



## **Le bruit dans la mer et ses effets sur les organismes marins**

Cet article a été traduit par la Commission Particulière du Débat Public sur les éoliennes en mer en Normandie (du 15 novembre 2019 au 19 août 2020).  
Il est mis à la disposition du public sur le site : [normandie.debatpublic.fr](http://normandie.debatpublic.fr)

### **Article original :**

Peng C, Zhao X, Liu G. Noise in the Sea and Its Impacts on Marine Organisms. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(10):12304-12323. Published 2015 Sep 30. doi:10.3390/ijerph121012304

Vous pouvez retrouver le texte original dans la bibliothèque du débat.

# Le bruit dans la mer et ses effets sur les organismes marins

Chao Peng, Xinguo Zhao et Guangxu Liu \*

**Résumé :** Avec l'utilisation et l'exploration croissantes de l'océan, le bruit anthropique augmente considérablement et donne lieu à un nouveau type de pollution : la pollution sonore. Dans cette étude, la source et les caractéristiques du bruit dans la mer, l'importance du son pour les organismes marins et les impacts du bruit sur les organismes marins sont résumés. En général, les études concernant l'impact du bruit sur les organismes marins portent principalement sur les poissons et les mammifères adultes, qui représentent plus de 50 % et 20 % de tous les cas signalés. Les études ont montré que le bruit anthropique peut provoquer un masquage auditif, entraînant des dommages cochléaires, des modifications du comportement individuel et social, des altérations du métabolisme, des entraves au recrutement des populations, et peut par la suite affecter la santé et les fonctions de service des écosystèmes marins. Cependant, étant donné que différentes méthodes d'échantillonnage et des mesures non standardisées ont été utilisées et que les effets du bruit sur les organismes marins dépendent des caractéristiques des espèces et du bruit étudiés, il est difficile de comparer les résultats rapportés. En outre, la rareté des études réalisées avec d'autres espèces et avec des individus larvaires ou juvéniles limite fortement la compréhension actuelle de la pollution sonore. De plus, des études supplémentaires sont nécessaires pour révéler en détail les causes des impacts détectés.

Mots clés : bruit ; organismes marins ; masquage auditif ; altération du comportement ; métabolisme ; recrutement ; composition de la population

## 1. Introduction

Le documentaire français *Le Monde du Silence*, co-réalisé par le célèbre océanographe français Jacques-Yves Cousteau et le réalisateur Louis Malle en 1956, présentait un monde sous-marin multicolore et merveilleux, plein de vie et d'énergie, qui satisfaisait la curiosité du public de l'époque. Cependant, avec l'approfondissement de l'enquête sur ce "monde", la réalité s'est révélée moins silencieuse qu'on ne le pensait au départ. En fait, le son joue un rôle vital dans la vie de nombreux organismes marins de ce monde sous-marin.

Il ne fait aucun doute que les sons anthropiques émis par les cargos, les sonars, les tests sismiques, les forages, les sondeurs, les bateaux de plaisance, etc. ont continué à se développer au cours du siècle dernier [1-5]. En conséquence, le niveau de bruit de fond sous-marin dans le monde entier a augmenté en conséquence en raison de l'augmentation des activités anthropiques, ce qui donne lieu à un nouveau type de pollution : la pollution sonore [6].

Le bruit peut causer du stress chez les animaux, augmenter le risque de mortalité en déséquilibrant l'interaction prédateur-proie, et interférer avec l'orientation et la communication basées sur le son, en particulier dans les contextes de reproduction [7]. L'impact du bruit anthropique sur les organismes marins suscite une inquiétude croissante au niveau international [8]. Un certain nombre d'études ont montré que les effets du bruit anthropique sur les organismes marins peuvent aller de l'absence d'influence à la mort immédiate, selon les différences d'intensité et de fréquence du bruit et la distance par rapport à la source de bruit. Cependant, les mécanismes qui sous-tendent ces effets sont encore mal compris [3,9-11].

Dans ce document, nous résumons (1) les sources de sons biotiques et abiotiques sous la mer et les caractéristiques des sons anthropiques, (2) l'importance des sons pour les organismes marins, et (3) les effets des sons anthropiques sur divers aspects de différentes espèces afin d'élucider la compréhension actuelle de la pollution sonore en mer et les lacunes de nos connaissances actuelles.

## 2. Les sons dans la mer et leur importance biologique

### 2.1. Propagation des sons dans la mer

La connaissance des caractéristiques du son est essentielle à une compréhension complète des impacts du son sur les organismes marins. La fréquence, la longueur d'onde et l'intensité sont les principaux paramètres utilisés pour décrire les caractéristiques du son. Une caractéristique importante du son est sa transmissibilité dans divers milieux. La vitesse et le trajet de propagation du son dépendent des caractéristiques du milieu dans lequel il circule. Dans la mer, les variations des propriétés de l'eau de mer telles que la température, la pression et la salinité ont toutes des effets significatifs sur la vitesse de propagation du son [12]. Lorsque le son traverse une eau de mer dont les caractéristiques changent, son trajet de propagation change également en raison de la réfraction. La courbe descendante observée lorsque le son se déplace dans la thermocline est un exemple typique de la façon dont la trajectoire du son est modifiée par la réfraction. Lorsque le son se déplace vers le bas dans la thermocline, la pression de l'eau augmente progressivement et entraîne une modification vers le haut de la trajectoire du son sous la base de la thermocline. Dans ce cas, le son peut théoriquement se déplacer à cette profondeur, également appelée "canal sonore profond", sans perte de propagation [13].

La perte de propagation est la réduction de l'intensité du son avec la propagation due à l'absorption et à la diffusion. Dans la mer, la perte de propagation dépend de diverses variables, comme la distance à laquelle se trouve la source sonore, l'emplacement de la source sonore, la quantité de particules en suspension dans l'eau de mer et la fréquence du son. Dans la mer, la propagation du son est également affectée par la réflexion. En particulier lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à la longueur d'onde du son, on s'attend à une perte de propagation élevée [12].

### 2.2. Sources de sons dans la mer

L'environnement sous-marin est constitué de sons biotiques et abiotiques qui sont étroitement liés à la survie et à la reproduction des organismes marins [11]. Les sources sonores biotiques sont produites par les poissons, les invertébrés, les mammifères marins et d'autres organismes marins, et sont essentielles à la communication, à l'orientation, à la détection de l'accouplement et des proies, et à l'écholocation [14,15]. Les organismes marins peuvent produire des sons biotiques de différentes manières [16]. Certains organismes, tels que la morue (*Melanogrammus aeglefinus*, *Gadus morhua*, *Pollachius pollachius*, *Raniceps raninus*) peuvent produire des sons en faisant vibrer leur vessie natatoire grâce à la force musculaire [17]. D'autres espèces produisent des sons en frottant les parties dures de leur corps. Par exemple, certains poissons-chats (*Siluridae*) produisent des sons en utilisant leur ceinture pectorale, certains cichlidés (*Cichlidae*) produisent des sons en utilisant leurs dents pharyngiennes, et les crevettes casseuses (*Alpheus* spp. et *Synalpheus* spp.) produisent des sons de moyenne fréquence (2 kHz-24 kHz) avec leurs griffes [3,15,18,19]. Les sources sonores abiotiques, qui fournissent aux organismes marins des informations importantes sur le milieu environnant, peuvent être divisées en deux catégories : le bruit de fond naturel et le bruit anthropique. Les vagues se brisant sur la côte, les courants se déplaçant sur les récifs, les gouttes de pluie à la surface de l'océan, les marées, les turbulences océaniques et le son produit par les tremblements de mer et les éruptions volcaniques sous-marines sont des bruits de fond naturels typiques [20,21]. La diversité des bruits anthropiques a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, tant en haute mer que dans les zones côtières très peuplées, en raison de l'augmentation des activités humaines (1,4,22,23). Les bruits anthropiques émis par les différentes activités humaines varient considérablement en termes de fréquences et d'intensité (tableau 1) [12,24-26]. Sur la base des caractéristiques de fréquence et d'intensité, le bruit anthropique peut être classé en deux types principaux : le bruit impulsif de haute intensité et le bruit stationnaire de basse fréquence. Les bruits

de haute intensité peuvent être produits par le battage de pieux, le dynamitage sous-marin, l'exploration sismique et l'application de sonars actifs [7]. De nos jours, le battage de pieux, une activité de construction, se trouve principalement près des côtes, où sont construits des ponts, des ports, des parcs éoliens et d'autres bâtiments. Les dispositifs d'exploration sismique, principalement les canons à air comprimé, sont utilisés dans le monde entier pour les études géologiques sous-marines et les études géophysiques telles que l'exploration pétrolière et gazière et la cartographie des fonds marins [10]. De même, les sonars générant du bruit à différentes intensités sont largement utilisés non seulement par les marines, mais aussi par les navires commerciaux, l'industrie de la pêche et les organismes de recherche marine [10]. Des bruits stationnaires à basse fréquence peuvent être générés par divers navires et bateaux [7]. Bien que le nombre de navires de pêche n'ait pas beaucoup augmenté depuis les années 1960, il y a encore environ 1,2 million de navires en service [11]. En outre, le nombre de bateaux de plaisance a augmenté rapidement dans les zones côtières. Une autre source croissante de bruit marin stationnaire à basse fréquence est la prolifération des cargos océaniques qui transportent de grandes cargaisons, un lien essentiel pour le maintien du commerce mondial. Le nombre de grands cargos a augmenté régulièrement de 8 à 14 % au cours de la première décennie du 21<sup>e</sup> siècle [27].

Types of the Anthropogenic Sound	Frequency	Intensity Level	References
Bottom-founded oil drilling and mining	4–38 Hz	119–127 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Pile driving	30–40 Hz	131–135 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Drillship	20–1000 Hz	174–185 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Semisubmersible drilling vessel	10–4000 Hz	~154 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Seismic airguns	100–250 Hz	240–250 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
The Acoustic Thermometry of Ocean Climate Project (ATOC)	~75 Hz	~195 dB re 1 $\mu$ Pa	Buck, 1995 [24]
Navy Sonar	100–500 Hz	~215 dB re 1 $\mu$ Pa	Conservation and development problem solving team, University of Maryland, 2000 [12]
High Frequency Marine Mammal Monitoring Sonar (HF/M3)	~3000 Hz	~220 dB re 1 $\mu$ Pa	Conservation and development problem solving team, University of Maryland, 2000 [12]
Supertanker & container ship	6.8–70 Hz	180–205 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]; Gisiner <i>et al.</i> , 1998 [25]
Medium size ship (ferries)	~50 Hz	150–170 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Boats (<30 m in length)	<300 Hz	~175 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]
Small ship (support & supply ship)	20–1000 Hz	170–180 dB re 1 $\mu$ Pa	Richardson <i>et al.</i> , 1995 [26]

Tableau 1. Exemples de bruits anthropiques signalés dans la mer avec différentes fréquences et niveaux d'intensité.

### 2.3. Significations biologiques du son dans la mer

Les variations météorologiques (par exemple, la vitesse du vent, la taille des gouttes de pluie et l'amplification du tonnerre), les alternances saisonnières, les activités géologiques (par exemple, les volcans et les tremblements de terre sous la mer), le comportement des organismes marins et les activités humaines contribuent tous au bruit ambiant [3,21], qui est crucial pour les organismes marins. En général, les organismes marins peuvent obtenir des informations de sources sonores biotiques et abiotiques par le biais de leurs systèmes auditifs et réagir en conséquence [3]. Par exemple, l'écholocation est appliquée via les sens auditifs de nombreuses espèces marines et fournit une vue en 3D du milieu environnant pour la détection des proies et des prédateurs [28-31]. De plus, il a été démontré que des bandes sonores spécifiques à une espèce sont utilisées par divers organismes marins pour attirer des compagnons, s'agréger et adopter un comportement territorial [10,20,32,33].

### 3. Les effets du bruit anthropique sur les organismes marins

Les organismes varient dans leur sensibilité absolue et leur gamme spectrale d'audition. De manière générale, les poissons peuvent être classés comme des spécialistes de l'audition (large gamme de fréquences auditives avec des seuils auditifs bas) ou des généralistes de l'audition (gamme de fréquences auditives étroite avec des seuils auditifs plus élevés) [11,34]. Par exemple, le poisson-crapaud lusitanien (*Halobatrachus didactylus*), un généraliste de l'audition, présente sa meilleure sensibilité auditive à des fréquences sonores comprises entre 50 Hz et 200 Hz. En revanche, le tête-de-boule (*Pimephales promelas*), un spécialiste de l'audition, présente sa plage d'audition la plus sensible entre 0,8 kHz et 2,0 kHz [35,36]. De même, chez les mammifères marins, le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) a une large plage d'audition allant de 0,01 kHz à 10 kHz, alors que la plage spectrale d'audition d'une otarie (*Zalophus californianus*) est relativement étroite, de 1 kHz à 10 kHz [11]. La portée, l'intensité et la fréquence de la pollution sonore anthropique peuvent être beaucoup plus importantes que les stimuli acoustiques naturels et, Par conséquent, il a été démontré que ce type de pollution sonore a une série d'influences négatives sur les espèces marines [9]. Les connaissances actuelles indiquent que le bruit anthropique peut affecter directement ou indirectement de nombreux organismes marins, en provoquant un masquage auditif [7], en entraînant des lésions cochléaires [37], en modifiant le comportement individuel et/ou social [38], en altérant le métabolisme du corps [35] et en entravant l'embryogenèse [39]. Par conséquent, la pollution sonore ne constituera pas seulement une grande menace pour les organismes marins individuels, mais peut également affecter la composition, et par conséquent la santé et les fonctions de service de l'écosystème. Par exemple, certaines études ont montré que le bruit anthropique a entraîné une réduction du taux de capture de certaines espèces marines commerciales, indiquant une diminution de la fonction de service de l'écosystème pour la fourniture de produits de la pêche (36,40-43).

#### 3.1. Masquage acoustique et dommages physiologiques au système auditif

De nombreux organismes marins dépendent de l'interprétation des informations acoustiques de leur environnement pour leur survie. Ainsi, la pollution sonore peut affecter la communication acoustique des organismes marins par un masquage auditif (dans lequel la perception d'un son est affectée par la présence d'un autre son) et par des dommages physiologiques du système auditif (tableau 2) [44]. Le masquage acoustique est considéré comme l'un des principaux effets de la pollution sonore sur les animaux marins [7,45-47]. Southall et al. ont étudié les portées de communication acoustique des éléphants de mer du nord (*Mirounga angustirostris*) et les résultats ont démontré que les différentes portées de communication dépendaient en partie des conditions de bruit ambiant (45). Selon ces résultats, le bruit anthropique pourrait limiter la communication acoustique des éléphants de mer du Nord par le biais du masquage auditif. Codarin et al. ont souligné que le bruit émanant des bateaux et de la navigation avait un effet significatif sur trois familles de poissons, *Chromis chromis*, *Sciaena umbra* et *Gobius cruentatus*, qui ont des capacités auditives différentes [7]. Les résultats ont montré que le bruit émanant d'un bateau de croisière à cabine réduit considérablement la sensibilité auditive de ces trois familles de poissons, car leurs seuils auditifs lors de la reproduction du bruit ambiant dans des conditions de laboratoire sont presque entièrement masqués [7]. De même, il a été signalé que seule la pression sonore supérieure à la plage d'audition normale peut être perçue immédiatement après l'exposition au stimulant sonore chez le marsouin commun (*Phocoena phocoena*) et le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) [48,49]. Ce phénomène a également été signalé par Vasconcelos chez le poisson-crapaud lusitanien (*Halobatrachus didactylus*), dans une étude où le signal devait être 36 dB plus fort pour être perçu par le poisson en présence de bruit de bateau (46). Une autre comparaison entre les audiogrammes masqués et les spectres sonores des vocalisations agonistes et d'accouplement du poisson-crapaud a montré que le bruit du navire entravait la capacité du

poisson-crapaud à percevoir des sons congénitaux (46). Malgré la rareté des preuves expérimentales directes chez la plupart des espèces marines, il est fort probable que les effets de masquage auditif d'un même bruit diffèrent d'une espèce à l'autre, comme cela a été signalé chez les poissons d'eau douce (34, 50, 51).

Le bruit anthropique peut entraîner non seulement un masquage auditif, mais aussi des dommages physiologiques dans le système auditif des animaux marins. McCauley et al. ont découvert que le bruit créé par un pistolet à air comprimé en fonctionnement endommagerait gravement les oreilles du vivaneau rose (*Pagrus auratus*), entraînant une ablation apparente des cellules ciliées de l'épithélium sensoriel [37]. De plus, les cellules cochléaires endommagées n'ont été réparées ou remplacées que 58 jours après l'exposition au pistolet à air comprimé. De même, André et al. ont démontré des preuves morphologiques et ultrastructurales d'un traumatisme acoustique massif chez quatre espèces de céphalopodes (*Loligo vulgaris*, *Sepia officinalis*, *Octopus vulgaris*, et *Illex coindetii*) soumis à une exposition au bruit à basse fréquence, qui a entraîné des altérations permanentes et substantielles des cellules ciliées sensorielles des statocystes [52]. Le bruit généré par les études sismiques géophysiques (niveaux de pression acoustique de pointe à 175 dB re 1  $\mu$ Pa) a également été identifié comme la cause d'échouages massifs atypiques de calamars géants (*Architeuthis dux*) [53]. Les examens internes ont montré que ces calamars échoués avaient subi des dommages importants aux fibres internes et aux statocystes, que leur estomac était déchiré et que leur tube digestif était mutilé [53].

Species	Types of Anthropogenic Noise	Effects	References
<i>M. angustirostris</i>	increased ambient noise	constrains acoustic communication	Southall <i>et al.</i> , 2003 [45]
<i>C. chromis</i> <i>S. umbra</i> <i>G. cruentatus</i>	boating and shipping noise	reduces auditory sensitivity and shifts the hearing threshold	Codarin <i>et al.</i> , 2009 [7]
<i>H. didactylus</i>	boating and shipping noise	constrains acoustic communication and shifts the hearing threshold	Vasconcelos <i>et al.</i> , 2007 [46]
<i>P. phocoena</i>	seismic air-gun shooting	shifts the hearing threshold	Lucke <i>et al.</i> , 2009 [48]
<i>T. truncatus</i>	experimental noise emanating device	shifts the hearing threshold	Nachtigall <i>et al.</i> , 2004 [49]
<i>P. auratus</i> <i>L. vulgaris</i> <i>S. officinalis</i> <i>O. vulgaris</i> <i>I. coindetii</i>	seismic air-gun shooting experimental noise emanating device	damages the hearing sensory epithelia	McCauley <i>et al.</i> , 2003 [37] André <i>et al.</i> , 2011 [52]
<i>A. dux</i>	seismic air-gun shooting	damage to internal fibers, statocysts, stomachs, and digestive tracts	Guerra <i>et al.</i> , 2011 [53]

Tableau 2. Exemples d'études montrant les effets du bruit anthropique sur la communication acoustique et le système auditif physiologique des organismes marins.

### 3.2. Altération du comportement

En outre, le bruit anthropique peut modifier le comportement individuel de certains organismes marins, entraînant des altérations du comportement telles que des réactions de sursaut et une distraction de l'attention (tableau 3). Les réponses comportementales du calmar (*Sepioteuthis australis*) et de deux espèces de poissons pélagiques démersaux en bancs, la carpe (*Pseudocaranx dentex*) et le vivaneau rose (*P. auratus*), avant, pendant et après l'exposition au bruit des canons à air ont été étudiées par Fewtrell et McCauley [54]. Les résultats ont montré que les poissons réagissaient au bruit en se déplaçant vers le fond de la colonne d'eau et en nageant plus vite en groupes plus étroitement cohérents, et que tant les poissons que les calmars montraient une augmentation

significative de leurs réactions d'alarme. Lorsqu'ils sont exposés à des exercices de sonar naval à moyenne fréquence, à des sonars militaires simulés, à des appels d'épaulards ou à des bruits limités par la bande, la perturbation du comportement de recherche de nourriture et les réactions d'évitement ont été constatées chez la baleine à bec de Blainville, *Mesoplodon densirostris* (55). De même, le bruit généré par un canon à air sismique (niveau de crête de la source de 252 dB re 1 uPa) aurait induit une réponse de plongée chez la tortue caouanne, *Caretta caretta*, ce qui indique une réponse d'évitement induite [56]. Schwarz et Greer ont également constaté que le hareng du Pacifique (*Clupea pallasii*), qui vit dans des enclos en filet, réagissait différemment à divers types de sons (38). Le hareng n'a pas montré de réaction visible au sonar, aux échosondeurs ou à tout autre son naturel enregistré, y compris la pluie à la surface de l'eau, les cris de mouettes (*Larus* spp.), les vocalisations d'orques (*Orcinus orca*), les aboiements de Steller des otaries (*Eumetopias jubatus*) et des pépiements et sifflements autoproduits. Cependant, le bruit des grands navires s'approchant à une vitesse constante et des petits navires s'approchant à une vitesse accélérée a conduit à des réactions d'évitement dans le hareng, ce qui indique que les harengs sont plus sensibles aux bruits à basse fréquence émis par les navires qu'aux sons à haute fréquence des sonars et des échosondeurs [38]. Grâce à l'observation par caméra sous-marine et à l'analyse du budget-temps (temps alloué à l'entretien des nids ou à l'intérieur des abris pendant la période d'observation), Picciulin et al. ont constaté que la lecture des bruits de bateau enregistrés n'avait aucun effet comportemental significatif à court terme, tandis que l'analyse du budget-temps a révélé un changement significatif du temps total passé à s'occuper de leurs nids (*C. chromis*) ou à l'intérieur de leurs abris (*G. cruentatus*) [57]. De même, il a été démontré par Bruintjes et Radford que le bruit des bateaux entraînait une réduction du creusement des nids, une diminution du comportement défensif contre les prédateurs pour les œufs et les alevins, et une augmentation de l'agressivité chez un cichlidé territorial qui se reproduit en coopération, le *Neolamprologus pulcher* (58).

Kastelein et al. ont étudié les seuils comportementaux de réaction de sursaut de huit espèces de poissons marins, dont le bar (*Dicentrarchus labrax*), le mullet à lèvres épaisses (*Chelon labrosus*), la loquette (*Trisopterus luscus*), le cabillaud de l'Atlantique (*G. morhua*), le lieu jaune (*P. pollachius*), le chinchard (*Trachurus trachurus*), l'anguille commune (*Anguilla anguilla*) et le hareng de l'Atlantique (*Clupea harengus*) exposés à des bruits de 0,1-64 kHz [6]. Il a été démontré que les espèces de poissons réagissaient différemment aux bruits testés, ce qui suggère que les réactions des espèces de poissons au bruit dépendaient probablement d'un ensemble complexe de variables telles que l'emplacement, la température, l'état physiologique, l'âge, la taille du corps et la taille du banc [6]. Outre la réaction de sursaut, une augmentation des erreurs de manipulation de la nourriture et une diminution de la discrimination entre les produits alimentaires et non alimentaires ont également été détectées lorsque des épinoches à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*) captives ont été exposées à un bruit expérimental bref et prolongé respectivement, ce qui suggère un changement d'attention et d'efficacité de recherche de nourriture causé par le bruit [59].

Outre le comportement d'évitement accru, le fait d'être distrait par le bruit a également rendu certaines espèces marines plus vulnérables à la prédation. Lorsqu'ils étaient exposés au bruit du moteur d'un bateau, les bernard-l'ermite des Caraïbes (*Coenobita clypeatus*) permettaient à un prédateur simulé de s'approcher plus près que d'habitude avant que la réaction de dissimulation ne soit activée (60). De même, un comportement plus lent de retrait vers un abri après la détection d'une attaque simulée de prédateur, outre la perturbation de la recherche de nourriture et un comportement de retournement, a été constaté chez le crabe de rivage (*Carcinus maenas*) lorsqu'il était exposé au bruit du bateau [61].

Une méthode pour faire face à l'effet de masquage acoustique du bruit, un comportement modifié de production de sons a été trouvée chez les baleines à bosse (*Megaptera novaeangliae*), les grands dauphins (*T. truncatus*), les baleines franches de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*) et les baleines franches de l'Atlantique Sud (*E. australis*) [62-64]. Par exemple, les rorquals à bosse mâles ont modifié leurs cris de parade nuptiale en réponse à l'exposition aux sonars [63]. De plus, la distance et les intervalles de temps entre les remontées successives de baleines à bosse (M.

novaeangliae) au large de North Kauai, Hawaii, ont augmenté avec l'augmentation des niveaux sonores reçus de l'expérience de thermométrie acoustique du climat océanique (ATOC) [65]. Les distances dans lesquelles divers organismes marins pourraient être affectés par le bruit généré par le battage de pieux ont été évaluées par Bailey et al. 66, qui ont suggéré qu'un fort comportement d'évitement ne serait attendu que dans un rayon de 20 km de la source de bruit. Une zone d'impact plus petite, dans un rayon de 14 km du lieu de battage des pieux pour les pinnipèdes, était prévue. Bien que la blessure auditive des grands dauphins (*T. truncatus*) ne se produise que dans un rayon de 100 m autour du lieu d'enfoncement des pieux, on peut s'attendre à des perturbations du comportement jusqu'à 50 km. De même, les perturbations comportementales des petits rorquals (*Balaenoptera acutorostrata*) peuvent se produire jusqu'à 40 km du lieu d'enfoncement des pieux [66]. Seules quelques études ont montré qu'un bruit anthropique donné avait peu ou pas d'impact sur certains aspects de certains organismes marins, ce qui est probablement dû aux différentes caractéristiques du bruit reçu et à ses effets sur diverses espèces. Par exemple, Wardle a constaté que ni les poissons ni les invertébrés ne migraient du récif après une exposition au bruit généré par un canon à air sismique triple G. (trois canons à air synchronisés, chaque canon 2,51 et 2000 psi), ce qui est probablement dû au fait que quitter l'habitat coûte plus cher que l'exposition au bruit pour ces espèces du récif [67].

Species	Types of Anthropogenic Noise	Effects	References
<i>D. labrax</i> <i>C. labrosus</i> <i>T. luscus</i> <i>G. morhua</i> <i>P. pollachius</i> <i>T. trachurus</i> <i>A. Anguilla</i> <i>C. harengus</i>	experimental noise emanating device	induces startle response	Kastelein <i>et al.</i> , 2008 [6]
<i>P. dentex</i> <i>P. auratus</i> <i>S. australis</i>	seismic air-gun shooting	induces startle response	Fewtrell and McCauley, 2012 [54]
<i>C. pallasii</i>	boating and shipping noise	induces avoidance responses	Schwarz and Greer, 1984 [38]
<i>N. pulcher</i>	boating and shipping noise	reduces digging and defense capabilities, increases aggression	Bruintjes and Radford, 2013 [58]
<i>G. aculeatus</i>	experimental noise emanating device	increases in food-handling error	Purser and Radford, 2011 [59]
<i>C. clypeatus</i>	boating and shipping noise	reduces defense capabilities	Chan <i>et al.</i> , 2010 [60]
<i>C. maenas</i>	boating and shipping noise	reduces defense capabilities	Wale <i>et al.</i> , 2013 [61]
<i>M. novaeangliae</i>	ATOC (Acoustic Thermometry of Ocean Climate) sound	increases distance and time intervals between successive surfacing	Frankel and Clark, 2000 [65]
<i>M. novaeangliae</i>	Sonar	modifies courtship calls	Miller, 2000 [63]
<i>T. truncatus</i>	pile driving noise	modifies sound producing	David, 2006 [62]
<i>E. glacialis</i> <i>E. australis</i>	vessels noise	modifies calling behavior	Parks <i>et al.</i> , 2007 [64]
<i>G. cruentatus</i> <i>C. chromis</i>	boating and shipping noise	decreases time in nest caring and increases time in the shelters	Picciulin <i>et al.</i> , 2010 [57]
<i>C. caretta</i>	seismic air-gun shooting	induces startle response	DeRuiter <i>et al.</i> , 2012 [56]
<i>M. densirostris</i>	mid-frequency sonar	disrupts foraging and induces avoidance behavior	Tyack <i>et al.</i> , 2011 [55]

Tableau 3. Exemples d'études montrant les effets du bruit anthropique sur le comportement individuel des organismes marins.

### 3.3. Changements dans la répartition et l'abondance de la population

L'émigration induite, la relation proie-prédateur déséquilibrée et le recrutement réduit causé par l'entrave à l'embryogenèse par l'exposition au bruit ont un impact énorme sur la structure régionale de la population (tableau 4). En outre, les relations entre le bruit anthropique et les échouages massifs de baleines à bec de Cuvier (*Ziphius cavirostris*) et de calmars géants (*A. dux*) peuvent représenter des exemples extrêmes de la façon dont le bruit anthropique remodèle la répartition et l'abondance des populations d'espèces marines [53,68]. Des résultats similaires ont été trouvés en ce qui concerne les tortues marines de Kemp (*Lepidochelys kempii*) et les grands dauphins (*Tursiops truncatus*), dont les échouages massifs ont été enregistrés sur les plages du nord-ouest du Golfe du Mexique lorsque des explosifs ont été utilisés pour enlever plusieurs plateformes pétrolières dans les eaux offshore adjacentes (69). De même, les échouages de la baleine à bec de Cuvier (*Ziphius cavirostris*), de la baleine à bec de Blainville (*M. densirostris*), de la baleine à bec de Gervais (*M. europaeus*) se sont souvent produits après le déclenchement des sonars à moyenne fréquence par des exercices navals internationaux ont été signalés. Une enquête plus approfondie a révélé que les baleines avaient souffert d'une congestion diffuse et d'une hémorragie graves, en particulier autour de la graisse acoustique de la mâchoire, des oreilles, du cerveau et des reins. Des lésions associées aux bulles de gaz et des embolies graisseuses ont été observées dans les vaisseaux et le parenchyme des organes vitaux. Il a été déduit que la modification des réponses comportementales de plongée à l'exposition acoustique a induit la formation de bulles de gaz et a ensuite provoqué une sursaturation en azote au-delà du seuil toléré, ce qui est un mécanisme plausible pour la morbidité et la mortalité observées chez les cétacés associées à l'exposition au sonar [70-72].

En général, les espèces marines nageant librement peuvent quitter un environnement défavorablement bruyant, ce qui entraîne une réduction de la densité de population. Par exemple, Morton a constaté que la présence d'orques (*O. orca*) a diminué de manière significative dans l'archipel de Broughton après l'installation de dispositifs de harcèlement acoustique (AHD) à haute amplitude (73). De même, un nombre nettement moins important de marsouins de port (*P. phocoena*) et de grands dauphins (*T. truncatus*) a été signalé après le début de l'exploitation des éoliennes offshore (74,75). La réduction des taux de capture signalée est un effet du bruit anthropique sur l'abondance de la population locale de poissons marins [36,41,43,76]. Skalski et al. ont montré que l'émission sonore d'un seul canon à air dans une pêcherie de sébastes (*Sebastes* spp.) située le long de la côte centrale de la Californie a entraîné une baisse moyenne de 52 % des taux de capture, causant une perte économique moyenne de 49,8 % [43]. Des effets similaires de réduction des taux de capture causés par le bruit anthropique ont également été constatés chez la morue (*G. morhua*) [36,41], l'églefin (*M. aeglefinus*) [41,42] et le lieu noir (*Pollachius virens*) [40]. Le taux de capture des langoustes (*Panulirus cygnus*) dans l'ouest de l'État de Victoria, en Australie, n'a pas été affecté par les études sismiques, ce qui est probablement dû aux différences de tolérance au bruit entre les espèces et à la réduction de l'évitement des prédateurs causé par le bruit (77).

En plus de provoquer une migration horizontale, le bruit peut également entraîner un changement vertical de la distribution spatiale de la population. On a constaté que le merlan bleu (*Micromesistius poutassou*) et les espèces mésopélagiques se déplacent vers des eaux plus profondes pendant les périodes de tir sismique, ce qui indique que la population évite à court terme le bruit des tirs [4]. Toutefois, Wilhelmsson a obtenu un résultat contraire, en constatant que l'abondance des poissons démersaux était plus importante à proximité des turbines que dans les zones environnantes, ce qui pourrait être dû au fait que la plupart des parties submergées des turbines étaient couvertes de moules bleues et de balanes et, par conséquent, servaient de récifs artificiels et de dispositifs de concentration des poissons démersaux de petite taille [78].

Il a été démontré que la pollution sonore peut entraîner une réduction du recrutement de la population de certaines espèces marines [35,39,79]. Par exemple, l'exposition au bruit pendant le développement des larves a entraîné une augmentation des malformations corporelles chez les coquilles Saint-Jacques (*Pecten novaezelandiae*) [39]. De même, le temps médian avant

métamorphose (TTM) pour les mégalopodes des crabes *Austrolice crassa* et *Hemigrapsus crenulatus* a été significativement augmenté d'au moins 18 h lorsqu'ils ont été exposés au bruit d'une turbine à marée ou d'une éolienne, par rapport à ceux des traitements de contrôle silencieux. Lorsque les deux espèces ont été soumises au bruit de leur habitat naturel, le TTM médian a diminué de 21%-31%, 38%-47% et 46%-60% par rapport à ceux qui ont été exposés à un contrôle silencieux, au bruit des marées et au bruit des éoliennes, respectivement [80]. De plus, bien que l'exposition à une seule décharge d'une série de canons à air sismiques n'ait pas affecté la survie des larves d'une espèce de crustacés, le crabe dormeur (*Metacarcinus magister*) [79], une réduction significative des taux de reproduction après exposition au bruit a été détectée chez une autre espèce de crustacés, la crevette brune (*Crangon crangon*) [35].

### 3.4. Les autres impacts physiologiques

En plus de provoquer un masquage auditif et des dommages histologiques dans les systèmes auditifs, entraînant une altération du comportement et modifiant la distribution et l'abondance de la population, la pollution sonore peut induire une série de réponses physiologiques (tableau 5) [81-84]. Par exemple, Casper et al. ont étudié les effets du bruit impulsif du battage de pieux sur deux groupes de taille de bars rayés hybrides (le bar blanc *Morone chrysops* croisé avec le bar rayé *M. saxatilis*). Les résultats ont montré que les grands bars rayés (taille moyenne de 17,2 g) étaient plus susceptibles de subir des blessures barotraumatiques que les petits poissons (taille moyenne de 1,3 g), tant en termes de nombre d'individus touchés que de gravité de la blessure [85]. Le bruit entraîne généralement des réactions de stress physiologique typiques chez les organismes marins, telles que la stimulation de l'activité nerveuse, l'augmentation du métabolisme et la réduction de l'immunité. Chez les baleines blanches (*Delphinapterus leucas*), on a constaté que les niveaux de noradrénaline, d'épinéphrine et de dopamine augmentaient de manière significative après des expositions à des niveaux sonores élevés (>100 kPa) à l'aide d'un canon à eau sismique (les niveaux de pression de crête d'impulsion variaient d'environ 8 à 200 kPa ou 198-226 dB re 1  $\mu$ Pa pression de crête) par rapport à des expositions à des niveaux sonores faibles (<100 kPa) ou à des témoins sans exposition au bruit, ce qui représente un effet d'activation nerveuse de l'exposition au bruit [81]. Chez les baleines blanches (*D. leucas*), une activation physiologique, la tachycardie, causée par l'exposition au bruit des navires a également été détectée (86). De même, chez les grands dauphins (*T. truncatus*), une augmentation significative de l'aldostérone et une diminution significative des monocytes ont été constatées après exposition au bruit des canons à air sismiques (44-207 kPa ou 213-226 dB re 1  $\mu$ Pa pression de pointe) [81]. En outre, Wale et al. ont constaté un taux métabolique plus élevé chez le crabe de rivage (*C. maenas*), car les individus consomment plus d'oxygène lorsqu'ils sont exposés à un bruit de bateau que ceux exposés à un bruit ambiant, ce qui indique un stress potentiellement plus important (82). Lorsqu'ils sont perturbés par le bruit, les organismes marins ont tendance à réduire leur consommation alimentaire et à augmenter leur taux métabolique, ce qui entraîne généralement une réduction de la croissance et d'autres effets morphologiques (35,83). Par exemple, Anderson et al. ont constaté que les hippocampes lignés (*Hippocampus erectus*) avaient un poids corporel beaucoup plus petit  $\Delta Wt$  (changement de poids) et plus grand  $\Delta K$  (changement du facteur de condition de Fulton) lorsqu'ils étaient exposés à un bruit fort provenant de systèmes d'aquarium (83). L'exposition au bruit a également entraîné une augmentation significative du métabolisme et une réduction du taux de croissance des crevettes brunes (*C. crangon*) [35]. De même, les concentrations de cortisol, de glucose et de lactate dans le sérum ont augmenté de manière significative tandis que l'AMP, l'ADP et l'ATP ont diminué de manière significative dans le bar commun européen (*D. labrax*) après exposition aux ondes acoustiques générées par un canon à air expérimental de prospection sismique, ce qui suggère une augmentation du taux métabolique sous l'effet du bruit [84]. Outre l'augmentation significative du lactate et la diminution du glucose, on a également constaté que les niveaux d'hématocrite étaient affectés par le bruit du trafic maritime dans le bar commun européen (*D. labrax*) et la daurade royale (*Sparus aurata*). Le niveau d'hématocrite

est l'un des indices les plus fiables et indique le niveau des composants corpusculaires du sang. Une augmentation de l'activité de l'hématocrite encourage la production de globules rouges pour le transport de l'oxygène. Chez les deux espèces, des niveaux d'hématocrite significativement plus élevés ont été enregistrés pour le groupe test par rapport au groupe témoin [2].

Species	Types of Anthropogenic Noise	Effects	References
<i>Z. cavirostris</i>	Sonar	causes mass strandings	Frantzis, 1998 [68]
<i>A. dux</i>	seismic air-gun shooting	causes mass strandings	Guerra <i>et al.</i> , 2011 [53]
<i>O. orca</i>	high-amplitude acoustic harassment devices	induces emigration	Morton, 2002 [73]
<i>P. phocoena</i> <i>T. truncatus</i>	pile driving noise	induces emigration	Thompson <i>et al.</i> , 2010 [75]
<i>C. harvengus</i> , <i>M. poutassou</i>	seismic air-gun shooting	induces emigration	Slotte <i>et al.</i> , 2004 [4]
<i>P. phocoena</i>	wind farm noise	induces emigration and alters vertical distribution	Carstensen <i>et al.</i> , 2006 [74]
<i>G. flavescens</i> <i>P. minutus</i> <i>P. microps</i> <i>T. bubalis</i> <i>M. scorpius</i>	wind farm noise	no detectable effects on community structure and biodiversity	Wilhelmsson <i>et al.</i> , 2006 [78]
<i>S. goodie</i> <i>S. paucispinis</i> <i>S. chlorostictus</i> <i>G. morhua</i> <i>M. aeglefinus</i>	seismic air-gun shooting	decreases catch rate	Skalski <i>et al.</i> , 1992 [43]; Løkkeborg <i>et al.</i> , 1993 [36]; Engås <i>et al.</i> , 1996 [41]
<i>P. virens</i>	boating and shipping noise	decreases catch rate	Engås, 1994 [40]
<i>M. aeglefinus</i>	experimental noise emanating device	decreases catch rate	Nicholson <i>et al.</i> , 1992 [42]
<i>P. cygnus</i>	seismic air-gun shooting	no detectable effect on catch rate	Parry and Gason, 2006 [77]
<i>P. novaezelandiae</i>	experimental noise emanating device	decreases population recruitment	Aguilar de Soto <i>et al.</i> , 2013 [39]
<i>A. crassa</i> <i>H. crenulatus</i>	tidal turbine and wind turbine noise	decreases population recruitment	Pine <i>et al.</i> , 2012 [80]
<i>C. crangon</i>	experimental noise emanating device	decreases reproduction rates	Lagarrière, 1982 [35]
<i>M. magister</i>	seismic air-gun shooting	no detectable effect on larval survival	Pearson <i>et al.</i> , 1994 [79]
<i>Z. cavirostris</i> <i>M. densirostris</i> <i>M. europaeus</i>	naval sonar	mass strandings	Cox, <i>et al.</i> , 2006 [70]
<i>Z. cavirostris</i> <i>M. densirostris</i> <i>M. europaeus</i>	naval sonar	mass strandings	Fernández, <i>et al.</i> , 2005 [71]
<i>Z. cavirostris</i> <i>M. densirostris</i> <i>M. europaeus</i>	naval sonar	mass strandings	Jepson, <i>et al.</i> , 2003 [72]
<i>L. kempii</i> <i>T. truncatus</i> <i>C. caretta</i>	Underwater explosives	mass strandings	Klima <i>et al.</i> , 1988 [69]

Tableau 4. Exemples d'études montrant les effets du bruit anthropique sur la répartition et l'abondance des populations d'organismes marins.

Species	Types of Anthropogenic Noise	Effects	References
<i>C. crangon</i>	experimental noise emanating device	increases metabolism and decreases growth	Lagardère, 1982 [35]
<i>D. leucas</i>	seismic air-gun shooting	increases metabolism and decreases immunity	Romano <i>et al.</i> , 2004 [81]
<i>T. trunccatus</i>			
<i>H. erectus</i>	increased ambient noise	increases metabolism and decreases growth and immunity	Anderson <i>et al.</i> , 2011 [83]
<i>C. maenas</i>	ship noise	increases metabolism	Wale <i>et al.</i> , 2013 [82]
<i>D. labrax</i>	seismic air-gun shooting	increases metabolism	Santulli <i>et al.</i> , 1999 [84]
<i>D. labrax</i>	boating and ship noise	increases metabolism and induces motility	Buscaino <i>et al.</i> , 2010 [2]
<i>S. aurata</i>			
<i>D. leucas</i>	experimental noise emanating device	increases heart rate	Lyamin <i>et al.</i> , 2011 [86]
<i>P. elephas</i>	ship noise	decreases immunity	Celi <i>et al.</i> , 2014 [87]
<i>M. chrysops</i>	pile driving	induces barotraumas injuries	Casper <i>et al.</i> , 2013 [85]
<i>M. saxatilis</i>			

Tableau 5. Exemples d'études montrant les impacts physiologiques du bruit anthropique sur les organismes marins.

Une étude réalisée par Celi et al. a montré que l'exposition au bruit des navires entraînait une diminution significative du nombre total d'hémocytes (THC) et de l'activité de la phénoloxydase (PO) dans l'hémolymphe acellulaire, ainsi qu'une augmentation significative de la concentration en protéines hémolympatiques et de l'expression de la protéine de choc thermique 27 (Hsp 27) dans le lysat hémocytaire de la langouste européenne (*Palinurus elephas*), ce qui suggère que le bruit a également des répercussions sur l'immunité [87]. L'exposition au bruit a également entraîné une dépression du système immunitaire chez la baleine blanche (*D. leucas*), avec une diminution du niveau de phosphatase alcaline et une augmentation du niveau de  $\gamma$ -glutamyltransférase [86]. De même, lorsque des hippocampes lignés (*H. erectus*) étaient exposés dans des bassins bruyants, les hétérophiles constituaient une proportion significativement plus importante de leur population de leucocytes et leur rapport hétérophiles/lymphocytes (rapport H:L) était significativement plus élevé que lorsqu'ils étaient dans des bassins calmes. Les concentrations de cortisol plasmatique étaient plus élevées et les reins étaient significativement plus affectés par les parasites dans les bassins bruyants [83].

#### [4. Discussion et conclusions](#)

Avec l'utilisation et l'exploration croissantes de l'océan par les êtres humains, l'impact du bruit anthropique sur les organismes marins est devenu l'un des sujets de recherche les plus importants. Comme le résume la présente étude, les effets du bruit anthropique sur les organismes marins dépendent des espèces étudiées et des niveaux de bruit impulsif et stationnaire. Par exemple, lorsque la même espèce, *C. harengus*, a été exposée à un bruit d'intensité différente généré par un dispositif expérimental d'émission de bruit, par la navigation de plaisance et la navigation maritime, et par des canons à air sismique, la réponse a varié, allant du sursaut et de l'évitement à l'émigration forcée, respectivement [4,6,38]. De même, les effets d'un même bruit sur diverses espèces se sont avérés spécifiques à chaque espèce en raison des différences intrinsèques entre les espèces. Lorsqu'ils sont exposés au même type de bruit, le bruit des bateaux et de la navigation, le comportement d'évitement, la réduction de la capacité à creuser des nids et à se défendre, ainsi que l'augmentation de la distance et des intervalles de temps entre les surfacages successifs ont été constatés pour *C. harengus*, *N. pulcher* et *M. novaeangliae* respectivement [38,58,65]. Un exemple extrême présentant des différences spécifiques aux espèces en réponse au bruit anthropique a même montré que, contrairement au bruit, la musique favorisait la croissance de *S. aurata* [2,88,89].

Cependant, étant donné que différents types de bruit, y compris le bruit des canons à air sismique, le bruit des bateaux et des navires, le sonar, le bruit blanc et le bruit généré par des dispositifs expérimentaux d'émission de bruit avec une large gamme d'intensités et de fréquences, ont été étudiés par différents chercheurs, il est difficile de comparer les résultats rapportés.

Grâce aux statistiques (figure 1), la plupart des études portant sur les effets du bruit anthropique sur les organismes marins ont été réalisées sur des poissons, qui représentent la moitié du nombre total d'espèces étudiées en ce qui concerne les effets du bruit. Les effets du bruit sur les espèces de mammifères marins, principalement les baleines et les dauphins, ont également été étudiés de manière efficace et représentent plus de 20 % du nombre total d'espèces étudiées. Seules quelques études ont été menées avec des invertébrés et des reptiles.

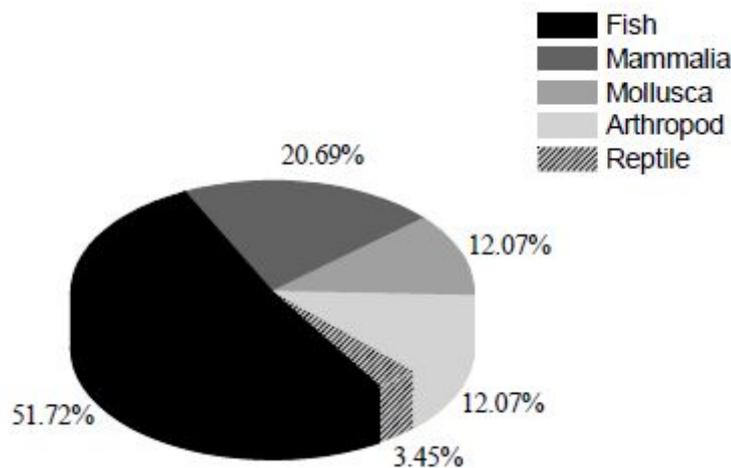


Figure 1. Le pourcentage d'espèces marines étudiées dans différents taxons qui sont affectées par le bruit anthropique.

Étant donné que les effets du bruit anthropique sur les organismes marins sont spécifiques à chaque espèce et que les organismes marins à différents stades de leur vie peuvent présenter des différences de sensibilité, les connaissances actuelles sur les effets biologiques du bruit sont encore limitées. Des études antérieures ont indiqué que les individus à différents stades de leur vie présentaient des réactions différentes à diverses perturbations environnementales. À ce jour, la plupart des études ont porté sur les effets du bruit anthropique sur les adultes. Par conséquent, la rareté des études menées sur des individus larvaires et/ou juvéniles, qui sont probablement plus sensibles au bruit anthropique, limite considérablement notre compréhension actuelle de la pollution sonore. En outre, presque toutes les études ont été réalisées avec des espèces ayant des structures de réception acoustique typiques de l'audition, telles que les oreilles et les lignes latérales, en raison de la pertinence logique évidente entre le bruit et les sens acoustiques des organismes. Cependant, les effets du bruit sur les organismes sans structures réceptrices acoustiques évidentes ont été largement négligés. Théoriquement, dans le champ lointain d'une source acoustique, les composantes de pression ( $p$ ) et de vitesse ( $v$ ) sont liées comme  $p = v \times z$ , où  $z$  est le paramètre qui indique l'impédance du milieu [39]. Par conséquent, le mouvement des particules dans l'eau provoqué par le bruit peut être détecté directement par la surface corporelle des organismes marins. Par exemple, la seule étude réalisée avec une espèce de bivalve a montré que le développement larvaire de la coquille Saint-Jacques et du pétoncle *P. novaezelandiae*, qui n'ont pas de structure réceptrice

acoustique, était considérablement entravé par l'exposition au bruit [39]. Par conséquent, il convient d'examiner les effets du bruit anthropique sur les organismes marins n'ayant aucune structure réceptrice acoustique apparente.

Il convient de noter que certaines études ont été menées avec des échantillons de taille extrêmement réduite, en raison soit de la faible densité de population du spécimen dans la zone d'étude, soit de la faible disponibilité du spécimen dans le laboratoire. La taille insuffisante de l'échantillon entrave sérieusement la fiabilité de la conclusion. Une autre difficulté technique réside dans l'évaluation des impacts du bruit isolés des autres facteurs de stress environnementaux, tels que la pollution, le changement climatique et l'acidification des océans. Mener l'enquête en laboratoire semble être une bonne solution pour isoler le bruit des autres facteurs de stress environnementaux. Cependant, les résultats obtenus ne représentent pas le scénario naturel réel. Pour bien comprendre les effets du bruit sur les organismes marins en mer, il faut non seulement étudier les réactions biologiques des espèces, mais aussi disposer d'informations complètes sur le bruit en mer, comme les niveaux sonores, la distance entre les espèces et la source sonore, la perte de propagation, ainsi que les conditions sonores ambiantes. Une description détaillée du type, des niveaux et des fréquences du son étudié est donc nécessaire, ce que certaines études ont négligé.

À l'heure actuelle, on comprend encore mal pourquoi et comment le bruit affecte les organismes marins, seuls certains aspects et une proportion extrêmement faible des organismes marins ayant été étudiés. Les réponses à de nombreuses questions restent inconnues, telles que "le signal sonore est-il perçu par les bivalves marins comme un stress environnemental commun ou comme des messages informatifs sur le milieu environnant" et "les espèces marines sessiles peuvent-elles s'adapter à des environnements sonores non mortels ?

## Remerciements

Ces travaux ont été soutenus financièrement par la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine (n° 31372503), le Projet majeur de science et de technologie du Zhejiang (2012C13005), et le Fonds ouvert du Laboratoire clé d'exploration et de préservation des bioressources côtières du Zhejiang (J2013003, J2015002).

## Contributions des auteurs

Chao Peng, Xinguo Zhao et Guangxu Liu ont procédé à la collecte et à l'analyse des données. Chao Peng a contribué à la rédaction du manuscrit. Guangxu Liu a dirigé la construction du manuscrit. Guangxu Liu et Xinguo Zhao ont contribué à la révision du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé le manuscrit final.

## Conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.