séquence d'augmentation efficace en fonction des espèces/groupe d'espèces

	Utilisation de répulsifs	Changement des voies de déplacement pour éviter les zones de travaux	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Utilisation de dispositifs type pingers ou effaroucheurs à phoques pour éloigner les animaux	Non unanime dans la communauté scientifique	Éloignement de zones écologiquement importantes, habitude des animaux
	Techniques visant à isoler/confiner la source de bruit	La technique des rideaux de bulles, bulles encapsulées, blocs isolants, batardeaux	Battage pieux, vibrofonçage, forage, explosion	Réduction du bruit en le confinant près de la zone de travaux et près des machines	En cours d'étude	Coût pouvant être plus fort Doit être accepté par les maîtres d'ouvrage

	Utilisation de techniques moins bruyante	Aménagement ou modification des techniques/outils employés	Battage pieux, forage, prospection, déplacement par bateau	Battage de pieux : remplacer par le vibrofonçage qui est moins bruyant, augmenter la durée de frappe (décale les fréquences vers les basses fréquences mais augmente le niveau sonore), utilisation d'un matériau autre que l'acier Sondeur : restreindre les émissions aux zones d'études navire : diminution de la vitesse pour limiter les phénomènes de cavitation qui génèrent bcp de bruits	Bonne	Viabilité économique de certaines solutions (changement de matériau pour les pieux)
	Planification	cf Eviter : même chose mais passe en réduction quand tous les impacts ne peuvent être éliminés				
Compenser	Pas de mesures compensatoires pour les impacts acoustiques					
	Actions inscrites dans un Plan national d'action					

ANNEXE 11 : Caractéristiques physiques des différentes sections d'un cours d'eau

	Section supérieure	Section moyenne		Section inférieure
		Partie amont	Partie aval	
Type	Torrents, cours d'eau montagnards, gorges profondes	Cônes alluviaux, chenal divagant, tressage de piedmont	Méandres libres de plaine, méandres stables de plaine, Chenaux sinueux	Delta
Pente	Forte	Faible		Faible
Sédiment	Grossier	Sable et gravier		Fin
Divagation	Faible	Tresse	Chenal unique et méandre	Ramification
Vitesse d'écoulement	Forte	Moyenne		Faible

Directeur de recherche : Laurent PHILIPPE

Emmanuelle Waguette
PFE/DAE5
Ingénierie des Milieux aquatiques
2023-2024

Analyse des impacts acoustiques et vibratoires négatifs des infrastructures humaines sur les écosystèmes aquatiques

Résumé : Les sons présents dans l'environnement jouent un rôle primordial dans le cycle de vie de la plupart des espèces piscicoles, que cela soit pour communiquer, se reproduire ou détecter des prédateurs (Sueur, 2020). Tous ses sons forment de véritables paysages sonores. L'aménagement du territoire, notamment des milieux aquatiques, a conduit à l'augmentation des niveaux de bruit ambiant sous-marin d'origine anthropique. Ces bruits ont de nombreux impacts sur l'ichtyofaune et les bivalves. Les ondes acoustiques et vibratoires vont provoquer une augmentation du stress chez les individus et modifier leurs comportements. Si les poissons peuvent pour la plupart les zones impactées, ce n'est pas le cas des bivalves. Une étude a d'ailleurs montré que les ondes acoustiques pouvaient endommager l'ADN. Les impacts sonores et vibratoires impactent donc les individus de l'échelle moléculaire à l'échelle comportementale. Certains impacts peuvent mener à une diminution de la survie des individus sur le long terme. Il devient donc important de mettre en place des mesures ERC pour les limiter. De telles mesures sont en place dans le milieu marins mais pas en milieu fluviale. Les études sont par ailleurs moins développées sur les impacts sonores et vibratoires dans les milieux fluviaux, retardant fortement la prise en compte de ces impacts dans les projets de développement. Il devient donc urgent d'améliorer les connaissances et d'établir des protocoles d'évaluation afin d'évaluer les impacts acoustiques et vibratoires générés par les travaux en milieu fluvial et ainsi améliorer la préservation de ces habitats sensibles.

Mots Clés : acoustique, travaux, fluvial, vibration, impact, poisson, bivalve, séquence ERC, onde