

EDF Renouvelables

SOCIETE EOLIENNES OFFSHORE DU CALVADOS

**IMPACT DES TRAVAUX D'INSTALLATION DU PARC EOLIEN EN MER DE COURSEULLES SUR
LA COQUILLE SAINT JACQUES *PECTEN MAXIMUS***

 Synthèse des études précédemment réalisées en milieu contrôlé

Date : Mai 2023



SOMMAIRE

1	Contexte	3
2	Synthèse des projets réalisés en milieu contrôlé.....	6
2.1	Impact du son sur la coquille Saint Jacques – Projet Benthoscope II.....	6
2.1.1	<i>Fiche projet.....</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Synthèse de l'étude</i>	<i>6</i>
2.2	Impacts du son sur les stades larvaires de la coquille Saint Jacques – Thèse de M. Gigot 12	
2.2.1	<i>Fiche projet.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Synthèse de l'étude</i>	<i>12</i>
2.3	Impacts des champs magnétiques sur la coquille Saint Jacques – projet SPECIES	21
2.3.1	<i>Fiche projet.....</i>	<i>21</i>
2.3.2	<i>Synthèse de l'étude</i>	<i>21</i>
2.4	Le traitement de la turbidité et de la remise en suspension	26
3	Synthèse	28
4	Références.....	29

1 CONTEXTE

Afin de répondre au challenge de l'énergie : produire suffisamment en réduisant la production de CO₂, le développement de l'éolien en mer est fortement encouragé. Depuis 2010, de nombreux sites sont proposés pour l'installation de parcs éoliens offshore avec pour objectifs la production de près 40 GW en 2050 pour la France. Les premiers parcs prévus en France se concentrent sur les côtes de l'Atlantique Nord et de la Manche et plus tardivement en Méditerranée (Figure 1).



Figure 1 : Projets éoliens en mer en développement sur les façades maritimes françaises (Site Eoliennes en mer)

L'installation de ces parcs doit cohabiter avec les ressources naturelles mais également les activités anthropiques déjà présentes (Copping et al. 2016). Plusieurs effets sont susceptibles d'être générés lors des différentes phases d'un projet éolien offshore :

- La perte d'habitats,
- Une remise en suspension des sédiments,
- Le bruit,
- La production de champs magnétiques par les câbles de raccordement ou inter-éoliennes,
- L'effet récif ou réserve une fois le parc installé.

Ces effets peuvent agir sur l'ensemble des compartiments marins et en particulier les peuplements benthiques, du fait de leur faible mobilité. Cependant, peu d'études analysent l'impact de ces effets sur ces organismes.

TBM environnement

En comparant la répartition des parcs éoliens programmés avec la distribution géographique de certains invertébrés d'intérêts écologiques et commercial, il apparaît que de nombreux sites se trouvent à proximité des principaux gisements de coquilles Saint Jacques *Pecten maximus* (Figure 2).



Figure 2 : Carte de distribution de *Pecten maximus* en Europe (en haut, Source : FAO) et les principaux gisements en France (en Bas, Source : IFREMER)

La coquille Saint Jacques est une espèce à fort enjeu commercial mobilisant près de 600 bateaux et employant environ 2 400 marins, selon le comité régional des pêches maritimes et des élevages marins. En 2017, la production était de 30 000 tonnes, pour un chiffre d'affaires de 87 millions d'euros. La coquille Saint Jacques est également une espèce fortement étudiée

par IFREMER pour la gestion des stocks et par le LEMAR pour son utilisation comme sentinelle de l'environnement. Dans de nombreuses études, le LEMAR et TBM environnement ont été capables de montrer que la Coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) pouvait être utilisée comme un outil de description de son environnement : description de blooms phytoplanctoniques (Chauvaud 1998 ; Chauvaud et al., 1998 ; Lorrain et al., 2000), d'upwelling en Norvège (Jolivet et al., 2015) ... Ces études reposent sur l'utilisation des patterns de croissance et de la composition chimique des coquilles de *Pecten maximus*.

Cependant, comme de nombreuses espèces d'invertébrés, peu d'études s'étaient intéressées aux effets potentiels des parcs éoliens offshore et en particulier du bruit ou des champs magnétiques sur la coquille Saint Jacques. Seuls les effets d'une hausse de turbidité avaient déjà été étudiés notamment par Szostek et al (2013).

Dans le présent rapport, nous présenterons les expérimentations menées en milieu contrôlé ou semi-contrôlé depuis 2015 pour analyser les effets :

- du bruit sur *Pecten maximus* à l'âge adulte (Benthoscope II)
- du bruit sur *Pecten maximus* au stade larvaire (thèse de Mathilde Gigot)
- des champs magnétiques sur *Pecten maximus* à l'âge adulte (projet SPECIES).


Nous concluons ce rapport en rappelant les principaux résultats de Szostek et al (2013) sur les effets de la turbidité sur *Pecten maximus* également obtenus en milieu contrôlés.

Nous reviendrons également sur les limites des expérimentations en milieu contrôlé et l'intérêt de travailler *in situ*.

2 SYNTHÈSE DES PROJETS RÉALISÉS EN MILIEU CONTRÔLÉ

2.1 Impact du son sur la coquille Saint Jacques – Projet Benthoscope II

2.1.1 Fiche projet

Acronyme du projet	Benthoscope II
Nom du projet	Mise au point d'une méthode d'observation opérationnelle de quantification de l'impact permettant d'évaluer les effets des projets EMR sur le compartiment zoobenthique
Type de projet	Projet France Energie Marine ANR-10-IEED-0006-05
Durée	42 mois 2016-2019
Partenaires	Grenoble INP, CHORUS, LEMAR, RTSYS, TBM environnement 
Source	Jolivet, A, S. Chauvaud, D. Mathias, L. Chauvaud (2020). Etude des effets acoustiques des activités anthropiques sur le comportement de la coquille Saint Jacques. Projet Benthoscope II – Lot 2 - Rapport sur les résultats obtenus en milieu contrôlé

2.1.2 Synthèse de l'étude

Il a été démontré que le paysage acoustique d'un site d'étude constitue une propriété intrinsèque de l'habitat. L'introduction d'énergie acoustique par l'homme vers les écosystèmes marins peut provoquer de nouvelles pressions qui viennent s'ajouter à celles déjà existantes. Depuis les années 1980, la recherche dans ce domaine s'est développée produisant des articles sur les effets des sons sur les mammifères marins ainsi que sur les poissons. Cependant, à notre connaissance très peu d'études se sont encore intéressées à l'impact du bruit anthropique, et en particulier ceux produits par les EMR sur les communautés benthiques. Les actions menées dans le projet Benthoscope II se sont concentrées sur le compartiment benthique avec des expérimentations en milieu contrôlé et en milieu naturel. Initialement, les espèces modèles choisies étaient d'une part la coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) dont la biologie est désormais bien connue, et le homard (*Homarus gammarus*) afin de caractériser les réponses d'un représentant des bivalves et des crustacés, groupes peu renseignés. Cependant le manque de connaissances sur le comportement des homards n'a pas permis d'identifier et caractériser une réponse comportementale aux émissions de bruits. Seuls les résultats obtenus sur la coquille Saint Jacques seront développés ici.

TBM environnement

Au cours des expérimentations réalisées, divers sons seront émis dans les aquariums :

- Le bruit de navires enregistrés *in situ*,
- Les sons produits par des congénères des espèces étudiées enregistrées en conditions contrôlées,
- Des séquences de sons artificiels couvrant une large gamme de fréquences.
- Une reproduction du bruit de battage de pieu

Les expérimentations ont lieu en 2016-2017 à Océanopolis.

La réponse des organismes est évaluée à travers leur comportement : suivi des mouvements d'ouverture et de fermeture des valves de Coquille Saint Jacques. Le peu de connaissances sur la sensibilité de la coquille Saint Jacques au son fait de cette première étude, une étude exploratoire. Etant donnés les niveaux sonores et types de sons appliqués, les objectifs de ces expérimentations sont de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que la coquille réagit au bruit ?
- Est-ce que cette réponse correspond à des mouvements différents d'une activité quotidienne (plus amples, plus rapides) ?
- Est-ce que cela induit un mouvement de stress ou de fuite ?

MATERIEL ET METHODE

ORIGINE DES COQUILLES

Les coquilles saint Jacques (*Pecten maximus*) ont toutes été pêchées en plongée à Roscanvel en rade de Brest (Taille : 97 ± 11 mm). Celles destinées aux expérimentations contrôlées ont été acclimatées en aquarium une semaine à un mois avant les expérimentations; alors que celles pour les expérimentations en milieu naturel ont été placées dans les cages développées dans le cadre du projet à la plage Ste Anne.

SUIVI DE LEUR COMPORTEMENT

Toutes les coquilles ont été équipés d'un accéléromètre fixé à l'aide d'un velcro permettant de suivre leur mouvement à une fréquence de 25 Hz. L'extraction et le traitement des données d'accélérométrie est conforme au protocole détaillé dans Coquereau *et al.* (2016). Le comportement est alors décrit par 4 paramètres : le nombre de mouvements réalisés, la durée de fermeture (s), l'accélération de la fermeture (g) et l'amplitude de la fermeture (°).



Figure 3 : Fixation d'un accéléromètre sur une coquille Saint Jacques

ÉMISSION DES SONS

En milieu contrôlé, chaque aquarium est équipé de sa propre source sonore (AQUA 30 DNH, 8 Ohms, 80-20 000 Hz), ainsi que d'un micro (HTI-96 MIN, High Tech, Inc) connecté à un enregistreur (Song Meter SM2+, Wildlife acoustics) pour enregistrer les sons émis. Le protocole suivi pour ajuster les émissions sonores dans les bassins expérimentaux correspond à celui développé dans Jolivet et al. (2015).



Figure 4 : Fixation des accéléromètres sur les coquilles Saint Jacques et dispositif expérimental utilisé

NIVEAUX SONORES

En conditions silencieuses, les niveaux sonores présents dans les aquariums sont de 102 à 105 dB re.1 μ Pa². Différents sons ont été émis dans les aquariums :

- une séquence multifréquence permettant de tester la sensibilité de la coquille en consistant en 20 bips créés aux fréquences : 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 1000, 12000, 15000, 20000. La séquence a été émise à près de 150 dB re. 1 μ Pa² soit près de 50 dB au-dessus des conditions silencieuses.

TBM environnement

- un bruit de navire avec deux niveaux comparables à ceux enregistrés en milieu naturel : 135 dB re. $1\mu\text{Pa}^2$ et un niveau plus élevé à 150 dB re. $1\mu\text{Pa}^2$ (Figure 5);
- des bruits biologiques enregistrés au cours de précédentes expérimentations sur les araignées de mer à des niveaux sonores de 30 dB supérieurs aux conditions silencieuses ;
- des bruits synthétiques de battage de pieu permettant de varier le type de fréquence et l'intensité diffusés dans l'aquarium. Ainsi les sons émis variaient entre 140 et 150 dB re. $1\mu\text{Pa}^2$. Les niveaux crête à crête émis dans l'aquarium étaient de 170 dB re. $1\mu\text{Pa}^2$ ce qui, pour le battage de pieu, correspond à un niveau reçu à 500 m de la source.

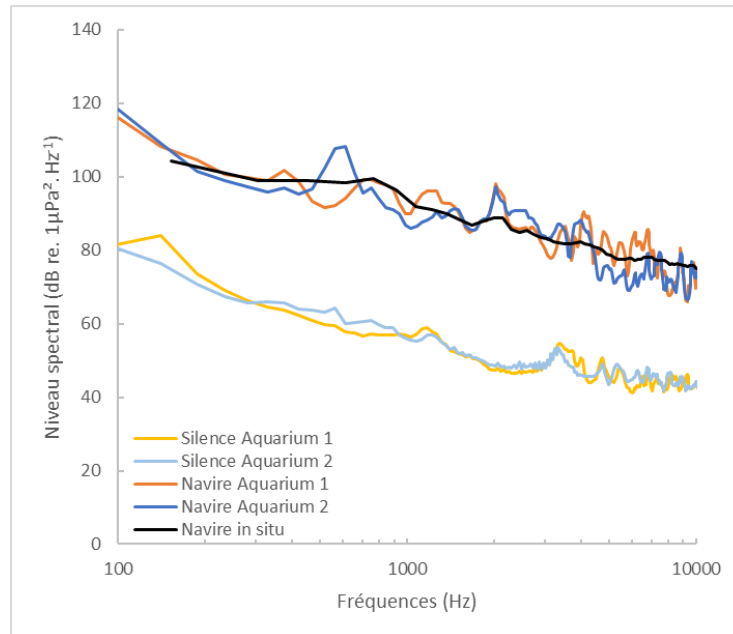


Figure 5 : Spectrogrammes enregistrés en période silencieuse et pendant les émissions du bruit de navire dans chaque aquarium ainsi qu'en milieu naturel

RESULTATS ET DISCUSSION

Il est tout d'abord important de noter qu'au cours de ces expérimentations aucune mortalité n'a été observée.

Est-ce que la coquille Saint Jacques perçoit le son ?

Lors des expérimentations de la présente étude, une augmentation significative du nombre de mouvements a été mesurée au cours des diffusions sonores. Ces mouvements ont lieu dès le démarrage d'un bruit continu (passage de navire pendant 5 minutes) et à chaque bip de basses fréquences (lors des émissions multifréquences).

Ainsi, nous pouvons dire que la coquille Saint Jacques perçoit le son et particulièrement aux basses fréquences (50-500 Hz). Cette gamme auditive rejoint ce qui a été observé pour le pétoncle japonais (*Mizuhopecten yessoensis*) et les pétoncles (*Chlamys swift*) qui ont une gamme auditive de 30 à 1000 Hz (Zhadan 2005) mais également celle de la moule (*Mytilus edulis*) avec 5 à 400 Hz dont une fréquence dominante à 210 Hz (Roberts et al. 2015).

Impact des travaux d'installation du parc éolien en mer de Courseulles sur la coquille Saint Jacques *Pecten maximus* – Synthèse des travaux réalisés en milieu contrôlé

TBM environnement

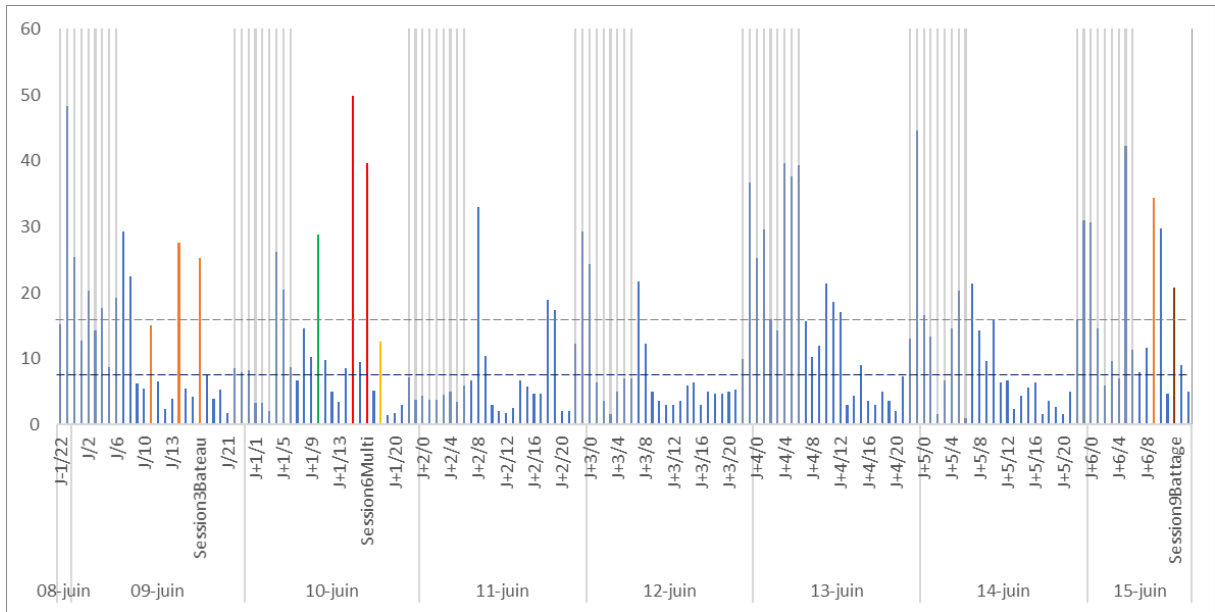


Figure 6 : Nombre de mouvements réalisés pour chaque créneau d'une heure. Pour faciliter la comparaison, les créneaux d'émission (25 min) et de repos (125 min) ont été converti en 60 minutes. En orange sont repérés les émissions de bateau, en vert les émissions biologiques, en rouge les émissions multifréquence et battage de pieu. Les lignes grises matérialisent les périodes de nuit.

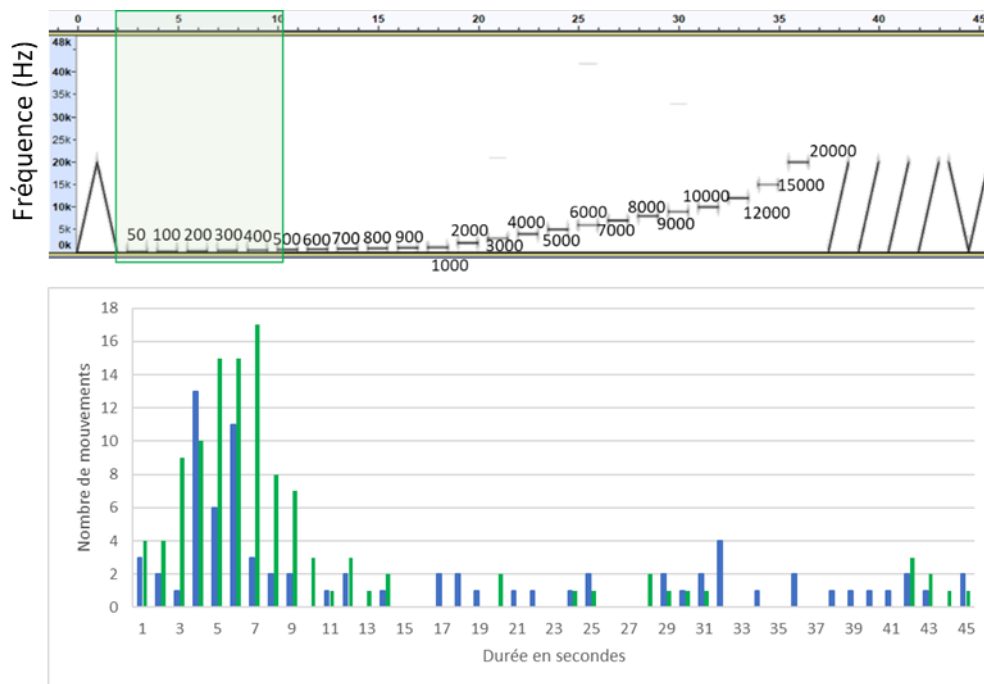


Figure 7 : Distribution des mouvements au cours de la séquence multi fréquence (séquence présentée sur le graphique du haut). Le maximum de mouvements est observé entre la 3ème et la 10ème seconde (zone encadrée).

Est-ce que cette réponse correspond à des mouvements plus amples, plus rapides ?

Les mouvements réalisés au cours des émissions de bruits continus (bruits de bateaux et bruits biologiques) semblent être des mouvements plus lents (durée de fermeture plus longues et accélérations faibles) et de faibles amplitudes. Lors d'émissions impulsions, les coquilles réalisent des mouvements plus rapides (accélération plus forte et durée plus courte) mais pas forcément plus amples.

Est-ce que cela induit un mouvement de stress ou de fuite ?

Dans l'ensemble, les réponses sont modérées et ne correspondent pas à des réponses de stress ou de fuites qui peuvent être observées en présence de prédateur ou sous l'effet d'algues toxiques (Coquereau et al. 2016). Cependant, la répétition de ces mouvements lors de bruits impulsionnels ou lors de passages de navires espacés mais répétés dans la journée pourrait, induire une fatigue.

Lors d'une des séquences, des coquilles ont pondu au cours de l'heure précédant la première diffusion de bruit de bateau induisant une augmentation du nombre de mouvements des coquilles pondant et des congénères du même aquarium. Ceci n'a pas empêché les coquilles de réagir à l'émission de bateau 1 heure plus tard mais avec peut-être une intensité moindre. Ainsi même en période de ponte, les coquilles peuvent réagir à une émission sonore quelque qu'elle soit, ce qui peut accentuer la fatigue déjà associée à la reproduction.

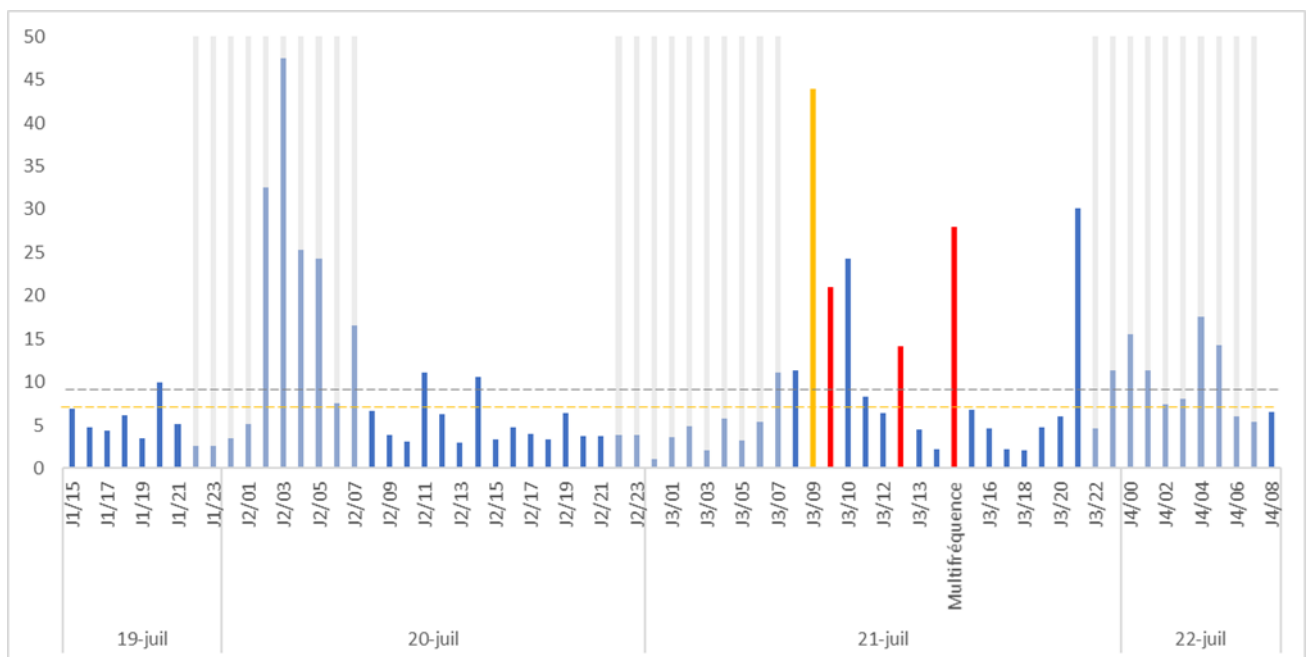



Figure 8 : Nombre de mouvements réalisés pour chaque créneau d'une heure. Pour faciliter la comparaison, les créneaux d'émission (25 min) et de repos (125 min) ont été converti en 60 minutes. En orange est repéré la période de ponte. En rouge le nombre de mouvements réalisés soit lors de la diffusion des bruits de navires soit lors de la séquence multifréquence. Les lignes grises représentent les périodes de nuit.

Les expérimentations réalisées en milieu contrôlé dans le cadre du projet Benthoscope II permettent de répondre à la question de la sensibilité des coquille Saint Jacques pour le son. Cependant, elles ne permettent pas de tester les effets de fortes intensités sonores telles que 220 dB ou 240 dB re $1\mu\text{Pa}^2$ pour le battage de pieu, les conditions testées correspondent à un son perçu à 500 m de la source. La réponse peut être impactée par les conditions expérimentales et nécessitent d'être validées en milieu naturel.

2.2 Impacts du son sur les stades larvaires de la coquille Saint Jacques – Thèse de M. Gigot

2.2.1 Fiche projet

Acronyme du projet	CHIMICHAS
Nom du projet	Caractérisation des réponses physiologiques et comportementales de l'impact acoustique sur les invertébrés marins - : Thèse de Mathilde Gigot
Type de projet	Projet CNRS /Ailes Marines
Durée	36 mois 2019-2022
Partenaires	LEMAR, WHOI, BOREA, ISMER 
Source	Gigot, M. (2022). Caractérisation de l'impact acoustique des travaux de battage de pieu et de forage associés à la construction d'éoliennes offshore sur les stades larvaires des bivalves marins <i>Pecten maximus</i> et <i>Venus verrucosa</i> (Doctoral dissertation, Brest).

2.2.2 Synthèse de l'étude

Les activités humaines introduisent des bruits dans le milieu marin et modifient le paysage acoustique. Avec l'essor des énergies marines renouvelables, l'installation d'éoliennes offshore engendre des sons basses fréquences à des niveaux très élevés. Les études concernant l'impact de la pollution sonore sur les animaux marins sont de plus en plus nombreuses mais les invertébrés en sont les grands oubliés malgré leur sensibilité acoustique démontrée et leurs rôles écologiques majeurs dans l'écosystème côtier. L'enjeu de cette thèse fut d'étudier l'impact des bruits de battage et de forage liés aux travaux offshore sur les stades larvaires de deux bivalves : la coquille Saint-Jacques *Pecten maximus* et la praire *Venus verrucosa*.

Seuls les résultats obtenus sur *Pecten maximus* seront détaillés ci-dessous via deux expérimentations en milieu contrôlé :

- L'impact des sons de battage et de forage sur les larves de coquilles Saint Jacques
- Les effets maternels du bruit de battage de pieux sur le développement des premiers stades de vie de *Pecten maximus*

Eu cours de ces expérimentations, la thèse a été focalisée sur les stades larvaires. En effet, il est alors important de déterminer quels sont les stades sensibles et à partir de quel stade le

TBM environnement

son peut avoir un impact sur la valeur sélective/fitness de l'espèce, par exemple pour mettre en place des limitations des émissions sonores pendant les périodes de ponte ou de développement des juvéniles. De plus, de récentes études posent l'hypothèse que le son pourrait renseigner l'individu sur les caractéristiques physiques et biotiques du milieu pour permettre aux larves de choisir un milieu satisfaisant (Lillis et al., 2016).

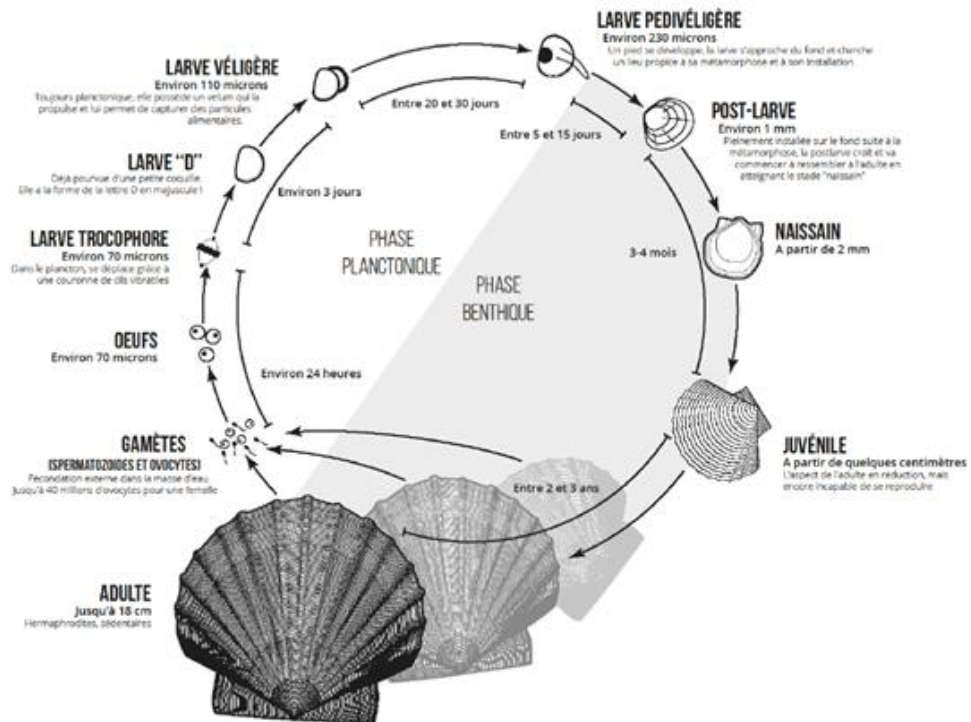


Figure 9 : Cycle de vie de la coquille Saint Jacques (Sébastien Hervé, thèse M. Gigot)

Une cuve expérimentale a également été conçue, permettant à la fois l'élevage larvaire et la diffusion fidèle de sons en limitant les phénomènes de réverbération et de résonance. Le Larvosonic est un bassin de taille 1360 x 950 x 680 cm, contenant six cylindres de diamètre 92 mm et de hauteur 382 mm (Figure 21).

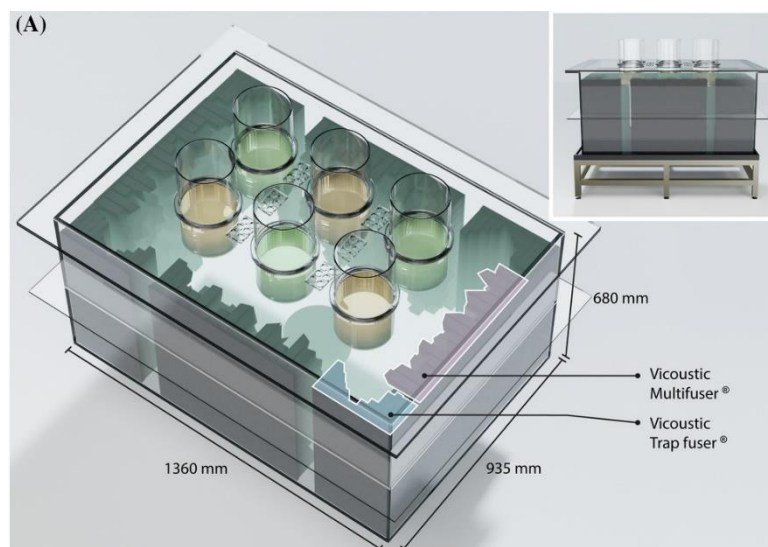


Figure 10 : Larvosonic (Olivier et al. 2023)

IMPACT DES SONS DE BATTAGE ET DE FORAGE SUR LES LARVES DE COQUILLES SAINT JACQUES

Cette première étude s'est intéressée au stade pédivéligère qui est un stade crucial dans le développement des bivalves. En effet, à ce stade, la larve devient compétente, c'est-à-dire qu'elle devient physiologiquement capable de se fixer et d'entamer sa métamorphose. Elle acquiert un pied qui lui permet de prospecter sur le substrat et de sélectionner un lieu optimal.

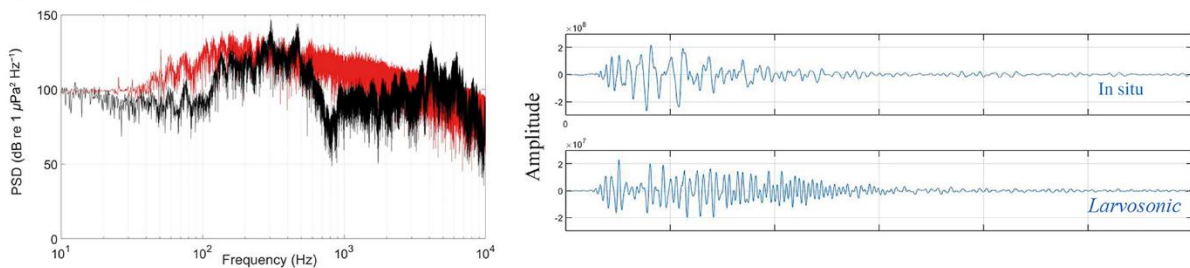
ORIGINE DES COQUILLES

Des lots de larves de pédivéligères ont été produits à l'Ecloserie du Tinduff (Plougastel-Daoulas, France) à partir d'adultes capturés à la drague dans la rade de Brest soit à Moulin Blanc (48°23.050'N, 004°25.520'W ; profondeur d'eau 10-12 m) soit à Lanvéoc (48°18.145'N, 004°26.189'W ; profondeur d'eau 11-12 m).

EMISSION DE SONS

Le son est émis vers le haut à partir d'un haut-parleur sous-marin Clark Synthesis AQ339 Diluvio™ (<https://clarksynthesis.com/aq339/>) placé au centre du larvasonic. La séquence de battage de pieux est issue d'un enregistrement réalisé lors de la phase de construction d'un parc éolien marin offshore en mer du Nord (profondeur autour de 30 m, base de données SOMME). Chaque impulsion de battage dure 200 ms avec une répétition toutes les 3s et le spectre acoustique est caractérisé par un niveau élevé dans la gamme de fréquences 40-800 Hz. La séquence de forage est basée sur un enregistrement de terrain réalisé en juin 2018 à 200 m du bateau opérant le forage géotechnique (base de données SOMME). Le forage est un son continu et son spectre est dominé par les fréquences 100-10 000 Hz avec plus de contenu énergétique dans les gammes de fréquences 150 - 600 Hz et 4000 - 7000 Hz.

(A) Pile driving



(B) Drilling

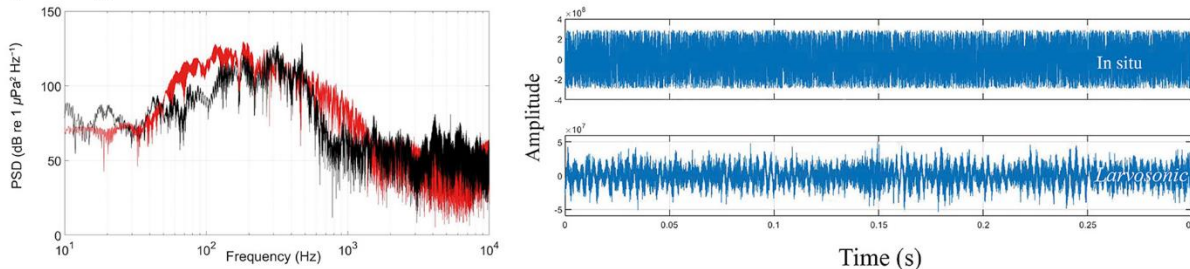


Figure 11 : Emission de battage de pieu et de forage dans le larvasonic (Olivier et al, 2023)

DESIGN EXPERIMENTAL

Une expérience de quatre jours a été menée pour mesurer l'interaction entre le son et l'alimentation sur le processus de métamorphose des larves pédivéligères. Deux lots de 4 mésocosmes « Larvasonic » ont été déployés dans 2 salles indépendantes dédiées soit aux traitements de battage (P) soit au forage (D). Le traitement alimentaire consistait en 2

mélanges différents de microalgues une avec et une sans la microalgue *Nannochloropsis occulata*.

Dans la première salle, trois niveaux croissants de battage de pieu ont été émis avec un cycle on:off de 6:6h. Les niveaux sonores émis (SPLpp) correspondent approximativement à ce qui a pu être enregistré à 78 000, 4 000 et 170 m de la source de battage, c'est-à-dire respectivement P1, P2 et P3. Aucun son n'a été émis dans le quatrième réservoir qui constituait la condition de contrôle PC.

Trois niveaux sonores ont également été utilisés pour le traitement sonore du forage, mais les distances de la source émettrice, évaluées à l'aide de SPLrms, ont été estimées à 21 500, 1 000 et <1 m respectivement. Le cycle on:off a été fixé à 19:5h et dans une condition de contrôle DC, aucun son n'a été émis.

RESULTATS ET DISCUSSION

Au cours de l'expérimentation, les taux de mortalité des larves de pédivéligères de coquilles dans l'expérience de battage de pieux étaient faibles (mortalité moyenne = $2,15 \pm 0,41$ %) et aucune différence significative n'a été identifiée suivant le traitement sonore ou le régime alimentaire. En revanche, des différences significatives ont été identifiées entre les traitements sonores de forage sans aucun effet du régime alimentaire. Le taux de mortalité était plus faible chez le témoin (mortalité témoin = $1,4 \pm 0,35$ %) que dans les autres traitements sonores (mortalité forage = $3,2 \pm 0,21$ %). Ces taux restent néanmoins très faibles, inférieurs à 4 %. Ces résultats sont en accord avec de Aguilar de Soto et al. (2013) qui ont montré aucune mortalité sur les larves D-véligères de *Pecten novaezelandiae* exposées à des impulsions sismiques pendant des expériences à court terme de 90h. Ces taux de mortalité sont également comparables à ce qui est classiquement observé en élevage (Robert et al. 1995).

Concernant l'alimentation, l'ajout de microalgues provoque de faibles variations du taux de croissance sans altérer la métamorphose. Les analyses biochimiques n'ont pas montré de différence dans le profil lipidique des larves. Il semblerait que cette microalgue ne soit pas assimilée par les larves de coquilles Saint-Jacques et que sa présence ne soit pas un déclencheur de métamorphose comme elle l'est chez la moule bleue (Jolivet et al. 2016). De plus, il n'y a pas d'interaction entre les facteurs trophique et acoustique.

Il apparaît que le battage de pieu stimule la croissance à la plus forte intensité (Figure 12) et la métamorphose à l'intensité sonore intermédiaire (Figure 13). D'autre part, le forage augmente le temps de métamorphose et le taux de filtration aux intensités les plus fortes.

Ainsi les réponses observées dépendent de l'intensité sonore mais les effets n'augmentent pas linéairement avec le niveau sonore.

TBM environnement

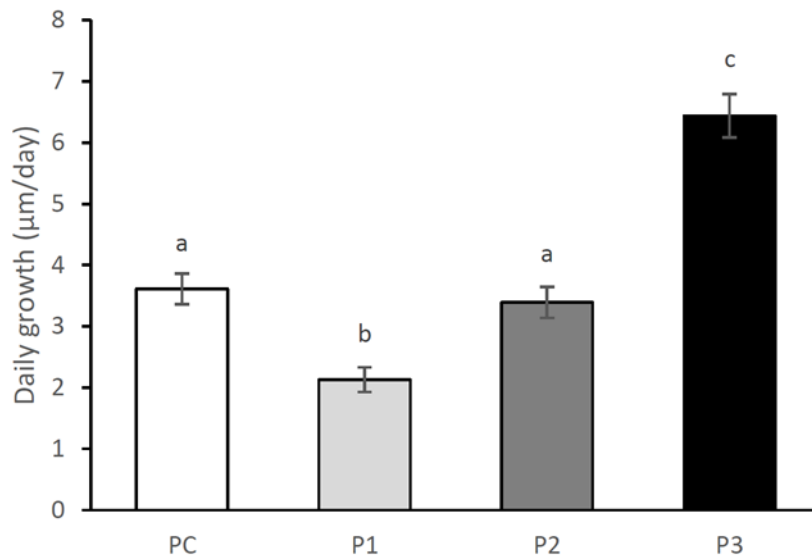


Figure 12 : Croissance journalière moyenne \pm erreur type ($\mu\text{m}/\text{jour}$) des larves exposées à des niveaux croissants de bruit de battage de pieux (PC, P1, P2 et P3). Seul l'effet des intensités sonores est présenté, car aucune interaction (alimentation x son) et l'effet de l'alimentation n'étaient significatifs dans le groupe de battage de pieux. Les groupes annotés avec la même lettre ne diffèrent pas significativement à $p\text{-perm} = 0,05$.

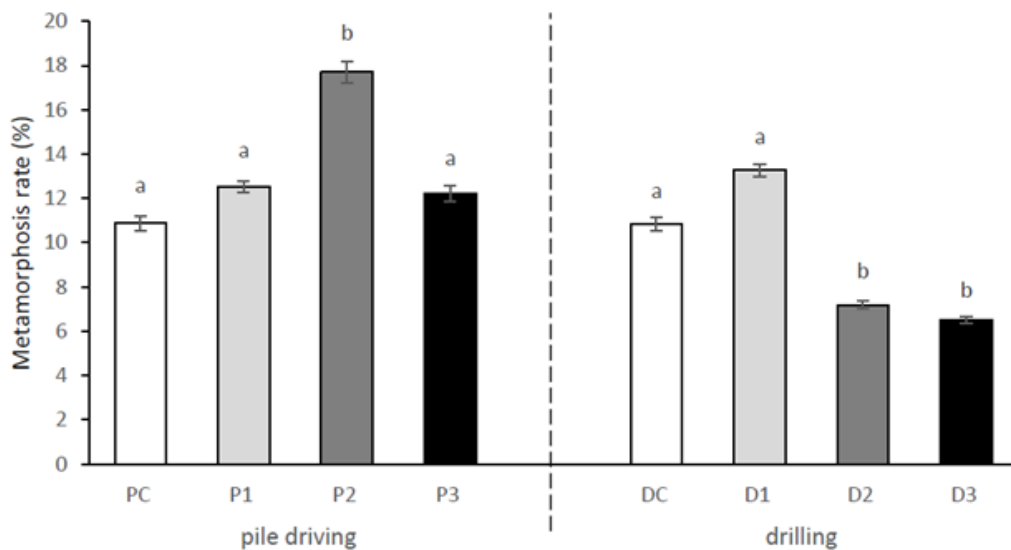


Figure 13 : Taux moyen de métamorphose \pm erreur type (%) des larves exposées aux différentes intensités de battage de pieux (PC, P1, P2 et P3) et de forage (DC, D1, D2 et D3) pour la fraction totale (rampants + nageurs). Seul l'effet des intensités sonores est présenté, car aucune interaction (alimentation x son) et l'effet de l'alimentation n'étaient significatifs. Les groupes annotés avec la même lettre ne diffèrent pas significativement à $p\text{-perm} = 0,05$.

Les effets contrastés entre les deux sons pourraient être dus à la différence temporelle entre le battage impulsif et le forage continu, à leurs rythmes d'émission (on:off) différents ou à leurs contenus fréquentiels qui ne sont pas tout à fait identiques.

Cet effet du son sur la métamorphose est conforme aux résultats d'autres études antérieures démontrant un impact positif ou négatif du son sur le règlement des stades d'invertébrés marins (Jolivet et al., 2016 ; Lillis et al., 2013 ; Wilkens et al., 2012). Ces modifications de la métamorphose peuvent entraîner des répercussions sur la suite du cycle de vie. En effet, si la

larve ne rencontre pas les conditions optimales à sa fixation, elle a la capacité de retarder sa métamorphose jusqu'à un certain point où ses réserves énergétiques sont trop basses et où elle se fixe en dernier recours, même dans un environnement défavorable (Gribben et al., 2006; Olivier et al., 2000; Tremblay et al., 2007). Ce concept écologique est appelé théorie de la larve «désespérée» (Knight-Jones, 1951; Lagarde et al., 2018; Pechenik, 1990; Toonen and Pawlik, 1994).

D'après ces résultats, le forage pourrait prolonger la phase pélagique et pousser les larves à un comportement «désespéré». A l'inverse, le battage de pieu pourrait induire la larve en erreur dans le choix de son site de fixation et compromettre ainsi ses chances de survie dans un milieu défavorable.

Cette étude a été publiée :

Gigot, M., Olivier, F., Cervello, G., Tremblay, R., Mathias, D., Meziane, T., Chauvaud, L., Bonnel, J., 2022. Pile driving and drilling underwater sounds impact the metamorphosis dynamics of *Pecten maximus* (L., 1758) larvae. *Marine Pollution Bulletin*, 191.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114969>

EFFETS MATERNELS DU BRUIT DE BATTAGE DE PIEUX SUR LE DEVELOPPEMENT DES PREMIERS STADES DE VIE DE *PECTEN MAXIMUS*

La seconde étude concerne les effets transgénérationnels du son : l'exposition d'un adulte à un stress peut influencer sa descendance (Bernardo, 1996).

ORIGINE DES COQUILLES

Des adultes ont été collectés par dragage le 26 novembre et le 6 décembre 2018, lorsque la maturation des gonades reprend faiblement (Paulet et al., 1995), sur les deux sites de prélèvement : Moulin Blanc et Lanvéoc.

EMISSION DE SONS

Les niveaux faibles, intermédiaires et intenses correspondent aux niveaux enregistrés sur le terrain à 78 000, 4000 et 170 m (perte de transmission = $15 \log(\text{distance})$) du système de battage (c'est-à-dire niveau de pression acoustique crête à crête (SPL_{pp}) = $147,6 \pm 2,5$; $167,1 \pm 2,4$; $187,6 \pm 2,4$ dB re $1 \mu\text{Pa}$ @ 1 m \pm erreur standard SE). Un haut-parleur sous-marin DNH Aqua-30™ (<https://www.dnh.no/speakers/aqua-30-365.aspx>) a été suspendu sous la surface au centre du réservoir et dirigé vers le bas.

DESIGN EXPERIMENTAL

À partir de début février et pendant 10 semaines, trois bassins de coquilles ont été exposés à un niveau croissant de bruit de battage de pieux pendant la gamétogenèse. Un quatrième bassin est resté sous condition de contrôle calme (Figure 14). Pour estimer l'effet potentiel du traitement sur l'alimentation et l'accumulation de réserves énergétiques, l'indice des glandes digestives (Lemaire et al., 2006) et l'indice musculaire (Narvarte, 2003) ont également été estimés à la fin de l'exposition sonore.

Une fois la fécondation réalisée, les larves ont été exposées au bruit de battage de pieux à l'aide du système Larvosonic. L'exposition a duré 4 jours. Des lots de 40 000 véligères (jeunes et vieux), 20 000 pédivéligères ou 10 000 post-larves ont été successivement introduits dans

chaque cylindre à respectivement 4, 13, 29 et 40 dpf. Le dispositif expérimental comprend huit systèmes « Larvosonic » répartis en deux salles (Figure 14). Dans chaque larvosonic, 3 cylindres étaient remplis de lots de larves provenant de parents exposés au niveau sonore témoin et intense (première salle) ou faible (deuxième salle). Dans les deux pièces, le son de battage de pieux a été émis aux mêmes 4 niveaux utilisés lors de l'exposition sonore parentale (témoin, faible, intermédiaire et intense) que le cycle sonore on:off fixé à 6:6h.

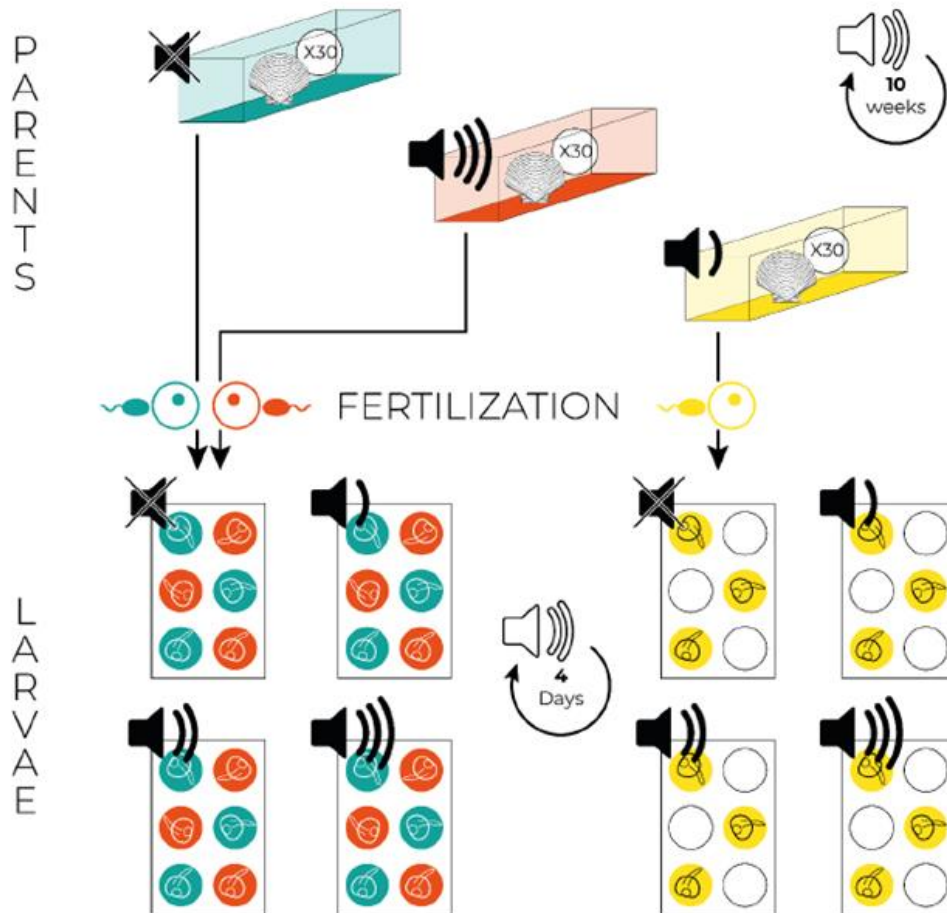


Figure 14 : Design expérimental. Des adultes de *Pecten maximus* ont été conditionnés pendant 2,5 mois de gamétogenèse en condition contrôle ou sous 3 niveaux croissants de bruit de battage (niveau faible, intermédiaire ou intense). Après le déclenchement de la ponte, leur progéniture a été répartie dans huit « systèmes Larvosonic » répartis dans deux salles dans chacune desquelles la même séquence de battage de pieux à 4 niveaux a été émise pendant 4 jours. Les parents exposés intermédiaires n'ont pas été incités à frayer en raison d'une ponte partielle pendant la maturation.

RESULTATS ET DISCUSSION

Mortalité : L'exposition au bruit de battage de pieux à différents niveaux pendant 2,5 mois n'a pas induit de surmortalité chez les adultes de *P. maximus*. Ce résultat diffère des travaux de Day et al., (2017) où une hausse de la mortalité avait été observé après une exposition de 191 à 213 dB re 1 μ Pa pendant 14 à 120 jour d'une autre espèce de pétoncle *Pecten fumatus*. Et pourtant le niveau d'émission est nettement plus élevé que celui appliqué par Gigot et al.

Succès reproducteur : Une diminution de la taille des gonades des adultes soumis au traitement sonore a été observé. Cette diminution de l'investissement maternel dans la reproduction n'a pas pour cause une réduction de l'alimentation comme le montre l'absence

de différence entre les contenus lipidiques des adultes du contrôle et des traitements sonores. L'augmentation du métabolisme causée par le stress acoustique pourrait être à l'origine de cette réduction de la maturation (Spiga et al., 2016).

Les adultes exposés à un faible niveau de son produisent moins d'œufs atrophiés, et leurs œufs montrent un plus haut taux d'éclosion. La stratégie maternelle mise en évidence par ces résultats pourrait être de produire moins de descendants mais de qualité supérieure. En effet, les larves résultantes possèdent de meilleures performances avant la métamorphose et grandissent et se métamorphosent plus rapidement. Ceci suggère une stratégie maternelle tournée vers la réduction de la phase pélagique (Podolsky, 2006).

Stade larvaire : L'effet maternel ne confère pas une adaptation stricte au son. Avant la métamorphose, l'exposition des parents à un faible niveau réduit la résistance des larves au son. L'exposition forte des parents permet d'augmenter les performances uniquement des larves exposées. La résistance au son conférée par l'effet maternel n'est alors avantageuse que dans un environnement sonore et pourrait représenter un coût évolutif dans une situation non stressante (Levinton et al., 2003).

Stade post-larve : Les effets sont moins significatifs ce qui laisse à penser que l'exposition maternelle agit surtout aux stades pré-métamorphiques et que la métamorphose remet à égalité les performances des différents lots de larves. Ces modulations de performances ne sont pas reliées à des variations du contenu lipidique et le mécanisme de transmission maternel reste donc inconnu.

De fortes et complexes interactions agissent entre l'exposition des adultes et celle des larves, et varient selon le stade et le niveau sonore. Compte tenu de l'importance des stades larvaires dans le renouvellement d'une population, ces résultats prouvent que l'impact du son peut se propager sur plusieurs générations. A travers la modulation de la taille et de la métamorphose, les effets maternels pourraient changer la sélectivité et les profils de dispersion larvaire.

TBM environnement

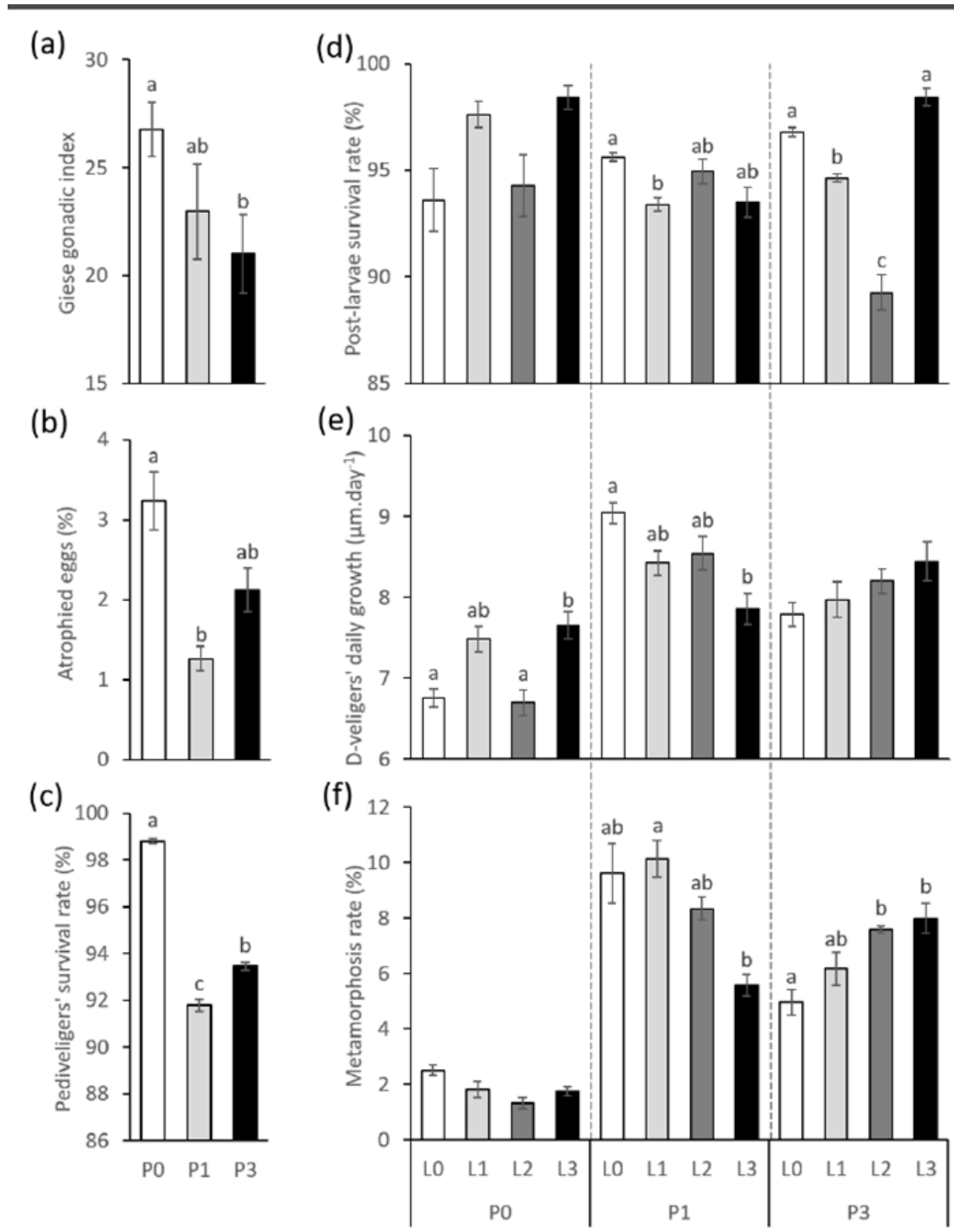


Figure 15 : Résultats des effets maternels de l'exposition au son (a) indice gonadique de Giese et (b) taux d'œufs atrophiés (en pourcentage) des adultes de *P. maximus* exposés à des niveaux croissants de battage de pieux (témoin P0, P1 faible, P3 intense). (c) taux de survie des larves pédivéligères de parents exposés (en pourcentage).

Effet de l'interaction de l'exposition adulte (P0, P1, P3) et larvaire (contrôle L0, faible L1, intermédiaire L2, intense L3) sur (d) le taux de survie des post-larves (en pourcentage), (e) la croissance quotidienne du D-véligère (en micromètres par jour) et (f) taux de métamorphose du pédivéligère (en pourcentage) (\pm erreur standard).

Les groupes annotés avec la même lettre ne diffèrent pas significativement à p -perm = 0,05. (N(A) = 10 pour P0 et P1, et 15 pour P3 ; N(B) = 23, 22 et 21 pour P0, P1 et P3 ; N(C) = 12 répétitions/traitement ; N(D) = 59, 52, 52, 50, 42, 42, 28, 39, 34, 40, 46, 41 respectivement pour la condition croisée de gauche à droite ; N(E et F) = 3 répétitions/condition croisée).

2.3 Impacts des champs magnétiques sur la coquille Saint Jacques – projet SPECIES

2.3.1 Fiche projet

Acronyme du projet	SPECIES
Nom du projet	Interactions des câbles sous-marins avec l'environnement et suivis associés
Type de projet	Projet France Energie Marine ANR-10-IEED-0006-17
Durée	44 mois 2017-2020
Partenaires	Ifremer, EDF, Centrale Nantes, RTE, Mappem Geophysics, TBM environnement, EDF renouvelables, MNHN 
Source	Taormina B., Quillien N., Lejart M., Carlier A., Desroy N., Laurans M., D'Eu J.-F., Reynaud M., Perignon Y., Erussard H. Derrien-Courtel S., Le Gal A., Derrien R., Jolivet A., Chauvaud S., Degret V., Saffroy D., Pagot J.-P. et Barillier A. Caractérisation des impacts potentiels des câbles électriques sous-marins associés aux projets d'énergies marines renouvelables. Plouzané : France Energies Marines Editions, 2020, 74 pages.

2.3.2 Synthèse de l'étude

Très peu de choses sont connues sur la magnétosensibilité des mollusques et leur utilité en particulier pour les bivalves. Dans un premier temps, des expérimentations en milieu contrôlé sont donc nécessaires pour définir si ces organismes perçoivent des variations de champs magnétiques et si ces variations induisent un stress sur ces animaux. L'évaluation de cet impact se fera en milieu contrôlé par la mesure et l'interprétation de son comportement grâce à l'accélérométrie. Elle nécessitera le développement et la réalisation d'une structure permettant la création d'un champ électromagnétique.

MATERIEL ET METHODE

ORIGINE DES COQUILLES

Les coquilles saint Jacques (*Pecten maximus*) ont toutes été pêchées en plongée à Roscanvel en rade de Brest (Taille: 94 ± 8 mm) et acclimatées en aquarium un mois avant les expérimentations. A l'issue de la période d'acclimatation, de nombreuses coquilles se sont retrouvées enfouies dans le sédiment, signe assez représentatif d'une bonne acclimatation aux conditions.

SUIVI DE LEUR COMPORTEMENT

Toutes les coquilles ont été équipés d'un accéléromètre fixé à l'aide d'un velcro permettant de suivre leur mouvement à une fréquence de 25 Hz (Figure 16). L'extraction et le traitement des données d'accélérométrie est conforme au protocole détaillé dans Coquereau *et al.* (2016). Le comportement est alors décrit par 4 paramètres : le nombre de mouvements réalisés, la durée de fermeture (s), l'accélération de la fermeture (g) et l'amplitude de la fermeture (°).



Figure 16 : Fixation des accéléromètres sur les coquilles Saint Jacques

EMISSION DE CHAMPS MAGNETIQUES

Le dispositif expérimental a été conçu par une collaboration TBM – MAPPEM Geophysics. Il consiste en deux grandes bobines de Helmholtz carrée de 1,5 m x 1,5 m, chacune constituée de 200 tours de fil de cuivre empilés verticalement (section de 2.5 mm², longueur totale de 1200 m). Les bobines sont séparées de 75 cm permettant de créer au centre d'une zone de champs homogène correspondant à la taille de l'aquarium expérimental (Figure 17). Le champ magnétique a été mesuré par un magnétomètre. Lorsque la bobine a été éteinte, le champ géomagnétique à l'intérieur du réservoir était de 47 μ T.

Deux valeurs ont été sélectionnées :

- 80 μ T : valeur moyenne enregistrée au-dessus de câbles enterrés à 1,5 m de profondeur ;
- 600 μ T : intensité magnétique coïncidant avec les valeurs enregistrées au contact du câble (Figure 17).

TBM environnement

Pour chaque condition, une cartographie du champ entre les bobines a été établie ainsi que dans les aquariums d'acclimatation et vers le poste de travail pour vérifier que ces deux zones restaient à des valeurs de champs magnétiques terrestres.

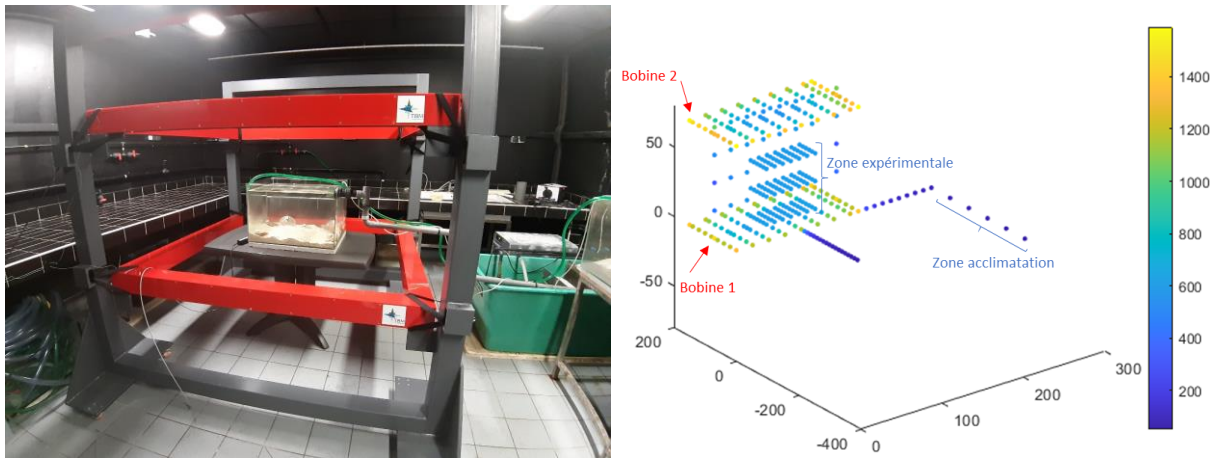


Figure 17 : Structure expérimentale permettant de créer un champ magnétique (à gauche, TBM environnement) et cartographie du champs produit à 600 μT (à droite).

Les champs ont été émis soit en courant continu (DC) soit en courant alternatif (AC).

DESIGN EXPERIMENTAL

Trois groupes de coquilles ont été constituées (Tableau 1). Pour les groupes 1 et 2, chaque journée d'exposition est organisée de la façon suivante : i) Une séquence impulsionnelle entre 10h et 10h30 constituée de : 5 x 1 min d'exposition séparées de 5 min de repos ; ii) Une séquence intermittente entre 11 h et 16h constituée de : 3 x 1h d'exposition séparées d'1 h de repos. Au cours de la dernière exposition, les coquilles sont également nourrit à l'aide de T-iso.

Pour le 3^{ème} groupe, les coquilles ont été exposées chaque jour pendant 2 heures avant d'être mise individuellement en présence d'une étoile de mer (*Marthasterias glacialis*, Figure 18).

Tableau 1 : Protocole expérimental pour les 3 groupes de coquilles

	Entrée dans le bac	1ère exposition		2ème exposition		Sortie bac	Objectif
		Niveau	date	Niveau	date		
Groupe 1	18-avr.	80 μT DC	24, 25, 26 avril	600 μT DC	29, 30 avril et 1er mai	03-mai	Suivi comportement
Groupe 2	3-mai	600 μT DC	6, 7, 8 mai	80 μT DC	13, 14, 15 mai	17-mai	Suivi comportement
Groupe 3	17-mai	600 μT DC	20, 21, 22 mai	600 μT AC	27, 28, 29 mai	03-juin	Comportement + réponse prédateur

TBM environnement

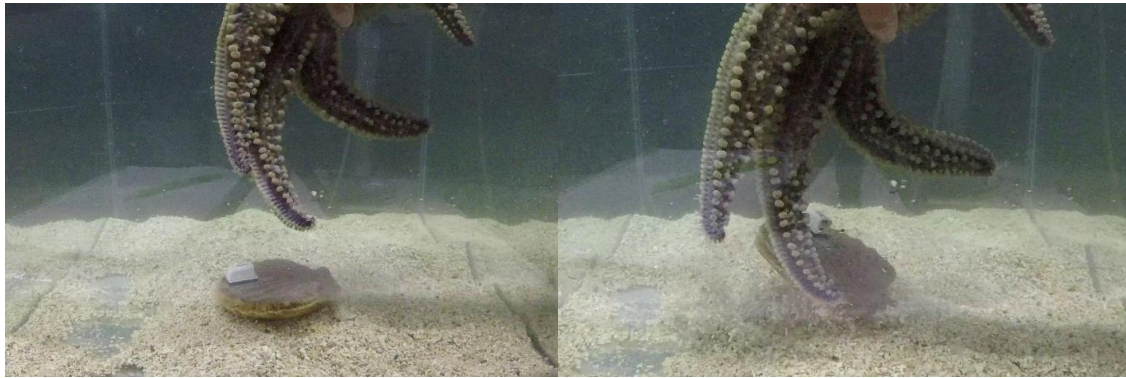


Figure 18 : Exemple de réponse d'une coquille Saint Jacques à l'approche d'un prédateur, l'étoile de mer (*Marthasterias glacialis*)

RESULTATS ET DISCUSSION

Impact sur l'activité des coquilles : Dès la deuxième journée d'exposition une très nette diminution de l'activité est observée quelle que soit la valeur du champ appliquée. Cette activité minimum se poursuit ensuite tout au long de l'expérimentation (Figure 19). Cependant, cette inhibition de l'activité n'est pas permanente car l'activité nocturne est moins impactée et elle peut être réactivée lors de la distribution de nourriture.

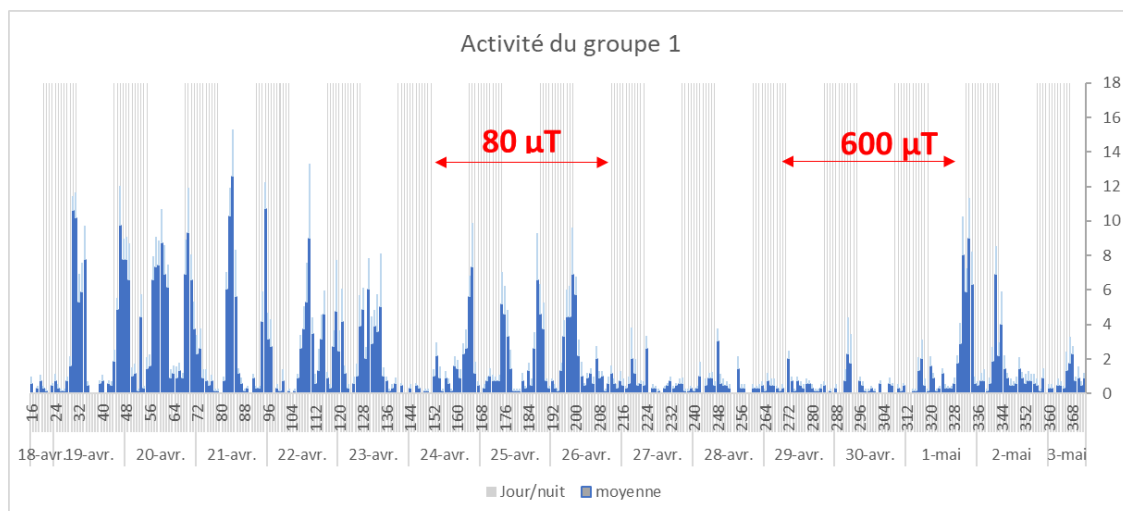


Figure 19 : Nombre de mouvements réalisés par heure moyenné sur les 7 individus du 1^{er} groupe.

Impact sur la réponse à un prédateur : Les paramètres liés au temps de réponse à l'exposition (durée, amplitude, accélération) ne diffèrent pas entre le contrôle, la réponse DC et la réponse AC ni suivant le passé des coquilles (ANOVA deux facteurs, $p > 0.05$).

Concernant les paramètres liés à la réponse de la coquille, seul le nombre de mouvements réalisés diffèrent significativement d'une part entre le contrôle et le traitement à 600 μT AC (ANOVA deux facteurs, $P = 0.006$) et d'autre part entre les coquilles dites naïves (jamais manipulées auparavant) et les coquilles du groupe 2 (qui viennent de subir 3 semaines d'expérimentation) (ANOVA 2 facteurs, $P = 0.045$) (Figure 20).

TBM environnement

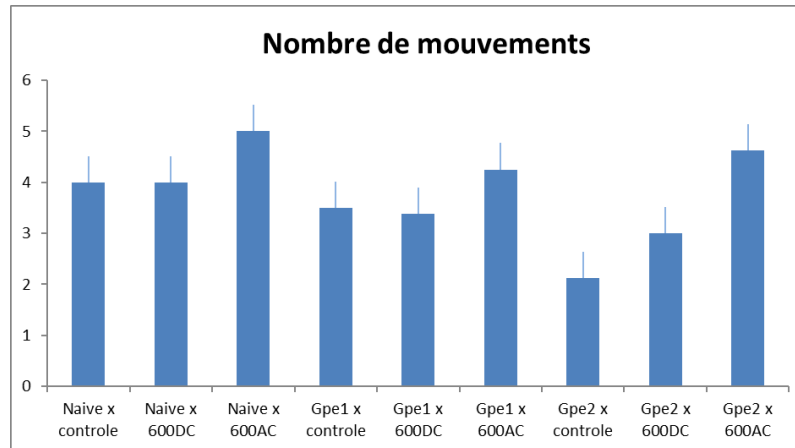


Figure 20 : Nombre de mouvements réalisés en réponse à l'approche d'une étoile de mer.

La coquille Saint Jacques est un animal sessile qui n'est pas amené à rencontrer de fortes modifications des champs magnétiques environnants du fait des faibles distances parcourues. De plus, la magnétoréception et son utilité chez les pectinidés en général ne sont pas démontrée, au contraire il semble que ce sont plutôt les variations de lumières qui seraient utilisées pour leur orientation. La coquille Saint Jacques dispose d'un système visuel étendu et complexe composé de deux rétines (distale, proximale), chacune contenant un type structurel différent de photorécepteur avec une réponse physiologique différente. A ce jour, les mécanismes impliqués dans la magnétosensibilité ne sont pas clairement définis et deux principales hypothèses sont discutées (Lohmann et al. , 2014). Une des hypothèses attribue une double fonction aux photorécepteurs du système visuel, qui feraient également office de magnétorécepteurs (Lohmann et al., 2014). Chez les mollusques, les connaissances fondamentales sur la magnétosensibilité sont fortement limitées. Aussi, très peu de travaux ont évalué l'impact des champs magnétiques artificiels sur ce groupe.

Ces résultats sont tout de même à analyser avec précaution car peuvent être en interaction avec à un effet des conditions expérimentale et le stress associé sur l'activité des coquilles. Malgré les précautions prises au cours de ces expériences (isolement de la zone expérimentale, acclimatation d'un mois en aquarium), le groupe 3 montre que le passé des coquilles et la durée des expérimentations peuvent également impacter leurs réponses.

2.4 Le traitement de la turbidité et de la remise en suspension

Parmi les effets possibles des travaux des parcs éoliens offshore et leur raccordement, la remise en suspension des sédiments peut également impacter la coquille Saint Jacques. Szostek et al. ont publié en 2013 une étude analysant les effets d'une augmentation de la turbidité sur la croissance et le comportement de coquilles Saint Jacques d'un an. Les principaux résultats sont rappelés ci-dessous.

ORIGINE DES COQUILLES

Les coquilles *Pecten maximus* d'un an ($29,5 \pm 2,26$ mm) ont été capturés à Mulroy Bay, nord-ouest de l'Irlande. Elles ont été acclimatées en aquarium sur une durée de deux semaines.

DESIGN EXPERIMENTAL

Les coquilles sont installées dans des aquariums circulaires, équipées d'un valvomètre pour le suivi de leur comportement (Wilson et al. 2005, Figure 21).

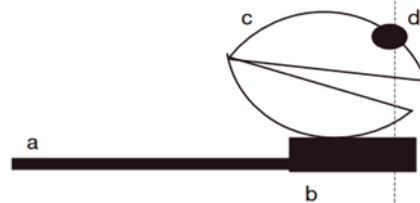


Figure 21 : Mise en place d'un valvomètre sur une coquille Saint Jacques : (a) câble étanche ; (b) Capteur à effet Hall enfoncé dans de la résine époxy ; (c) pédoncle; (d) aimant. La ligne pointillée indique la position de l'aimant, directement au-dessus du capteur Hall

Pour chaque condition expérimentale, huit coquilles instrumentées sont utilisées et positionnées dans le sens du courant (leur orientation naturelle vis-à-vis du courant, Eckman et al. 1989, Bricelj & Shumway 1991).

Des sédiments fins de 0,1 à 0,3 mm sont utilisés pour les différentes conditions de turbidité. Trois lots sont créés : pas de matières en suspension (témoin), une concentration faible (50 à 100 mg l⁻¹, moyenne $66,1$ mg l⁻¹) et une concentration élevée (200 à 700 mg l⁻¹, moyenne $432,8$ mg l⁻¹). La faible charge est similaire à celle que l'on peut trouver dans des conditions de vent supérieures à la moyenne ou à quelques centaines de mètres d'un site d'extraction d'agrégats (Last et al. 2011), et la charge élevée est similaire à celle qui peut être expérimentée à proximité (dans ~ 50 m) d'une drague à pétoncles passante (Black & Parry 1994). Les coquilles restent à ces turbidités pendant 18 jours.

RESULTATS ET DISCUSSION

Cette étude démontre que le comportement et la croissance de *Pecten maximus* sont affectés par des niveaux élevés de turbidité. Le nombre de claquements était significativement plus élevé dans des conditions de turbidité élevée (200 à 700 mg l⁻¹), mais il n'y avait pas de différence significative entre les conditions de contrôle et de faible turbidité (50 à 100 mg l⁻¹). Moins de 1 % du temps a été passé avec la coquille fermée, reflétant des fermetures rapides de la coquille associées au dégagement du manteau (Wilkens 1991).

TBM environnement

Ces résultats semblent indiquer que *P. maximus* est capable de nettoyer le manteau des sédiments en excès avec de nombreux mouvements de coquille peu profonds, sans nécessiter une fermeture complète de la coquille.

Ce niveau d'activité plus élevé confère un coût énergétique, en raison du compromis entre l'utilisation d'énergie pour les processus métaboliques et la croissance somatique, et a donc des implications pour la forme physique (par exemple, la croissance et l'investissement reproductif). Des turbidité élevées affectent l'efficacité de l'alimentation chez *Pecten maximus* (Gibson 1956); une énergie supplémentaire est nécessaire pour des taux de filtration des particules plus élevés et une production de pseudofèces sous exposition à des turbidités élevées.

Ce coût énergétique est confirmé par des taux de croissance significativement plus faibles observés dans les deux traitements de turbidité et l'augmentation significative de la fréquence des mouvements de la coquille (changements d'angle d'ouverture $\geq 10^\circ$) sous des niveaux élevés de SPM.

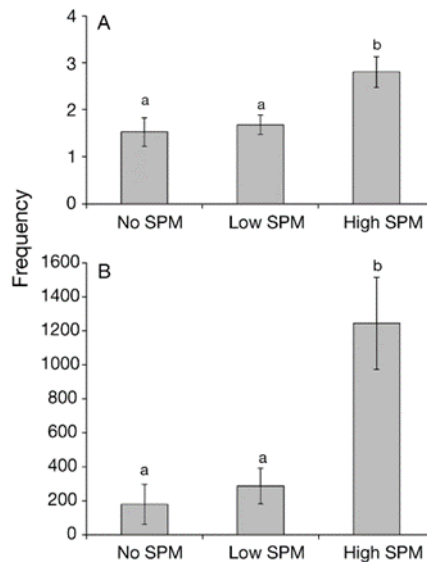


Figure 22 : (A) Fréquence moyenne des "claquements" de coquilles (fermeture <10 % de l'angle) par période de 14 h, sur 7 jours. (B) Fréquence moyenne des occurrences d'angle d'ouverture de coquille < 20° par période de 14 h, sur 7 j. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements. SPM :particules en suspension

Bien que la survie à long terme des juvéniles de *Pecten maximus* soumis à une turbidité élevée n'ait pas été évaluée, toutes les coquilles étaient encore vivantes 20 jours après l'expérience.

3 SYNTHÈSE

La coquille Saint Jacques est un organisme utilisé comme sentinelle de l'environnement car il est possible à travers l'étude de sa croissance, son comportement caractériser une perturbation anthropique. L'implantation de parcs éoliens en mer à proximité des gisements de coquilles Saint-Jacques peuvent avoir des effets sur ces populations par notamment une remise en suspension des sédiments lors des différentes phases de travaux, le bruit généré par les différentes activités et phase du chantier (les navires, le battage de pieu, le forage ou l'ensouillage des câbles), et les champs magnétiques émis par ces câbles.

Pour analyser ces effets sur la coquilles deux types d'expérimentations peuvent être menées : en milieu contrôlé ou en milieu naturel. Dans ce rapport, nous avons relaté les études en milieu contrôlé les plus récentes relatives à ces effets.

Pour les effets du bruit, la thèse de Mathilde Gigot sur les stades larvaires et le projet Benthoscope II sur les stades adultes mettent en évidence :

- Un retardement de la métamorphose sous l'effet du forage contrairement à une accélération de la métamorphose sous l'effet du battage ;
- Des réponses variables selon les stades larvaires et le niveau d'exposition en phase de reproduction et en phase larvaire ;
- Une sensibilité acoustique entre 50 et 500 Hz des adultes ;
- La réalisation de mouvements lents et de faibles amplitudes lors de bruits continus (type navire) et de mouvements plus rapides lors de bruits impulsifs (type battage de pieu).

Pour les effets des champs magnétique, le projet SPECIES a mis en évidence une diminution de l'activité quelle que soit la valeur du champ appliquée. Cependant, cette inhibition de l'activité n'est pas permanente car l'activité nocturne est moins impactée et elle peut être réactivée lors de la distribution de nourriture.

Enfin pour les effets de la turbidité, Szostek et al. (2013) mettent en évidence une augmentation de l'activité lors de fortes turbidités afin de nettoyer leurs branchies ce qui a un coût énergétique visible sur leur croissance.

Ces expérimentations en milieu contrôlé apportent un début de réponse aux effets potentiels de l'implantation des parcs éoliens en mer sur la coquille Saint Jacques. Ces résultats sont cependant à considérer avec précaution car notamment avec les adultes, un effet de stress / d'acclimatation des individus peut amplifier ou modifier leur réponse. De même les conditions de sons ou de champs magnétiques recrées en aquarium ne sont jamais totalement conformes à la réalité. C'est pourquoi ces résultats doivent être validés et complétés par des observations en milieu naturel, sous conditions réelles.

4 REFERENCES

- Aguilar de Soto, N., Delorme, N., Atkins, J., Howard, S., Williams, J., & Johnson, M. (2013). Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *Scientific Reports*, 3(1), 2831. <https://doi.org/10.1038/srep02831>
- Bernardo, J. (1996). Maternal Effects in Animal Ecology. *American Zoologist*, 36(2), 83-105. <https://doi.org/10.1093/icb/36.2.83>
- Black KP, Parry GD (1994) Sediment transport rates and sediment disturbance due to scallop dredging in Port Phillip Bay. *Mem Queensl Mus* 36:327–341
- Bricelj VM, Shumway S (1991) Physiology: energy acquisition and utilization. In: Shumway SE (ed) *Scallops: biology, ecology and aquaculture*. Elsevier, Amsterdam, p 305–346
- Chauvaud, L., 1998. La coquille Saint-Jacques en rade de Brest : un modèle biologique d'étude des réponses de la faune benthique aux fluctuations de l'environnement (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Occidentale).
- Chauvaud, L., Thouzeau, G. and Paulet, Y.M., 1998. Effects of environmental factors on the daily growth rate of *Pecten maximus* juveniles in the Bay of Brest (France). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 227(1), pp.83-111.
- Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewska, G., Staines, G., Gill, A.B., Hutchison, I., O'Hagan, A., Simas, T., Bald, J., Sparling, C., Wood, J., Masden, E., 2016. Annex IV 2016. State of the Science Report. Environmental effect of marine renewable energy development around the world. Pacific Northwest National Laboratory.
- Coquereau L, Jolivet A, Hégaret H, Chauvaud L (2016) Short-term behavioural responses of the great Scallop *Pecten maximus* exposed to the toxic alga *Alexandrium minutum* measured by accelerometry and Passive Acoustics. *PLoS ONE* 11(8): e0160935.
- Day, R. D., McCauley, R. D., Fitzgibbon, Q. P., Hartmann, K., & Semmens, J. M. (2017). Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(40), E8537-E8546. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700564114>
- Eckman JE, Peterson CH, Cahalan JA (1989) Effects of flow speed, turbulence and orientation on growth of juvenile bay scallops *Argopecten irradians concentricus* (Say). *J Exp Mar Biol Ecol* 132:123–140
- Gibson FA (1956) Escallops (*Pecten maximus* L.) in Irish waters. *Sci Proc R Dublin Soc* 27:253–271
- Gigot, M., Olivier, F., Cervello, G., Tremblay, R., Mathias, D., Meziane, T., Chauvaud, L. & Bonnel, J. (2023). Pile driving and drilling underwater sounds impact the metamorphosis dynamics of *Pecten maximus* (L., 1758) larvae. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114969.
- Gribben, P. E., Marshall, D. J., & Steinberg, P. D. (2006). Less inhibited with age? Larval age modifies responses to natural settlement inhibitors. *Biofouling*, 22(2), 101-106. <https://doi.org/10.1080/08927010600562583>

- Jolivet, A., Asplin, L., Strand, Ø., Thébault, J. and Chauvaud, L., 2015. Coastal upwelling in Norway recorded in Great Scallop shells. *Limnology and Oceanography*, 60(4), pp.1265-1275.
- Jolivet, A., Tremblay, R., Olivier, F., Gervaise, C., Sonier, R., Genard, B., & Chauvaud, L. (2016). Validation of trophic and anthropic underwater noise as settlement trigger in blue mussels. *Scientific reports*, 6, 33829.
- Knight-Jones, E. (1951). Gregariousness and some other aspects of the setting behaviour of *Spirorbis*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 30(2), 201-222.
- Lagarde, F., Richard, M., Bec, B., Roques, C., Mortreux, S., Bernard, I., Chiantella, C., Messiaen, G., Nadalini, J., Hori, M., Hamaguchi, M., Pouvreau, S., Roque d'Orbcastel, E., & Tremblay, R. (2018). Trophic environments influence size at metamorphosis and recruitment performance of Pacific oysters. *Marine Ecology Progress Series*, 602, 135-153. <https://doi.org/10.3354/meps12666>
- Last KS, Hendrick VJ, Beveridge CM, Davies AJ (2011) Measuring the effects of suspended particulate matter and smothering on the behaviour, growth and survival of key species found in areas associated with aggregate dredging. Marine Aggregate Levy Sustainability Fund, Project MEPF 08/P76. www.cefas.defra.gov.uk/media/469297/mepf%2008-p76%20final%20report.pdf
- Lemaire, N., Pellerin, J., Fournier, M., Girault, L., Tamigneaux, E., Cartier, S., & Pelletier, E. (2006). Seasonal variations of physiological parameters in the blue mussel *Mytilus* spp. From farm sites of eastern Quebec. *Aquaculture*, 261(2), 729-751. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.017>
- Levinton, J. S., Suatoni, E., Wallace, W., Junkins, R., Kelaher, B., & Allen, B. J. (2003). Rapid loss of genetically based resistance to metals after the cleanup of a Superfund site. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(17), 9889-9891. <https://doi.org/10.1073/pnas.1731446100>
- Lillis, A., Eggleston, D. B., & Bohnenstiehl, D. R. (2013). Oyster Larvae Settle in Response to Habitat-Associated Underwater Sounds. *PLoS ONE*, 8(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079337>
- Lillis, A., Bohnenstiehl, D., Peters, J. W., & Eggleston, D. (2016). Variation in habitat soundscape characteristics influences settlement of a reef-building coral. *PeerJ*, 4. <https://doi.org/10.7717/peerj.2557>
- Lohmann, K. J., Ernst, D. A., Derby, C. D., & Thiel, M. (2014). The geomagnetic sense of crustaceans and its use in orientation and navigation. *Crustacean Nervous Systems and Control of Behavior*, 321-336.
- Lorrain, A., Paulet, Y.M., Chauvaud, L., Savoye, N., Nézan, E. et al., 2000. Growth anomalies in *Pecten maximus* from coastal waters (Bay of Brest, France): relationship with diatom blooms. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 80(04), pp.667-673.
- Narvarte, M. A. (2003). Growth and survival of the tehuelche scallop *Aequipecten tehuelchus* in culture. *Aquaculture*, 216, 127-142. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00430-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00430-1)

- Olivier, F., Tremblay, R., Bourget, E., & Rittschof, D. (2000). Barnacle settlement : Field experiments on the influence of larval supply, tidal level, biofilm quality and age on *Balanus amphitrite* cyprids. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 185-204. <https://doi.org/10.3354/meps199185>
- Olivier, F., Gigot, M., Mathias, D., Jezequel, Y., Meziane, T., l'Her, C., Chauvaud L., Bonnel, J. (2023). Assessing the impacts of anthropogenic sounds on early stages of benthic invertebrates: The "Larvosonic system". *Limnology and Oceanography: Methods*, 21(2), 53-68.
- Paulet, Y.-M., Bekhadra, F., Devauchelle, N., Donval, A., & Dorange, G. (1995). Seasonal cycles, reproduction and oocyte quality in *Pecten maximus* from the Bay of Brest. 3^{ème} rencontres scientifiques internationales, Brest.
- Pechenik, J. A. (1990). Delayed metamorphosis by larvae of benthic marine invertebrates : Does it occur? Is there a price to pay? *Ophelia*, 32(1-2), 63-94. <https://doi.org/10.1080/00785236.1990.10422025>
- Podolsky, R. D. (2006). Integrating function across marine life cycles. *Integrative and Comparative Biology*, 46(5), 577-586. <https://doi.org/10.1093/icb/icl026>
- Robert Rene, Miner Philippe, Nicolas Jean-Louis, Mazuret Michel, Connan Jean-Paul (1995). Etudes sur les mortalités larvaires de la coquille st Jacques *Pecten maximus* en éclosérie. RI/DRV 95-15 RA. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1568/>
- 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.
- Spiga, I., Caldwell, G. S., & Bruintjes, R. (2016). Influence of Pile Driving on the Clearance Rate of the Blue Mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 27. <https://doi.org/10.1121/2.0000277>
- Szostek, C. L., Davies, A. J., & Hinz, H. 2013. Effects of elevated levels of suspended particulate matter and burial on juvenile king scallops *Pecten maximus*. *Marine Ecology Progress Series*, 474, 155-165.
- Toonen, R. J., & Pawlik, J. R. (1994). Foundations of gregariousness. *Nature*, 370, 511-512.
- Tremblay, R., Olivier, F., Bourget, E., & Rittschof, D. (2007). Physiological condition of *Balanus amphitrite* cyprid larvae determines habitat selection success. *Marine Ecology Progress Series*, 340, 1-8. <https://doi.org/10.3354/meps340001>
- Wilkins LA (1991) Neurobiology and behaviour of the scallop. In: Shumway SE (ed) *Scallops: biology, ecology and aquaculture*. Elsevier, Amsterdam, p 429-469
- Wilkins, S. L., Stanley, J. A., & Jeffs, A. G. (2012). Induction of settlement in mussel (*Perna canaliculus*) larvae by vessel noise. *Biofouling*, 28(1), 65-72. <https://doi.org/10.1080/08927014.2011.651717>
- Zhadan, P. M. (2005). Directional sensitivity of the Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* and Swift scallop *Chlamys swifti* to water-borne vibrations. *Russian Journal of Marine Biology*, 31(1), 28-35.

TBM environnement

Siège social :

2 rue de Suède Bloc III Porte Océane - 56400 AURAY

Tel 02.97.56.27.76. - Fax 02.97.29.18.89.

contact@tbm-environnement.com

www.tbm-environnement.com

