

# CARACTÉRISATION DES IMPACTS POTENTIELS DES CÂBLES ÉLECTRIQUES SOUS-MARINS ASSOCIÉS AUX PROJETS D'ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES

Bilan et perspectives du projet SPECIES (2017-2020)



FRANCE  
ENERGIES  
MARINES

Editions





# CARACTÉRISATION DES IMPACTS POTENTIELS DES CÂBLES ÉLECTRIQUES SOUS-MARINS ASSOCIÉS AUX PROJETS D'ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES

## AUTEURS :

Bastien Taormina, Nolwenn Quillien, Morgane Lejart, **France Energies Marines**  
Antoine Carlier, Nicolas Desroy, Martial Laurans, **Ifremer**  
Jean-François D'Eu, **MAPPem Geophysics**  
Marine Reynaud, Yves Perignon, Hélène Erussard, **Ecole Centrale de Nantes**  
Sandrine Derrien-Courtel, Aodren Le Gal, René Derrien, **Muséum National d'Histoire Naturelle**  
Aurélie Jolivet, Sylvain Chauvaud, **TBM Environnement**  
Viviane Degret, Damien Saffroy, **RTE**  
Jean-Philippe Pagot, Agnès Barillier, **EDF Renouvelables**

Tous droits réservés.

Les textes de ce rapport de synthèse sont la propriété des partenaires du projet SPECIES (Ecole Centrale de Nantes, EDF, EDF Renouvelables, France Energies Marines, Ifremer, MAPPem Geophysics, Museum National d'Histoire Naturelle, RTE, TBM Environnement). Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux (sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur. Ils restent la propriété des partenaires du projet SPECIES et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable des partenaires du projet SPECIES.

Citer le document comme ci-dessous :

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.

Edition : Décembre 2020

Photo couverture : Colonisation par des laminaires du câble de raccordement du site d'essais de l'hydrolienne SABELLA D10, dans le Fromeur © Olivier Dugornay, Ifremer

Dépôt légal à parution

Conception graphique : halynea.com



# Table des matières

	Page
Liste des figures	6
Liste des tableaux	9
Préface	11
<b>1 - Effets générés par les câbles électriques sous-marins</b>	<b>12</b>
<b>2 - Présentation des sites d'étude</b>	<b>15</b>
<b>3 - Résultats du projet</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Mesure des effets physiques</b> .....	<b>20</b>
• <b>Fiche 1</b> Outils de mesure des champs électromagnétiques .....	20
• <b>Fiche 2</b> Mesures mobiles des champs électromagnétiques .....	22
• <b>Fiche 3</b> Mesures fixes des champs électromagnétiques .....	24
• <b>Fiche 4</b> Effet des câbles électriques sous-marins sur la température .....	26
<b>3.2 Evaluation <i>in situ</i> des impacts potentiels sur le benthos</b> .....	<b>30</b>
• <b>Fiche 5</b> Méthodes de suivi des communautés benthiques subtidales à proximité des câbles .....	30
• <b>Fiche 6</b> Suivi des communautés épibenthiques associées aux structures de protection des câbles .....	32
• <b>Fiche 7</b> Suivi de la mégafaune benthique associée aux structures de protection des câbles .....	34
• <b>Fiche 8</b> Suivi de la mégafaune benthique associée aux structures de raccordement d'une éolienne flottante .....	36
• <b>Fiche 9</b> Evaluation de l'effet réserve associé à la présence d'un corridor de protection.....	38
• <b>Fiche 10</b> Evaluation de l'impact des câbles électriques sur les communautés benthiques adjacentes .....	40
<b>3.3 Evaluation en laboratoire des impacts potentiels sur le benthos</b> .....	<b>42</b>
• <b>Fiche 11</b> Méthodes d'étude expérimentale des réponses d'organismes benthiques à des champs magnétiques artificiels .....	42
• <b>Fiche 12</b> Etude de l'impact de champs magnétiques artificiels sur le homard européen ..	44
• <b>Fiche 13</b> Etude de l'impact de champs magnétiques artificiels sur la coquille Saint-Jacques .....	48
<b>4 - Retour d'expérience</b>	<b>52</b>
<b>5 - Bilan du projet</b>	<b>58</b>
<b>6 - Perspectives</b>	<b>64</b>
<b>7 - Acronymes, abréviations et définitions</b>	<b>68</b>
<b>8 - Bibliographie</b>	<b>69</b>

## Liste des figures

Page

Fig. 1	• Principales techniques d'installation des câbles électriques sous-marins .....	12
Fig. 2	• Accumulation de sable coquillier le long du câble de raccordement du site d'essais de Paimpol-Bréhat .....	13
Fig. 3	• Distribution générale de certaines espèces d'invertébrés sur les fonds marins, et intensités théoriques des champs magnétiques émis par des câbles de 225 kV ensouillés et non ensouillés, alimentés avec un courant électrique de 1000 A.....	14
Fig. 4	• Localisation des cinq sites d'étude .....	15
Fig. 5	• Aperçu de l'outil PASSEM sur le pont avant déploiement .....	20
Fig. 6	• Dipôles de mesure électrique de l'outil PASSEM .....	20
Fig. 7	• Aperçu de l'outil STATEM avant déploiement et posé sur le fond .....	21
Fig. 8	• Positions des transects effectués avec l'outil PASSEM pour mesurer les champs électromagnétiques émis par les câbles de l'interconnexion France-Angleterre IFA2000 .....	22
Fig. 9	• Positions des profils et stations prévues initialement pour mesurer les champs électromagnétiques avec l'outil PASSEM, au niveau de la connexion Jersey-Cotentin comprenant les câbles N1, N2 et N3 .....	22
Fig. 10	• Champs magnétiques observés sur le site d'IFA2000, permettant de voir les signaux magnétiques des deux câbles, et spectrogrammes des signaux électriques mesurés par les 4 dipôles de l'outil PASSEM.....	23
Fig. 11	• Champs magnétiques observés sur le site de Jersey, permettant de voir les signaux magnétiques des deux câbles, et spectrogrammes des signaux électriques mesurés par les 4 dipôles de l'outil PASSEM.....	23
Fig. 12	• Localisation de la station S1 niveau de la connexion Jersey-Cotentin comprenant les câbles N1, N2 et N3 et positionnement du dispositif STATEM par rapport au câble N1 .....	24
Fig. 13	• Schéma représentant la position du dispositif STATEM par rapport au hub de connexion du site d'essais du SEM-REV .....	24
Fig. 14	• Intensité du champ magnétique mesuré et puissance électrique transitant dans le câble N1 entre le 25 et le 29 juin 2019 .....	25
Fig. 15	• Champ électrique mesuré et puissance transitant dans le câble N1 .....	25
Fig. 16	• Composantes 50, 100, 150, 200, 250 Hz du champ magnétique total enregistré durant 17h et intensité du courant électrique dans le câble .....	25
Fig. 17	• Composantes 50, 100, 150, 200, 250 Hz du champ électrique enregistré par le dipôle1 et intensité du courant dans le câble .....	25
Fig. 18	• Exemples de sondes de température installées sur des coques de protection en fonte ou directement à la surface d'un câble nu .....	26
Fig. 19	• Température mesurée toutes les heures du 25 au 29 juin 2019 à la surface des câbles N1 et N2 et sur une station témoin à proximité des deux câbles, et puissance transitant dans les câbles N1 et N2 aux mêmes dates .....	27
Fig. 20	• Ecart moyen absolu entre les températures témoins et les températures à la surface des câbles électriques mesurées toutes les heures du 12/09/2019 au 07/02/2020 .....	27

Fig. 21	• Température mesurée toutes les heures du 28 octobre au 4 novembre 2019 à la surface du câble d'export, à la surface de l'ombilical de Floatgen, et sur une station témoin à proximité des deux câbles, puissance transitant dans les deux câbles électriques aux mêmes dates, hauteur d'eau aux mêmes dates ....	28
Fig. 22	• Echantillonnage de la macrofaune benthique par l'utilisation d'une suceuse sous-marine après grattage .....	30
Fig. 23	• Benne Van-Veen ouverte sur le pont d'un navire .....	30
Fig. 24	• Prise de photo sous-marine en plongée sur le site de Paimpol-Bréhat .....	31
Fig. 25	• Vue d'ensemble d'un des sites de suivi où sont visibles le câble protégé par une coque en fonte et un matelas de béton stabilisateur .....	32
Fig. 26	• Diagramme conceptuel de la succession écologique observée sur les structures artificielles du site de Paimpol-Bréhat .....	32
Fig. 27	• Cadrage multidimensionnel non-métrique des communautés épibenthiques basé sur la similarité de Bray-Curtis entre les images .....	33
Fig. 28	• Principales espèces de mégafaune mobile trouvant refuge dans les cavités des matelas de béton .....	34
Fig. 29	• Dynamique de colonisation des espèces suivies entre juin 2015 et septembre 2019 sur les matelas visités à chaque campagne, dynamique de l'abondance totale par matelas, richesse spécifique par matelas .....	35
Fig. 30	• Schémas d'ordination de l'analyse de redondance .....	35
Fig. 31	• Vue 3D du hub de connexion installé sur le site d'essais du SEM-REV .....	36
Fig. 32	• Image prise à l'aide d'un ROV d'une équerre de fixation utilisée pour la portion posée de l'ombilical de Floatgen, autour de laquelle se concentre un banc de tacauds .....	37
Fig. 33	• Carte de la zone d'étude entre l'île de Jersey et la France indiquant la localisation des 21 sites d'étude, distribués côté français et côté anglais .....	38
Fig. 34	• Indices de diversité taxonomique obtenus pour les sites étudiés côté français et côté anglais à l'extérieur et à l'intérieur de la zone d'exclusion et en fonction de l'effort de pêche .....	39
Fig. 35	• Indices de diversité fonctionnelle obtenus pour les sites étudiés côté français et côté anglais à l'extérieur et à l'intérieur de la zone d'exclusion et en fonction de l'effort de pêche .....	39
Fig. 36	• Photographie du câble électrique suivi au sein d'une forêt de laminaires .....	40
Fig. 37	• Densités des différents taxa recensés dans les zones témoins et du câble, lors des campagnes de 2018 et de 2019 .....	41
Fig. 38	• Bobines de Helmholtz utilisées pour réaliser les expérimentations sur les juvéniles de homard européen .....	42
Fig. 39	• Bobines de Helmholtz utilisées pour réaliser les expérimentations sur la coquille Saint-Jacques et cartographie du champ magnétique produit d'une intensité de 600 $\mu$ T dans la zone expérimentale .....	43
Fig. 40	• Configuration expérimentale utilisée pour étudier les juvéniles de homard .....	44

Fig. 41	• Vitesse moyenne, distance parcourue et temps passé par les juvéniles de homards dans les 4 zones du corridor selon la condition appliquée .....	45
Fig. 42	• Temps pour trouver l'abri, distance parcourue et vitesse moyenne des juvéniles de homards pour les quatre essais consécutifs selon la condition appliquée .....	46
Fig. 43	• Fixation des accéléromètres sur les coquilles Saint-Jacques .....	48
Fig. 44	• Exemple de réponse d'une coquille Saint-Jacques à l'approche d'un prédateur, l'étoile de mer <i>Marthasterias glacialis</i> .....	49
Fig. 45	• Nombre moyen de mouvements réalisés de jour et de nuit pendant chaque période du suivi pour les coquilles Saint-Jacques du Groupe 1 et du Groupe 2 .....	50
Fig. 46	• Nombre moyen de mouvements réalisés par le Groupe 1 et le Groupe 2 en présence de séquences impulsionnelles et de séquences intermittentes pour chaque traitement .....	50
Fig. 47	• Nombre moyen de mouvements réalisés en réponse à l'approche d'une étoile de mer .....	51
Fig. 48	• Mise à l'eau de l'hydrolienne HydroQuest Ocean sur le site de Paimpol-Bréhat .....	52
Fig. 49	• Intervention sur le site d'essais du SEM-REV .....	53
Fig. 50	• Macrophotographie en plongée d'un invertébré fixé sur le câble de raccordement du site d'essais de Paimpol-Bréhat .....	54
Fig. 51	• Balisage des matelas de béton visités et des abris à homard identifiés .....	55
Fig. 52	• Photographie des systèmes STATEM et PASSEM avant déploiement en mer .....	56
Fig. 53	• Suivi <i>in situ</i> du câble de Paimpol-Bréhat .....	56
Fig. 54	• Dispositif expérimental de laboratoire utilisé pour étudier l'impact des champs électromagnétiques sur les juvéniles de homard européen .....	57
Fig. 55	• Colonisation benthique sur différents types de câbles et structures associées .....	58
Fig. 56	• Distribution du taux de recouvrement en maërl dans le secteur de Belle-Île (coordonnées en WGS 84, UTM zone 30 – 1000 mètres en deux graticules) .....	59
Fig. 57	• Navire utilisé pour installer les câbles électriques sous-marins .....	60
Fig. 58	• Distribution générale de certaines espèces d'invertébrés sur les fonds marins, et intensités théoriques des champs magnétiques émis par des câbles de 225 kV ensouillés (1 m) et non ensouillés, alimentés avec un courant électrique de 1000 A (diamètre : 27 cm) .....	61
Fig. 59	• Homard européen femelle observé sous un matelas du site d'essais de Paimpol-Bréhat .....	62
Fig. 60	• Exemples de systèmes de récupération d'énergies océaniques .....	64
Fig. 61	• Eolienne flottante et son ombilical .....	67
Fig. 62	• Exemple de réseau de connexion électrique d'une ferme houlomotrice .....	67

## Liste des tableaux

Page

<b>Tab. 1 :</b> Abondances des différentes espèces de la mégafaune recensées sur le hub de connexion du site d'essais du SEM-REV et sur deux transects le long de l'ombilical de Floatgen .....	36
<b>Tab. 2 :</b> Protocole expérimental pour les trois groupes de coquilles Saint-Jacques .....	49
<b>Tab. 3 :</b> Caractéristiques des dispositifs de mesure des champs .....	55
<b>Tab. 4 :</b> Synthèse des projets d'interconnexions et de raccordement de parcs EMR ciblant les eaux métropolitaines françaises (ou régions marines proches) impliquant la pose de liaisons électriques sous-marines haute tension ou moyenne tension pour les projets pilotes.....	66

## Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un financement de France Energies Marines, de ses membres et partenaires, ainsi que d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0006-17). Ce travail a également été rendu possible grâce aux équipes associées aux auteurs ; à savoir, pour le MNHN-Station marine de Concarneau : François-Xavier Decaris et René Derrien.

## Synthèse et rédaction

### Bastien Taormina

Chargé d'étude en habitats benthiques à France Energies Marines.

## Direction scientifique et coordination

### Antoine Carlier

Chercheur en écologie benthique au Laboratoire d'écologie benthique côtière à l'Ifremer,  
Docteur en biologie marine.

### Nicolas Desroy

Chercheur en écologie benthique au Laboratoire Environnement Ressources de Bretagne Nord à l'Ifremer,  
Docteur et HDR en biologie marine.

### Nolwenn Quillien

Cadre de recherche en écologie benthique à France Energies Marines,  
Docteure en biologie marine.

### Morgane Lejart

Responsable du programme de R&D Intégration environnementale des énergies marines renouvelables à France Energies Marines,  
Docteure en biologie marine.

## Préface

Des câbles électriques sous-marins sont présents dans l'ensemble de nos océans pour divers usages : raccorder des îles aux continents, connecter des réseaux électriques autonomes, alimenter des plateformes en mer, mais également transporter l'énergie produite par les installations d'énergies marines renouvelables (EMR) à terre. En 2015, on estimait ainsi à 8000 km la longueur totale de câbles électriques de haute tension (aussi appelés HVDC pour *High Voltage Direct Current*) présents sur les fonds marins à travers le monde, 70 % d'entre eux se situant en Europe (Ardelean et Minnebo, 2015).

5047 éoliennes, représentant 22,1 GW, étaient installées à la fin 2019 en Europe et 25 GW sont prévus pour 2025 (WindEurope, 2020). Dans ce contexte de développement exponentiel des projets EMR, le nombre de câbles électriques sous-marins augmente considérablement. Comme n'importe quelle installation ou activité humaine en mer, ces câbles peuvent entraîner des perturbations pour la vie et les habitats marins. Néanmoins, bien qu'ils soient présents dans nos océans depuis le milieu du vingtième siècle, très peu de publications scientifiques traitent des effets des câbles électriques sur le milieu marin (Taormina *et al.*, 2018; Carlier *et al.*, 2019). L'augmentation actuelle du nombre de câbles rend donc urgente la caractérisation de leurs impacts potentiels sur les écosystèmes marins.

C'est dans ce cadre que le projet collaboratif SPECIES (*Submarine Power Cables Interactions with Environment & associated Surveys*) a été initié en 2016. Celui-ci visait à améliorer les connaissances sur les interactions potentielles entre les câbles de raccordement électrique des projets EMR et les organismes benthiques, qui sont a priori les plus exposés. Coordinné par France Energies Marines et piloté scientifiquement par l'Ifremer, le projet a fédéré un consortium de neuf partenaires académiques et privés aux compétences et aux contributions complémentaires.

Les recherches ont été menées selon trois axes principaux :

- La mesure *in situ* des effets physiques générés par les câbles (ex. émission de champs électromagnétiques, radiation thermique) sur différents sites d'essais EMR ou interconnexions en France,
- L'étude de l'impact potentiel des câbles sur les communautés benthiques côtières avec des approches *in situ*, en se focalisant sur différents compartiments biologiques (ex. endofaune, communautés épibenthiques et crustacés/poissons de la mégafaune benthique) sur différents sites en France,
- L'étude de l'impact potentiel des câbles, et notamment des champs électromagnétiques, sur le comportement de certaines espèces benthiques remarquables, en adoptant des approches expérimentales en laboratoire.

Ce rapport a pour but d'offrir une synthèse des résultats issus du projet SPECIES et des perspectives qui en découlent. Il est constitué de six parties :

- Une synthèse des différents effets pouvant être générés par les câbles électriques sous-marins,
- Une présentation des sites d'étude sélectionnés,
- Des fiches synthétiques, déclinées par questions scientifiques, présentant les méthodes développées et mises en œuvre ainsi que les principaux résultats issus du projet,
- Un retour d'expérience sur les difficultés rencontrées et les recommandations méthodologiques qui en découlent,
- Un bilan du projet pour les gestionnaires et les acteurs de la filière,
- Les perspectives de recherches futures sur la même thématique.

## 1 - Effets générés par les câbles électriques sous-marins

Cette partie se base pour l'essentiel sur le contenu de quatre articles et rapports scientifiques (Taormina *et al.*, 2018 ; Albert *et al.*, 2020 ; Carlier *et al.*, 2019 ; Copping & Hemery, 2020) qui contiennent la majorité des références bibliographiques utilisées pour l'élaboration du présent document.

Avant toute chose, il convient de définir le terme « effet ». Un **effet** correspond à la modification d'un paramètre environnemental (comme le bruit, la température, le champ électromagnétique) hors de sa gamme de variabilité naturelle. Si cet effet cause des changements observables sur un ou des récepteurs identifiés qui peuvent être des compartiments biologiques de l'écosystème ou des processus au sein de cet écosystème, nous pouvons alors parler d'**impact**. Bien que la distinction demeure extrêmement subjective,

ces impacts peuvent être qualifiés de « positifs » ou « négatifs » pour l'écosystème. Si la finalité du projet était bien d'informer sur les risques d'impact sur l'écosystème, il convenait pour cela de caractériser convenablement les effets.

Cette partie présente uniquement les effets associés à la **phase de fonctionnement** des câbles électriques sous-marins, car seule cette phase a été considérée dans le cadre du projet. Il s'agit de la modification de l'habitat benthique (considéré ici comme la nature et la configuration physiques des fonds marins), de l'effet réserve, de l'émission de chaleur et de l'émission de champs électromagnétiques. Pour plus d'informations, les quatre articles de référence cités plus haut abordent également les effets associés à la phase d'installation des câbles électriques sous-marins.

### 1.1 La modification de l'habitat

De par sa présence physique, un câble non ensouillé, c'est-à-dire simplement posé sur le fond, peut modifier l'habitat en créant un nouvel habitat artificiel et en modifiant l'habitat naturel environnant. Concernant le premier processus, les câbles non ensouillés ainsi que les différentes structures de protection ou de stabilisation associées (comme les matelas de béton, enrochements et coques protectrices), fournissent un nouveau substrat dur qui est soumis au phénomène de colonisation biologique (Fig. 1). Ce phénomène, qui concerne l'ensemble des structures d'origine anthropique immergées, est couramment appelé **effet récif**. Les structures sont ainsi colonisées par des espèces sessiles de substrats durs (animales et végétales) qui forment la communauté épibenthique aussi appelée biofouling. Certaines espèces mobiles de la macrofaune et de la mégafaune, telles que des poissons et des crustacés, peuvent également être attirés par les structures déployées. L'étendue de l'effet récif dépend de la taille et de la nature des structures associées au câble, mais également des caractéristiques de l'habitat naturel environnant (types de fond, courantologie, profondeur).

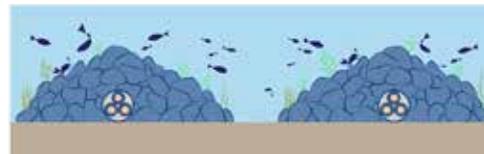
La présence des câbles et des structures associées peut également modifier l'habitat à proximité immédiate via des modifications de l'hydro-

dynamisme et de la dynamique sédimentaire. Généralement, compte-tenu des faibles hauteurs et volumes de ces structures, cette perturbation est très localisée (< 5 m) et se matérialise par la présence d'une étroite accumulation de sédiment le long de ces structures (Fig. 2).

#### ENSOUILLAGE



#### ENROCHEMENT



#### MATELAS BÉTON

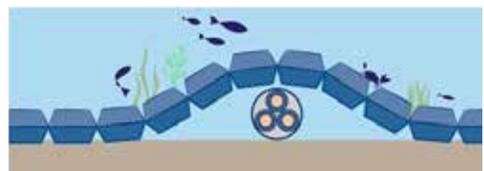


Fig. 1 : Principales techniques d'installation des câbles électriques sous-marins.



Fig. 2 : Accumulation de sable coquillier le long du câble de raccordement du site d'essais de Paimpol-Bréhat.

## 1.2 L'effet réserve

Si l'ensouillage ou les structures de protection ne permettent pas de protéger les câbles électriques de dommages potentiels causés par certaines activités anthropiques telles que le mouillage ou la pêche aux arts traînants, ces dernières peuvent être régulées, voire interdites, à proximité des câbles par les autorités locales. Ces activités ayant un impact écologique avéré sur les fonds marins, leur interdiction pourrait induire une amélioration de l'état écologique des communautés marines par rapport à celles qui se trouvent en dehors de la zone de restric-

tion ou d'interdiction : c'est l'**effet réserve**. C'est par conséquent un effet indirect, qui est souvent qualifié de « positif » pour l'écosystème marin. La taille de cette zone contrôlée et la nature des interdictions dépendent de la méthode d'installation du câble (ensouillé ou non ensouillé) et du nombre de câbles présents dans la zone. Habituellement, ces zones d'interdiction concernent surtout les câbles non ensouillés et forment des corridors de plusieurs centaines de mètres de chaque côté du câble sur l'ensemble de son tracé.

## 1.3 L'émission de chaleur

Lors du passage d'un courant électrique dans un câble, une partie de cette énergie est transformée en énergie thermique : c'est l'effet Joule. Dans le cas des câbles sous-marins non ensouillés, le flux constant d'eau dissipe efficacement cette chaleur et la confine à la surface du câble. En revanche, concernant les câbles ensouillés, cette radiation thermique peut chauffer les sédiments à proximité immédiate. L'étendue spatiale et l'amplitude de l'échauffement sont très variables selon les caractéristiques techniques et la puissance du câble, le type de courant (cou-

rant continu ou alternatif) ou la nature du sédiment présent. Les sédiments les plus cohésifs (comme la vase compacte) engendrent les plus forts échauffements (jusqu'à plusieurs dizaines de degrés Celsius, sur plusieurs dizaines de centimètres) du fait de leur plus faible conductivité thermique. Cependant, la plupart des données disponibles proviennent de modèles numériques, alors que très peu d'études ont mesuré l'échauffement *in situ*, à proximité de câbles électriques sous-marins en fonctionnement.

## 1.4 La modification des champs électromagnétiques

Le transit du courant électrique dans les câbles entraîne la production de champs électromagnétiques qui comprennent le champ électrique (mesuré en volts par mètre) et le champ magnétique (mesuré en teslas). Du fait de sa configuration, un câble souterrain ou sous-marin n'émet pas directement de champ électrique car il est entouré d'un écran métallique mis à la terre. Le champ magnétique dépend de l'intensité du courant électrique dans le câble et des paramètres de pose (notamment de la géométrie). Il diminue rapidement avec la distance (Fig. 3). Pour les câbles monopolaires et les bicâbles en courant continu non jointif, l'intensité du champ magnétique décroît selon la relation  $1/d$ ,  $d$  étant la distance à partir du centre du câble. Dans le cas d'un tricâble en courant alternatif, ou d'un bicâble en courant continu jointif (deux câbles en opposition de phase), les champs générés par chacun des câbles se compensent mutuellement et le champ diminue alors selon la relation  $1/d^2$ .

Le champ magnétique émis par un câble en courant continu est statique dans le temps, mais son intensité varie avec celle du courant électrique.

Le champ magnétique terrestre est lui-même un champ statique (si l'on excepte les variations dues aux vents solaires) de l'ordre de  $50 \mu\text{T}$  au niveau de la France. En revanche, dans le cas du courant alternatif, un courant sinusoïdal circule dans les câbles avec une fréquence donnée ( $50$  ou  $60 \text{ Hz}$ ), les champs magnétiques varient donc aussi dans le temps à la même fréquence. Les champs magnétiques, par effet d'induction dans les éléments électriquement conducteurs (comme l'eau de mer ou les organismes vivants), engendrent un champ électrique « induit » de quelque  $\mu\text{V/m}$  à l'extérieur du câble.

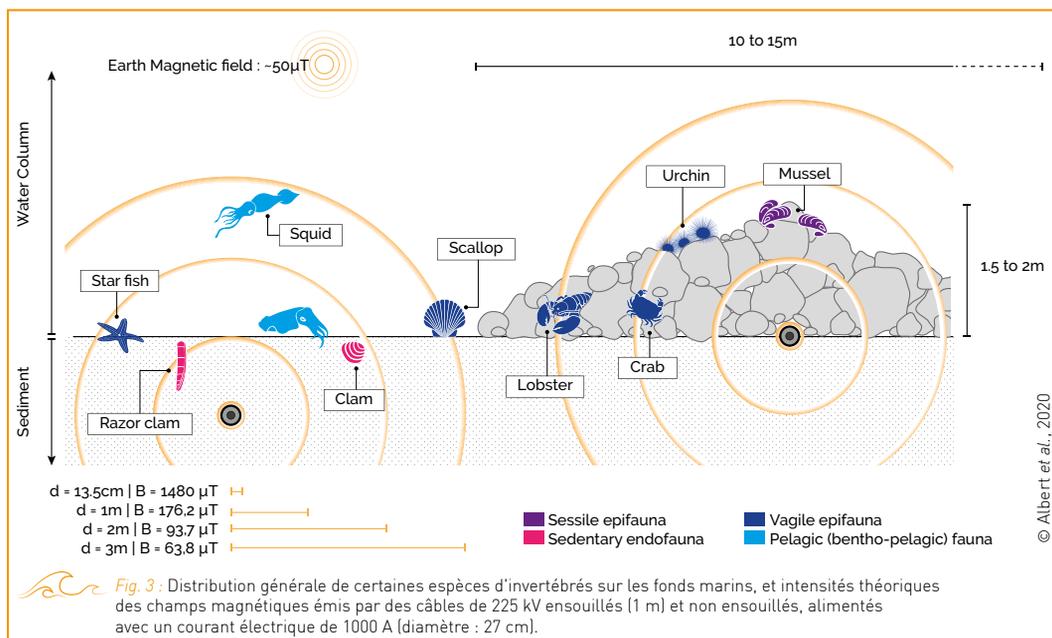
### EN SAVOIR +

Taormina B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart M., Desroy N., Carlier A. [2018]

**A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: knowledge gaps, recommendations and future directions.**

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 96, 380-391.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>



## 2 - Présentation des sites d'étude

Cinq sites différents ont été sélectionnés pour cette étude. Trois sont des sites d'essais dédiés aux énergies : Paimpol-Bréhat dans les Côtes d'Armor, le Fromveur au large d'Ouessant dans

le Finistère et le SEM-REV au large du Croisic en Loire-Atlantique. Deux sont des sites de connections électriques n'ayant pas de lien avec les EMR.

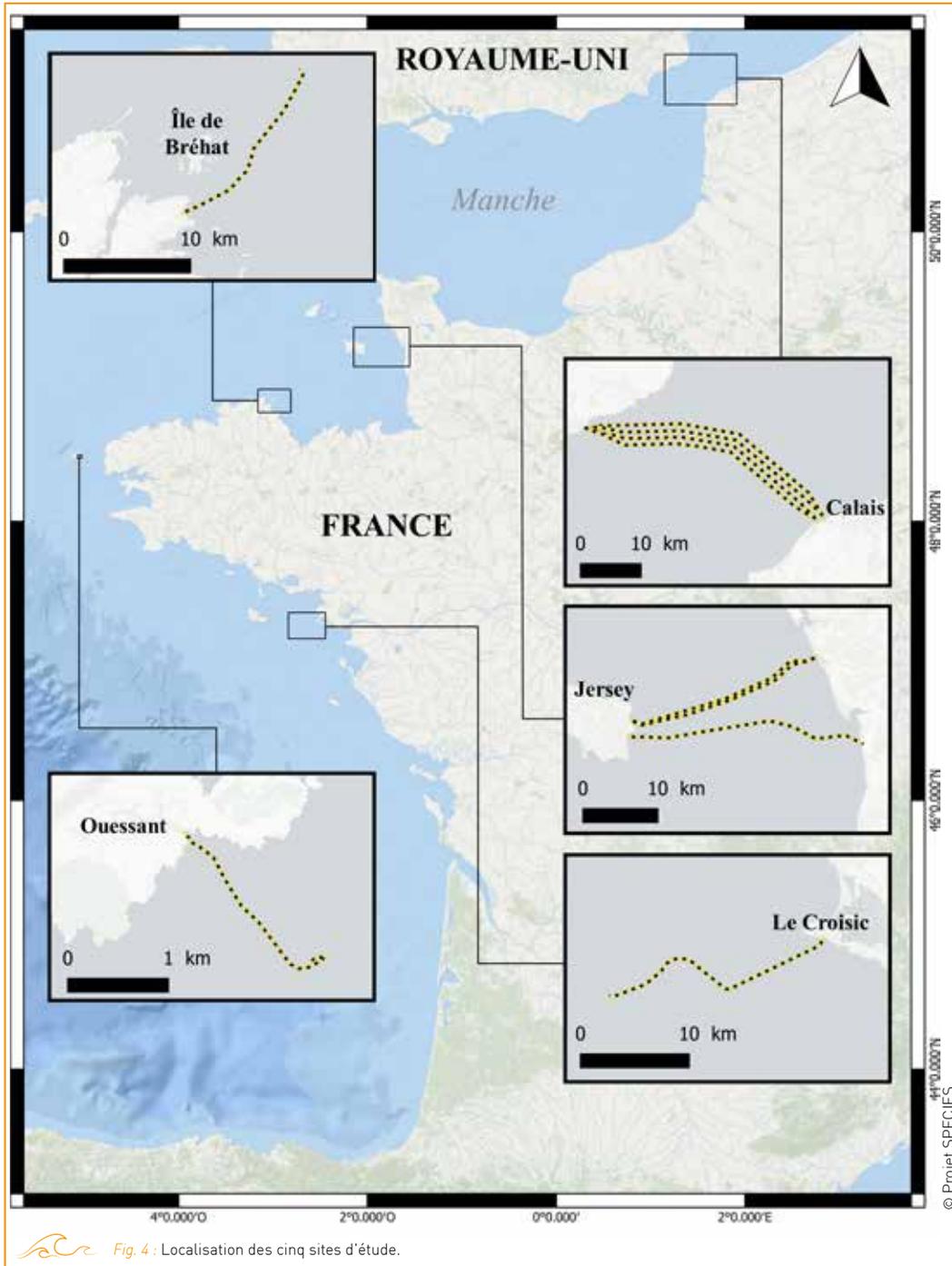


Fig. 4 : Localisation des cinq sites d'étude.

## 2.1 Les sites d'essais dédiés aux énergies marines renouvelables

### Câble du site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat

- **Puissance :**  
8 MVA
- **Tension :**  
10 kV
- **Type :**  
Courant continu
- **Date d'installation :**  
2012
- **Description :**  
Le site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat est localisé au large de Paimpol (Bretagne, France) au sein du cantonnement à crustacés de La Horaine. La connexion entre les démonstrateurs hydroliens et la terre ferme se fait par un câble électrique long de 15 km. En raison des forts courants présents dans la zone et de fonds marins dominés par des substrats durs, une portion de 11 km n'est pas ensouillée, mais simplement posée sur le fond. Cette portion non ensouillée du câble est protégée par des coques en fonte et stabilisée par 120 matelas de béton installés en 2013.
- **Mise en service :**
  - OpenHydro : aucune connexion électrique n'a eu lieu durant les différents tests du parc démonstrateur de 2 MW
  - HydroQuest : le démonstrateur d'1 MW est connecté au réseau depuis juin 2019
- **Travaux réalisés :**
  - Suivi de la colonisation benthique des structures artificielles
  - Suivi de la population de coquilles Saint-Jacques (état de référence de croissance)

### Câble du site d'essais hydrolien du Fromveur

- **Puissance :**  
500 kW (max)
- **Tension :**  
7,5 kV
- **Type :**  
Courant alternatif
- **Date d'installation :**  
2015, et plus précisément, pose du câble en mai, installation de l'hydrolienne D10 en juin, connexion et début de production en septembre, raccordement au réseau en novembre.
- **Description :**  
Destiné à tester les hydroliennes de l'entreprise Sabella, le site d'essais du Fromveur se situe au sein du passage portant le même nom, situé entre l'Île d'Ouessant et l'archipel de Molène (Bretagne, France). Le démonstrateur hydrolien D10 est relié à l'Île d'Ouessant par un câble non ensouillé d'une longueur de 2 km. Ce câble est nu à l'exception d'un tronçon de 200 m qui est protégé par des coques en fonte. Une première mise sous tension a eu lieu entre mi-octobre et fin décembre 2018 de manière continue, puis de façon ponctuelle jusqu'en avril 2019.
- **Mise en service :**  
Septembre 2015. Production pendant plusieurs mois de manière non continue jusqu'à avril 2016, relevage de la turbine en juillet 2016 et repose en octobre 2018, production en continu jusqu'à la fin décembre puis de manière ponctuelle jusqu'en mars 2019, relevage en avril 2019, puis repose d'une semaine en octobre 2019 avec peu de production puis relevage.
- **Travaux réalisés :**
  - Suivi de la colonisation benthique sur le câble nu
  - Mesure de la température

### Câble du site d'essais du SEM-REV

→ **Puissance :**  
8 MVA

→ **Tension :**  
20 kV

→ **Type :**  
Courant alternatif

→ **Date d'installation :**  
2012

→ **Description :**

Le site d'essais en mer du SEM-REV se situe au large de la commune du Croisic, à l'ouest du banc de Guérande et est raccordé à terre au Croisic (Pays de la Loire, France). Le site du SEM-REV est la propriété de l'Ecole Centrale de Nantes. Il est opéré par le laboratoire CNRS LHEEA (UMR 6598). L'Ecole Centrale de Nantes a assuré la maîtrise d'ouvrage pour la mise en place du site d'essais et dispose de toutes les autorisations administratives préalables pour tester des prototypes multi-technologies (houlomoteur et éolien flottant). Un câble d'export de 23 km relie les prototypes au poste de livraison haute tension à terre via un hub sous-marin de connexion. Le câble est ensouillé sur tout son trajet à environ 1,5 m sous les sédiments, sauf à l'aplomb d'une tête rocheuse au nord-ouest du plateau du Four. A cet endroit, il est protégé par 60 matelas de protection en béton sur une longueur de 350 m. Les matelas de protection ont été installés en 2013.

→ **Mise en service :**  
L'éolienne flottante Floatgen (2 MW) est connectée au réseau depuis septembre 2018.

→ **Travaux réalisés :**

- Mesure des champs électromagnétiques
- Suivi de la température
- Suivi de la colonisation de structures artificielles

## 2.2 Les câbles de connexions électriques hors EMR

### Connexions Jersey-Cotentin

- ➔ **Puissance :**
  - 50 MW (Normandie 1)
  - 90 MW (Normandie 2)
  - 100 MW (Normandie 3)
- ➔ **Tension :**
  - 90 kV (Normandie 1-2-3)
- ➔ **Type :**
  - Courant alternatif
- ➔ **Dates d'installation :**
  - 1982, remplacé en 2016 (Normandie 1)
  - 2000 (Normandie 2)
  - 2013 (Normandie 3)
- ➔ **Description :**

L'alimentation de Jersey en électricité est opérée par trois câbles électriques qui sont localisés dans le golfe Normand-Breton entre l'île et le Cotentin (Normandie, France). Le plus récent, Normandie 3, installé au sud, est ensouillé, au contraire de Normandie 1 et 2, localisés plus au nord et espacés l'un de l'autre par 500 m, qui sont simplement posés sur le fond marin sans système de protection associé.
- ➔ **Travaux réalisés :**
  - Mesure des champs électromagnétiques
  - Étude de l'effet réserve
  - Mesure de la température

### Interconnexion France-Angleterre IFA 2000

- ➔ **Puissance :**
  - 2 GW
- ➔ **Tension :**
  - 270 kV
- ➔ **Type :**
  - Courant continu
- ➔ **Date d'installation :**
  - 1981
- ➔ **Description :**

L'interconnexion France-Angleterre IFA 2000 est une connexion de très haute tension reliant les réseaux électriques de France et du Royaume-Uni. Cette connexion est constituée de quatre câbles qui traversent le Pas-de-Calais sur 46 km. Ces câbles ont été ensouillés dans le sédiment, avec une cible d'environ 1,50 m de profondeur lors des travaux d'installation. Une portion de quelques centaines mètres de ce câble a fait l'objet d'une maintenance en 2017 et est désormais posée sur le fond et protégée par des enrochements.
- ➔ **Travaux réalisés :**
  - Mesure des champs électromagnétiques

## 3 - Résultats du projet

Treize fiches synthétiques, déclinées par questions scientifiques, présentent les méthodes développées et mises en œuvre ainsi que les principaux résultats issus du projet.

### 3.1 Mesure des effets physiques

- **Fiche 1**  
Outils de mesure  
des champs électromagnétiques
- **Fiche 2**  
Mesures mobiles  
des champs électromagnétiques
- **Fiche 3**  
Mesures fixes des champs électromagnétiques
- **Fiche 4**  
Effet des câbles électriques sous-marins  
sur la température

### 3.2 Evaluation *in situ* des impacts potentiels sur le benthos

- **Fiche 5**  
Méthodes de suivi des communautés  
benthiques subtidales à proximité des câbles
- **Fiche 6**  
Suivi des communautés épibenthiques  
associées aux structures de protection  
des câbles
- **Fiche 7**  
Suivi de la mégafaune benthique associée  
aux structures de protection des câbles
- **Fiche 8**  
Suivi de la mégafaune benthique associée  
aux structures de raccordement  
d'une éolienne flottante
- **Fiche 9**  
Evaluation de l'effet réserve associé  
à la présence d'un corridor de protection
- **Fiche 10**  
Evaluation de l'impact des câbles électriques  
sur les communautés benthiques adjacentes

### 3.3 Evaluation en laboratoire des impacts potentiels sur le benthos

- **Fiche 11**  
Méthodes d'étude expérimentale  
des réponses d'organismes benthiques  
à des champs magnétiques artificiels
- **Fiche 12**  
Etude de l'impact de champs magnétiques  
artificiels sur le homard européen
- **Fiche 13**  
Etude de l'impact de champs magnétiques  
artificiels sur la coquille Saint-Jacques



**Objectif :** Disposer et développer des outils permettant de mesurer, en fixe ou en statique, des champs électromagnétiques en mer.

### Mesure mobile des champs électromagnétiques : l'outil PASSEM

#### Description

L'outil PASSEM est un système de mesure des champs électromagnétiques développé par MAP-PEM Geophysics. Le système, tracté par un navire de surface, est composé d'un « poisson » principal où se situe l'électronique d'acquisition et certains capteurs, suivi d'un câble comportant des électrodes formant plusieurs dipôles et mesurant des différences de potentiels entre deux électrodes (Fig. 5).



Fig. 5 : Aperçu de l'outil PASSEM sur le pont avant déploiement.

Le « poisson » principal regroupe le système d'acquisition, les capteurs de navigation (altimètre, capteur de pression, inclinomètres), et un capteur magnétique trois axes de type *fluxgate* de haute sensibilité pour les mesures du champ magnétique. Les mesures des champs électriques sont assurées par quatre dipôles indépendants, de longueurs différentes (Fig. 6).

#### Acquisition

Les dipôles sont disposés le long d'un câble tracté par le dispositif. Les champs électriques sont mesurés grâce à des électrodes AgCl et des préamplificateurs à forts gains. Les quatre dipôles de mesures ont des longueurs différentes (19 m, 17 m, et deux dipôles de 4 m) et permettent une redondance sur les données. L'acquisition est réalisée avec une résolution de 24 bits et une fréquence de 2 kHz pour tous les capteurs. Pour les capteurs électriques, le niveau de bruit est de  $10^{-10}$  nV/m/√Hz, pour le capteur magnétique, il est inférieur à 10 pT/√Hz. Ces niveaux de bruit sont bien inférieurs aux niveaux de signaux ambiants.

#### Avantages

L'outil PASSEM permet d'évaluer les champs électromagnétiques rapidement et à l'échelle d'une zone large. Il permet aussi de déterminer les principales sources des champs. Ce système est facile à déployer. En effet, le « poisson », de par ses dimensions (1,5 m de long et 20 cm de diamètre), est facilement manipulable sur le pont d'un navire par deux personnes et les câbles de détection peuvent être déployés à la main. La longueur des dipôles permet une mesure fine des champs électriques présents dans la zone.

#### Inconvénients

L'outil PASSEM ne permet une mesure des champs électromagnétiques qu'à un instant donné. Le système étant tracté, les données magnétiques sont perturbées par les mouvements de l'appareil de mesure et nécessitent une correction.

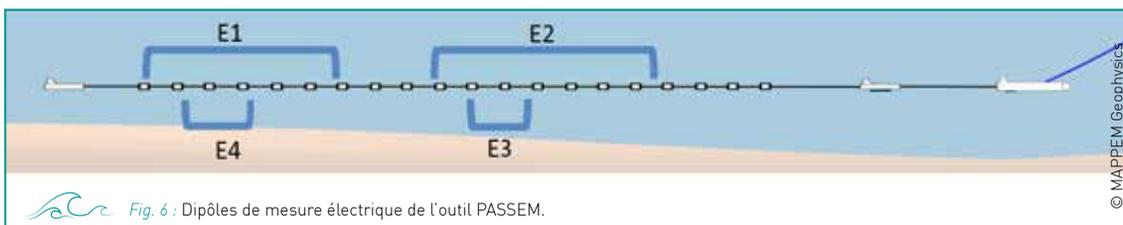


Fig. 6 : Dipôles de mesure électrique de l'outil PASSEM.

## Mesure fixe des champs électromagnétiques : l'outil STATEM

### Description

Ce dispositif fixe permet de mesurer les champs électromagnétiques avec une très grande précision et donc d'évaluer finement les variations à proximité des sources de signaux (Fig. 7). Les données ne sont pas perturbées par les mouvements de l'appareil de mesure, et les mesures peuvent être effectuées à proximité de la source de signal électromagnétique (comme les câbles ou les éoliennes). Cette station possède un capteur magnétique *fluxgate* trois composantes et deux dipôles électriques perpendiculaires. L'outil étant capable d'effectuer des acquisitions pendant deux semaines (voire plus si besoin), il permet de voir l'évolution du champ électrique et magnétique au cours du temps. L'acquisition haute fréquence (512 Hz) permet d'enregistrer également les signaux des champs alternatifs.

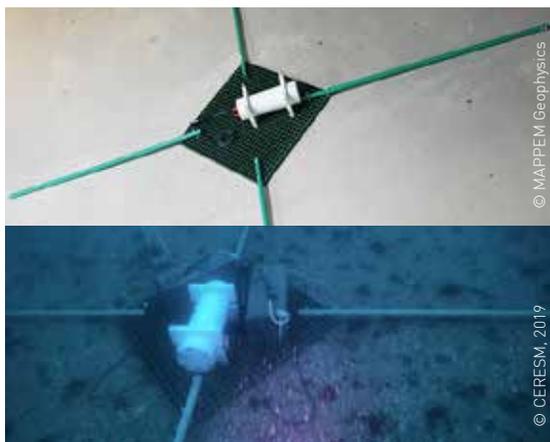


Fig. 7 : Aperçu de l'outil STATEM avant déploiement (en haut) et posé sur le fond (en bas).

### Spécifications

- Bâti en fibre de verre : 1 m x 1 m.  
Envergure totale : 5 m maximum avec les bras des dipôles électriques
- Profondeur d'immersion : jusqu'à 50 m
- Poids à terre : environ 35 kg (sans lests).  
Des lests sont ajoutés pour augmenter la stabilité au fond, en fonction des conditions de mise en œuvre (lests en béton).  
Ils sont récupérés en même temps que la station.
- Autonomie : 2 semaines
- Capteur magnétique : *fluxgate* trois axes (bruit inférieur à 20 pT/VHz)
- Capteurs électriques : de type AgCl, longueur des dipôles jusqu'à 5 m (bruit < 0,2  $\mu$ V/VHz)
- Acquisition : 512 Hz, 32 bits

### Déploiement

Le déploiement est effectué par un navire en surface, avec ou sans l'aide de plongeurs selon les conditions de mise à l'eau. Le navire est mis en station au-dessus du point de mesure choisi. L'outil STATEM est alors mis en route à bord (synchronisation GPS, initialisation et auto-tests). Il peut être déployé soit à la grue uniquement (avec un corps mort déporté si le besoin de précision de localisation n'est pas très important), soit à l'aide de plongeurs pour un positionnement précis au fond (notamment à proximité des infrastructures, en mesurant précisément la distance à la source).

### Avantages

L'outil STATEM permet de mesurer les champs avec une meilleure précision qu'avec un système tracté, car les données ne sont pas perturbées par les mouvements de l'appareil de mesure. L'enregistrement est beaucoup plus proche de la source de perturbation électromagnétique. De plus, il permet de mesurer les variations du champ électrique et magnétique au cours du temps.

### Inconvénients

Ce système peut nécessiter l'intervention de plongeurs pour l'installation et la récupération du matériel. Il peut également présenter des difficultés de mise en œuvre sur des sites où des objets (engins de pêches) sont présents sur le fond et/ou dans la colonne d'eau.

### EN SAVOIR +

Les  $\mu$ V/VHz pour les mesures électriques ou pT/VHz pour les capteurs magnétiques sont des unités classiques calculées à partir des spectres fréquentiels de bruit (densité spectrale de puissance). Pour les capteurs électriques, les champs électriques sont souvent précisés également en  $\mu$ V/m, car les niveaux dépendent de la longueur du dipôle utilisé pour faire la mesure.

**Objectif :** Caractériser les champs électriques et magnétiques au voisinage de plusieurs types de câbles électriques sous-marins.

### Contexte :

Les champs électromagnétiques produits par les câbles électriques sous-marins ont, jusqu'à présent, fait l'objet de très peu de mesures *in situ* au regard du nombre de câbles déjà déployés dans les océans à travers le monde. En effet, les valeurs de champs générés sont souvent fournies sur la base de modèles et ne sont que rarement validées par des mesures *in situ*. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de mesurer les champs électromagnétiques émis par des câbles électriques sous-marins déjà en

fonctionnement et présentant des caractéristiques (puissance, profondeur d'ensouillage, etc.) contrastées. Les deux sites d'étude retenus présentent des technologies de transport d'énergie différentes : transport de courant continu pour les câbles IFA 2000 assurant l'interconnexion entre la France et l'Angleterre, et utilisation du courant alternatif pour les câbles reliant l'île de Jersey à la presqu'île du Cotentin. Les signaux mesurés devaient ainsi être différents.

### Méthode :

Les champs électromagnétiques ont été mesurés à l'aide de l'outil PASSEM (Fiche n° 1) au cours de deux missions différentes.

- Pour l'interconnexion IFA 2000, 13 transects ont été effectués au-dessus des 4 câbles HVDC le 27/09/2018, à une distance au-dessus des câbles variant entre 4 et 20 m, et à une vitesse d'environ 3 nœuds (Fig. 8).
- Pour l'interconnexion de Jersey, 11 transects ont été effectués au-dessus des 3 câbles du 25 au 26 juin 2019 : 5 transects le 1<sup>er</sup> jour, au-dessus des câbles Normandie 1 (N1) et Normandie 2 (N2) aux alentours de la zone P1, et 6 transects le 2<sup>ème</sup> jour, au-dessus du câble Normandie 3 (N3), aux alentours de la zone du profil P4 (Fig. 9). Du fait de conditions météorologiques défavorables, seules les zones des profils P1 et P4 ont pu être visitées.



Fig.9 : Positions des profils (P1 à P6) et stations (S1 à S3) prévues initialement pour mesurer les champs électromagnétiques avec l'outil PASSEM, au niveau de la connexion Jersey-Cotentin comprenant les câbles N1, N2 et N3.

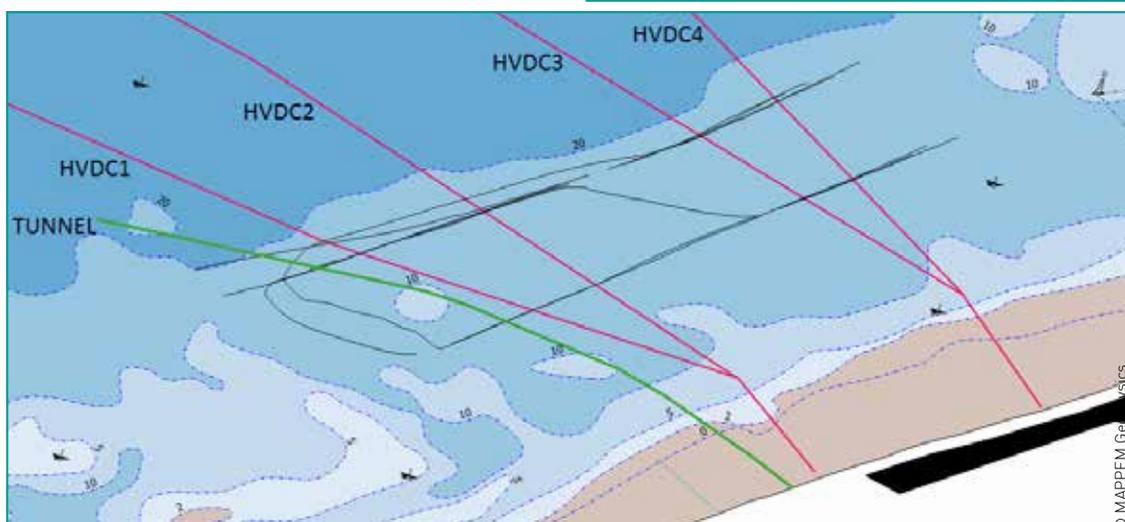
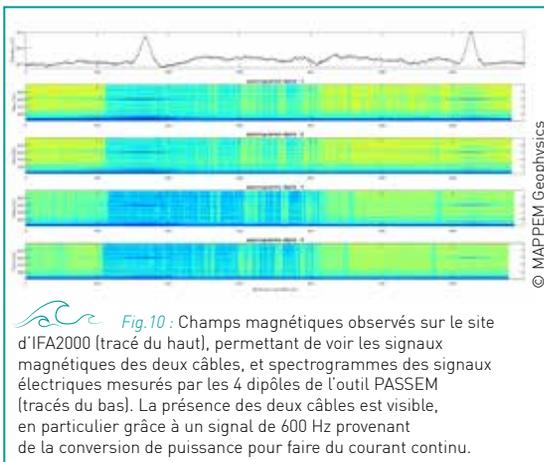


Fig. 8 : Positions des transects effectués avec l'outil PASSEM (lignes noires) pour mesurer les champs électromagnétiques émis par les câbles de l'interconnexion France-Angleterre IFA2000 (lignes rouges).

## Résultats :

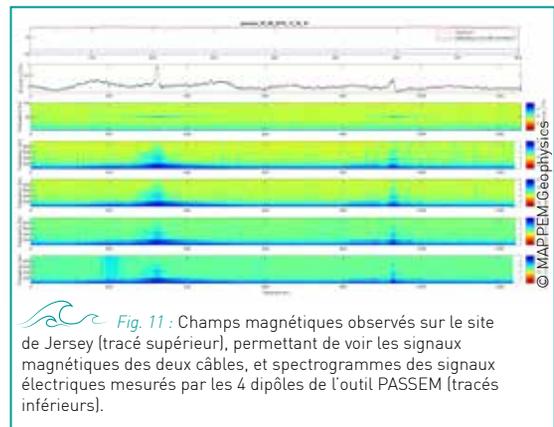
Les signaux électromagnétiques des câbles sont clairement identifiables sur les données mesurées, notamment sur les spectrogrammes qui permettent de mesurer les différentes harmoniques détectables. Les câbles IFA 2000 montrent un champ magnétique de quelques centaines de nanoTeslas à une distance de 10 m, et un champ électrique qui est uniquement dû aux fréquences parasites présentes, elles-mêmes liées aux dispositifs utilisés pour redresser le courant (Fig. 10). Sur le site de Jersey, les signaux sont différents. Les champs magnétiques sont du même ordre de grandeur, mais présentent essentiellement des composantes fréquentielles du fait de la nature du courant circulant dans les câbles. Le contenu fréquentiel est ainsi nettement plus fort avec des composantes harmoniques décroissantes. Les signaux 50 Hz sont évidemment les plus élevés (Fig. 11). Les signaux électriques sont plus facilement exploitables grâce à la longueur des dipôles du dispositif PASSEM. Les signaux magnétiques principaux peuvent cependant être également identifiés.



## Conclusion :

A l'échelle d'une zone où plusieurs câbles sont présents, il a été possible, grâce au système PASSEM, de caractériser les signaux électromagnétiques, et d'obtenir une évaluation de l'amplitude des champs électriques et magnétiques en fonction de la puissance du courant électrique dans les câbles. Les champs électriques peuvent être mesurés avec une grande précision. Les champs magnétiques sont souvent plus bruités à cause de la distance aux câbles (généralement plusieurs mètres) et des mouvements dus à la traction par le navire.

Les mesures effectuées au-dessus des câbles IFA2000 ont permis, de manière inattendue, d'identifier un signal électrique significatif au droit du tunnel sous la Manche, et par conséquent provenant vraisemblablement de cet ouvrage sous-terrain. Ce signal s'est matérialisé par une saturation de l'appareil de mesure sur quelques dizaines de mètres du côté « ouest » des transects. La gamme d'enregistrement du signal électrique ayant été préalablement paramétrée pour la caractérisation des signaux des câbles, cela signifie que le tunnel sous la Manche pourrait générer un champ électrique supérieur à ceux qui sont associés aux câbles électriques IFA2000. Une nouvelle campagne de mesure, avec une gamme d'enregistrement adaptée au signal attendu *a priori* pour ce type d'ouvrage permettrait de mieux caractériser l'effet électromagnétique auquel l'écosystème benthique est soumis à cet endroit.



## ! Limites :

Les mouvements du dispositif PASSEM augmentent le bruit sur les données. La quantification des champs électromagnétiques est approximative car les courants électriques circulant dans les câbles sont souvent mal connus à l'instant exact du passage du système au-dessus des câbles. En effet, les données de puissance sont moyennées. Par ailleurs, il est difficile à ce stade de normaliser les valeurs de champs électromagnétiques par rapport à la distance au câble du fait de la nature non linéaire et complexe des champs émis.



**Objectif :** Mesurer les variations temporelles des champs électriques et magnétiques au voisinage de plusieurs types de câbles électriques sous-marins.

### Contexte :

Les champs électromagnétiques produits par les câbles électriques sous-marins ont, jusqu'à présent, fait l'objet de très peu de mesures *in situ* au regard du nombre de câbles déjà déployés dans les océans à travers le monde. En effet, les valeurs de champs générés sont souvent fournies sur la base de modèles et ne sont que rarement validées par des me-

sure *in situ*. Parmi ces mesures, un nombre extrêmement restreint de travaux s'intéresse à l'évolution des champs au cours du temps. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de mesurer les fluctuations temporelles des champs électromagnétiques émis par deux câbles électriques sous-marins en fonctionnement.

### Méthode :

Les champs électromagnétiques ont été mesurés à l'aide de l'outil STATEM (Fiche n° 1) à proximité immédiate du câble Normandie 1 de la connexion Jersey-Cotentin et du hub de connexion du câble de raccordement du site d'essais du SEM-REV. Pour le câble « Normandie 1 », le système a été déployé, du 25 au 29 juin 2019, sur le fond à la station S1, à 4 m

de distance du câble (Fig. 12). Pour le câble du site du SEM-REV, le système a été positionné à 2 m du hub de connexion (Fig. 13), le 22 octobre 2019. La position géographique exacte de déploiement du dispositif est moins importante que la distance et l'orientation de la station par rapport au câble.

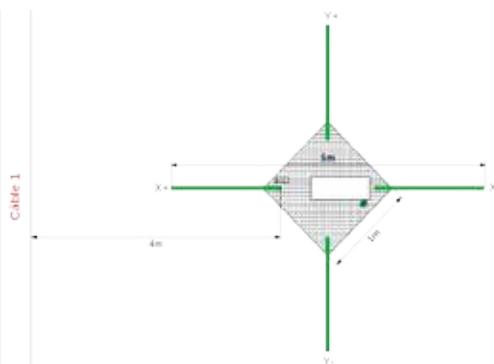


Fig. 12 : Localisation de la station S1 au niveau de la connexion Jersey-Cotentin comprenant les câbles N1, N2 et N3 (en haut) et positionnement du dispositif STATEM par rapport au câble N1 (en bas).

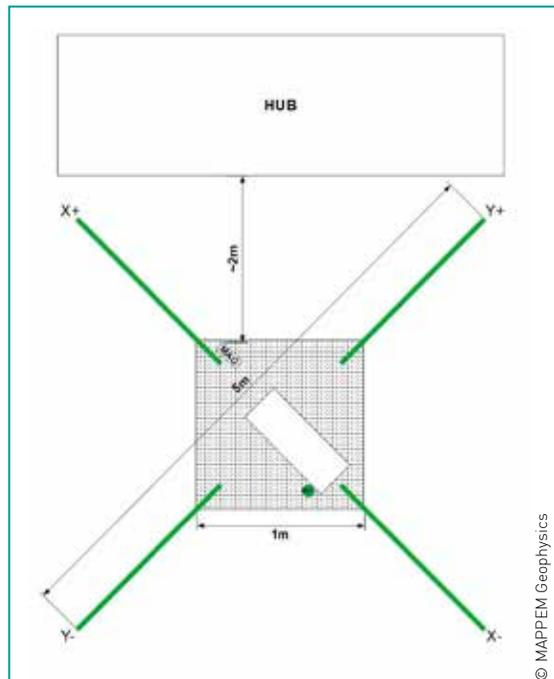


Fig. 13 : Schéma représentant la position du dispositif STATEM par rapport au hub de connexion du site d'essais du SEM-REV. Le dipôle 1 correspond au dipôle X+X- et le dipôle 2 au dipôle Y+Y-.

## Résultats :

Pour le câble « Normandie 1 », les variations du champ magnétique, mesurées et filtrées sur les harmoniques principales, suivent bien les variations de la puissance du courant dans le câble pendant toute la durée de la mesure (Fig. 14). Ces variations sont de l'ordre de **quelques nanoTeslas à 4 m du câble**. Il en est de même pour les champs électriques (Fig. 15), avec des variations de quelques centaines de nanoVolts par mètre, pour environ 30 MW de puissance présente dans le câble (environ 200 A).

Au niveau du hub de connexion du site d'essais du SEM-REV, des données de champs électromagnétiques ont été obtenues pendant une courte période

(quelques heures), qui correspondait à une phase de production électrique croissante de l'éolienne flottante Floatgen, comprenant une production électrique maximale à la fin de la période d'enregistrement. L'intensité du champ magnétique émis par le hub a suivi les mêmes oscillations que l'intensité du courant électrique. **Ce signal magnétique a varié de 0,5 à 6 nT à 2 m du hub, avec une saturation à 6 nT pendant la phase de production maximale** (Fig. 16).

Le champ électrique a augmenté progressivement sur cette même période, jusqu'à une valeur maximum de 16  $\mu\text{V}/\text{m}$ . Ce signal était moins bien corrélé avec l'intensité du courant électrique produit au début de la période d'enregistrement (Fig. 17).

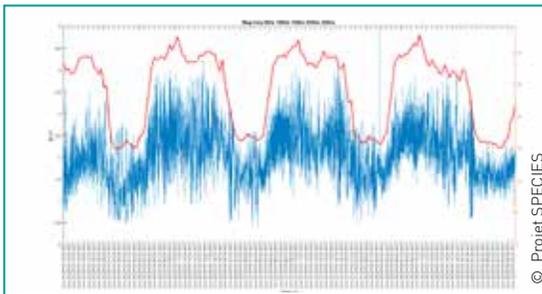


Fig. 14 : Intensité du champ magnétique mesuré (en bleu) et puissance électrique transitant dans le câble N1 entre le 25 et le 29 juin 2019 (en rouge, données fournies par la Jersey Electricity Compagny).

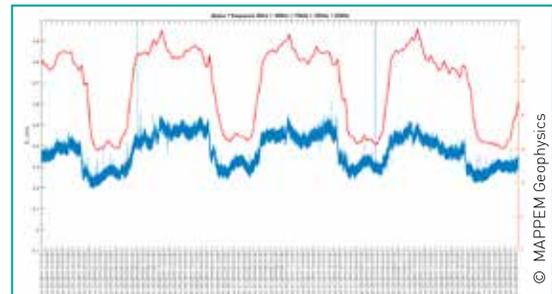


Fig. 15 : Champ électrique mesuré (en bleu) et puissance transitant dans le câble N1 (en rouge).

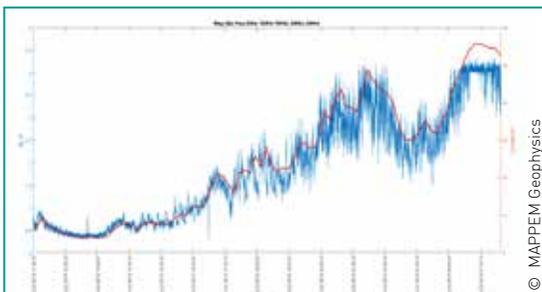


Fig. 16 : Composantes 50, 100, 150, 200, 250 Hz du champ magnétique total enregistré durant 17h (en bleu) et intensité du courant électrique dans le câble (en rouge).

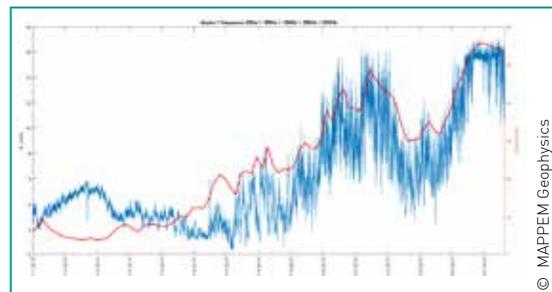


Fig. 17 : Composantes 50, 100, 150, 200, 250 Hz du champ électrique enregistré par le dipôle1 (en bleu) et intensité du courant dans le câble (en rouge).

## Conclusion :

La station STATEM a permis de mesurer de manière très précise les champs électriques et magnétiques à proximité d'un câble posé et d'une infrastructure de connexion électrique sous-marine. Les champs électromagnétiques enregistrés étaient très bien corrélés avec l'intensité du courant électrique qui transitait dans le câble et le hub. Ils ont même reflété la phase de production électrique maximale sur le site d'essais du SEM-REV. L'outil STATEM permet donc d'évaluer convenablement le signal électromagnétique émis pendant les différentes phases de fonctionnement des dispositifs EMR.

## ! Limites :

Il est nécessaire de bien connaître les caractéristiques du courant électrique injecté et les positions relatives du câble et de la station pour pouvoir extrapoler les amplitudes des signaux émis par les câbles. En raison de la non linéarité des champs électromagnétiques et de la complexité des structures des câbles, il reste difficile à ce stade, sur la base des mesures effectuées, de normaliser précisément les champs magnétiques émis par rapport à la distance au câble et au courant.



**Objectif :** Caractériser l'échauffement potentiel provoqué par le passage du courant électrique dans les câbles.

### Contexte :

De manière générale, le passage d'un courant électrique dans un conducteur provoque un échauffement, que l'on appelle en physique l'effet Joule. Bien que la partie conductrice des câbles, aussi appelée âme, soit protégée par différents matériaux métalliques et plastiques, un rayonnement thermique existe, généralement dissipé par les mouvements de la masse d'eau. Dans le cas des câbles électriques sous-marins, il s'agit de déterminer si leur fonctionnement peut conduire à une augmentation

de la température à leur surface, colonisée par des organismes benthiques, et dans leur environnement proche. Bien que les câbles de raccordement des parcs éoliens en mer et les interconnexions marines puissent transmettre de grandes puissances électriques, il n'existe dans la littérature que très peu de données renseignant sur la potentielle augmentation de température sur et autour des câbles, qu'ils soient ensouillés ou non.

### Méthode :

Des enregistrements de température à la surface de différents câbles électriques ont été effectués sur plusieurs sites d'étude hébergeant des câbles en phase de fonctionnement : la connexion Jersey-Cotentin et les sites d'essais de Ouessant, de Paimpol-Bréhat et du SEM-REV. Sur chacun de ces sites, la stratégie était de réaliser des mesures de température *in situ* à l'aide de sondes autonomes fixées à la surface des câbles, mais aussi sur un support inerte à proximité pour obtenir la température naturelle de l'eau de mer (température témoin). La perturbation potentielle est caractérisée en mesurant la différence de température obtenue entre les sondes des câbles et les sondes témoins. Les sondes qui ont été utilisées sont de type *i-button* (Fig. 18). Elles ont été

paramétrées pour enregistrer la température toutes les 1 à 3 heures selon les sites, avec une sensibilité de 0,06°C et une précision de 0,5°C. L'étanchéité des sondes a été assurée par un mastic. Les sondes des câbles ont été plaquées sur la surface des câbles à l'aide de colliers Colson™.

L'intermittence de la production d'énergie et la fluctuation de la consommation entraînent une variation de la puissance et de l'intensité du courant électrique qui transite dans les câbles.

Les enregistrements ont donc été maintenus suffisamment longtemps pour capter au mieux ces variations de puissance électrique et donc d'échauffement potentiel.

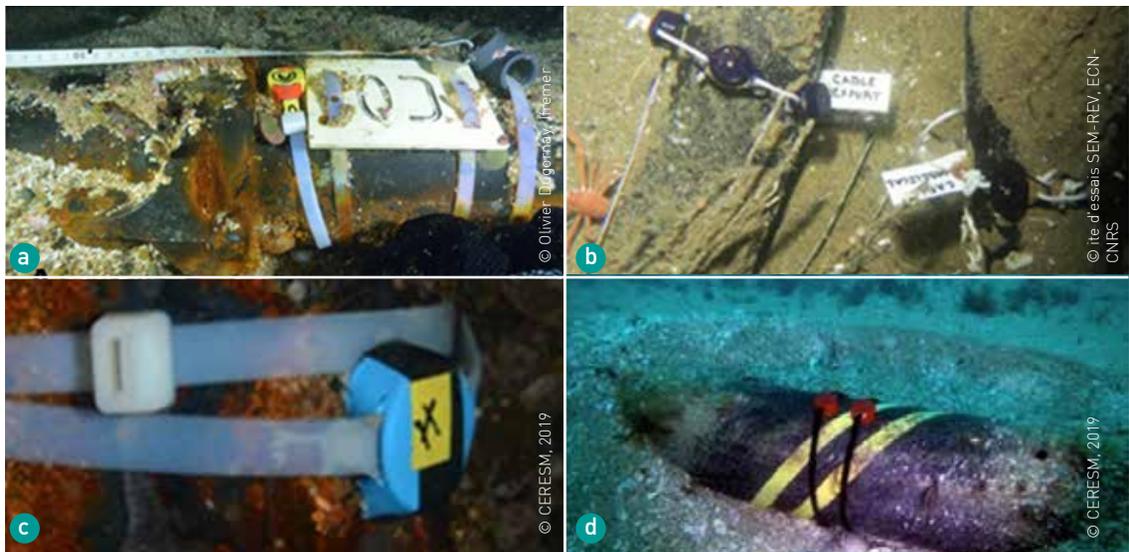


Fig. 18 : Exemples de sondes température installées sur des coques de protection en fonte (A : Site de Paimpol-Bréhat) ou directement à la surface d'un câble nu (B : Site du SEM-REV, C et D : connexion Jersey-Cotentin).

## Résultats :

Des données de température ont été obtenues en phase de fonctionnement sur les câbles de la connexion Jersey-Cotentin et des sites d'essais de Ouessant et du SEM-REV. Des données de température de référence ont été acquises pour le câble de Paimpol-Bréhat.

Les mesures réalisées sur le câble de Ouessant ne révèlent aucune différence de température entre les sondes fixées sur le câble (n=3) et les sondes fixées sur une portion de câble témoin sans courant électrique (n=3), située à environ 5 m du câble principal. Les données de puissances qui ont transité dans le câble durant cette période ne sont actuellement pas disponibles et ne peuvent donc pas être confrontées aux températures mesurées. Malgré cela, l'absence de différence de température entre les sondes du câble et les sondes témoins témoigne de l'absence de tout échauffement.

Au niveau de la connexion Jersey-Cotentin, les fluctuations de température observées sur les deux câbles suivent exactement celles relevées avec les sondes témoins et sont totalement découplées des variations de puissances électriques mesurées dans les câbles (Fig. 19). Les très faibles différences de température obtenues entre les câbles et les sondes témoins sont comprises dans la gamme de précision des sondes. Ainsi, la différence de température mesurée (0,2°C) entre les deux sondes fixées sur les câbles de la connexion Jersey-Cotentin (N1 et N2) est supérieure à la différence obtenue entre chacune de ces sondes et les sondes témoins. Sur le site du SEM-REV, quatre capteurs ont été installés : deux capteurs sur l'ombilical de l'éolienne Floatgen, un capteur sur le câble d'export du site

d'essais et trois sur une station témoin située à environ 5 m des câbles électriques. Les écarts moyens ont été obtenus en calculant la moyenne de l'ensemble des écarts en absolu pour chaque condition. Par exemple, la formule de calcul pour le capteur n°1 de l'ombilical (OM1) est :

$$OM1-T = \text{Moyenne} (\Sigma |OM1\text{-Témoin n}^{\circ}1| ; \Sigma |OM1\text{-Témoin n}^{\circ}2| ; \Sigma |OM1\text{-Témoin n}^{\circ}3|)$$

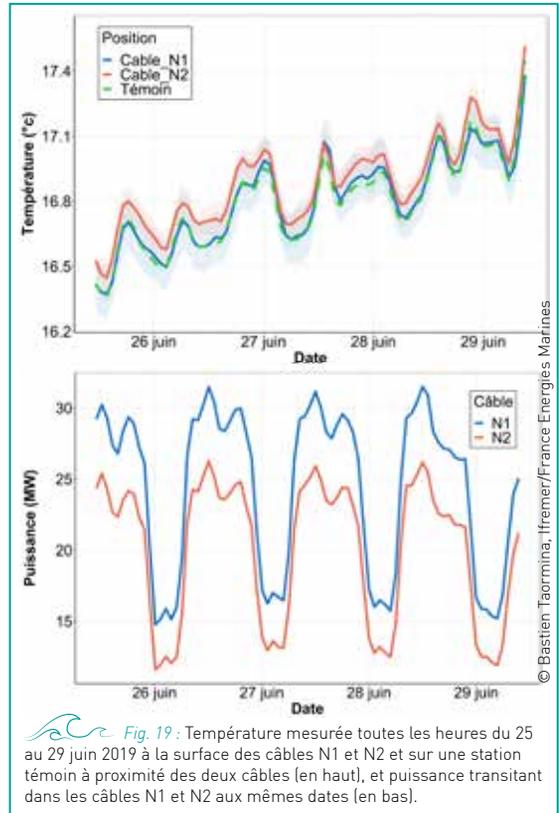


Fig. 19 : Température mesurée toutes les heures du 25 au 29 juin 2019 à la surface des câbles N1 et N2 et sur une station témoin à proximité des deux câbles (en haut), et puissance transisant dans les câbles N1 et N2 aux mêmes dates (en bas).

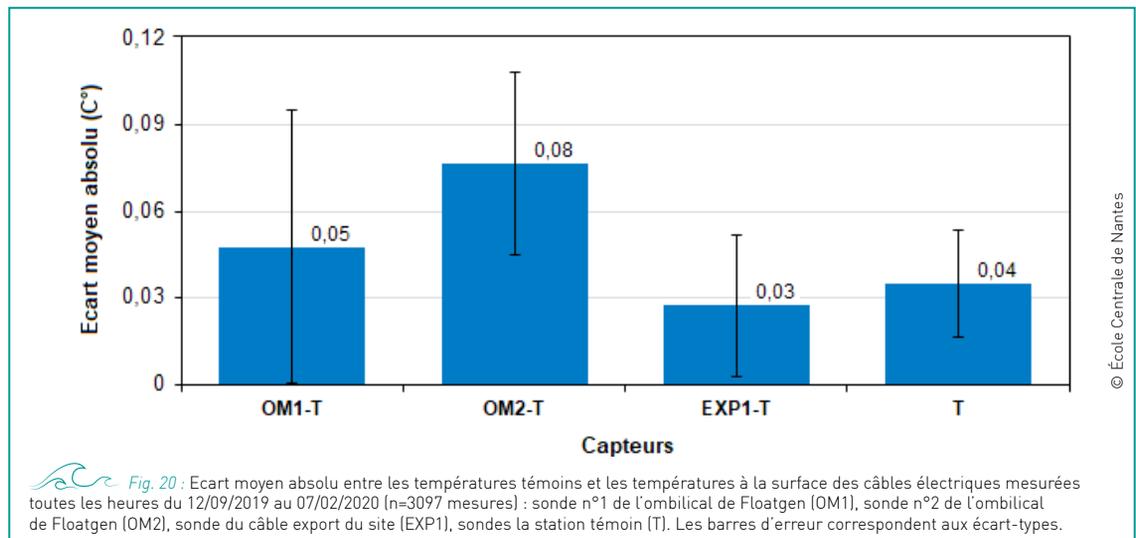
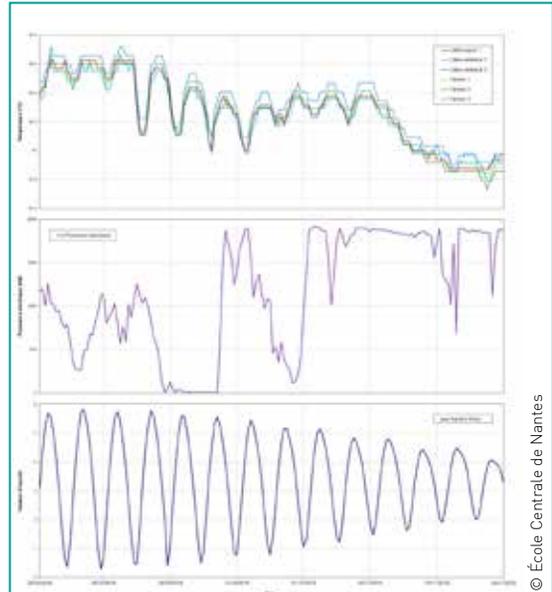


Fig. 20 : Ecart moyen absolu entre les températures témoins et les températures à la surface des câbles électriques mesurées toutes les heures du 12/09/2019 au 07/02/2020 (n=3097 mesures) : sonde n°1 de l'ombilical de Floatgen (OM1), sonde n°2 de l'ombilical de Floatgen (OM2), sonde du câble export du site (EXP1), sondes la station témoin (T). Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

Les écarts moyens absolus observés entre les températures témoins et les températures des capteurs positionnés à la surface des câbles électriques sont de  $0,05^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ ) et  $0,08^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ ) pour ceux de l'ombilical de Floatgen, et de  $0,03^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ ) pour celui du câble d'export du site. L'écart moyen absolu des températures issues des capteurs témoins est de  $0,04^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ ) (Fig. 20). Ces écarts ont été calculés uniquement pendant les périodes de production de l'éolienne. Ces valeurs sont très faibles et sont dans la gamme de résolution et de précision des capteurs de température utilisés. Par conséquent, les variations observées pourraient être dues aux variations intrinsèques des capteurs. Si elles correspondaient réellement à des émissions de chaleur par les câbles électriques, la hausse des températures n'excéderait pas  $0,11^{\circ}\text{C}$  pour un câble électrique d'une puissance de 2 MW.

De la même façon qu'au niveau de la connexion Jersey-Cotentin, les fluctuations de température observées sur les deux câbles suivent exactement celles relevées avec les capteurs témoins. Ces variations sont indépendantes de la production électrique. Elles peuvent être expliquées par des facteurs hydrodynamiques comme la marée et/ou la houle (Fig. 18). En effet, du 28 au 31 octobre 2019, la hauteur de la houle était comprise entre 1,07 et 2,02 m alors que du 2 au 3 novembre 2019, la hauteur de la houle était comprise entre 3,10

et 4,14 m (mesures issues du houlographe du SEM-REV). Ceci se traduit par une homogénéisation de la colonne d'eau et par un lissage des oscillations des courbes de température (Fig. 21).



© École Centrale de Nantes

Fig. 21 : Température mesurée toutes les heures du 28 octobre au 4 novembre 2019 (en haut) à la surface du câble d'export (1 capteur), à la surface de l'ombilical de Floatgen (2 capteurs), et sur une station témoin à proximité des deux câbles (3 capteurs), puissance transmise dans les deux câbles électriques aux mêmes dates (au milieu), hauteur d'eau aux mêmes dates (en bas).

## Conclusion :

Les données acquises au niveau de la connexion Jersey-Cotentin et des sites d'essais de Ouessant et du SEM-REV n'ont révélé aucun échauffement à la surface des câbles, et donc dans leur environnement immédiat, à un niveau de sensibilité de 0,06 °C. Le suivi de la température des câbles n'a pas pu être réalisé ou finalisé sur tous les sites d'étude. Cependant, en considérant que les câbles de la connexion Jersey-Cotentin présentaient une puissance plus forte que celles des câbles des autres sites d'essais considérés dans l'étude, il semble que l'impact écologique lié à la température des câbles posés sur le fond en période de fonctionnement soit négligeable.



## Limites :

La température n'a pas pu être mesurée sur la portion ensouillée du câble de raccordement du site du SEM-REV. Il n'a, par conséquent, pas été possible de caractériser l'échauffement potentiel autour d'un câble ensouillé à 1,5 m sous le fond marin. La radiation thermique des câbles ensouillés peut chauffer les sédiments à proximité immédiate car ceux-ci sont peu soumis à des mouvements d'eau. C'est un manque de connaissances qu'il faudra tenter de combler dans une prochaine étude.



**Objectif :** Identifier les stratégies de suivi *in situ* pour évaluer l'impact potentiel des câbles électriques sur les communautés benthiques localisées dans le champ proche des câbles.

### Contexte :

Un suivi des communautés benthiques consiste à faire un inventaire des communautés ciblées, c'est-à-dire une liste des taxons et un dénombrement de chaque taxon par unité de surface. Cet inventaire peut être effectué en utilisant des protocoles **destructifs** où des organismes sont prélevés directement sur site puis analysés en laboratoire. Des protocoles

**non destructifs** existent également et consistent en des inventaires réalisés *in situ* avec des observations directes ou en utilisant des techniques d'images sous-marines. La méthode sélectionnée dépend de la question scientifique initiale et des caractéristiques du site d'étude, principalement de la nature du substrat (dur ou meuble) et de la profondeur.

### Suivis destructifs :

#### Prélèvements *in situ*

Les communautés benthiques peuvent être échantillonnées directement *in situ* par une équipe de plongeurs qualifiés ou, dans certains cas, en utilisant des appareils téléguidés. Ces techniques présentent l'avantage de pouvoir réaliser des échantillonnages à des positions très précises, ce qui est utile pour évaluer les impacts a priori très localisés, comme ceux d'un câble électrique sous-marin (voir Fiche n° 6). Elles sont cependant lourdes à mettre en place. Pour les **substrats meubles**, des carottiers à main peuvent être utilisés pour prélever le sédiment et l'endofaune associée sur une surface donnée. Dans le cas des **substrats durs**, il est possible d'utiliser une suceuse, c'est-à-dire un aspirateur sous-marin à air comprimé (Fig. 22), après grattage d'une surface donnée pour prélever l'ensemble de la communauté qui y vivait fixée.



Fig. 22 : Echantillonnage de la macrofaune benthique par l'utilisation d'une suceuse sous-marine après grattage.



Fig. 23 : Benne Van-Veen ouverte sur le pont d'un navire.

#### Prélèvements distants

Certains outils de prélèvement sont employés depuis le pont d'un navire pour prélever les communautés benthiques. Ces techniques ne permettent pas une localisation précise des prélèvements mais ne demandent pas l'intervention de plongeurs. Elles peuvent être adaptées pour évaluer l'effet réserve qui peut concerner un champ plus large de part et d'autre des câbles (voir Fiche n° 9). Différents outils peuvent être utilisés selon le compartiment benthique visé. L'endofaune est échantillonnée avec différents types de **bennes** : Van-Veen, Smith-McIntyre ou Hamon (Fig. 23). L'épifaune peut être récoltée avec des **chaluts** à perche ou de fond. Pour leur part, les **dragues**, Rallier du Baty ou Charcot-Picard, peuvent échantillonner les deux compartiments. Ces techniques ne peuvent en revanche pas être employées pour opérer des prélèvements sur les substrats durs et ne concernent donc que les communautés de substrats meubles.

### Avantages et limites

Quel que soit le type d'échantillonnage destructif employé, ce qui est prélevé est ensuite tamisé puis conservé avant d'être traité en laboratoire. Ces suivis destructifs présentent l'avantage de permettre la détermination des organismes avec une grande précision taxonomique, puisque celle-ci se fait en laboratoire avec des clés de détermination, des

loupes binoculaires et des microscopes. De plus, les données collectées sont de nature quantitative et rendent les analyses plus robustes. Le travail de laboratoire associé (tri et détermination des échantillons) est néanmoins chronophage et l'aspect destructif de l'échantillonnage ne permet pas la réalisation de suivis temporels sur des endroits précis.

## Suivis non destructifs :

### Inventaires *in situ*

Les communautés benthiques subtidales peuvent être inventoriées visuellement, directement sur place par des équipes de plongeurs. Depuis 2008, ces inventaires sont standardisés grâce à la délimitation des surfaces avec l'utilisation de quadrats (Derrien-Courtel, 2008 ; Derrien-Courtel *et al.* ; 2013 ; Le Gal et Derrien-courtel, 2015). L'inventaire peut être exhaustif ou se focaliser sur certains com-

partiments (comme les algues, les crustacés ou la macrofaune) selon la problématique. Ces suivis présentent l'inconvénient de nécessiter des plongées souvent longues et des plongeurs ayant de bonnes compétences en taxonomie, mais ont l'avantage de permettre la réalisation de suivis temporels sur des endroits précis.

### Imagerie sous-marine

La prise d'images sous-marines peut être réalisée directement par des **plongeurs** (photoquadrats ou transects vidéos) (Fig. 24), ou en utilisant des **appareils distants**, qui peuvent être **mobiles** (caméra suspendue, traineau vidéo, ROV, AUV...) ou **immobiles** (système fixe de vidéo avec ou sans appâts). L'utilisation d'images sous-marines permet la collecte rapide d'importantes quantités d'informations avec une haute résolution spatiale. Elle permet de revenir facilement sur les données brutes pour vérifier une identification, un comptage ou pour rechercher un nouveau paramètre. Cette approche demande néanmoins un traitement en laboratoire qui est chronophage et fastidieux tant que l'on ne dispose pas d'outils fiables de reconnaissance automatique d'objets. L'identification des organismes étant jusqu'à présent réalisée par un observateur, un protocole d'analyse par sous-échantillonnage de l'image est souvent nécessaire.



Fig. 24 : Prise de photo sous-marine en plongée sur le site de Paimpol-Bréhat.

### Avantages et limites

Ces protocoles de suivi non-destructif sont régulièrement employés sur l'ensemble de la façade Manche-Atlantique depuis 2004 pour caractériser les communautés benthiques épigées et de substrats durs, mais ne sont en revanche pas adaptés pour les communautés cryptiques de l'endofaune. Contrairement aux méthodes destructives, ces méthodes ne

causent aucune perturbation des communautés ce qui est une clé pour opérer des suivis à long terme sur un même site. Cependant, ces méthodes offrent une résolution taxonomique un peu moins importante que les méthodes destructives car le scientifique, même aguerri, peut parfois passer à côté de certaines espèces de très petite taille (<5 mm).



**Objectif :** Etudier la succession des communautés épibenthiques colonisant les structures artificielles associées à un câble électrique sous-marin dans un environnement fortement hydrodynamique.

### Contexte :

Pour raccorder des installations EMR ou assurer des connexions entre îles et continents ou pays riverains, les câbles électriques sous-marins peuvent être enfouis ou simplement posés sur le fond et/ou protégés par des structures artificielles. Ces dernières constituent autant de substrats disponibles pour les espèces végétales et animales qui affectionnent les fonds durs. Un des objectifs de l'étude était de caractériser la colonisation et la succession de ces communautés sur différentes structures artificielles associées au site d'essai hydrolien de Paimpol-Bréhat.

En effet, la colonisation par les communautés épibenthiques (aussi appelée biofouling) de structures artificielles installées dans des environnements fortement hydrodynamiques reste méconnue.

### Méthode :

Deux types de structures artificielles (coques de protection en fonte et matelas de béton stabilisateur) associées au câble d'export du site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat ont été suivis pendant une période de 5 ans à une fréquence semestrielle (Fig. 25). Opéré en plongée, le suivi a été fait par imagerie sous-marine en trois sites différents le long du tracé du câble. A chaque site, des photographies des substrats artificiels, mais aussi du substrat naturel environnant, ont été prises. Les photos ont été analysées en laboratoire afin de décrire les communautés épibenthiques en utilisant une méthode optimisée pour cette étude.



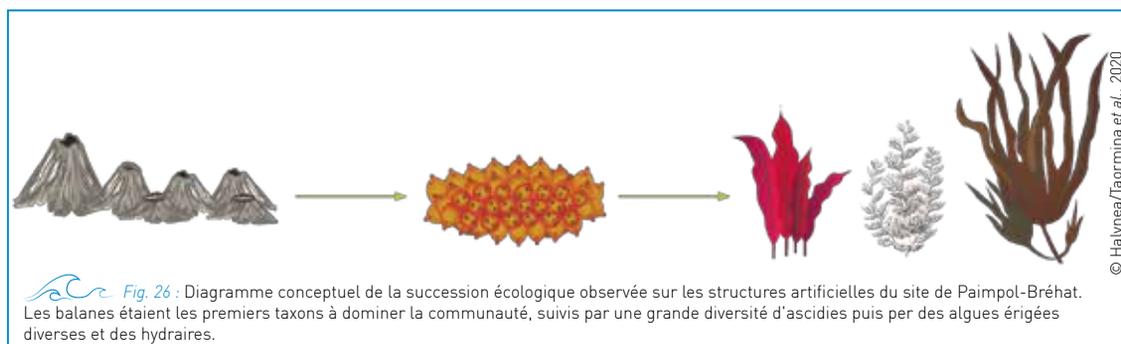
© Olivier Dugornay, Ifremer

Fig. 25 : Vue d'ensemble d'un des sites de suivi où sont visibles le câble protégé par une coque en fonte et un matelas de béton stabilisateur.

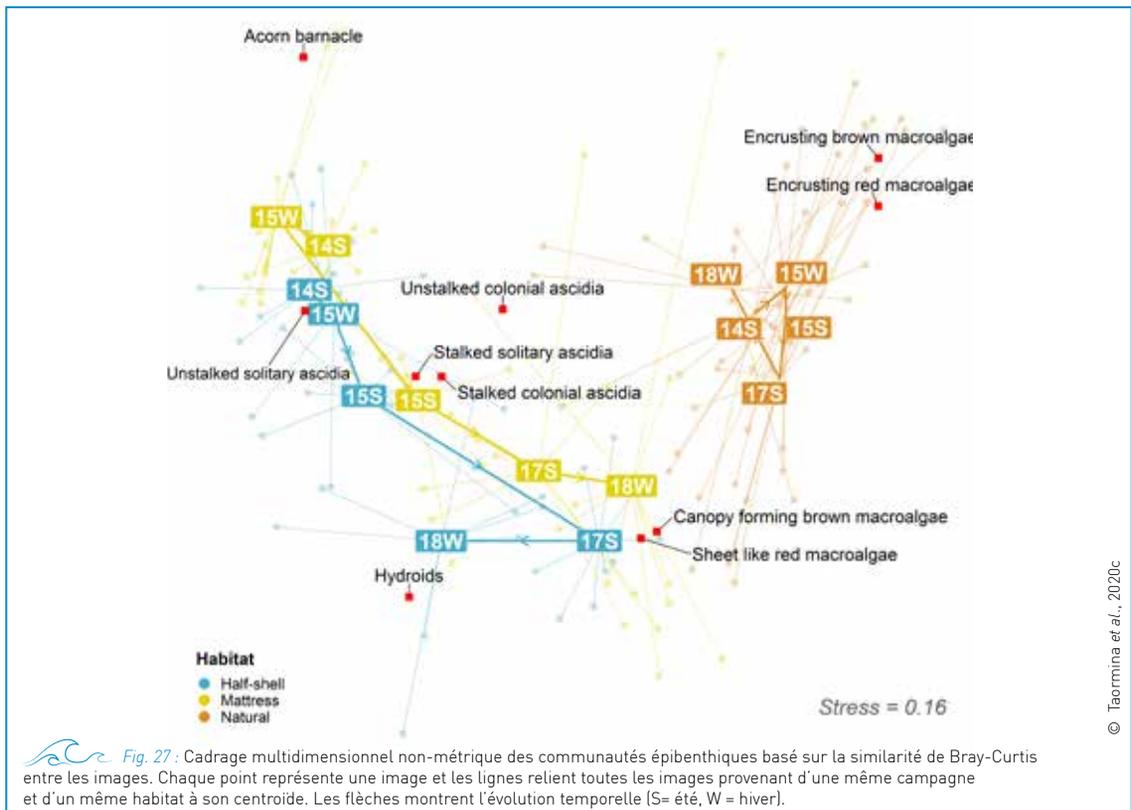
### Résultats :

Cette étude a mis en évidence une succession écologique globalement similaire (succession de balanes, de différents types d'ascidies et d'algues rouges) pour les communautés des deux habitats artificiels. Ces dernières tendaient cependant à se différencier après quatre ans de suivi, avec l'apparition de laminaires sur les matelas et d'hydrides sur les coques (Fig. 26 et 27). Néanmoins, ces processus de succession écologique ne semblaient pas terminés, en

d'autres termes le stade d'équilibre, ou *climax*, n'était pas atteint puisque les communautés ne montraient aucune stabilité dans le temps à la fin du suivi. Le substrat naturel environnant, dominé par des galets et des blocs rocheux, présentait, lui, des communautés benthiques stables dans le temps, dominées par des taxons encroûtants, et donc structurellement moins complexes que les communautés observées sur substrat artificiel à la fin du suivi.



© Halýnea/Taormina et al., 2020



© Taormina et al., 2020c

## Conclusion :

Le déploiement de structures artificielles a créé de nouveaux habitats décrits comme stables dans un environnement où l'habitat naturel proche est hautement mobile et fortement exposé à l'abrasion par le sédiment. Ainsi, la succession épibenthique a atteint des stades écologiques plus complexes au sein des habitats artificiels. Bien que ces communautés épibenthiques colonisant les substrats artificiels ne semblent pas avoir atteint leur stade climacique à la fin du suivi, ceux-ci abritent déjà des assemblages structurellement complexes qui pourront potentiellement entraîner une augmentation locale de la diversité.

## EN SAVOIR +

Taormina B., Marzloff M., Desroy N., Caisey X., Dugornay O., Metral-Thiesse E., Tan-cray A., Carlier A. (2020b) **Optimizing image-based protocol to monitor macroepibenthic communities colonizing artificial structures.** *ICES Journal of marine science*, Vol 77, 835-845 <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz249>

## ! Limites :

Le substrat naturel environnant n'étant pas de la roche au sens strict, mais un mélange de galets et de blocs de différentes tailles, il est difficile de réellement trancher sur la question de la différence de colonisation entre substrat artificiel et naturel dans cette étude. Afin de répondre à cette question, il faudrait considérer un site où les structures artificielles sont directement installées sur, ou à proximité immédiate, de récifs rocheux. Une meilleure caractérisation des différents sites de suivis, par exemple en installant des courantmètres pour caractériser l'hydrodynamisme, aurait permis de mieux comprendre la variabilité spatiale des conditions environnementales au sein de la présente étude.

Taormina B., Percheron A., Marzloff M., Quillien N., Lejart M., Caisey X., Desroy N., Dugornay O., Carlier A. (2020c) **Succession of epibenthic communities on artificial reefs associated with offshore renewable energy facilities within a tide-swept environment.** *ICES Journal of marine science*, Vol 77, 2656-2668 <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa129>



**Objectif :** Caractériser le potentiel d'habitat des structures artificielles de stabilisation de câbles électriques sous-marins pour la mégafaune benthique.

### Contexte :

Le déploiement de structures artificielles de protection et de stabilisation de câbles électriques sous-marins, que ce soit pour le raccordement de projets d'énergies marines renouvelables ou pour connecter des pays riverains, crée un nouvel habitat potentiel pour les poissons et crustacés, deux groupes d'organismes faisant partie de la mégafaune. Cet impact potentiel direct est souvent considéré comme bénéfique. Néanmoins, les connaissances vis-à-vis de l'impact réel de ce type de structure sur l'écosystème et la dynamique de co-

lonisation sur le long terme restent restreintes. Cette étude a donc visé à mieux caractériser le potentiel d'habitat pour la mégafaune benthique des matelas de béton utilisés pour stabiliser le câble d'export du site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat. En effet, 120 matelas de béton ont été installés en août 2013 sur une portion de câble non ensouillée d'environ 10 km, dont la profondeur varie entre 18 et 20 m. Une des spécificités de ce site d'étude réside dans l'existence, depuis 1966, d'un cantonnement à crustacés à proximité de ces matelas de béton.

### Méthode :

Parmi les 120 matelas de béton installés, 45 ont été suivis de 2015 à 2019 sur plusieurs secteurs de la route du câble. Ce suivi *in situ* était basé à la fois sur des comptages effectués pendant les plongées et sur l'analyse de vidéos réalisées par les plongeurs. Il a permis l'inventaire de cinq taxons ciblés : deux crustacés (le tourteau *Cancer pagurus* et le homard européen *Homarus gammarus*) et trois poissons (le congre *Conger conger*, la vieille *Labrus bergylta* ainsi que le capelan et le tcaud regroupés sous le terme *Trisopterus spp.*). Ce suivi a aussi été l'occasion, pour chaque matelas, d'une description du substrat dominant et du nombre de cavités présentes, en discernant les « trous » (cavités triangulaires entre deux blocs de béton constituant le matelas) et les « grottes » (cavités plus larges formées sous le matelas lorsqu'il n'est pas en contact direct avec le fond) (Fig. 28).

### Résultats :

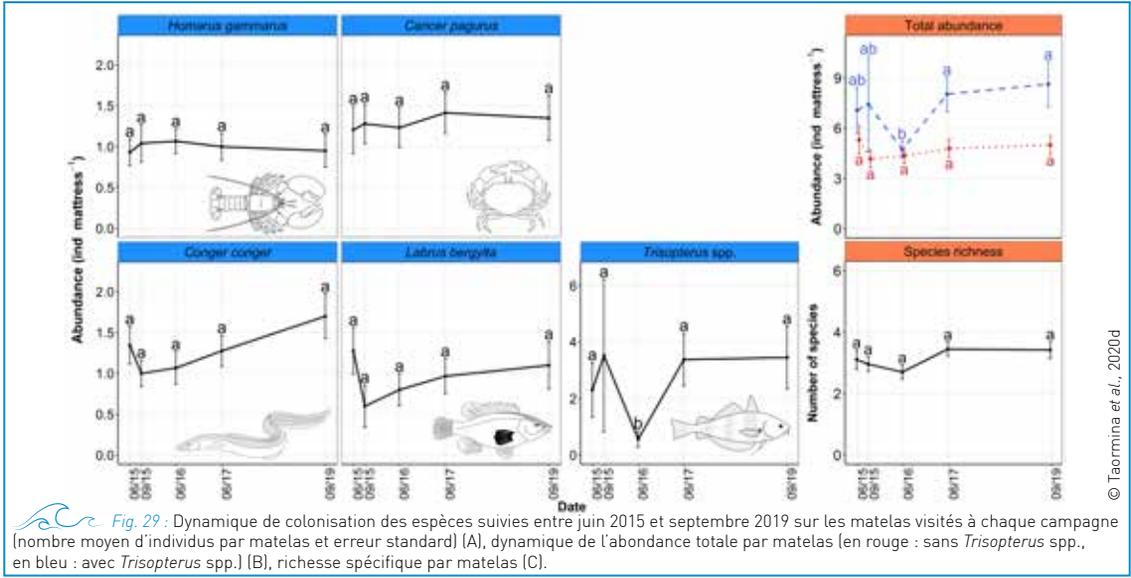
En ne considérant que les espèces ciblées, la richesse spécifique et la densité des espèces (excepté pour *Trisopterus spp.*) n'ont pas varié significativement entre 2015 et 2019 (Fig. 29). Les densités maximales observées sont de 0,28 individu/m<sup>2</sup> pour le homard et de 0,22 individu/m<sup>2</sup> pour le congre. L'installation de ces espèces semble donc s'être faite rapidement après l'implantation des matelas de béton et le taux d'occupation maximal a vraisemblablement été atteint à la date de début du suivi (c'est-à-dire en deux ans, ou moins). Le nombre et la nature (grotte ou trou) des abris disponibles pour chaque matelas déterminent significativement la composition de la communauté de mégafaune benthique présente. La présence du homard est largement associée au nombre de trous présents. De plus, la nature et le



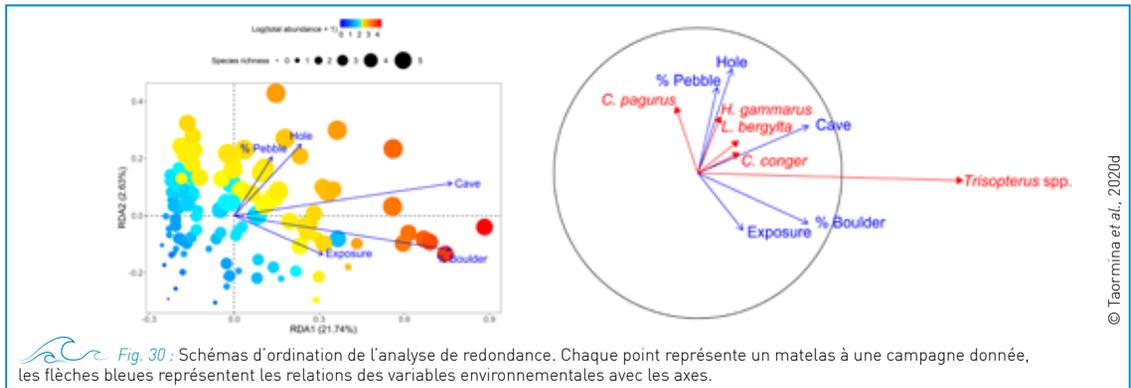
Fig. 28 : Principales espèces de mégafaune mobile trouvant refuge dans les cavités des matelas de béton : *Homarus gammarus* dans un « trou » (en haut à gauche), *Cancer pagurus* dans une « grotte » (en haut à droite), *Trisopterus spp.* dans une grotte (en bas à gauche), *Conger conger* dans un « trou » (en bas à droite).

nombre d'abris dépendent des conditions physiques locales comme le type de substrat, la topographie ou l'exposition au courant de marée (Fig. 30). On retrouve ainsi :

- des matelas avec de nombreuses cavités de type grotte sur des zones dominées par des blocs rocheux et soumis à de forts courants, qui sont fortement colonisés, notamment par *Trisopterus spp.*, qui sont des poissons grégaires,
- des matelas avec de nombreuses cavités de type trou associées aux zones de galets qui sont modérément colonisés par l'ensemble des espèces solitaires de la mégafaune,
- des matelas présentant un nombre très réduit de cavités disponibles et faiblement colonisés par la mégafaune benthique.



© Taormina et al., 2020d



© Taormina et al., 2020d

### Conclusion :

Cette étude a montré que les matelas de béton stabilisateurs offrent un habitat approprié et durable pour les cinq taxons de poissons et crustacés suivis. Elle met plus particulièrement en lumière l'importance, pour caractériser précisément le potentiel d'habitat d'une structure artificielle, de considérer à la fois le design de la structure elle-même (qui détermine la spécificité de l'habitat), et la façon dont cette structure interagit avec les conditions locales de substrat naturel et de courant de marée (qui déterminent la disponibilité de l'habitat).

### EN SAVOIR +

Taormina B., Laurans M., Marzloff M., Dufournaud N., Lejart M., Desroy N., Leroy D., Martin S., Carlier A. [2020d] **Renewable energy homes for marine life: habitat potential of a tidal energy project for benthic megafauna.** *Marine Environmental Research*, Vol 161, 105131 <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105131>

### ! Limites :

Les différentes cavités présentes ont été décrites de manière très succincte en ne différenciant que ce qui a été appelé grottes et trous. Il aurait été intéressant de procéder à des descriptions plus précises de ces cavités, notamment des grottes, en renseignant par exemple des critères quantitatifs tels que leur profondeur, leur taille et la forme de leur ouverture. Cela aurait permis d'avoir une meilleure compréhension des propriétés du récif artificiel.

L'occupation des habitats du récif artificiel par la mégafaune benthique peut varier selon des cycles nyctéméral et tidal, en fonction de l'écologie et du comportement des différentes espèces. Pour intégrer ce paramètre, il serait intéressant d'utiliser un système d'enregistrement vidéo fixe et autonome sur un laps de temps assez long pour couvrir plusieurs cycles journaliers et différents coefficients de marée.

# Evaluation *in situ* des impacts potentiels sur le benthos Suivi de la mégafaune benthique associée aux structures de raccordement d'une éolienne flottante

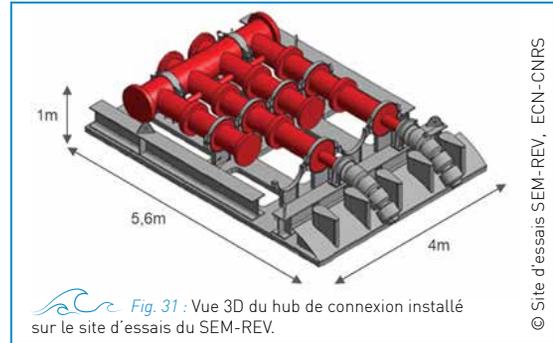


**Objectif :** Étudier la colonisation par la mégafaune benthique des structures de raccordement (hub de connexion et ombilical) de l'éolienne flottante sur le site d'essais du SEM-REV.

## Contexte :

De manière assez similaire à l'étude de la mégafaune opérée sur le site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat (voir Fiche n° 7), ces travaux visaient à caractériser le potentiel d'habitat pour la mégafaune benthique de deux structures associées au raccordement de l'éolienne flottante Floatgen installée sur le site d'essais du SEM-REV. Il s'agit en l'occurrence du hub de connexion (Fig. 31) et de la portion de l'ombilical posée sur le fond et maintenue avec des étréques de fixation. Le contexte écologique de ce site est très différent de celui du site de Paimpol Bréhat de par le type de fond, la profondeur, les conditions océanographiques et la proximité de l'estuaire de la Loire. Il était

donc intéressant de décrire l'assemblage d'espèces de la mégafaune mobile dans cet environnement.



## Méthode :

Ce suivi de la mégafaune sur le hub et l'ombilical de l'éolienne Floatgen a eu lieu en plongée. Cette opération nécessite des conditions de mer quasi idéales avec une absence de houle pour la mise à l'eau ainsi qu'une visibilité correcte pour travailler à une profondeur de 40 mètres. A deux reprises, la visibilité de l'eau qui était très faible n'a pas permis d'effectuer le

travail souhaité. Lors de ces interventions en plongée, le binôme était équipé d'une caméra pour filmer l'ensemble de la zone suivie. Comme pour le site de Paimpol-Bréhat, le comptage des individus de la mégafaune était basé à la fois sur des comptages effectués *in situ* et sur l'analyse de vidéos réalisées par les plongeurs.

Espèces observées	Hub de connexion	Ombilical Floatgen	
		(Plongée 1 ; 10 minutes, 165 m)	(Plongée 2 ; 14 minutes ; 230 m)
Congre ( <i>Conger conger</i> )	10	0	0
Homard ( <i>Homarus gammarus</i> )	3	1 <sup>(a)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
Tourteau ( <i>Cancer pagurus</i> )	6	5	16
Etrille ( <i>Necora puber</i> )	4	1	1
Lieu ( <i>Pollachius sp.</i> )	1	0	0
Araignée ( <i>Maja brachydactyla</i> )	0	0	1
Tacaud ( <i>Trisopterus spp.</i> )	Plusieurs dizaines	Peu	Plusieurs dizaines <sup>(c)</sup>
Grondin perlon ( <i>Chelidonichthys lucerna</i> )	0	1	2
Sole Commune ( <i>Solea solea</i> )	0	0	2
Dragonnet Lyre ( <i>Callionymus lyra</i> )	0	0	2

(a) : au niveau du câble ombilical, à environ 20 m du hub, (b) : au niveau d'une étréque de stabilisation, (c) : concentrés surtout au niveau des étréques de stabilisation.

Tab 1 : Abondances des différentes espèces de la mégafaune recensées sur le hub de connexion du site d'essais du SEM-REV et sur deux transects le long de l'ombilical de Floatgen.

Au cours de trois plongées réalisées le 24 mai 2018, un suivi complet du hub et d'une partie de l'ombilical a pu être effectué. Lors de la première plongée, l'ensemble de la structure du hub de connexion a pu être prospecté, le comptage a donc été exhaustif. Concernant l'ombilical de Floatgen, la longueur suivie dépendait du temps de plongée, limité par la profondeur im-

## Résultats :

Le suivi des deux structures de raccordement a permis d'identifier, de manière préliminaire et exploratoire, les espèces majoritairement présentes (Tab. 1). On retrouve en commun les crustacés, bien que le homard et l'étrille soient présents de manière plus abondante au niveau du hub. En ce qui concerne le tourteau, les deux habitats semblent lui convenir. Le congre, quant à lui, est inféodé au hub. Si le hub était à peine ensouillé par le sédiment, l'ombilical n'était plus visible à plusieurs reprises et ne proposait alors aucun habitat potentiel. La présence de tacauds sur ce câble était concentrée à proximité des équerres de stabilisation (Fig. 32).

L'étude d'impact réglementaire réalisée pour l'implantation du site d'essais du SEM-REV indiquait que les tacauds, les grondins, les dragonnets lyres et les soles étaient présents dans les habitats de fonds sableux (sable fin) à proximité. On peut donc affirmer qu'ils ne sont pas influencés par l'habitat constitué par le hub et l'ombilical. Il en est sans doute de même pour les tourteaux, les araignées et les étrilles, qui

## Conclusion :

Les deux structures de raccordement, le hub et l'ombilical, représentent deux habitats artificiels différents se traduisant par une présence de cortèges d'espèces distincts. Ainsi, les trous et cavités proposés par le hub sont largement colonisés par les congres et les homards, de façon similaire à ce qui est observé sous les matelas de béton du site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat. Au niveau de l'ombilical, le seul habitat artificiel notable est apporté par les équerres stabilisatrices. La houle et le courant génèrent autour du câble des mouvements de sable qui entraînent un ensouillage très variable et parfois des dépressions. Celles-ci sont autant d'habitats potentiels pour les tourteaux qui peuvent s'y enfouir.

La simplicité de la structure de l'ombilical et la taille limitée du hub permettent un suivi en plongée de qualité. En revanche, des difficultés d'intervention sub-

portante. Ainsi, pour caractériser les deux transects sur l'ombilical, le temps effectif du suivi a été précisé et la distance parcourue a été estimée grâce à la localisation précise des infrastructures du site.

La majorité des taxons de la mégafaune a été identifiée au niveau spécifique et comptabilisée en plongée (Tab. 1).

sont classés comme ne présentant pas d'affinité pour un substrat particulier. En revanche, le congre, le homard et le lieu n'ont jamais été mentionnés dans cette étude d'impact, ce qui est logiquement dû à leur affinité pour les substrats rocheux. Ces espèces sont donc certainement attirées par les structures artificielles étudiées.



Fig 32 : Image prise à l'aide d'un ROV d'une équerre de fixation utilisée pour la portion posée de l'ombilical de Floatgen, autour de laquelle se concentre un banc de tacauds.

sistent en raison de l'éloignement par rapport à la côte et d'une visibilité parfois médiocre. Au niveau de l'ombilical, une alternative à la plongée consisterait à déployer un ROV pour acquérir des données de bonne qualité pendant un temps peu limité. La structure tridimensionnelle complexe du hub rend son suivi par ROV plus compliqué pour obtenir des données quantitatives fiables, mais permet d'obtenir un bon aperçu des espèces présentes.

Ce travail de suivi effectué avant le passage de courant électrique dans l'ombilical a permis d'obtenir des données préliminaires sur le niveau de colonisation de ces structures. Même s'il souffre d'un manque de réplification dans le temps, ce travail pourra servir de référence pour les suivis ultérieurs qui seront réalisés pendant les périodes de fonctionnement de l'éolienne flottante.



**Objectif :** Evaluer le potentiel effet réserve sur les communautés benthiques associé aux restrictions de pêche dans le corridor des câbles électriques sous-marins entre Jersey et le Cotentin.

### Contexte :

La plupart du temps, le corridor des câbles électriques sous-marins fait l'objet d'une exclusion de certaines activités anthropiques, notamment la pêche aux engins trainants, afin de prévenir toute avarie. Les zones où le chalutage, le dragage et le mouillage sont prohibés peuvent ainsi devenir des zones dites réserves pour les communautés benthiques qui s'y trouvent protégées du remaniement sédimentaire et de l'abrasion. Il s'agit d'un impact indirect de la présence des câbles sous-marins qui est parfois considéré comme « positif ». Néanmoins,

ce potentiel effet réserve associé à la présence de câbles électriques n'a été que très peu étudié et concerne surtout les secteurs où les câbles ne sont pas ensouillés. Entre l'île de Jersey et la presqu'île du Cotentin, deux câbles électriques posés sur le fond empruntent le même corridor et la pêche aux arts trainants y est interdite depuis les années 80. Ce corridor représente une zone de 60 km<sup>2</sup> où les communautés benthiques peuvent potentiellement bénéficier de l'effet réserve.

### Méthodes :

C'est l'endofaune qui a été ciblée dans les échantillonnages réalisés (Fig. 33) :

- côté français, en octobre 2017, en utilisant une benne Van Veen (0,1 m<sup>2</sup>) sur 12 sites d'un habitat sablo-vaseux (4 au sein de la zone d'interdiction et 8 en dehors),
- côté anglais, en mars 2018, à l'aide d'une benne Hamon (0,1 m<sup>2</sup>) sur 9 sites d'un habitat graveleux (3 au sein de la zone d'interdiction et 6 en dehors).

Les prélèvements ont été tamisés à bord sur une maille de 2 mm. Les organismes ont ensuite été triés, déterminés et dénombrés au laboratoire. La stratégie adoptée a été de comparer, au sein et en dehors du corridor, la biodiversité benthique analysée sur les plans taxonomique et fonctionnel. Pour cela, une étude statistique a été menée concernant la relation entre la diversité des communautés, la position par rapport à la zone d'exclusion et l'effort de pêche estimé à partir de données VMS obtenues pour les années 2014 à 2016 (Fig. 33).

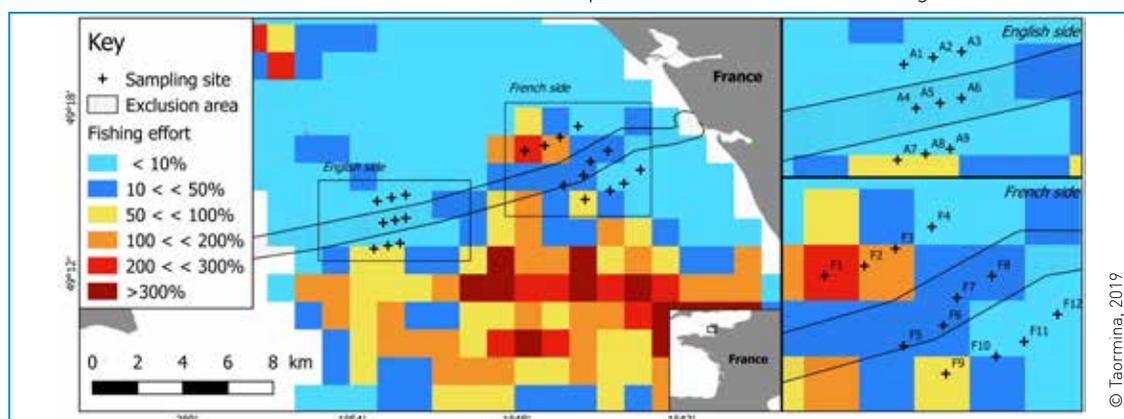
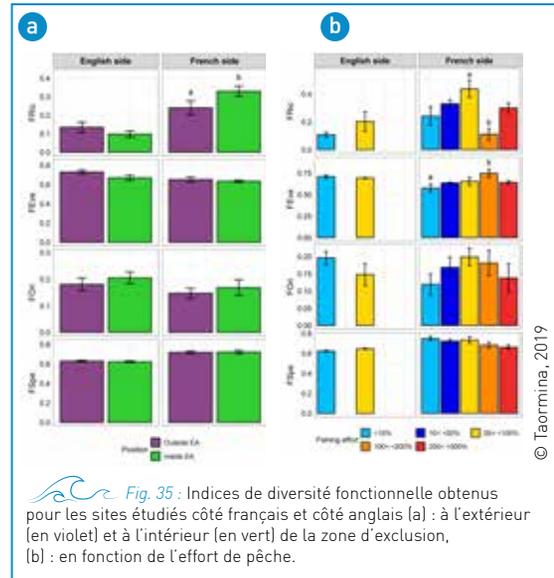
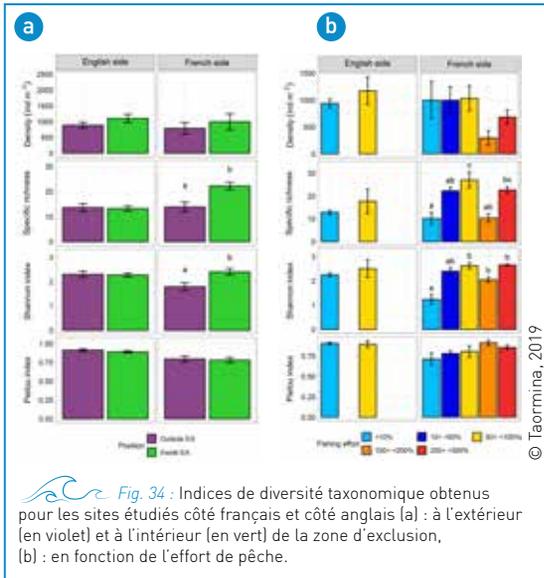


Fig. 33 : Carte de la zone d'étude entre l'île de Jersey et la France indiquant la localisation des 21 sites d'étude, distribués côté français et côté anglais. La pression de pêche est représentée sur une grille en pourcentage de surface remaniée par an (une valeur supérieure à 100 % pour une cellule indique que l'ensemble de sa surface a été remaniée plus d'une fois durant l'année).

### Résultats :

Du côté anglais, aucune différence entre l'intérieur et l'extérieur de la zone d'exclusion n'a été observée, quels que soient les indices de diversité fonctionnelle et taxonomique testés (Fig. 34 et 35). En revanche, du côté français, les assemblages situés dans la zone d'exclusion étaient légèrement plus diversifiés

que ceux des sites localisés à l'extérieur d'un point de vue taxonomique (différence significative pour la richesse spécifique et l'indice de Shannon), et dans une moindre mesure, d'un point de vue fonctionnel (différence significative pour la richesse fonctionnelle) (Fig. 34 et 35).



## Conclusion :

Du côté français, les différences mises en évidence suggèrent un léger mais réel effet réserve, avec des communautés plus diversifiées à l'intérieur de la zone d'exclusion.

Côté anglais, l'absence de différence peut s'expliquer par une faible pression de pêche, et ce même à l'extérieur de la zone d'exclusion.



## EN SAVOIR +

Taormina B (2019) **Potential impacts of submarine power cables from marine renewable energy projects on benthic communities.** *Thèse de doctorat : Université de Bretagne Occidentale.* 274 p.



## Limites :

La pression de pêche aux engins trainants est globalement faible dans la zone d'étude au regard de ce qu'elle peut être ailleurs dans le golfe Normand-Breton. La distribution spatiale de cette pression de pêche apparaît hétérogène à proximité de la zone d'exclusion. Par conséquent, il a été difficile d'appliquer un protocole d'échantillonnage incluant un gradient de pression de pêche bien marqué du centre de la zone d'exclusion vers les zones extérieures, et ainsi de mettre en relation les différences de diversité avec la pression de pêche.

Les résultats ne portent que sur la fraction dite endofaune des communautés benthiques ciblées. Or, il est démontré que l'épifaune, qui comporte des espèces de plus grandes tailles et souvent plus fragiles, est généralement plus sensible à la pression de pêche aux engins trainants que l'endofaune. Cependant, compte-tenu des forts courants de marée et des mouvements sédimentaires dans la zone d'étude, l'épifaune est peu présente. C'est pour cela qu'il a été décidé de ne pas l'étudier.



**Objectif :** Etude de l'impact potentiel du câble de raccordement électrique sous-marin d'une hydrolienne sur les biocénoses des fonds rocheux subtidaux.

### Contexte :

Cette étude avait pour objectif de mieux caractériser les impacts potentiels de la présence d'un câble sur les communautés benthiques associées, dans un cadre où le nombre d'études *in situ* est extrêmement

restreint. Des communautés de substrat rocheux ont ainsi été étudiées au voisinage d'un câble et dans une zone témoin, afin d'évaluer l'influence du câble sous tension sur leur composition.

### Méthode :

L'étude a été effectuée le long du câble d'export du site d'essais hydrolien du Fromveur, situé sur la côte sud de l'île d'Ouessant. La zone étudiée, rocheuse, est traversée par le câble à une profondeur de 13 m. Conformément au protocole national DCE (Derrien-Courtel, 2008 ; Derrien-Courtel *et al.*, 2013 ; Le Gal et Derrien-Courtel, 2015), à chaque campagne, 20 quadrats non destructifs de 0,25 m<sup>2</sup> ont été intégralement inventoriés (faune/flore/strate arbustive) *in situ* par des plongeurs. Parmi ces 20 quadrats, 10 étaient positionnés à proximité immédiate du câble (zone du câble) et 10 autres à 5 mètres du câble (zone témoin) (Fig. 36). Au sein de chaque quadrat, chaque espèce était dénombrée : sous forme de nombre d'individus (ou de colonies), ou sous forme de pourcentage de recouvrement (faune encroûtante non individualisable), ou encore sous

forme de classe de pourcentage de recouvrement (pour les algues encroûtante uniquement). Deux campagnes ont été réalisées en juillet 2018 et juin 2019. Le câble a été mis sous tension de manière continue entre mi-octobre et fin décembre 2018, puis de façon discontinue jusqu'en avril 2019.



Fig. 36 : Photographie du câble électrique suivi (au premier plan) au sein d'une forêt de laminaires. Le quadrat utilisé pour suivre les communautés épibenthiques est visible dans le coin inférieur gauche.

### Résultats :

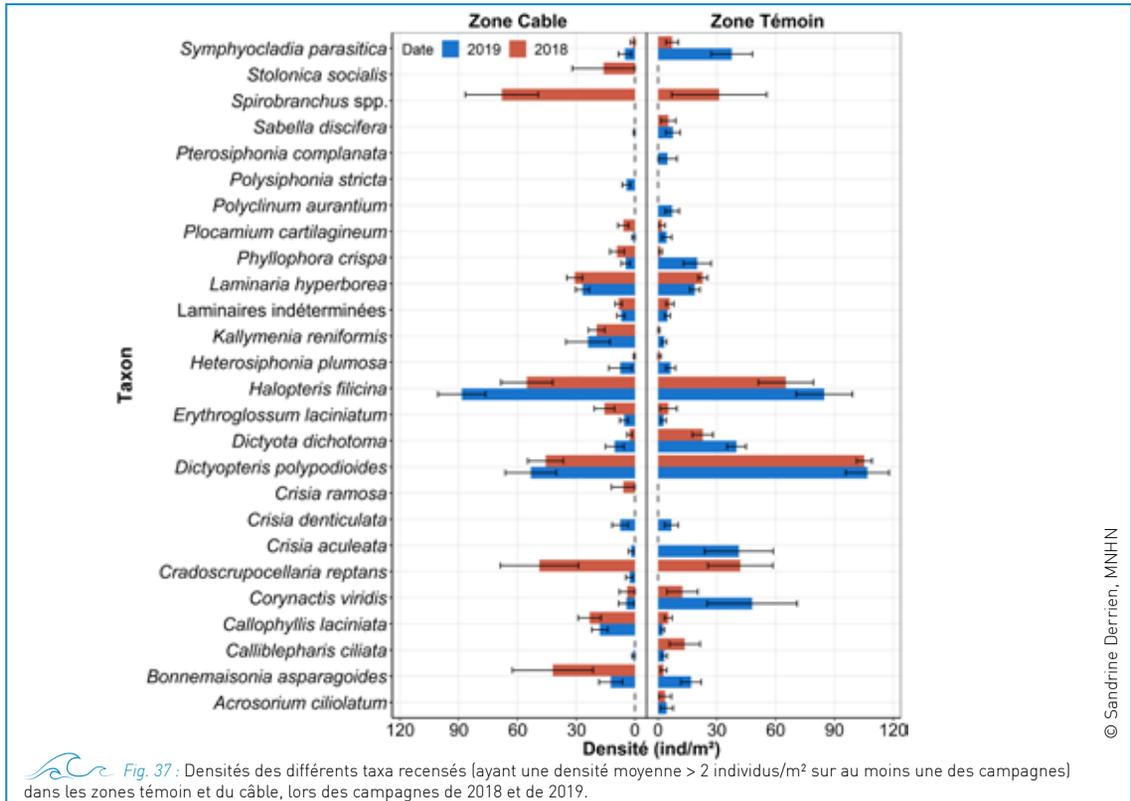
#### Strate arbustive

Pour les deux zones, témoin et du câble, la strate arbustive est dominée par la laminaire *Laminaria hyperborea*. Après analyses statistiques des données acquises, aucune différence significative entre les deux campagnes n'a été mise en évidence, qu'il s'agisse de la densité totale de la strate arbustive ou des densités des espèces qui composent cette strate.

#### Sous-strate

Au niveau de la sous-strate, en 2018 et 2019 respectivement, 39 et 49 taxa ont été inventoriés sur la zone témoin, tandis que 45 et 49 taxa ont été inventoriés sur la zone du câble. Au sein de la zone témoin, plusieurs taxons voient leur abondance présenter des variations de manière significative entre 2018 et 2019 (Fig. 37). Ces différences sont vraisemblablement liées à la variation temporelle naturelle de ces communautés. Pour la zone du câble, il est enregistré une diminution significative de l'abondance de l'annélide *Spirobranchus* spp. (espèce la plus abondante en 2018 et qui n'est plus recensée en 2019) et des

algues brunes encroûtantes. En parallèle, la densité de la rhodophycée *Polysiphonia stricta* augmente de manière significative entre les deux années d'échantillonnage. En ce qui concerne la comparaison entre zone témoin et zone du câble en 2019, les tests statistiques mettent en évidence une différence significative pour 12 des taxa. Parmi ceux-ci, trois sont significativement plus abondants sur la zone du câble : il s'agit des rhodophycées *Callophyllis laciniata*, *Kallymenia reniformis* et *Polysiphonia stricta*. Cette dernière n'avait pas été recensée en 2018, par contre les deux autres étaient déjà plus abondantes sur cette zone. Les espèces dont les abondances sont supérieures sur la zone témoin sont les phéophycées *Dictyota dichotoma* et *Dictyopteris polypodioides*, les rhodophycées *Symphocladia parasitica* et *Phyllophora crispa*, l'échinoderme *Marthasterias glacialis*, le cnidaire *Corynactis viridis*, l'annélide *Sabella discifera*, l'ascidie *Polyclinum aurantium* et le bryozoaire *Crisia aculeata*.



## Conclusion :

Cette étude a mis en évidence des différences significatives d'abondance de certaines espèces (12) au niveau des communautés d'organismes fixés (flore et faune) de la zone témoin *versus* celle de la zone du câble, grâce à des tests de Welch de comparaison de moyenne par mutation (n=100) réalisés pour chaque taxon. La plus forte abondance de certaines espèces sur la zone témoin peut sans doute être expliquée par la topographie moins accidentée, qui permet un léger dépôt de sédiment, favorisant ainsi le développement de certaines espèces telles que les phéophycées *Dictyopteris polypodioides* et *Dictyota dichotoma*, l'annélide *Sabella discifera* et l'ascidie *Polyclinum aurantium*. Il est donc difficile de relier cette différence à la présence du câble. En ce qui concerne les modifications de la biocénose à laminaires engendrées par l'installation du câble, celles-ci se font en plusieurs étapes. Dans un premier temps, la pose du câble crée un nouveau substrat qui va connaître une colonisation progressive par des espèces pionnières, telles que les algues brunes encroûtantes et *Spirobranchus* spp. La disparition de *Spirobranchus* spp., après la mise en service du câble, est probablement le résultat du processus de succession écologique naturel de colonisation d'un nouveau substrat, plutôt que celui de l'effet du champ électromagnétique.

## ! Limites :

Cette étude avait initialement pour but d'observer l'effet du passage de courant dans le câble, et donc la production de champs électromagnétiques, sur la colonisation benthique. En raison de problèmes techniques, l'hydrolienne n'a que très peu fonctionné entre 2018 et 2019, ce qui limite la portée des résultats obtenus au vu des objectifs initiaux.



**Objectif : Développer des dispositifs et des protocoles de laboratoire adaptés à l'analyse de la réponse d'organismes benthiques modèles à des champs magnétiques artificiels.**

### Contexte :

L'étude *in situ* de la réponse d'organismes benthiques à l'émission de champs magnétiques provenant de câbles électriques offre l'avantage d'analyser un contexte écologique réaliste. Cela est souvent rendu complexe du fait de la logistique à mettre en œuvre sur place et de la multitude de facteurs non contrôlés pouvant potentiellement influencer la réponse de ces organismes. Les approches en laboratoire sont très complémentaires des approches *in situ* car elles

permettent de ne faire varier que le facteur à étudier, tout en contrôlant les autres facteurs. Néanmoins, les organismes étudiés ne se trouvent pas dans un contexte très réaliste. Les approches expérimentales adoptées dans cette étude consistent à créer en laboratoire des champs magnétiques d'intensités choisies puis à étudier la réponse comportementale ou physiologique des espèces modèles, lorsqu'elles sont exposées à ces champs.

### Description générale :

Des bobines de Helmholtz ont été développées et fabriquées pour le projet afin de créer des zones d'expérimentation où le champ magnétique désiré est relativement uniforme, c'est-à-dire dont l'intensité est la plus constante possible. Le dispositif est constitué de deux bobines de mêmes dimensions positionnées selon deux plans parallèles, l'une en face de l'autre, à une distance contrôlée. En injectant du courant électrique dans ces bobines, un champ magnétique uniforme est créé au centre du dispositif. L'alimentation peut se faire en **courant continu** ou en **courant alternatif**, pour simuler les champs

magnétiques produits par différents types de câbles électriques sous-marins. Il est possible d'ajuster l'intensité du champ magnétique produit pour créer des valeurs proches de ce que l'on peut retrouver au voisinage de câbles électriques sous-marins, en modifiant l'intensité du courant électrique injecté dans les bobines. Dans le cadre de l'étude, deux dispositifs différents de type « bobines de Helmholtz » ont été utilisés : un premier à destination de juvéniles de homard européen et un second pour des coquilles Saint-Jacques.

### Dispositif pour étudier les juvéniles de homard européen

Le premier dispositif a été employé pour étudier la réponse de juvéniles de homard européen (voir Fiche n°12). Il était constitué de deux bobines de Helmholtz de 600 m de câble [section de 2,5 mm<sup>2</sup> avec conducteur en cuivre]. Les bobines étaient enroulées sur deux cadres en bois de 1,5 m de côté (représentant 100 tours de câble) et espacées verticalement de 1 m (Fig. 38). Pour créer un champ magnétique continu, les deux bobines étaient connectées à une alimentation de laboratoire en courant continu (modèle BK Précision BK-1745A). Pour créer le champ magnétique alternatif, l'alimentation était assurée avec un autotransformateur monophasé (modèle RS CMV 15E-1).



Fig.38 : Bobines de Helmholtz utilisées lors de l'étude pour les expérimentations sur les juvéniles de homard européen.

© Bastien Taormina, Ifremer /France Energies Marines

## Dispositif pour étudier les coquilles Saint-Jacques

Le second dispositif a été utilisé pour étudier la réponse de coquilles Saint-Jacques (voir Fiche n° 13). Il était constitué de deux bobines de 1200 m de câble (section de 2,5 mm<sup>2</sup> avec conducteur en cuivre). Les bobines étaient enroulées sur deux cadres en PVC de 1,5 m de côté (représentant 200 tours de câble) et espacées de 1 m (Fig. 39a). Cette configuration a créé un champ magnétique attendu à moins d'un mètre de distance d'un câble électrique sous-marin, homogène dans la zone d'expérimentation. Ce système, conçu par TBM Environnement et MAPPEM Geophysics, est mobile et conçu pour des usages réguliers et des besoins expérimentaux variés (champs homogènes, effets barrières, courants DC/AC...). En outre, tous les paramètres électriques (tension, mise en marche/arrêt, température des bobines) ont été contrôlés, enregistrés et programmés à partir d'un logiciel spécialement conçu à cet effet et développé par MAPPEM Geophysics.



Fig. 39a : Bobines de Helmholtz utilisées lors de l'étude pour les expérimentations sur la coquille Saint-Jacques.

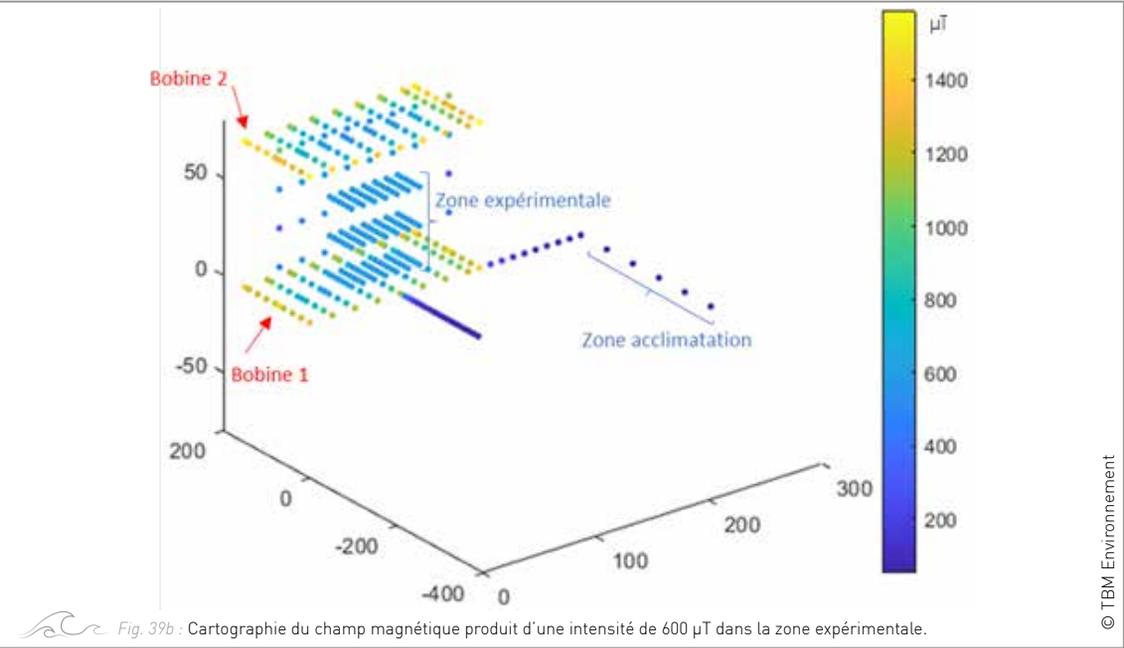


Fig. 39b : Cartographie du champ magnétique produit d'une intensité de 600 µT dans la zone expérimentale.



**Objectif :** Etudier expérimentalement les impacts de champs magnétiques artificiels sur le comportement du homard européen en phase juvénile.

**Contexte :**

Le homard européen (*Homarus gammarus*), espèce emblématique et à fort enjeu commercial sur les côtes françaises, est régulièrement observé dans divers récifs artificiels, y compris les installations associées aux projets d'énergies marines renouvelables. Cette colonisation peut conduire les homards à être exposés durablement aux champs magnétiques émis par les câbles électriques sous-marins. Il est donc nécessaire de déterminer, par des études contrôlées en laboratoire, quel peut être l'impact potentiel de champs magnétiques artificiels produits

par des câbles en courant continu (champ magnétique statique) ou alternatif (champ magnétique variable dans le temps) sur les espèces pour lesquelles une sensibilité est avérée ou supposée. Par ailleurs, la majorité des travaux portent sur la phase adulte des modèles biologiques, alors que les premières phases de développement des organismes sont une étape critique pour le maintien des populations. L'étude s'est donc focalisée sur le comportement de juvéniles de homard européen.

**Protocole général :**

Deux tests différents ont été mis au point pour analyser l'influence potentielle d'un champ magnétique artificiel sur le comportement des juvéniles de homard (Fig. 40) :

- un test de choix d'abri afin de mettre en évidence des phénomènes d'attraction, de répulsion ou d'indifférence à deux types de champs magnétiques artificiels,

- un test portant sur leur comportement d'exploration et leur capacité à trouver un abri après une exposition d'une semaine à des champs magnétiques artificiels.

Les champs magnétiques artificiels ont été générés en laboratoire, en courant continu et en courant alternatif, avec des bobines de Helmholtz. Le dispositif est décrit en détail dans la Fiche n° 11.

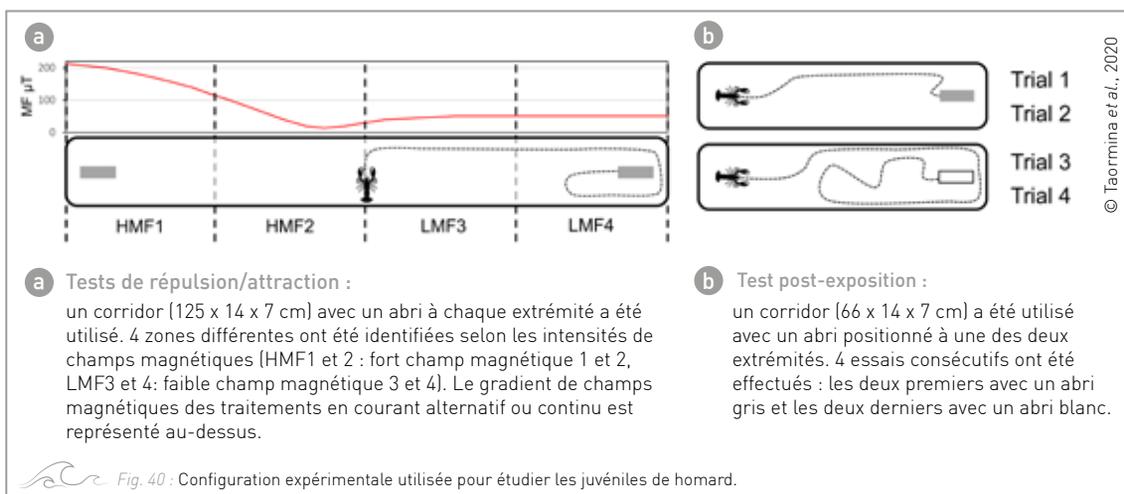


Fig. 40 : Configuration expérimentale utilisée pour étudier les juvéniles de homard.

## Tests de répulsion/attraction :

### Méthode

Le test permettant d'étudier le potentiel d'attraction ou de répulsion des champs magnétiques artificiels consistait à relâcher un homard au centre d'un corridor (125 x 14 x 7 cm) comprenant un abri semi-cylindrique situé à chaque extrémité. L'expérience comportait trois conditions différentes :

- le corridor était soumis à une zone de gradient de **champ magnétique** artificiel **statique** (créée avec un courant électrique continu), ce qui signifie qu'un des deux côtés du corridor était soumis à un champ magnétique artificiel d'une intensité allant jusqu'à 200  $\mu\text{T}$ , tandis que l'autre côté se trouvait dans le champ magnétique naturel ambiant (31 homards testés),
- le corridor était soumis à une zone de gradient similaire, mais le **champ magnétique** artificiel était **variable** dans le temps car créé avec un courant électrique alternatif (30 homards testés),
- le corridor n'était soumis à aucun champ magnétique artificiel, seulement au champ magnétique naturel terrestre ambiant. Il s'agissait de la **condition** dite de **contrôle** (31 homards testés).

Le comportement de chaque homard a été suivi par enregistrement vidéo de manière à s'affranchir des éventuelles perturbations engendrées par la présence de l'expérimentateur. L'analyse des vidéos *a posteriori* a permis d'extraire la trajectoire de chaque homard, et en particulier sa vitesse moyenne, la distance totale parcourue et le pourcentage de temps passé dans les différentes zones du corridor.

### Résultats

Quelle que soit la condition testée, le pourcentage de temps passé dans chaque zone du corridor était sensiblement le même. Le comportement exploratoire des homards, comprenant leur vitesse moyenne et la distance parcourue dans chaque zone du corridor, n'était pas significativement différent entre les trois conditions (Fig. 41).

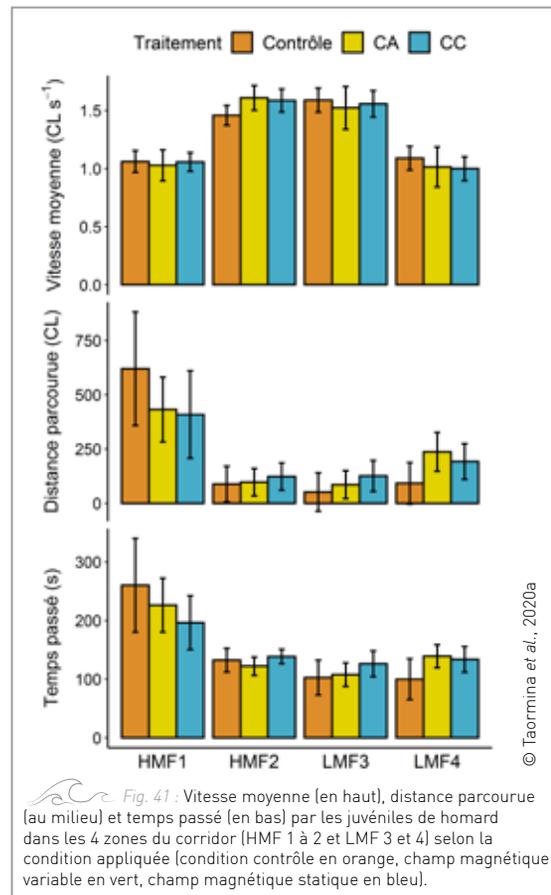


Fig. 41 : Vitesse moyenne (en haut), distance parcourue (au milieu) et temps passé (en bas) par les juvéniles de homard dans les 4 zones du corridor (HMF 1 à 2 et LMF 3 et 4) selon la condition appliquée (condition contrôle en orange, champ magnétique variable en vert, champ magnétique statique en bleu).

Test d'exposition :

Méthode

Afin d'étudier le comportement exploratoire et la faculté à trouver un abri des homards après une exposition à un champ magnétique artificiel, 111 homards juvéniles ont été exposés à trois conditions différentes durant une semaine :

- une exposition à un **champ magnétique** artificiel **statique** d'une intensité de 225  $\mu\text{T}$  (35 homards testés),
- une exposition à un **champ magnétique** artificiel **variable** dans le temps d'une intensité de 225  $\mu\text{T}$  (38 homard testés) et,
- une exposition au champ magnétique naturel ambiant qui correspondait à la condition dite de **contrôle** (38 homard testés).

Après cette période d'exposition, la capacité à trouver un abri a été évaluée de la manière suivante : le homard était relâché à l'extrémité d'un corridor (66 x 14 cm) tandis qu'à l'extrémité opposée se trouvait un abri. Chaque homard était soumis à quatre essais consécutifs. Ces quatre essais étaient similaires, à l'exception de la couleur de l'abri utilisé : les deux premiers utilisaient des demi-cylindres gris tandis que les deux derniers utilisaient des demi-cylindres blancs. Le comportement des homards était suivi par enregistrement vidéo. L'analyse des vidéos a permis d'obtenir, pour chaque homard, le temps qu'il mettait à entrer à l'intérieur de l'abri, la distance totale parcourue et la vitesse moyenne de ses déplacements.

Résultats

Aucune mortalité n'a été observée durant la semaine d'exposition quelle que soit la condition testée. Le comportement exploratoire était similaire pour les trois conditions. En effet, aucune différence significative n'a été relevée au niveau du temps nécessaire pour trouver les abris, de la vitesse moyenne de déplacement ou de la distance parcourue. En revanche, les homards ont mis en moyenne plus de temps pour trouver les abris blancs que les abris gris (Fig. 42). Dans la mesure où les bordures du corridor étant blanches, ce résultat n'est pas surprenant car les abris de couleur blanche étaient moins visibles pour le homard et donc plus difficiles à trouver.

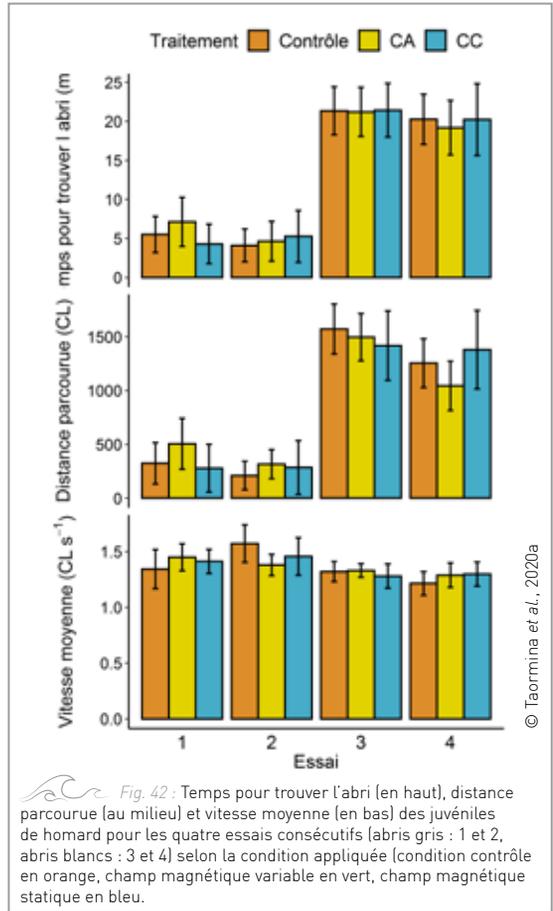


Fig. 42 : Temps pour trouver l'abri (en haut), distance parcourue (au milieu) et vitesse moyenne (en bas) des juvéniles de homard pour les quatre essais consécutifs (abris gris : 1 et 2, abris blancs : 3 et 4) selon la condition appliquée (condition contrôle en orange, champ magnétique variable en vert, champ magnétique statique en bleu).

## Conclusion :

Cette étude a montré que les champs magnétiques artificiels, qu'ils soient statiques ou variables dans le temps, n'impactent pas le comportement des juvéniles de homard européen en laboratoire pour les intensités testées (autour de 200  $\mu$ T). La capacité des animaux à trouver un abri après une exposition d'une semaine demeurait inchangée et aucun phénomène d'attraction ou de répulsion aux champs magnétiques artificiels n'a été mis en évidence.

## ! Limites :

- Il ne peut pas être exclu que des intensités de champs magnétiques plus élevées pourraient avoir un impact sur le homard. Répliquer cette expérimentation avec différentes intensités supérieures à 200  $\mu$ T pourrait permettre de mettre en évidence des valeurs seuils au-delà desquelles une modification de comportement est détectée.
- Les différents stades de vie de cette espèce (œufs, larves, adultes) pourraient répondre différemment à ce type de perturbation, comme cela a été montré récemment pour la langouste (Ernst & Lohmann, 2018).
- La capacité du homard européen à ressentir le champ magnétique naturel terrestre n'a, à ce jour, pas été démontrée et aucun récepteur spécifique n'a été mis en évidence. Des études anatomiques et physiologiques fondamentales, telles que celles qui ont été réalisées pour la langouste des Caraïbes (*Panulirus argus*) par Boles & Lohmann en 2003, permettraient de mieux appréhender le risque d'impact des champs magnétiques sur le homard.



## EN SAVOIR +

Taormina B., Di Poi C., Agnalt A.-L., Carlier A., Desroy N., Escobar-Lux R. H., D'eu J.-F., Freydet F., Durif C. M. F. (2020a) **Impact of magnetic fields generated by AC/DC submarine power cables on the behavior of juvenile European lobster (*Homarus gammarus*)** *Aquatic Toxicology*, Vol 220, 105401 <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105401>



**Objectif : Etudier expérimentalement les impacts de champs magnétiques artificiels sur le comportement de la coquille Saint-Jacques adulte.**

### Contexte :

La coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus*) est une espèce à fort intérêt commercial. Sa pêche mobilise en France environ 600 bateaux et emploie 2 400 marins selon le Comité national des pêches maritimes et des élevages marins. Son aire de répartition, qui couvre la façade atlantique et la Manche (avec des gisements importants en baie de Saint-Brieuc et en baie de Seine) va être concernée par l'implantation des futurs parcs éoliens et les nombreuses poses de câbles d'interconnexion. La coquille Saint-Jacques peut donc être amenée à se retrouver à proximité de sources de champ magnétique artificiel et à y

être exposée durablement. Chez les mollusques, les connaissances fondamentales sur la magnéto-sensibilité sont très limitées et peu de travaux ont évalué l'impact des champs magnétiques artificiels sur ce groupe. Des expérimentations en milieu contrôlé ont été nécessaires pour définir de quelle manière ces organismes perçoivent les variations de champs magnétiques et si ces variations induisent un stress. Cet impact a été évalué en milieu contrôlé par la mesure et l'interprétation du comportement de coquilles Saint-Jacques soumises à des champs électromagnétiques artificiels.

### Méthode :

#### Origine des coquilles

Les coquilles Saint-Jacques ont toutes été pêchées en plongée à Roscanvel, en rade de Brest, et acclimatées en aquarium un mois avant les expérimentations. A l'issue de cette période, de nombreuses coquilles étaient enfouies dans le sédiment, signe d'une bonne acclimatation aux conditions expérimentales.

#### Suivi de leur comportement

Trente coquilles ont chacune été équipées d'un accéléromètre fixé à l'aide d'un velcro permettant de suivre leurs mouvements à une fréquence de 25 Hz (Fig. 43). L'extraction et le traitement des données d'accélérométrie ont été réalisés conformément au protocole détaillé par Coquereau *et al.* en 2016. Le comportement a été décrit par quatre paramètres : le nombre de mouvements réalisés, la durée de la fermeture (en s), l'accélération de la fermeture (en g) et l'amplitude de la fermeture (en °).

#### Génération des champs magnétiques

Les champs magnétiques artificiels ont été générés en laboratoire, en courant continu et en courant alternatif, avec des bobines de Helmholtz, selon le dispositif décrit en détail dans la Fiche n° 11. Deux intensités de champs magnétiques ont été sélectionnées : 80  $\mu$ T et 600  $\mu$ T. Une cartographie du champ entre les bobines a été établie pour chaque condition ainsi que dans les aquariums d'acclimatation et vers le poste de contrôle des bobines pour vérifier que ces deux zones restaient à des valeurs de champs magnétiques terrestres.

#### Traitements

Les coquilles ont été réparties en trois groupes et suivies pendant trois semaines dont les plannings sont donnés dans le Tableau 2. Pour tous les groupes, des périodes de contrôles ont précédé et suivi les phases d'exposition aux champs magnétiques. Dans l'étude comportementale, chaque coquille a été son propre témoin. Ainsi, la réponse de chaque animal correspond ou non à une dérive par rapport aux observations faites dans la période de contrôle précédente, aux mêmes heures.

Pour le Groupe 1 et le Groupe 2, chaque journée d'exposition a comporté : une séquence impulsionnelle entre 10h et 10h30 constituée de 5 x 1 min d'exposition séparées de 5 min de repos, puis une séquence intermittente entre 11h et 16h constituée de 3 x 1h d'exposition séparées d'1h de repos. Tout au long du suivi, les coquilles ont été nourries chaque jour à 15h00 avec une culture de microalgues T-iso. Au cours de la dernière exposition, les coquilles ont également été nourries afin d'évaluer les effets du



Fig. 43 : Fixation des accéléromètres sur les coquilles Saint-Jacques.

champ sur la prise alimentaire. Les périodes de repos laissées entre chaque exposition ont été suivies et repérées par la lettre « R » dans le but d'évaluer un temps de récupération ou un effet à long terme. Pour le Groupe 3, les coquilles ont été exposées chaque jour pendant 2 h avant d'être mises indivi-

duellement en présence d'une étoile de mer *Marthasterias glacialis* (Fig. 44). Les coquilles de ce groupe provenaient pour un tiers du groupe 1, pour un tiers du groupe 2 et pour un tiers d'individus naifs. Les différences entre traitements sont analysées par comparaison de moyennes selon la méthode ANOVA.

		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Entrée dans le bac		18 avril	3 mai	17 mai
Contrôle 1		21-23 avril	3-5 mai	17-19 mai
1 <sup>ère</sup> exposition	Niveau	80 $\mu$ T DC	600 $\mu$ T DC	600 $\mu$ T DC
	Date	24, 25, 26 avril	6, 7, 8 mai	20, 21, 22 mai
Contrôle 2		27-28 avril	9-12 mai	23-26 mai
2 <sup>ème</sup> exposition	Niveau	600 $\mu$ T DC	80 $\mu$ T DC	600 $\mu$ T AC
	Date	29, 30 avril et 1 <sup>er</sup> mai	13, 14, 15 mai	27, 28, 29 mai
Contrôle 3		2-3 mai	16-17 mai	30 - 2 juin
Sortie bac		3 mai	17 mai	3 juin
Objectif		Suivi comportement	Suivi comportement	Comportement + réponse prédateur

Tab 2. Protocole expérimental pour les trois groupes de coquilles Saint-Jacques.



Fig. 44 : Exemple de réponse d'une coquille Saint-Jacques à l'approche d'un prédateur, l'étoile de mer *Marthasterias glacialis*.

Résultats :

Impact sur l'activité des coquilles Saint-Jacques

Le nombre de mouvements réalisés par heure était assez élevé pendant la première phase de contrôle et diminuait dès l'exposition à un champ magnétique, que ce soit à 80 ou 600  $\mu\text{T}$ . Cette baisse d'activité a été principalement mesurée en journée, mais pas la nuit. Elle était également réversible car pouvant réaugmenter en fin de suivi.

Pour le Groupe 1, la première période de contrôle présente une activité significativement différente de la seconde et de la période d'exposition à 600  $\mu\text{T}$  (Fig. 45, en haut).

Pour le Groupe 2, trois phases distinctes apparaissent : une première phase correspondant à la première période de contrôle où l'activité est élevée et significativement différente de toutes les autres, une deuxième phase constituée de l'exposition à 600  $\mu\text{T}$  et de la deuxième période contrôle avec une activité moyenne, et enfin, une troisième phase avec l'exposition à 80  $\mu\text{T}$  et la période de contrôle de fin d'expérimentation avec une activité faible, significativement différente des deux autres (Fig. 45, en bas). Cette baisse d'activité se retrouve principalement lors des créneaux où les animaux sont exposés à un champ électromagnétique, que ce soit en mode impulsionnel ou intermittent (Fig. 46).

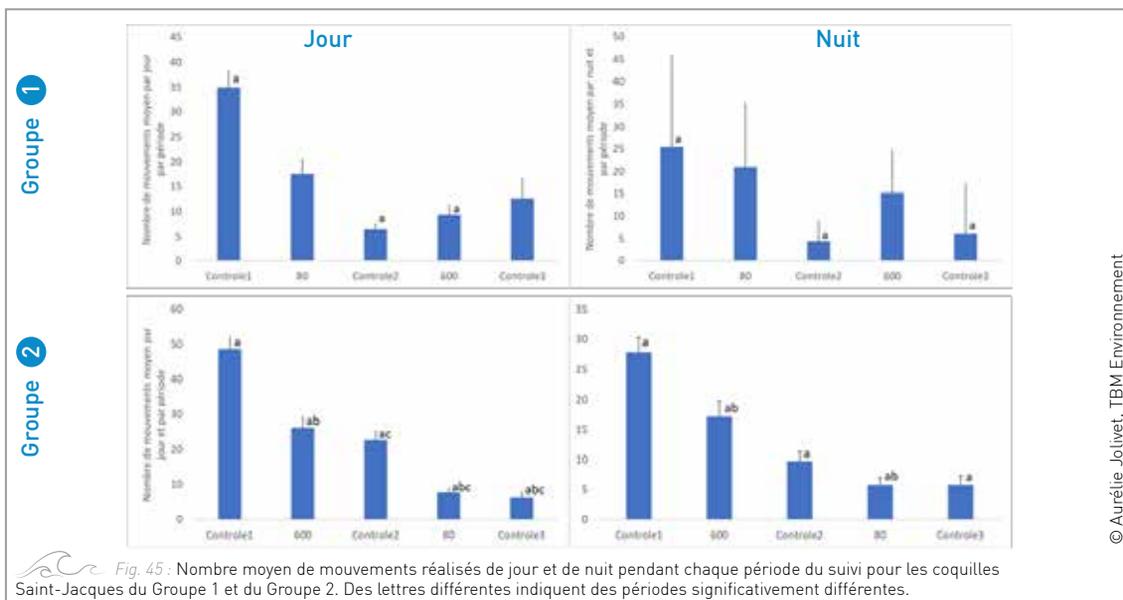


Fig. 45 : Nombre moyen de mouvements réalisés de jour et de nuit pendant chaque période du suivi pour les coquilles Saint-Jacques du Groupe 1 et du Groupe 2. Des lettres différentes indiquent des périodes significativement différentes.

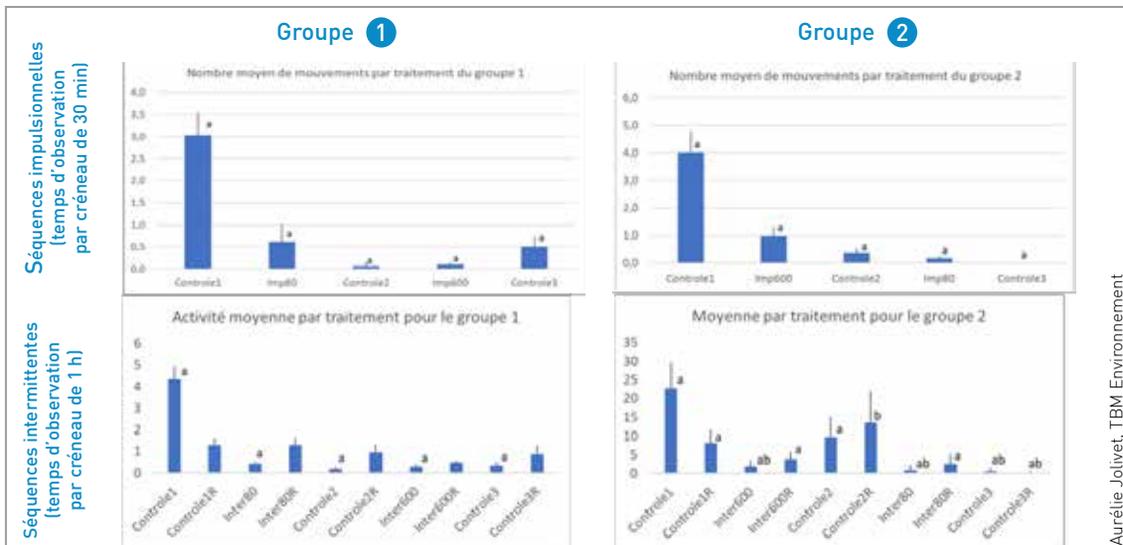


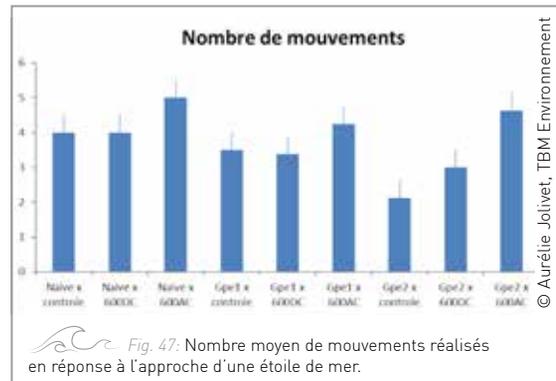
Fig. 46 : Nombre moyen de mouvements réalisés par le Groupe 1 et le Groupe 2 en présence séquences impulsionnelles et de séquences intermittentes pour chaque traitement. Les lettres repèrent les traitements significativement différents. Les créneaux annotés d'un « R » correspondent aux périodes de repos consécutives aux périodes d'exposition.

## Impact sur la réponse des coquilles Saint-Jacques à un prédateur

Quel que soit le traitement effectué ou le passé des individus, aucune différence n'était observée concernant l'accélération, la durée et l'amplitude des mouvements des coquilles du Groupe 3 en réponse à l'approche d'une étoile de mer (ANOVA à 2 facteurs,  $P > 0,05$ ). Seul le nombre de mouvements montrait des changements significatifs, d'une part entre le contrôle et le traitement à  $600 \mu\text{T}$  en courant alternatif (ANOVA à 2 facteurs,  $P = 0,006$ ), et d'autre part entre les coquilles dites naïves (jamais manipulées auparavant) et les coquilles issues du Groupe 2 (venant de subir 3 semaines d'expérimentation) (ANOVA à 2 facteurs,  $P = 0,045$ ) (Fig. 47). En revanche, les propriétés des mouvements réalisés (accélération du premier claquement, accélération moyenne et amplitude des mouvements) ne diffèrent pas entre les traitements ( $P < 0,05$ ).

### Conclusion :

Deux types d'expérimentation ont été menés. Pour les deux premiers groupes, des expositions rapides d'une minute (dites impulsives) ou d'une heure (dites intermittentes) ont été appliquées plusieurs fois par jour à deux valeurs différentes : 80 et  $600 \mu\text{T}$ . Dès la deuxième journée d'exposition, une très nette diminution de l'activité était observée, quelle que soit la valeur du champ appliquée (80 ou  $600 \mu\text{T}$ ). Cette activité minimum s'est poursuivie ensuite tout au long de l'expérimentation. L'activité nocturne était moins impactée. L'activité réalisée lors des périodes d'exposition pouvait être réactivée lors de la distribution de nourriture. La coquille Saint-Jacques est un animal peu mobile qui n'est pas amené à rencontrer de fortes modifications du champ magnétique environnant. De plus, la magnétoréception n'est pas démontrée chez les pectinidés en général. Il semble que ce sont plutôt les variations de lumière qui seraient utilisées pour leur orientation. Cet animal dispose d'un système visuel étendu et complexe composé de deux rétines (distale, proximale), chacune contenant un type structurel différent de photorécepteurs avec une réponse physiologique différente. A ce jour, les mécanismes impliqués dans la magnéto-sensibilité ne sont pas clairement définis et deux hypothèses principales sont discutées. Une de ces hypothèses attribue une double fonction aux photorécepteurs du système visuel, qui feraient également office de magnétorécepteurs (Lohmann & Ernst, 2014).



### ! Limites :

Les résultats obtenus sont à interpréter avec précaution, car ils peuvent découler d'interactions entre les expositions aux champs magnétiques artificiels et les conditions expérimentales, lesquelles ont pu générer un effet 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), un groupe montre que le passé des coquilles et la durée des expérimentations peuvent impacter les réponses. Des observations en milieu naturel sont donc nécessaires pour valider ou infirmer l'hypothèse d'une perception des champs magnétiques par les coquilles Saint-Jacques et évaluer le potentiel impact sur l'activité de ces animaux.

## 4 - Retour d'expérience

### 4.1 Contraintes liées aux calendriers industriels

Plusieurs suivis *in situ* destinés à mesurer l'impact du fonctionnement des câbles électriques sous-marins avaient été initialement prévus, avec pour ambition d'employer une approche *Before After Control Impact* (BACI) sur les sites d'essais hydroliens de Ouessant et de Paimpol-Bréhat. L'objectif était de décrire les éventuels changements de communautés benthiques dans l'aire d'influence supposée des câbles avant et après leur connexion électrique. Cela incluait la faune située à proximité immédiate ou directement fixée sur les câbles ou les structures artificielles associées. Théoriquement, cette approche aurait dû permettre de différencier les impacts potentiels générés par le passage du courant électrique (champ électromagnétique, échauffement) de ceux associés à la seule présence physique du câble. Cependant, des contretemps dans le calendrier des groupes industriels prévoyant le déploiement d'hydroliennes à ces deux sites d'essais ont empêché la connexion de leur câble électrique de raccordement durant les trois années d'étude et la réalisation des suivis selon une approche BACI (voir Fiches n° 6, 7 et 10).

Sur le site de Paimpol-Bréhat, il a néanmoins été montré que les communautés épibenthiques associées aux structures artificielles du câble (voir Fiche n° 6) n'avaient pas atteint le climat

du point de vue de leur composition et poursuivaient leur processus de succession écologique six années après la pose du câble. Ce retour d'expérience est intéressant, car si le câble du site d'essais avait fonctionné, il aurait alors été impossible de dissocier les changements de communauté dus au phénomène naturel de succession écologique, de ceux éventuellement dus au passage du courant électrique. Ce délai de restauration des communautés est en accord avec celui d'une dizaine d'années observé lors de perturbations majeures comme les grands aménagements. Ce résultat montre qu'il est très important que la communauté soit dans un état d'équilibre pour appliquer une approche BACI. Pour pallier ce problème, il pourrait être envisagé d'utiliser des câbles « témoins » sans courant électrique. Cette approche a été testée sur le site hydrolien de Ouessant, où deux tronçons de câbles témoins de trois mètres ont été installés en deux stations proches du câble de raccordement de l'hydrolienne. Cette stratégie avait également été envisagée sur le site de Paimpol-Bréhat, avec l'installation de portions de câbles témoins protégées par des coques en fonte, de part et d'autre du câble principal. Toutefois, le défi logistique étant beaucoup plus important que sur le site de Ouessant, où le câble est nu, ce protocole n'a pu être appliqué.



Fig. 48 : Mise à l'eau de l'hydrolienne HydroQuest Ocean sur le site de Paimpol-Bréhat.

## 4.2 Normes réglementaires

La réglementation apporte également certaines contraintes d'ordre méthodologique. Ainsi, dans la norme NF-C-18-510 (01/2012) qui encadre les interventions réalisées au niveau des câbles électriques sous-marins, la pose de capteurs ou de coupons de suivi de la biocolonisation sur les câbles correspond à une « activité sans risque pour la canalisation, mais nécessitant d'entrer en contact avec elle sans la déplacer » qui est détaillée dans le paragraphe 9.7.2.3. Elle stipule que ces activités doivent être exécutées sous la conduite d'un chargé de chantier titulaire d'une habilitation B0 (installation basse tension, travaux d'ordre non électrique) ou H0 (installation haute tension, travaux d'ordre non électrique), compatible avec les conditions de l'environnement électrique. De plus, pour réaliser ses activités, la norme précise trois niveaux de sécurité :

- La consignation de la canalisation doit être envisagée en priorité,
- Si la consignation n'est pas possible, la canalisation doit être mise hors tension ou, en dernier lieu, maintenue sous tension,
- Dans tous les cas, l'état général de la canalisation doit être examiné en vue de prendre toute mesure de prévention complémentaire appropriée.

Il est à noter que le nettoyage d'une canalisation est exclu de cette section et est traité au paragraphe 9.7.2.4.4.

## 4.3 Des échantillonnages biologiques complexes

Les environnements d'implantation des EMR présentent certaines spécificités selon le type d'énergie visée. Les sites hydroliens sont, par définition, soumis à d'intenses courants de marée et les sites éoliens, à des vents forts et plutôt réguliers. Les conditions dans ces environnements rendent difficiles les interventions scientifiques. Dans le cas des sites hydroliens, seules les périodes d'étales de marée en périodes de mortes eaux peuvent être investiguées, ce qui limite grandement les créneaux disponibles. Ces derniers sont également restreints en raison des conditions météorologiques (principalement le vent et la houle), plus imprévisibles, qui peuvent empêcher tout type d'intervention et repousser la campagne aux mortes-eaux suivantes. Tout au long de l'étude, de nombreuses campagnes ont ainsi été annulées au dernier moment, ou bien

Dans un premier temps, il est donc nécessaire d'avoir un chef de chantier habilité H0 ou B0 "accès zone haute tension". Sur le site d'essais du SEM-REV, par exemple, le personnel de l'Ecole Centrale de Nantes possède cette habilitation afin de couvrir ce type d'intervention. La difficulté est également de placer et justifier le curseur parmi ces niveaux de sécurité en fonction des travaux à réaliser. A titre d'illustration, lors des interventions en plongée pour la pose et la récupération des capteurs de température sur le site du SEM-REV, une procédure d'arrêt et de mise hors tension de l'éolienne et du poste électrique a été mise en œuvre pour mettre le câble sous-marin hors tension, puisque les plongeurs travaillaient à son contact.



Fig. 49 : Intervention sur le site d'essais du SEM-REV.

d'échantillonnage aveugles couramment utilisées, telles que les bennes ou les systèmes vidéo suspendus déployés depuis le pont d'un navire. Pour de tels échantillonnages, une des seules solutions pertinentes pour la prise d'images (voir Fiches n° 6 et 7), la réalisation d'inventaires (voir Fiche n° 10) ou de prélèvements *in situ* à l'aide de carottiers à main est la plongée sous-marine. Celle-ci présente toutefois certaines limites puisque le temps de travail ainsi que la profondeur d'intervention sont généralement restreints. L'utilisation de recycleurs et le recours à des plongeurs professionnels capables de travailler à plus grande profondeur peuvent permettre d'augmenter le temps de travail au fond, mais rendent la logistique moins souple et le coût beaucoup plus important. Ces limites sont exacerbées lorsque l'objectif est d'étudier les communautés benthiques endogées, comme dans le cas des câbles électriques ensouillés. Pour ces communautés, la prise d'images par des plongeurs, qui présente l'avantage d'être rapide et simple à mettre en place, ne peut se substituer à des prélèvements *in situ* (Fig. 50). Ces prélèvements, qui peuvent se faire à l'aide de carottiers manuels, demandent de suivre des protocoles particulièrement lourds et difficiles à mettre en œuvre. Le nombre de réplicats par station doit en effet être suffisamment important pour espérer mesurer un impact qui est *a priori* faible. Il est à noter que l'usage de véhicules sous-marins téléguidés comme les ROV peut également être envisagé. Ceci demande néanmoins des moyens nautiques et économiques conséquents pour être mis en œuvre, en particulier dans les zones à forts courants de marée.



Fig. 50 : Macrophotographie en plongée d'un invertébré fixé sur le câble de raccordement du site d'essais de Paimpol-Bréhat.

Lors de l'étude, les difficultés liées à l'échantillonnage des communautés benthiques évoquées précédemment ont significativement impacté les travaux prévus sur le site du SEM-REV. Le câble

de raccordement de ce site a été sélectionné afin d'étudier la colonisation des matelas de béton stabilisateurs par la mégafaune benthique vagile (voir Fiche n° 6) et l'influence de l'ensouillement du câble sur les communautés benthiques endogées. Ces différents objectifs scientifiques ont néanmoins rencontré de nombreuses complications liées à :

- la profondeur : les stations d'échantillonnage visées étaient particulièrement profondes (environ 40 m) pour des interventions en plongée longue, en toute sécurité,
- la turbidité : ce site étant soumis aux apports turbides de la Loire et de la Vilaine, la visibilité, qui répond à une temporalité difficilement prévisible, peut être quasiment nulle. Ces conditions posent d'importants problèmes pour la sécurité des plongeurs et rendent très difficile, voire impossible, la localisation des structures à étudier. L'utilisation d'outils d'imagerie sous-marine devient par conséquent d'un intérêt limité. Ainsi, l'étude de l'endofaune à proximité du câble, initialement prévue à l'aide de prélèvements par carottiers à main en plongée, n'a pu être réalisée, et ce malgré de nombreux essais avec des équipes de plongeurs confirmés.

Malgré toutes ces spécificités, certains protocoles optimisés ont été mis au point au cours du projet pour étudier les effets des câbles électriques sous-marins. Le retour d'expérience du projet permet ainsi de proposer quelques recommandations d'ordre méthodologique permettant de contourner certaines difficultés pour l'étude des communautés benthiques potentiellement soumises à l'influence des câbles. Logiquement, il apparaît plus raisonnable de viser des sections de câbles peu profondes et situées dans des eaux claires, ce qui permet d'augmenter le temps de travail en plongée et d'améliorer la sécurité des plongeurs. L'étude de l'endofaune peut être centrée sur des habitats intertidaux traversés par un câble ensouillé ou protégé, accessibles à pied, afin d'éviter l'intervention de plongeurs, d'augmenter le nombre de plages de travail possibles, et éventuellement la fréquence des suivis quelles que soient les conditions météorologiques. Ceci nécessiterait néanmoins que les câbles électriques étudiés soient faiblement enterrés (< 2 m de profondeur), ce qui est désormais rarement le cas dans les zones intertidales où l'utilisation de forages horizontaux dirigés est privilégiée.

Protocole de suivi de la mégafaune benthique des matelas de béton du site d'essais de Paimpol-Bréhat.

**Le suivi des matelas du site d'essais hydrolien de Paimpol-Bréhat (voir Fiche n° 7), a engendré le développement d'un protocole opérationnel de suivi très précis résumé ci-dessous :**

- Les matelas pouvant faire l'objet d'un suivi régulier sont préalablement sélectionnés en fonction de leur profondeur et de l'espace moyen entre deux matelas afin d'optimiser le temps de chaque plongée en nombre de matelas suivi.
- Chaque matelas suivi est numéroté afin d'assurer une identification précise. La pose de la plaque numérotée doit avoir lieu au même endroit sur chaque matelas lors de la première opération terrain (Fig. 51).
- La position des matelas étant très précise, le premier matelas suivi est balisé permettant ainsi aux plongeurs de se positionner immédiatement.
- Lors de chaque mission, deux équipes de plongeurs se succèdent à chaque étale de marée : la première intervient environ 45 minutes avant l'étales et la deuxième intervient juste après. Cela permet de garantir un travail dans des conditions de faibles courants. Chaque plongée dure de 35 à 45 min en fonction des temps de paliers.
- Afin d'optimiser le temps de travail sur le fond, la première équipe balise le dernier matelas qui vient d'être visité, depuis le fond à l'aide d'une bouée de plongeur. Cette opération permet à la première équipe de rejoindre la surface en toute sécurité en faisant son pallier et à la deuxième équipe de se repérer immédiatement et de continuer le travail dans les meilleures conditions.
- A la fin de l'opération, les plongeurs déclenchent depuis le fond une bouée de plongeur, et remontent le long de celle-ci en se laissant dériver. Le courant ayant très souvent repris en fin d'opération, ce système permet au navire de suivre en toute sécurité la remontée des plongeurs.



Fig. 51 : Balisage des matelas de béton visités et des abris à homard identifiés.

4  
Retour d'expérience

#### 4.4 Quel outil pour la mesure des champs électromagnétiques ?

Deux outils différents ont été employés pour mesurer les champs électromagnétiques produits par les câbles sous-marins : les systèmes STATEM et PASSEM (Tab. 3). Le système PASSEM permet la caractérisation des champs électromagnétiques sur une grande zone en quelques heures, mais uniquement à un instant donné. A l'inverse, le dispositif STATEM, qui est un système fixe déployé au fond, permet de mesurer les variations temporelles des champs électromagnétiques sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Cependant, comme tout capteur autonome installé en mer, il existe un risque qu'il soit perdu ou endommagé, par le chalutage par

Système	STATEM	PASSEM
Déploiement	Fixe, installé par des plongeurs	Tracté par un bateau
Etendue spatiale de la mesure	Ponctuelle	Egale à celle du transect effectué
Etendue temporelle de la mesure	Egale à celle du déploiement et de l'autonomie	Ponctuelle

Tab. 3. Caractéristiques des dispositifs de mesure des champs électromagnétiques.

exemple. Dans le cas des projets EMR, la production d'électricité étant variable dans le temps (marées, conditions de vent), l'utilisation du système STATEM permet de mesurer l'influence de ces variations sur les champs électromagnétiques produits par les câbles. Il est ainsi possible

d'obtenir des valeurs moyennes et maximales *in situ* de ces champs. Cet outil donne un aperçu plus global des perturbations électromagnétiques que le système PASSEM car les champs produits varient plus dans le temps que dans l'espace.



Fig. 52 : Photographie des systèmes STATEM (à gauche) et PASSEM (à droite) avant déploiement en mer.

#### 4.5 L'utilisation d'une approche couplant études *in situ* et expérimentations en laboratoire

Le projet ambitionnait de combiner des études réalisées *in situ*, visant à étudier l'impact potentiel de différents câbles électriques dans des conditions naturelles, avec des expérimentations **en laboratoire**, permettant de renseigner la réponse d'organismes cibles à l'émission de champs électromagnétiques. Chacune des deux approches présente ses avantages et limites. Elles peuvent être très complémentaires pour aborder une même problématique, lorsqu'elles sont menées en parallèle.

##### Approche *in situ*

Beaucoup de paramètres extérieurs, comme la mise en tension des câbles ou les conditions météorologiques et de marée, conditionnent la faisabilité de la mise en œuvre d'opérations *in situ*. Les sites d'étude, quels qu'ils soient, sont également soumis à des événements non prédictibles qui peuvent influencer les résultats et les rendre difficiles à interpréter. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on cherche à évaluer l'impact des champs électromagnétiques, qui sont a priori faibles, en l'état actuel des connaissances. Comme ils ne causent pas de changements drastiques dans la composition des communautés benthiques ou dans leur fonctionnement, les impacts potentiels peuvent facilement être masqués par des changements de plus grandes ampleurs liés à d'autres facteurs, naturels ou anthropiques. En revanche, les études *in situ* per-

mettent, si elles peuvent être maintenues dans la durée, de mettre en évidence des changements à moyen ou long terme, qui sont difficilement détectables autrement.



Fig.53. Suivi *in situ* du câble de Paimpol-Bréhat.

##### Approche en laboratoire

Les expérimentations en laboratoire permettent d'étudier précisément l'impact à court terme d'un ou plusieurs facteurs, tout en contrôlant rigoureusement la plupart des autres paramètres susceptibles d'influencer le modèle d'étude. Elles permettent en particulier de mesurer la sensibilité du récepteur et de décrire finement ses réponses au facteur étudié, en jouant sur une gamme d'intensité qui peut dépasser celle rencontrée dans le milieu naturel. L'approche en laboratoire présente cependant des limites, qui sont notamment d'ordre technique. En effet, il est complexe de produire des champs magné-

tiques d'intensités élevées et homogènes sur de grandes surfaces (plusieurs mètres carrés) et de les maintenir sur une longue durée (plusieurs jours). Cette contrainte impose des choix d'ordre méthodologique comme l'utilisation de temps d'exposition courts avec une intensité de champs magnétiques élevée ou inversement, ou encore le travail sur des espaces restreints et donc des modèles biologiques de taille adaptée. De plus, transposer des résultats obtenus en laboratoire dans le milieu naturel est souvent délicat et matière à débats. Par ailleurs, si les expérimenta-

tions en laboratoire peuvent permettre de révéler des effets comportementaux et des valeurs de champs électromagnétiques seuils, elles ne peuvent se substituer aux études *in situ* pour mesurer des effets en milieu naturel ou établir si les effets observés en laboratoire ont un impact véritable à l'échelle d'une population, d'une communauté, voire d'un réseau trophique. Il est donc important de rappeler la complémentarité des études *in situ* et des expérimentations en laboratoire.

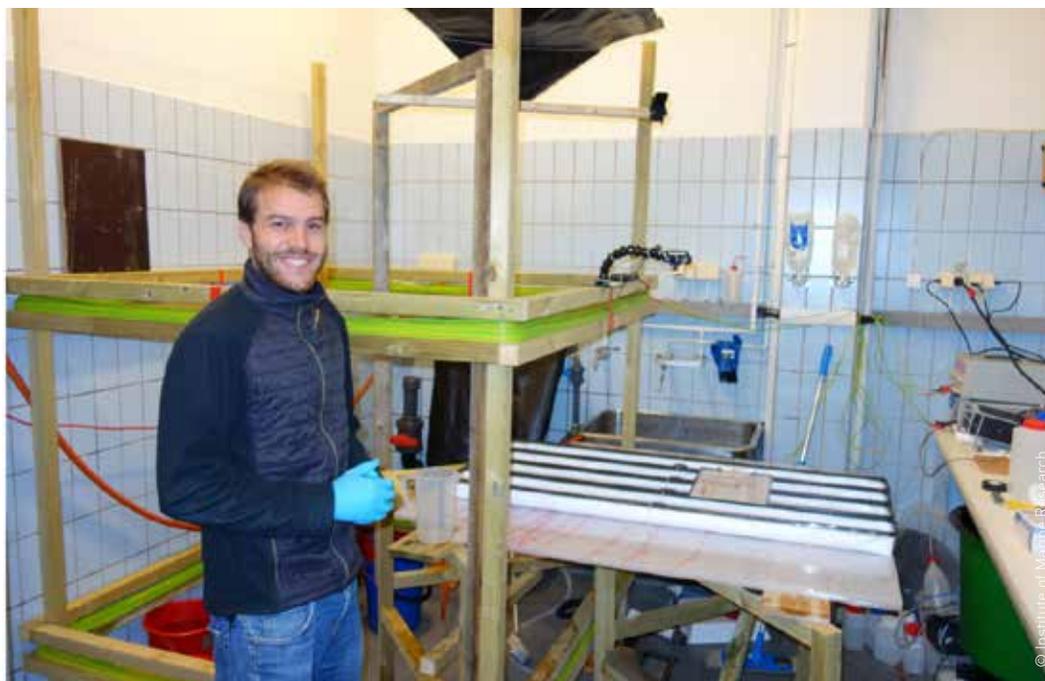


 Fig. 54. Dispositif expérimental de laboratoire utilisé pour étudier l'impact des champs électromagnétiques sur les juvéniles de homard européen.

## 5 - Bilan du projet

### 5.1 L'effet récif des câbles électriques

Concernant l'effet récif associé aux câbles électriques sous-marins, il faut distinguer le **câble lui-même**, nu ou avec une coque protectrice, et les **structures associées**, mises en place pour sa protection et sa stabilisation (comme les matelas et enrochements) ou pour les connexions (comme les hubs). Le câble, nu ou avec ses protections rapprochées, représente un récif artificiel cylindrique long et fin dont le diamètre est inférieur à 20 cm. Au contraire, les structures associées sont beaucoup plus massives avec un volume de plusieurs mètres cubes, et peuvent présenter des formes très diverses et complexes.

Les câbles et les structures associées constituant des substrats durs, ils sont sujets à la colonisation par des invertébrés épibenthiques sessiles (Fig.55A). Cependant, ils peuvent accueillir des communautés taxonomiquement distinctes, même s'ils sont situés dans le même environnement, en raison de différences de matériaux (plastique, métal, béton, etc.), de hauteur ou de complexité de forme. Sur le site d'essais de Paimpol-Bréhat, l'étude a montré que les matelas en béton et les demi-coques en fonte associés au câble, bien que déployés dans le même environnement, abritaient différentes communautés épibenthiques sessiles (voir Fiche n° 6). En ce qui concerne la mégafaune comme les poissons ou les décapodes, les structures associées, plus massives et complexes, offrent un potentiel supérieur en termes d'abris. Elles constituent donc des récifs artificiels plus attractifs que les câbles seuls (Fig. 55B et 55C). Les matelas de béton déployés sur le site d'essais de Paimpol-Bréhat, ainsi que le hub de connexion du site du SEM-REV sont ainsi colonisés par une importante communauté d'organismes appartenant à la mégafaune mobile (voir Fiches n° 7 et 8).

Si les câbles électriques sous-marins et leurs structures associées constituent des récifs artificiels permettant la colonisation d'une large gamme d'espèces sessiles et mobiles, la véritable question est de savoir si l'ampleur de l'effet récif, se traduisant notamment par la biodiversité abritée et la production des communautés, est significative. Par rapport à des récifs artificiels pour lesquels les impacts significatifs sont bien établis, tels que les épaves de navires (Krone & Schröder, 2011), les fondations de parcs éoliens

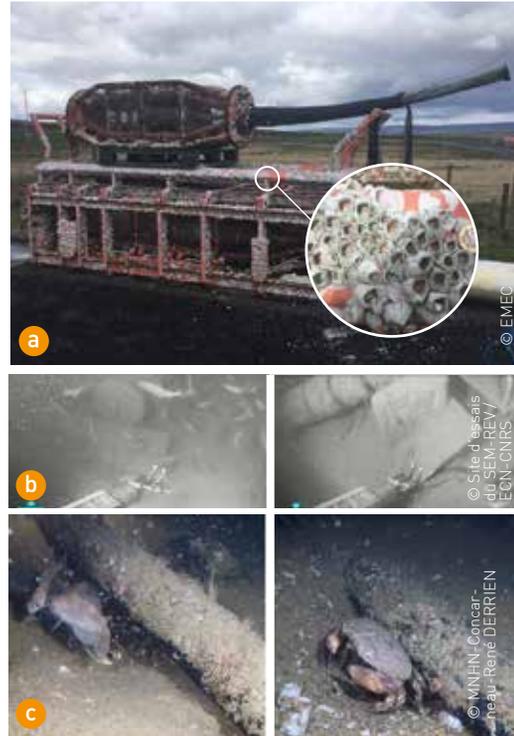


Fig. 55 : Colonisation benthique sur différents types de câbles et structures associées.

- a Hub de connexion électrique sur le site d'essais houlomoteur de l'EMEC (Orcaades, Ecosse) et vue rapprochée de balanes après 3 ans de déploiement en mer,
- b Forte colonisation par *Trisopterus* spp. (à gauche) et *Conger conger* et *Homarus gammarus* (à droite) du hub de connexion du site d'essais du SEM-REV sur des sédiments meubles,
- c Colonisation occasionnelle par *Trisopterus minutus* et *Homarus gammarus* (à gauche) et *Cancer pagurus* (à droite) de l'ombilical de l'éolienne Floatgen installée sur le site d'essais du SEM-REV.

(Reubens *et al.*, 2010) ou les dispositifs conçus pour la conservation des écosystèmes (Jensen, 2002), les câbles seuls peuvent être considérés comme ayant un effet mineur, ne serait-ce que par leur faible couverture spatiale. En effet, même si les câbles peuvent être déployés sur plusieurs dizaines de kilomètres (voire centaines de kilomètres pour les interconnexions), leur largeur limitée entraîne une dilution de l'effet récif associé. Par conséquent, **les câbles seuls abriteront une communauté épibenthique et joueront potentiellement un rôle de point de relais périodique pour plusieurs espèces de la mégafaune mobile, mais ne devraient pas entraîner une modification drastique de l'écosystème récepteur.**

En revanche, les **structures associées** au câble pourraient jouer un rôle plus important. Par leur plus grande complexité structurelle, elles présentent des similitudes avec les autres types de récifs artificiels mentionnés précédemment, et permettent donc le développement durable d'une communauté de récif diversifiée et autonome pouvant avoir une influence notable sur les habitats alentours. Bien qu'une seule structure puisse jouer un rôle anecdotique, **le déploiement de plusieurs unités (de type matelas ou hub)**

**dans une même zone géographique, en créant un réseau de récifs artificiels, peut avoir une influence significative sur la zone environnante.**

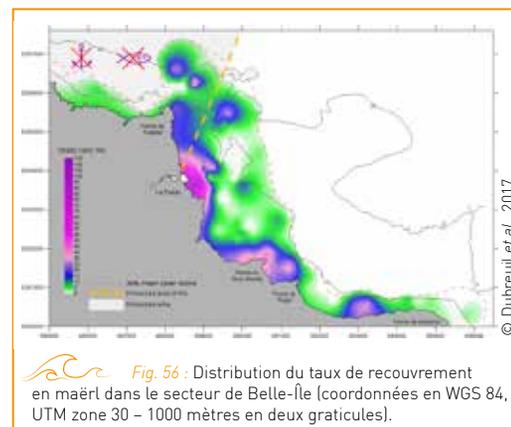
Dans le contexte du développement des EMR, il est à noter que les structures spécifiques des câbles électriques interagiront avec d'autres structures artificielles telles que les fondations d'éoliennes ou les protections contre l'affouillement et contribueront ainsi à la constitution d'un vaste réseau de récifs artificiels.

## 5.2 Les corridors de câbles peuvent-ils jouer le rôle de réserves marines ?

L'étude menée sur la zone de restriction d'activités anthropiques associée aux câbles reliant l'île de Jersey et la France a montré un effet mineur de ces restrictions sur la composition des communautés benthiques (voir Fiche n° 9). Ceci s'explique principalement par le niveau relativement faible de la pression anthropique principale existant dans le secteur étudié, autrement dit la pêche aux arts trainants, que ce soit au sein ou en dehors de la zone de restriction. Ce secteur est également soumis à un fort hydrodynamisme, ce qui peut avoir pour effet de masquer les impacts de la pêche étant donné l'instabilité naturelle du milieu. Le fait de ne disposer d'aucune information sur l'état écologique avant la mise en place de la zone de restriction d'usages rend incomplète la conclusion concernant son effet sur la communauté benthique.

Les zones protégées associées aux câbles sous-marins présentent certaines particularités dont leur géométrie. Étant conçues pour englober le tracé des câbles, elles ont généralement une forme particulièrement étroite (de l'ordre de quelques centaines de mètres de largeur) et linéaire (Taormina, 2019). Cette configuration présente un rapport périmètre/surface élevé et une forte proportion de lisières, ce qui n'est pas du tout optimal, du point de vue de l'écologie de la conservation, laquelle cherche à minimiser les effets de lisières tout en maximisant la surface intérieure protégée (McLeod *et al.*, 2009). En effet, la forte proportion de lisières rend les zones protégées associées aux câbles plus susceptibles d'être soumises à la pêche ou toute autre activité anthropique interdite. De plus, lorsque le rapport périmètre/surface est élevé, les espèces mobiles sont plus susceptibles de se disperser au-delà des frontières, vers des zones non protégées (Buechner, 1987). Dans un but de conservation, les aires marines protégées se concentrent

généralement sur des habitats essentiels qui sont importants sur le plan de la conservation biologique ou des fonctionnalités écologiques, comme les zones de nurseries, les frayères et les secteurs comportant une grande diversité d'espèces (McLeod *et al.*, 2009). Le tracé des câbles étant généralement contraint par la loi afin d'éviter d'endommager des zones sensibles pendant la phase d'installation, il est assez rare qu'une zone protégée associée à un ou plusieurs câbles englobe un habitat essentiel. Il existe cependant quelques rares cas, comme à Belle-Île-en-Mer en Bretagne, où la présence d'un câble sous-marin est à l'origine de la seule aire protégée englobant pour partie un banc de maërl qui constitue un habitat biogénique à haute valeur écologique (Dubreuil *et al.*, 2017) (Fig. 56).



Les aires protégées associées aux câbles électriques sous-marins n'étant pas conçues et délimitées dans un but de conservation des écosystèmes, elles ne sont donc pas aussi efficaces que de véritables aires marines protégées. Cependant, même si elles ne sont pas optimisées, **elles peuvent avoir un impact positif sur l'écosystème marin du point de vue de la conservation, si la zone n'a pas été perturbée par des activités**

anthropiques avant l'installation du câble, sur la restauration, si l'écosystème était dans un mauvais état écologique avant l'application de la réglementation. Il est à noter que dans le cadre des projets EMR, les restrictions peuvent ne pas être cantonnées aux tracés des câbles mais à l'ensemble du parc, créant ainsi des zones de réserves plus étendues et efficaces, notamment grâce à un rapport périmètre/surface beaucoup plus faible. Dans ce contexte, une étude utilisant des modèles trophiques a mis en évidence, à l'intérieur d'un parc éolien offshore, une aug-

mentation de la biomasse d'un grand nombre de groupes trophiques, principalement les espèces pêchées et les niveaux trophiques moyens des prédateurs, qui est expliquée par la fermeture totale à la pêche (Halouani *et al.*, 2020). **Les bénéfices écologiques de ces aires protégées peuvent aussi agir en synergie avec l'effet récif créé par les structures artificielles**, à l'instar du parc éolien offshore néerlandais *Egmond aan Zee* où l'hétérogénéité des habitats, la biodiversité du benthos, des poissons, des mammifères marins et des oiseaux a augmenté (Lindeboom *et al.*, 2011).



Fig. 57 : Navire utilisé pour installer les câbles électriques sous-marins.

### 5.3 La radiation thermique

La question de l'échauffement du milieu lié au passage du courant électrique dans les câbles suscite parfois des interrogations quant à son impact écologique potentiel. **Les mesures effectuées dans le cadre du projet n'ont montré aucune hausse de température au contact des câbles posés et en fonctionnement** (Voir Fiche n° 4), confortant l'hypothèse, dans le cas de câbles posés, d'un **échauffement immédiatement dissipé par convection avec la masse d'eau** (Taormina *et al.*, 2018 ; Carlier *et al.*, 2019). En revanche, une incertitude demeure concernant le rôle potentiel d'isolant thermique que peut jouer la faune épibenthique ayant colonisé les câbles. Le projet de R&D collaboratif ABIOP+, actuellement en cours, qui vise à mieux prendre

en compte le biofouling au moyen de protocoles de quantification utiles à l'ingénierie, est en train d'étudier cette question dans le cas des câbles électriques dynamiques.

Durant le projet, aucune mesure n'a pu être effectuée sur des câbles ensouillés qui sont les plus susceptibles de propager l'augmentation de température au-dessus du câble dans les sédiments les plus perméables. En raison du faible nombre de mesures de température *in situ* pour ce type de câble, une incertitude scientifique demeure sur les conséquences pour l'endofaune vivant à proximité. Il est donc important de mieux caractériser cet effet, en ciblant les câbles ensouillés de plus grandes puissances (Carlier *et al.*, 2019).

## 5.4 L'impact écologique potentiel des champs électromagnétiques

### 5.4.1 De nouvelles données *in situ*

Les caractéristiques des champs électromagnétiques artificiels et leurs impacts potentiels sur la vie marine sont encore mal connus. Dans le cadre des retours d'expérience sur les impacts écologiques, il est important de distinguer les résultats obtenus en laboratoire de ceux issus du terrain. La plupart des études expérimentales portant sur l'impact des champs magnétiques vis-à-vis de la vie aquatique mettent en œuvre des intensités supérieures ou égales à 1 000  $\mu\text{T}$  (Taormina, 2019). L'utilisation de ces intensités très élevées est souvent justifiée par des données provenant de modélisations, mais ne sont pas forcément représentatives des valeurs mesurées *in situ*. Les rares études de terrain qui ont permis d'effectuer des mesures de champs magnétiques émis par des câbles ont effectivement mis en évidence des gammes d'intensités nettement inférieures.

La recherche bibliographique menée dans le cadre du projet indique qu'un maximum de 116,8  $\mu\text{T}$  a été mesuré par Love *et al.* en 2017 pour un câble de 35 kV en courant alternatif. Bien que l'intensité des champs produits par un câble électrique dépende fortement de ses caractéristiques et de la distance au câble, un écart semble exister entre les intensités mesurées *in situ* et celles utilisées en laboratoire (Snoek *et al.*, 2016 ; Taormina, 2019). Des intensités très élevées supérieures à 1 000  $\mu\text{T}$  peuvent exister, mais sont cantonnées au contact de câbles de très grande

puissance. Ceux-ci étant très souvent ensouillés ou protégés par d'autres structures, il est donc hautement improbable que des espèces benthiques soient en contact avec de telles intensités de champs magnétiques (Fig. 58) (Albert *et al.*, 2020). Par conséquent, il semble que la plupart des intensités de champs magnétiques appliquées dans les études expérimentales soient peu représentatives de la réalité. Même si ces études fournissent des informations utiles, la transposition des résultats obtenus expérimentalement sur le terrain reste donc difficile. Dans un contexte où le nombre de connexions et la puissance individuelle des câbles électriques sous-marins augmentent rapidement, il faut avant tout davantage de mesures *in situ* de l'intensité des champs magnétiques produits pour mieux comprendre et évaluer l'impact potentiel de cette perturbation sur la vie marine.

Dans ce contexte, **le projet a contribué à montrer la pertinence et le potentiel de précision des outils et méthodes développées pour caractériser les champs électromagnétiques à proximité des câbles et infrastructures.** Ils sont disponibles pour d'autres études et peuvent être intégrés pour une meilleure caractérisation *in situ* des champs et de leurs impacts potentiels, notamment en regard des calculs théoriques pour chaque type de câble et des observations de la faune à proximité des câbles.

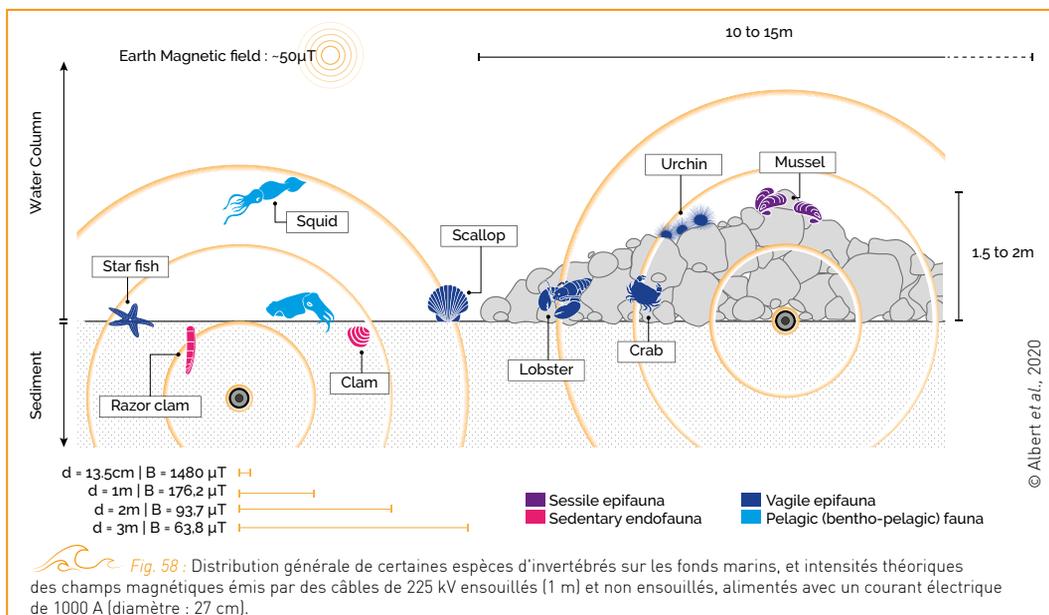


Fig. 58 : Distribution générale de certaines espèces d'invertébrés sur les fonds marins, et intensités théoriques des champs magnétiques émis par des câbles de 225 kV ensouillés (1 m) et non ensouillés, alimentés avec un courant électrique de 1000 A (diamètre : 27 cm).

### 5.4.2 Standardisation de la valeur des champs électromagnétiques

Les mesures *in situ* de champs électromagnétiques produits par les câbles électriques sous-marins sont non seulement rares, mais elles manquent de surcroît de standardisation. Ces mesures sont rarement effectuées à la même **distance du câble** et il est fréquent que la distance au câble ne soit même pas renseignée. Elles sont donc difficilement comparables. De plus, la **puissance** électrique transitant dans les câbles à l'instant précis des mesures est rarement indiquée ou ne peut pas être donnée avec précision puisque cette information est souvent moyennée sur une période plus ou moins longue. Cela ne permet donc pas de savoir si les valeurs de champs me-

surées sont représentatives. **Une homogénéisation des données obtenues est donc nécessaire afin de pouvoir comparer différents câbles entre eux.** Concernant la distance, harmoniser les valeurs de champs obtenus à un mètre du coeur du câble semble judicieux car souvent utilisé. Afin de standardiser le champ produit par rapport à la puissance transitant, le **rapport intensité de champ/puissance** peut être utilisé, tout en précisant la puissance maximale pouvant transiter dans le câble. Ainsi, pour un câble donné, en prenant l'exemple du champ magnétique, l'intensité produite pourrait être donnée en  **$\mu\text{T}/\text{MW}$  à un mètre.**

### 5.4.3 Champs électromagnétiques et vie marine

Bien qu'au cours des dernières années, la question de l'impact des champs magnétiques sur la vie marine ait fait l'objet d'une attention croissante de la communauté scientifique, un important déficit de connaissances subsiste. Des études expérimentales sur l'impact des champs magnétiques vis-à-vis des homards européens juvéniles et des coquilles Saint-Jacques ont ainsi été conduites dans le cadre du projet (Voir Fiches n° 12 et 13). En ce qui concerne le homard européen, des incertitudes subsistent néanmoins pour les individus adultes sur lesquels aucune étude n'a été menée jusqu'à présent. Une autre perspective concernant cette espèce cible serait d'étudier l'impact potentiel des champs magné-

tiques sur le développement embryonnaire et larvaire, car les femelles fécondées peuvent parfois être très proches des câbles électriques lorsqu'elles occupent des récifs artificiels (Fig. 59).

Le reste de la littérature sur les impacts des champs électromagnétiques vis-à-vis de la vie marine montrent des résultats assez contrastés (Taormina *et al.*, 2018 ; Carlier *et al.*, 2019 ; Albert *et al.*, 2020). Certaines espèces testées ont effectivement montré des réponses significatives à la présence de champs électromagnétiques artificiels (Ernst & Lohmann, 2018 ; Stankevičiūtė *et al.*, 2019 ; Hutchison *et al.*, 2020) contrairement à d'autres espèces testées (Bochert & Zettler,



Fig. 59. Homard européen femelle observé sous un matelas du site d'essais de Paimpol-Bréhat.

2004 ; Woodruff *et al.*, 2012, 2013 ; Love *et al.*, 2017). Ces résultats montrent donc qu'il existe bel et bien des effets mesurables de la présence de champs électromagnétiques artificiels sur certains organismes marins au niveau comportemental, physiologique, développemental ou génétique (Gill & Desender, 2020). Néanmoins, l'extrapolation de ces effets à des impacts écologiques avérés *in situ*, comme des changements au niveau d'une population se manifestant à travers des modifications de la survie ou du succès de reproduction, reste spéculative (Gill & Desender, 2020).

Il est à noter que la plupart des études sur le sujet sont réalisées en laboratoire. Sur la base d'une analyse de la littérature portant sur l'impact des champs électromagnétiques vis-à-vis de la vie aquatique, il apparaît que la majorité des

études ont adopté une approche expérimentale *ex situ* (37 études sur 47), tandis que le nombre d'études *in situ* reste très faible (10 sur 47) (Taormina, 2019). La réalisation d'un plus grand nombre d'études ou d'expérimentations *in situ* est essentielle pour parvenir à des conclusions solides. Lors du projet, tous les travaux de terrain effectués sur les sites de Paimpol-Bréhat et de Ouessant ont été réalisés sans qu'aucun courant électrique ne passe dans les câbles, et donc sans émission de champs magnétiques. Poursuivre les différents suivis de la mégafaune et des communautés épibenthiques à ces sites permettrait ainsi de déterminer si des changements dus aux champs électromagnétiques, comme l'apparition ou la disparition d'espèces particulières, sont générés une fois que les câbles sont connectés.

## 6 - Perspectives

### 6.1 État des connaissances sur les risques liés aux champs électromagnétiques

Les préoccupations relatives aux impacts potentiels des câbles électriques sous-marins sur le milieu marin sont récurrentes dans les processus de consultation des citoyens pour la mise en place des projets d'énergies marines renouvelables ou d'interconnexions électriques. Même si elles ne constituent pas des interrogations majeures, telles que celles posées par le bruit en phase de travaux ou les collisions avec les oiseaux marins, elles influent sur le niveau d'acceptation globale de ces projets. La connaissance des différents risques environnementaux associés à ces nouvelles activités en mer montrent encore parfois d'importantes lacunes. Ces lacunes conduisent les acteurs des territoires accueillant les projets EMR à en avoir une perception accrue. Avant de procéder à un « retrait des risques », c'est-à-dire écarter des débats les préoccupations environnementales qui ne constituent pas un enjeu significatif pour le milieu marin, il est crucial de combler ces déficits de connaissances.

Les risques associés à l'émission de champs électromagnétiques dans le milieu marin par les câbles électriques ont récemment fait l'objet de débats scientifiques pour savoir s'ils pouvaient être retirés des processus consultatifs et réglementaires. Les premiers retours scientifiques indiquant des impacts négligeables à faibles sur la vie marine (OES-Environmental, 2019), il est donc tentant d'écarter le risque associé et de le classer comme acceptable. Néanmoins, du point de vue de l'ensemble des partenaires du projet, le recul scientifique sur les impacts écologiques des champs électromagnétiques est encore trop faible pour écarter définitivement ce risque. Comme expliqué précédemment, il y a un déficit de caractérisation physique *in situ* des champs générés et un manque encore plus important d'études sur la réponse d'espèces potentiellement sensibles et des impacts sur le long terme.

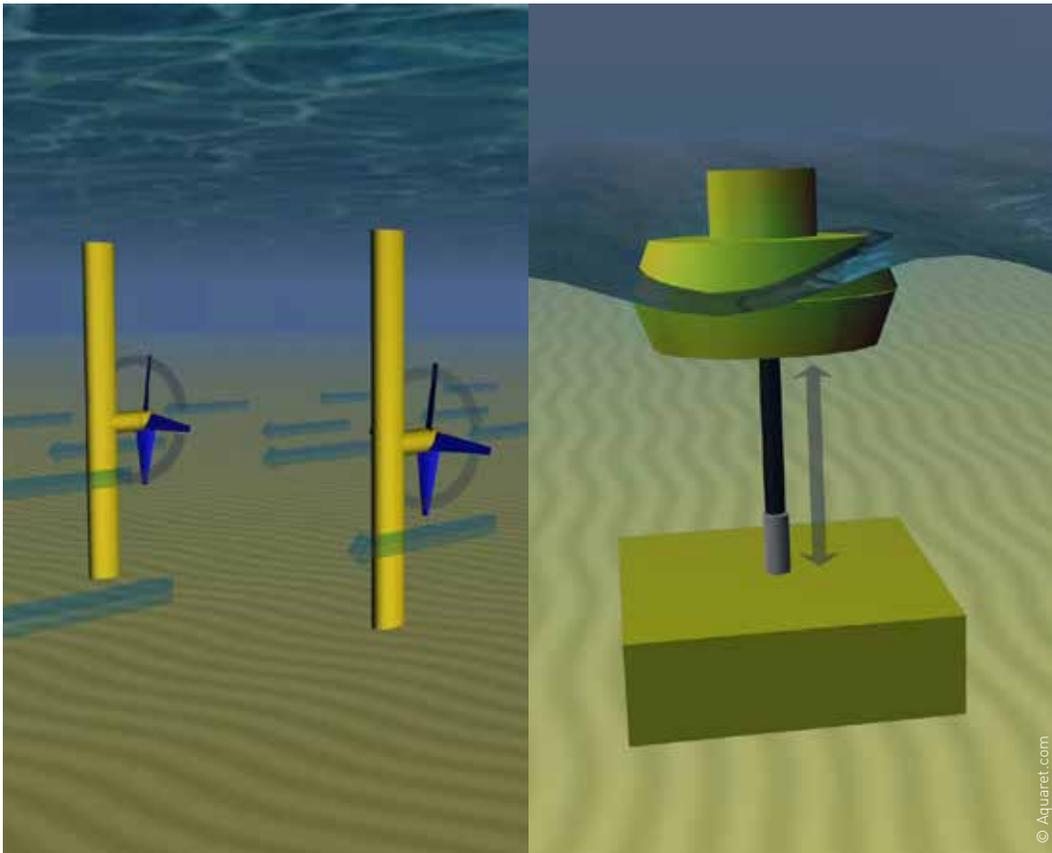


Fig. 60 : Exemples de systèmes de récupération d'énergies océaniques : hydrolienne à axe horizontal (à gauche) et système houlomoteur (à droite).

L'initiative collaborative internationale *Ocean Energy Systems – Environmental*, qui a pour objectif de comprendre les impacts environnementaux des systèmes de récupération d'énergie des courants, vagues et différentiels de température et de salinité, a récemment mis au point un processus autorisant ou non le retrait des risques (Copping *et al.*, 2020). Celui-ci vise à déterminer quelles interactions entre les dispositifs de récupération d'énergie océaniques et l'environnement marin constituent un risque faible pouvant être écarté, et lesquelles nécessitent une collecte de données supplémentaires ou l'application de mesures d'atténuation pour réduire les risques à un niveau acceptable. Les premières phases de ce processus ont eu lieu lors de trois ateliers hébergés dans différents pays (Italie, États-Unis, Australie) au cours de l'année 2019. Un total de 81 experts du domaine des énergies océaniques, originaires de 11 pays (Australie, Canada, France, Allemagne, Italie, Corée, Pays-Bas, Portugal, Suède, Royaume-Uni, États-Unis), ont été impliqués. Elles ne concernaient que le cas de sites pilotes houlomoteurs et hydroliens consti-

tués de trois appareils ou moins. La réflexion portait sur les effets du bruit sous-marin, produit par les dispositifs de production d'énergie, et des champs électromagnétiques, provenant des câbles électriques sous-marins, vis-à-vis de la faune marine (Copping *et al.*, 2020). **Concernant les champs électromagnétiques, les participants aux ateliers ont estimé que les raccordements de sites abritant un petit nombre d'appareils ne constituaient qu'un risque relativement faible.** Cette conclusion était justifiée par le fait que la puissance transportée dans ces câbles est faible comparée à celles de câbles d'export de fermes commerciales ou de câbles de connexion (Copping *et al.*, 2020). Néanmoins, les participants ont précisé que **cette problématique était encore récente et qu'il était important de poursuivre les études sur le sujet, et notamment de réaliser des mesures *in situ* de champs électromagnétiques.** Les démarches de ce genre sont essentielles pour orienter les recherches scientifiques à mener et répondre aux préoccupations citoyennes sur l'impact des énergies marines renouvelables.

## 6.2 Le futur des câbles électriques sous-marins en France

Au cours du projet, les câbles visés lors des différentes études étaient soit des câbles d'export de sites d'essais (Ouessant, Paimpol-Bréhat, SEM-REV), soit des câbles de connexion (interconnexion IFA2000, Jersey-Cotentin). Avec le développement des parcs éoliens offshore français dans les années à venir, les câbles d'export vont présenter des caractéristiques qui sont actuellement peu présentes dans les eaux françaises, c'est-à-dire une tension de 225 kV en courant alternatif pour la plupart (Tab. 4) (Carlier *et al.*, 2019). Par ailleurs, certains câbles de connexion auront, dans les prochaines années, des puis-

sances encore jamais atteintes dans l'Hexagone. Plusieurs projets entre la France, le Royaume-Uni et l'Espagne sont actuellement à l'étude (Carlier *et al.*, 2019). **Cette augmentation drastique et inédite, dans les eaux côtières françaises, du nombre de câbles électriques sous-marins et de leur puissance, nécessite de poursuivre la caractérisation de leurs impacts potentiels sur les communautés benthiques,** initiée dans le cadre du projet, avec notamment la caractérisation des seuils de détection pour les espèces benthiques électro- et magnéto-sensibles.

	Nom du projet et puissance	Linéaire de liaison sous-marine	Mise en service
INTERCONNEXIONS ELECTRIQUES	• IFA 2000, 2 GW (France - Royaume-Uni)	4 liaisons HVDC 270 kV, <b>46 km</b>	1986
	• BRITNED, 1 GW (Angleterre - Hollande)	HVDC 450 kV, <b>250 km</b>	2011
	• ELECLINK, 1 GW (France - Royaume-Uni)	320 kV HVDC, <b>51 km</b> de câble à l'intérieur du tunnel sous la Manche	2019
	• NEMO, 1 GW (Belgique - Royaume-Uni)	<b>130 km</b>	2018
	• IFA2, 1 GW (Southampton - Calvados)	HVDC, <b>200 km</b>	2020
	• FAB, 1,4 GW (France-Aurigny - Grande Bretagne)	Double liaison HVDC, <b>220 km</b> (30,5 km en France)	2022
	• CELTIC INTERCONNECTOR, 0,7 GW (France - Irlande)	HVDC, <b>500 km</b>	2025
	• Golfe de Gascogne, 5 GW (France - Espagne)	Double liaison HVDC, <b>280 km</b>	2025
	• GRIDLINK, 1,4 GW (France - Royaume-Uni)	AC, <b>140 km</b> (32 km en France)	2025
EOLIEN EN MER POSE	• Dieppe-Le Tréport, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>24 km</b>	2023
	• Fécamp, 498 MW (83 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>18 km</b>	2023
	• Courseulles sur Mer, 450 MW (75 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>16 km</b>	2023
	• St-Brieuc, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>33 km</b>	2023
	• St-Nazaire, 480 MW (80 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>33 km</b>	2022
	• Ile d'Yeu/Noirmoutier, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>27 km</b>	2024
	• Dunkerque, 600 MW (> 50 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, <b>10 km</b>	2027
EOLIEN EN MER FLOTTANT	• « Provence Grand Large », zone de Faraman en Méditerranée, 25 MW (3 éoliennes)	33 kV AC, <b>30 km</b>	2022
	• « Les éoliennes flottantes du golfe du Lion », zone de Leucate en Méditerranée, 30 MW (3 éoliennes)	63 kV, AC, <b>18 km</b>	2022
	• « Les éoliennes flottantes de Groix », Groix en Bretagne, 28,5 MW (3 éoliennes)	63 kV, AC, <b>30 km</b>	2022
	• « Eolmed », Gruissan en Méditerranée, 30 MW (3 éoliennes)	33 kV, AC, <b>27 km</b>	2022
SITES D'ESSAIS EMR	• Paimpol Bréhat, 1 MW, (1 hydrolienne)	<b>15 km</b>	2019
	• SEM-REV, 20 kV	<b>20 km</b>	2018
	• Raz-Blanchard 12 MW (4 hydroliennes)	<b>3 km</b>	En attente
	• Fromveur, 1 MW (1 hydrolienne)	<b>2 km</b>	2015

Tab. 4. Synthèse des projets d'interconnexions et de raccordement de parcs EMR ciblant les eaux métropolitaines françaises (ou régions marines proches) impliquant la pose de liaisons électriques sous-marines haute tension (> 33 kV) ou moyenne tension pour les projets pilotes (adaptée de Carlier *et al.*, 2019).

### 6.3 Le cas des câbles dynamiques

Le développement de systèmes de production d'énergie flottants comme les éoliennes, mais également les systèmes houlomoteurs et certaines hydroliennes, nécessitent le déploiement de câbles électriques entre la surface et le fond, appelés **câbles dynamiques** ou **ombilicaux**. La présence de ce type de câbles constitue une nouveauté pour les écosystèmes marins. Comme les câbles électriques déployés sur le fond, ils vont émettre des champs électromagnétiques, mais les organismes potentiellement récepteurs sont alors différents. Alors que les câbles statiques ont principalement une emprise sur les espèces benthiques et benthodémersales, les ombilicaux peuvent potentiellement influencer les espèces pélagiques (Taormina *et al.*, 2018). Parmi celles-ci, un grand nombre est reconnu comme magnétosensibles : tortues marines (Lohmann & Lohmann, 1996 ; Luschi *et al.*, 2007), mammifères marins (Bauer *et al.*, 1985), poissons téléostéens (Walker, 1984 ; Formicki *et al.*, 2019) et élastomobranches (Formicki *et al.*, 2019). La réponse de ces organismes à des champs électromagnétiques artificiels dans la colonne d'eau est encore complètement inconnue puisqu'il s'agit d'une technologie en pleine phase de développement. Avec la mise en place des premières fermes pilotes d'éoliennes flottantes, notamment

en France, il est essentiel de caractériser les impacts potentiels générés par ces câbles dynamiques et ainsi adopter les mesures nécessaires si ceux-ci sont avérés. **Si des mesures de réduction existent pour les câbles statiques, comme l'ensouillage et la pose d'enrochements, en proposer pour les ombilicaux peut représenter un véritable défi.**



Fig. 61. Eolienne flottante et son ombilical.

### 6.4 Les sous-stations : des sites d'étude prioritaires

Les divers effets associés aux câbles électriques sous-marins ont comme caractéristique commune d'être fortement localisés. A l'exception de l'effet réserve, ils ne s'expriment que sur quelques mètres (voire dizaines de centimètres) de part et d'autre du câble. C'est le cas pour la modification de l'habitat, ainsi que les émissions de chaleur et de champs électromagnétiques. En conséquence, l'empreinte spatiale de ces effets pour un câble seul peut être considérée comme faible. En revanche, là où la densité de câbles est élevée, ces effets peuvent se cumuler et influencer des surfaces plus importantes. C'est notamment le cas au voisinage des sous-stations électriques de fermes d'énergies marines renouvelables, où converge l'énergie produite par l'ensemble des dispositifs, avant d'être transformée et exportée vers le réseau terrestre par le ou les câbles d'export (Fig. 62). Sur ces secteurs, les organismes benthiques mobiles peuvent être amenés à devoir franchir, non pas un seul, mais plusieurs câbles électriques orientés différemment, ce qui pourrait potentiellement impliquer

des réponses différentes. Ces zones de concentration de câbles électriques semblent ne jamais avoir fait l'objet d'études sur les impacts cumulés des champs électromagnétiques, même dans les pays disposant déjà de nombreux parcs d'énergies marines renouvelables. Dans le contexte français actuel de développement des EMR, **ces zones de forte densité de câbles constituent des zones d'étude prioritaires pour renseigner l'impact *in situ* des câbles électriques sous-marins sur les communautés benthiques.**

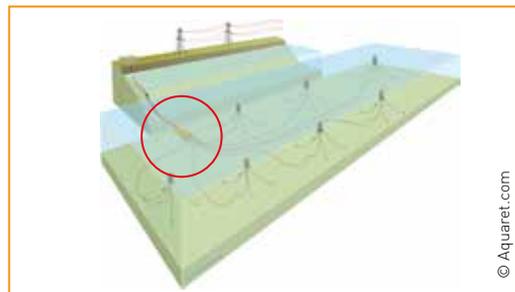


Fig. 62. Exemple de réseau de connexion électrique d'une ferme houlomotrice. Le cercle rouge indique la sous-station électrique où le réseau de câble est le plus dense.

## 7 - Acronymes, abréviations et définitions

**A** = Ampère. Unité de mesure de l'intensité du courant électrique.

**AC** = *Alternating Current*. Le courant alternatif est un courant électrique périodique qui change de sens deux fois par période et qui transporte des quantités d'électricité alternativement égales dans un sens et dans l'autre.

**AgCl** = Chlorure d'argent

**ANOVA** = *Analysis of Variance*. L'analyse de la variance est un ensemble de modèles statistiques utilisés pour vérifier si les moyennes des groupes proviennent d'une même population.

**AUV** = *Autonomous Underwater Vehicle*. Robot qui se déplace dans l'eau de manière autonome.

**BACI** = *Before After Control Impact*. Approche BACI qui consiste à suivre deux sites (contrôle et impact), avant et après une perturbation, afin de mesurer l'effet de cette dernière sur les écosystèmes.

**BO** = Habilitation pour des travaux d'ordre non électrique dans des installations basse tension.

**DC** = *Direct Current*. Le courant continu est un courant électrique dont l'intensité est indépendante du temps.

**DCE** = Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE). Directive européenne qui établit un cadre pour une politique globale communautaire dans le domaine de l'eau.

**EMR** = Energies Marines Renouvelables.

**GPS** = *Global Positioning System*

**IFA** = Interconnexion France Angleterre

**h** = heure

**HO** = Habilitation pour des travaux d'ordre non électrique dans des installations haute tension.

**HVDC** = *High Voltage Direct Current*. Le courant continu haute tension est une technologie d'électro-technique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu haute tension.

**Hz** = Hertz. Unité de mesure de la fréquence.

**m** = mètre

**nT/VHz ou V/VHz** = densités spectrales de puissance

**NF** = Norme Française

**p** = probabilité pour un modèle statistique donné sous l'hypothèse nulle d'obtenir la même valeur ou une valeur encore plus extrême que celle observée.

**PASSEM** = outil de mesure mobile des champs électromagnétiques

**ROV** = *Remotely Operated underwater Vehicle*. Robot sous-marin contrôlé à distance (généralement filoguidé).

**spp.** = plusieurs espèces du même genre, non identifiées

**STATEM** = outil de mesure fixe des champs électromagnétiques

**T** = Tesla. Unité de la densité de champ magnétique.

**V** = Volt. Unité de force électromotrice et de différence de potentiel (tension).

**VA** = Voltampère. Unité de mesure de la puissance électrique apparente.

**W** = Watt. Unité de puissance ou de flux énergétique.

## 8 - Bibliographie

- Albert L., Deschamps F., Jolivet A., Olivier F., Chauvaud L. & Chauvaud S.** (2020) A current synthesis on the effects of electric and magnetic fields emitted by submarine power cables on invertebrates. *Marine Environmental Research*, Vol. 159, 104958, [doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104958](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104958)
- Ardelean M. & Minnebo P.** (2015) HVDC Submarine Power Cables in the World. State-of-the-Art Knowledge. JRC Technical reports, European Commission, 79 p., DOI : [10.2790/95735](https://doi.org/10.2790/95735)
- Bauer G. B., Fuller M., Perry A., Dunn J. R. & Zoeger J.** (1985) Magnetoreception and Biomineralization of Magnetite in Cetaceans. In *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism*, Ed. J. L. Kirschvink, D. S. Jones & B. J. MacFadden, Springer US, Boston, MA, pp. 489-507, [doi.org/10.1007/978-1-4613-0313-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0313-8_24)
- Bochert R. & Zettler M. L.** (2004) Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, Vol. 25, pp. 498-502, DOI : [10.1002/bem.20019](https://doi.org/10.1002/bem.20019)
- Boles L. C. & Lohmann K. J.** (2003) True navigation and magnetic maps in spiny lobsters. *Nature*, Vol. 421, pp. 60-63, DOI : [10.1038/nature01226](https://doi.org/10.1038/nature01226)
- Buechner M.** (1987) Conservation in insular parks: Simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries. *Biological Conservation*, Vol. 41, pp. 57-76, [doi.org/10.1016/0006-3207\(87\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0006-3207(87)90047-4)
- Carlier A., Vogel C. & Alemany J.** (2019) Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation. *Rapport Ifremer*, 102 p.
- Copping A.E. & Hemery L.G.** (2020a) OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. *Report for Ocean Energy Systems*, 327 p., DOI : [10.2172/1632878](https://doi.org/10.2172/1632878)
- Copping A. E., Freeman M. C., Gorton A. M. & Hemery L. G.** (2020b) Risk retirement-decreasing uncertainty and informing consenting processes for marine renewable energy development. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, pp. 1-22, <https://doi.org/10.3390/jmse8030172>
- 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*, Vol. 11, pp. 1-15, [doi.org/10.1371/journal.pone.0160935](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160935)
- Derrien-Courtel S.**, 2008. L'étude des peuplements subtidaux rocheux (flore et faune) du littoral breton permet-elle de contribuer à l'évaluation de la qualité écologique du littoral et d'en mesurer les changements dans le temps ? *Thèse de l'Ecole doctorale du Muséum « Sciences de la Nature et de l'Homme »*, Concarneau, p. 222.
- Derrien-Courtel S., Le Gal, A. and Grall, J.** 2013. Regional-scale analysis of subtidal rocky shore community. *Helgoland Marine Research*, 1-16. [DOI : [10.1007/s10152-013-0355-2](https://doi.org/10.1007/s10152-013-0355-2)]
- Dubreuil J., Grall J. & Barillé, A.** (2017) Cartographie fonctionnelle comme outil de gestion d'un habitat patrimonial : cas du banc de maërl de Belle-Île-en-Mer. *An aod - Les cahiers naturalistes de l'Observatoire marin*, pp. 1-16
- Ernst D. A. & Lohmann K. J.** (2018) Size-dependent avoidance of a strong magnetic anomaly in Caribbean spiny lobsters. *Journal of experimental biology*, Vol. 221, pp. 1-6, DOI : [10.1242/jeb.172205](https://doi.org/10.1242/jeb.172205)
- Formicki K., Korzelecka-Orkisz A. & Tański A.** (2019) Magnetoreception in fish. *Journal of Fish Biology*, Vol. 95, pp. 73-91, DOI : [10.1111/jfb.13998](https://doi.org/10.1111/jfb.13998)
- Gill A. B. & Desender M.** (2020) Risk to Animals from Electromagnetic Fields Emitted by Electric Cables and Marine Renewable Energy Devices. In *OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World*. Report for Ocean Energy Systems, 163 pp. 86-103
- Halouani G., Villanueva M.-C., Raoux A., Davin J.-C., Ben Rais Lasram F., Foucher E., Le Loc'h F., Safi G., Araignous E., Robin J.-P. & Niquil N.** (2020) A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems*, Vol. 212, 103434, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103434>

- Hutchison Z. L., Gill A. B., Sigray P., He H. & King J. W.** (2020) Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Nature Scientific Reports*, Vol. 10, pp. 1-15
- Jensen A. C.** (2002) Artificial reefs of Europe: perspective and future. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 59, pp. S3-S13, [doi.org/10.1006/jmsc.2002.1298](https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1298)
- Krone R. & Schröder A.** (2011) Wrecks as artificial lobster habitats in the German Bight. *Helgoland Marine Research*, Vol. 65, pp. 11-16
- Le Gal A. et Derrien-Courtrel S.**, 2015. Quality Index of Subtidal Macroalgae (QISubMac), a suitable tool for ecological quality status assessment under the scope of the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1) : 334-48 [DOI : 10.1016/j.marpolbul.2015.10.053]
- Lindeboom H. J., Kouwenhoven H. J., Bergman M. J. N., Bouma S., Brasseur S., Daan R., Fijn R. C., de Haan D., Dirksen S., van Hal R., Hille Ris Lambers R., ter Hofstede R., Krijgsveld K. L., Leopold M & Scheidat M.** (2011) Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environmental Research Letters*, Vol. 6, pp. 1-13
- Lohmann K. J. & Lohmann C. M. F.** (1996) Detection of magnetic field intensity by sea turtles. *Nature*, Vol. 380, pp. 59-61, DOI: 10.1038/380059a0
- Lohmann, K. J. & Ernst D. A.** (2014) The geomagnetic sense of crustaceans and its use in orientation and navigation. In *Nervous Systems and Control of Behavior*, Ed. C. Derby & M. Thiel, Oxford University Press, pp. 321-336
- Love M. S., Nishimoto M. M., Clark S., McCrea M. & Bull A. S.** (2017) Assessing potential impacts of energized submarine power cables on crab harvests. *Continental Shelf Research*, Vol. 151, pp. 23-29, [doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.002)
- Luschi P., Benhamou S., Girard C., Ciccione S., Roos D., Sudre J. & Benvenuti S.** (2007) Marine Turtles Use Geomagnetic Cues during Open-Sea Homing. *Current Biology*, Vol. 17, pp. 126-133
- McLeod E., Salm R., Green A. & Almany J.** (2009) Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 7, pp. 362-370
- OES-Environmental**, 2019. Workshop: Retiring Risks of MRE Environmental Interactions to Support Consenting/Permitting. Naples. <https://tethys.pnnl.gov/events/retiring-risks-mre-environmental-interactions-support-consenting-permitting>
- Ramirez L., Fraile D. & Brindley G.** (2020) Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2019. Ed. Walsh C., *WindEurope Report*, 40 p.
- Reubens J. T., Degraer S. & Vincx M.** (2010) The importance of marine wind farms, as artificial hard substrata, for the ecology of the ichthyofauna. In *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Early environmental impact assessment and spatio-temporal variability*, Ed. Degraer S., Brabant S. & Rumes B., Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brussels, pp. 69-82
- Snoek R., de Swart R., Didden K., Lengkeek W. & Teunis M.** (2016) Potential effects of electromagnetic fields in the Dutch North Sea - Phase 1 - Desk Study. *Rijkswaterstaat Water Final Report*, 95 p.
- Stankevičiūtė M., Jakubowska M., Pažusienė J., Makaras T., Otremba Z., Urban-Malinga B., Fey D. P., Greszkiewicz M., Sauliūtė G., Baršienė J. & Andrulewicz E.** (2019) Genotoxic and cytotoxic effects of 50 Hz 1 mT electromagnetic field on larval rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), Baltic clam (*Limecola balthica*) and common ragworm (*Hediste diversicolor*). *Aquatic Toxicology*, Vol. 208, pp. 109-117
- Taormina B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart M., Desroy N. & Cartier, A.** (2018) A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 96, pp. 380-391, [doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026)
- Taormina B.** (2019) Potential impacts of submarine power cables from marine renewable energy projects on benthic communities. *Thèse de doctorat : Université de Bretagne Occidentale*. 274 p.
- Taormina B., Di Poi C., Agnalt A., Cartier A., Desroy N., Escobar-lux R. H., D'eu J.-F., Freytet F. & Durif C. M. F.** (2020a) Impact of magnetic fields generated by AC / DC submarine power cables on the behavior of juvenile European lobster (*Homarus gammarus*). *Aquatic Toxicology*, Vol. 220, 105401, [doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105401](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105401)

**Taormina B., Marzloff M. P., Desroy N., Caisey X., Dugornay O., Metral Thiesse E., Tancray A. & Carlier A.** (2020b) Optimizing image-based protocol to monitor macroepibenthic communities colonizing artificial structures. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 77, pp. 835-845, [doi.org/10.1093/icesjms/fsz249](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz249)

**Taormina B., Percheron A., Marzloff M. P., Caisey X., Quillien N., Lejart M., Desroy N., Dugornay O., Tancray A. & Carlier A.** (2020c) Succession in epibenthic communities on artificial reefs associated with marine renewable energy facilities within a tide-swept environment. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 77, pp. 2656-2668, [doi.org/10.1093/icesjms/fsaa129](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa129)

**Taormina B., Laurans M., Marzloff M. P., Dufournaud N., Lejart M., Desroy N., Leroy D., Martin S. & Carlier A.** (2020d) Renewable energy homes for marine life: habitat potential of a tidal energy project for benthic megafauna. *Marine Environmental Research*, Vol. 161, 105131, [doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105131](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105131)

**Walker M. M.** (1984) Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 155, pp. 673-679

**Woodruff D., Schultz I., Marshall K., Ward J. & Cullinan V.** (2012) Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates - Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms. *Fiscal Year 2011 Progress Report*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 68 p.

**Woodruff D., Cullinan V. I., Copping A. E. & Marshall K. E.** (2013) Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates - Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms. *Fiscal Year 2012 Progress Report*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 62 p.





Le projet SPECIES a permis d'améliorer considérablement la base de connaissances disponibles sur les impacts potentiels associés aux câbles électriques sous-marins des projets d'énergies marines renouvelables. A cette occasion, des outils de mesure de champs électromagnétiques ont été développés et testés. Des études *in situ* de la réponse des communautés benthiques à la présence de câbles électriques ont ainsi été menées. En parallèle, et de manière complémentaire, des expérimentations en laboratoire sur l'impact de champs électromagnétiques artificiels vis-à-vis du comportement de deux espèces d'intérêt ont été réalisées. Ces nouvelles connaissances constituent un apport d'une grande importance pour mieux appréhender ces impacts et permettre aux acteurs de la filière d'adopter des mesures de gestion adaptées.

Bien que des impacts négatifs drastiques sur les écosystèmes benthiques n'aient pas été mis en évidence, certaines problématiques demeurent insuffisamment documentées, et tout particulièrement l'impact des champs électromagnétiques. En effet, aux yeux de l'ensemble des partenaires du projet, le retour scientifique sur le sujet demeure insuffisant pour pouvoir totalement éluder les débats concernant les préoccupations environnementales associées. Ce déficit de connaissances provient majoritairement du manque important d'études menées *in situ*, qui sont donc à privilégier à l'avenir. Alors que les premiers parcs éoliens offshore verront bientôt le jour en France, il est plus que jamais nécessaire de poursuivre l'effort de recherche initié dans le cadre de ce projet.



Bâtiment Cap Océan  
Technopôle Brest Iroise  
525, avenue Alexis de Rochon  
29280 Plouzané - France  
+33 (0) 02 98 49 98 69

[www.france-energies-marines.org](http://www.france-energies-marines.org)

