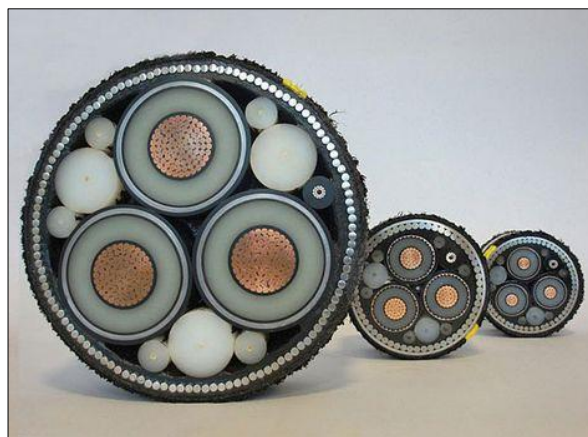


SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR LES IMPACTS DES CABLES ELECTRIQUES SOUS-MARINS: PHASES DE TRAVAUX ET D'EXPLOITATION

Etude du compartiment benthique et des ressources halieutiques



Fiche documentaire

Titre du rapport : Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation	
Référence interne : ODE/DYNECO/LEBCO/2019 Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	Date de publication : 2019/07/31 Version : 1.0.0 Références de l'illustration de couverture De haut en bas et de gauche à droite : - ATOC/Pioneer Seamount cable (Kogan et al., 2006) ; - Matelas stabilisateur du câble électrique du site hydrolien de Paimpol-Bréhat (IFREMER, 2017) ; - Basslink cable (Sherwood et al., 2016) ; - https://journalbitcoin.com/submarine-power-cable-market-size-share-demand-and-analysis-2019-to-2025/ Langue(s) : Français
Résumé/ Abstract : Cette synthèse bibliographique, financée par RTE, traite de l'impact potentiel des câbles électriques sous-marins sur différentes composantes des écosystèmes marins côtiers susceptibles d'accueillir des projets de liaisons électriques en mer. Elle constitue une actualisation d'un précédent état de l'art réalisé sur la même problématique par l'Ifremer en 2011, déjà à la demande de RTE. Ce rapport traite successivement des différents types de perturbations que peut engendrer un projet de câble sous-marin, pendant les phases de travaux (pose, maintenance) et d'exploitation, en distinguant ce qui relève des changements des paramètres physico-chimiques du milieu (ce que l'on désigne ici par effets) de ce qui relève des changements de la biodiversité et des fonctionnalités des compartiments benthiques et halieutiques (ce que l'on désigne ici par impacts).	
Mots-clés/ Key words : Câbles sous-marins ; impacts ; travaux ; exploitation ; écosystèmes côtiers ; habitats benthiques ; ressources halieutiques ; bruit ; température ; champs électromagnétiques ; effet récif ; effet réserve ; impact cumulés.	
Comment citer ce document : 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. 99 pp. + Annexes.	
Disponibilité des données de la recherche :	

DOI :	
Commanditaire du rapport : Réseau de Transport d'Electricité (RTE)	
Nom / référence du contrat : Lettre-Contrat DDVPE-SC-1664 bon de commande RTE N°4500671938/R0UM contrat Ifremer 18/2 216 272F <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : Aucun	
Auteur(s) / adresse mail :	Affiliation / Direction / Service, laboratoire:
Antoine Carlier	ODE / DYNECO / LEBCO
Camille Vogel	RBE / HMMN / LRHPB
Juliette Alemany	RBE / HMMN / LRHPB
Encadrement(s) : Antoine Carlier	
Destinataire : RTE (Damien Saffroy, Lisa Garnier, Viviane Degret)	
Validé par : Alain Biseau (PDG / RBE) Luc Drévès (PDG / DCB) Sébastien Ybert (PDG / REM)	

Sommaire

1. Introduction.....	13
1.1. Contexte	13
1.2. Définitions.....	15
1.3. Synthèse du rapport de Carlier & Delpech 2011	16
1.4. Objectifs et organisation du rapport.....	18
2. Le substrat.....	21
2.1. Modification du substrat induite par la phase de travaux.....	21
2.1.1. Effets attendus	21
2.1.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	22
2.1.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	23
2.2. Modification du substrat au cours de la phase d'exploitation.....	25
2.2.1. Effets attendus	25
2.2.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	25
2.2.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	27
3. La turbidité.....	30
3.1. Effets attendus	30
3.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	32
3.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	33
4. L'hydrodynamisme	35
4.1. Effets attendus	35
4.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	36
4.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	36
5. La température	37
5.1. Effets attendus	37
5.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	39
5.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	39
6. La chimie de l'eau et des sédiments	41
6.1. Effets attendus	41
6.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	42
6.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	43
7. L'acoustique	44
7.1. Effets attendus	44
7.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique	46
7.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	47

7.3.3.	Considérations générales	47
7.3.4.	Les expériences en milieu contrôlé	48
7.3.5.	Les expériences de terrain	49
8.	Les champs électromagnétiques	51
8.1.	Caractérisation des champs électromagnétiques et effets attendus	51
8.1.1.	Rappels théoriques	51
8.1.2.	Dimensionnement et configuration des câbles	54
8.1.3.	Effets attendus sur les espèces marines	54
8.2.	Impacts potentiels sur le compartiment benthique	55
8.2.1.	Les expériences en milieu contrôlé	55
8.2.2.	Les expériences de terrain	56
8.3.	Impacts potentiels sur les ressources halieutiques	56
8.3.1.	Les expériences en milieu contrôlé	56
	Impact potentiel sur les stades embryonnaire et larvaire	56
	Impact potentiel sur le stade juvénile	57
	Impact potentiel sur le stade adulte	58
8.3.2.	Les expériences de terrain	58
8.3.3.	Les expériences sur l'ichtyofaune non halieutique	60
9.	Interactions attendus avec les autres activités anthropiques	62
9.1.	Interactions lors de la phase de travaux	62
9.2.	Interactions lors de la phase d'exploitation	63
10.	Prise en compte des impacts cumulés	66
10.1.	Définition et mise en contexte	66
10.1.1.	Définition	66
10.1.2.	Cadre législatif	67
10.1.3.	Cadre scientifique	67
10.1.4.	Application dans le cadre d'un projet industriel	68
10.1.5.	Identification des projets en cours et à venir	69
10.2.	Méthode d'évaluation des impacts cumulés	71
10.2.1.	L'approche DPSIR (Driver, Pression, Impact, Réponse)	71
10.2.2.	La cartographie comme outil de gestion	71
10.2.3.	Impacts cumulés à l'échelle de la population	72
10.2.4.	Approche écosystémique	73
10.3.	Limites de l'approche développée	73
11.	Mesure ERC (« Eviter, Réduire, Compenser »)	75
11.1.	Recommandations pour éviter les impacts	75
11.1.1.	Etat des lieux	75

Evitement géographique en amont.....	75
Evitement technique.....	77
Evitement temporel	77
11.1.2. Recommandations spécifiques.....	77
11.2. Recommandations pour réduire les impacts	78
11.2.1. Etat des lieux	78
Mesures de réduction géographiques	78
Mesures de réduction techniques.....	78
Mesures de réduction temporelles	79
Mesures de réduction par restriction d'usages	79
11.2.2. Recommandations spécifiques.....	79
11.3. Mesures de compensation	80
Compensation technique.....	80
Compensation financière.....	80
12. Suivi environnemental	82
12.1. Suivis réglementaires.....	82
12.2. Apports scientifiques réglementés	83
12.3. Accessibilité des données	84
13. Conclusions	85
14. Glossaire.....	88
15. Références	89
Annexe 1	100
Annexe 2	101

Liste des figures

Figure 1. Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (en haut) et flottant (en bas) en mer (RTE 2018).....	14
Figure 2. Occurrence des modifications potentielles des paramètres environnementaux (étiquettes jaunes) en fonction des différentes phases d'un projet de câble électrique sous-marin (flèches orange pour la phase de travaux et flèche bleue pour la phase d'exploitation). Au cours de la phase d'exploitation, les opérations de maintenance sont ponctuelles dans le temps, elles peuvent entraîner des modifications de la chimie de l'eau (action et effet matérialisés en pointillés)....	19
Figure 3. Illustrations du comblement de la souille créée par la pose d'un câble sur la marge continentale californienne 5 ans (B) et 15 ans (D) après son installation (modifié d'après Kraus & Carter, 2018).	22
Figure 4. Etendue spatiale et concentration en matière en suspension du panache turbide généré par le démantèlement d'un câble électrique de 138 kV (Fissel & Jiang, 2011).	31
Figure 5. A. Dépôt de sable grossier le long du câble de raccordement électrique du site pilote hydrolien de Paimpol-Bréhat et de ses structures de protection (© IFREMER, 2013). B. Câbles posés sur le fond sur un site de l'European Marine Energy Center (© EMEC).	35
Figure 6. A : Evolution du régime de transfert de la chaleur en état stable en fonction de la perméabilité du sédiment et du différentiel de température imposé par une source de chaleur à sa surface. B : Echauffement du sédiment mesuré au-dessus d'un câble (non visible, situé à la hauteur 110 cm) pour un différentiel de température à la surface du câble de 18°C par rapport au milieu ambiant, avec un sédiment peu perméable (en haut) et perméable (en bas) (reproduit de Emeana et al., 2016).	38
Figure 7. Echelle du bruit anthropique émis par différentes activités en mer (Lossent et al., 2018).....	45
Figure 8. Etendue géographique de l'impact acoustique de différents types d'activités en mer estimée pour le grand dauphin et pour le hareng à l'aide du modèle SPEAR (Nedwell et al., 2012a, b).....	46
Figure 9. Représentation des impacts théoriques possibles sur les organismes vivants mobiles, tels que les poissons, d'une exposition au bruit anthropique en fonction du niveau sonore et de la distance à la source de ce bruit (PTS : <i>permanent threshold shift</i> , TTS : <i>temporary threshold shift</i>) (reproduit de Dooling et al., 2015).	47
Figure 10. Champs électriques et magnétiques associés à différentes configurations de câbles électriques sous-marins (modifié d'après Gill et al., 2012)	52
Figure 11. Comparaison des valeurs de champ magnétique (CC) mesurées (symbolisées par des étoiles) et modélisées (symbolisées par des cercles) à l'intérieur d'un enclos de traitement positionné au-dessus d'un câble CC bipolaire (symbolisé par la ligne verticale noire) transportant un courant électrique de 1175 A (Hutchison et al., 2018). Les couleurs noire, bleue et rouge représentent respectivement le fond, 1,25 m et 2,5 m au-dessus du fond.	53

Figure 12. Causes de défaillances de câble enregistrées entre 1959 et 2005. Les données montrent que les activités les plus fréquemment impliquées sont la pêche et le transport, généralement par moins de 200 m de profondeur (modifié de (Wood & Carter, 2008).	62
Figure 13. Profondeur de pénétration d'une ancre en fonction de la dureté du substrat et du poids de l'ancre elle-même (reproduit de Jensen et al., 2009). Les cas spécifiques des chaluts de fond (<i>otter trawl</i>) et des chaluts à perche (<i>beam trawl</i>) sont également présentés.	64
Figure 14. Représentation du phénomène d'effets cumulés s'exerçant sur un récepteur. Le récepteur choisi dans cet exemple est l'habitat (reproduit de La Rivière et al., 2016).....	66
Figure 15. Diagramme des effets engendrés par les différents types d'immersion de câbles sous-marins (dynamique, posé ou ensouillé) pendant les phases de travaux (pose/démantèlement) et d'exploitation (Taormina et al., 2018).....	85

Liste des tableaux

Tableau 1. Synthèse des impacts potentiellement engendrés par les câbles électriques sous-marins sur l'écosystème, élaborée en 2011. Le degré d'impact était qualifié de faible (vert), moyen (jaune) ou fort (rouge). Le symbole X signifiait qu'aucune interaction n'était identifiée. L'incertitude sur chaque impact était qualifiée de faible (1, vert), moyenne (2, jaune) ou forte (3, rouge) (modifié de Carlier & Delpech, 2011).	17
Tableau 2. Description des mécanismes d'interaction identifiés par Osthoff et al. (2017) entre un câble électrique sous-marin et une ancre selon la profondeur d'ensouillage. Des précisions sont données sur les profondeurs d'ensouillage recommandée.....	64
Tableau 3. 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.....	70
Tableau 4. Bilan et hiérarchisation des impacts potentiels associés aux différents effets induits par les câbles électriques sous-marins. Ces estimations se basent sur les résultats des travaux de la littérature scientifique et sur du « dire d'expert » lorsque les connaissances sont insuffisantes.	86
Tableau 5. Exemples de valeurs de CEM mesurées <i>in situ</i> et estimées par modélisation.	100

Liste des abréviations et acronymes

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

CA : Courant alternatif

CC : Courant continu

CE : Champ électrique

CEM : Champ électromagnétique

CIEM : Conseil International pour l'Exploration de la Mer

CM : Champ magnétique

CPUE : Captures Par Unité d'Effort

DCSMM : Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin

DPSIR : *Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses*

EIE : Etude d'impact environnemental réglementaire

EMR : Energies Marines Renouvelables

GW : Gigawatt

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HVDC : (*High Voltage Direct Current*) Courant continu Haute tension

PCB : Polychlorobiphényle

RTE : Réseau de transport d'électricité

SEMLA : *Swedish ElectroMagnetic Low-noise Apparatus*

SIG : Système d'Information Géographique

T : Tesla

Résumé

Cette synthèse bibliographique traite de l'impact potentiel des câbles électriques sous-marins sur différentes composantes des écosystèmes marins côtiers susceptibles d'accueillir des projets de liaisons électriques en mer (Raccordement des énergies marines renouvelables (EMR), interconnexions îles-continents ou entre différents pays).

Ce travail a été financé par RTE et constitue une actualisation d'un précédent état de l'art réalisé sur la même problématique par l'Ifremer en 2011, à la demande de RTE. Suite aux premiers appels d'offres de l'Etat pour l'éolien en mer posé lancés en 2011 et 2013 et dans la perspective de projets d'interconnexion électrique et des prochains appels d'offres concernant l'éolien posé et flottant, RTE a souhaité mettre à jour les connaissances disponibles sur les impacts avérés ou potentiels (négatifs ou positifs) des câbles électriques sous-marins sur les compartiments benthiques et halieutiques des écosystèmes côtiers et sur les activités humaines en mer. Le rapport traite des câbles de raccordement (ceux dont RTE a la charge) mais pas des câbles internes aux parcs EMR.

A l'image de ce qui avait été produit en 2011, le présent rapport traite successivement des différents types de perturbations que peut engendrer un projet de câble sous-marin, pendant les phases de travaux (pose, maintenance) et d'exploitation, en distinguant ce qui relève des changements des paramètres physico-chimiques du milieu (ce que l'on désigne ici par *effets*) de ce qui relève des changements de la biodiversité et des fonctionnalités des compartiments benthiques et halieutiques (ce que l'on désigne ici par *impacts*).

Pour ce qui concerne les interactions découlant de modifications de la nature des fonds, de la turbidité, de la dynamique hydro-sédimentaire, de la chimie de l'eau de mer et du sédiment ou de l'acoustique, les connaissances n'ont pas beaucoup progressé depuis 2011. Cependant, le recul scientifique est dans l'ensemble suffisant pour affirmer que les impacts relatifs à chacun de ces effets sont globalement négligeables à faibles, dès lors que les projets de câbles évitent les espèces et habitats benthiques les plus vulnérables (c'est-à-dire avec des capacités de récupération écologique limitées) et/ou supportant des fonctions écologiques essentielles (zones fonctionnelles halieutiques, telles que les nourriceries et frayères). Toutefois, les incertitudes sur l'impact du bruit anthropique sur le benthos et sur les espèces halieutiques ne sont pas levées. L'effet « réserve », lié aux éventuelles restrictions d'usages dans le corridor des câbles, peut engendrer des impacts qualifiés de moyens et allant dans le sens d'une amélioration de la qualité écologique des fonds. Cependant, cette dernière problématique restant peu abordée, une incertitude subsiste qui empêche d'en faire une généralité.

Pour d'autres types d'interactions telles que celles induites par les modifications électromagnétiques ou de la température, pour lesquelles était noté un manque de données scientifiques, les connaissances ont sensiblement progressé depuis 2011. L'impact de la modification de la température au voisinage du câble est jugé globalement négligeable pour tous les compartiments considérés, principalement en raison du caractère très localisé dans l'espace de cet effet, et tant que la perméabilité du sédiment n'autorise pas de phénomènes de convection. Concernant l'émission de champs magnétiques anthropiques, la moitié des études expérimentales ciblant le champ magnétique révèlent un impact significatif (sur des paramètres biologiques très variés) mais elles appliquent des intensités de champ

dix à cent fois supérieures à ce qui a pu être mesuré au voisinage de câbles électriques existants. La grande majorité des études *in situ*, qui appliquent des niveaux de perturbation réalistes, montrent une absence d'impact. Les effets et impacts potentiels liés à l'émission de champs électriques anthropiques restent peu étudiés.

Le bilan des niveaux d'impact appréhendés par couple d'interaction « effet x compartiment » révèle qu'ils sont en majorité négligeables à faibles, et peut être représenté par le tableau générique suivant. Cette matrice reste cependant une approche globale qui ne peut être transposée directement à un projet d'installation de câbles électriques sous-marins particulier.

			RECEPTEURS DE L'ECOSYSTEME IMPACTES									Ensemble de l'écosystème concerné
			Benthos			Poissons			Poissons migrateurs + éla-smobran-ches			
			TECHNIQUE DE POSE									
PARAMETRES AFFECTES	PHASE CONCERNÉE		E	P	D	E	P	D	E	P	D	
	Substrat: Remaniement	Tr.	1	1	1	1	1	NA	1	1	NA	2
	Structures artificielles	Expl.	NA	1	2	NA	1	2	NA	1	1	1
	Turbidité	Tr.	1	1	NA	1	1	NA	1	1	NA	1
	Hydrodynamique	Expl.	NA	1	NA	NA	1	NA	NA	1	NA	1
	Température	Expl.	2	1	1	2	NA	NA	NA	NA	NA	2
	Chimie / Contaminant	Tr.	1	1	NA	1	1	NA	1	1	NA	1
		Expl.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Acoustique	Tr.	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
	Champs électro-magnétiques	Expl.	1	2	NA	1	2	2	2	2	3	2
Restrictions d'usage	Expl.	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2	
Effets cumulés		Tr., Expl.	?	?	?	?	?	?	?	?	?	

Ce tableau synthétise de manière qualitative l'information récoltée sur l'impact environnemental des câbles électriques sous-marins. Il ne saurait en aucun cas être considéré comme exhaustif et la consultation des chapitres correspondants est indispensable en vue d'une utilisation dans le cadre d'une étude spécifique.

Signification des codes et abréviations:

Degré d'impact:	pas d'interaction	Inconnu	Négligeable	Faible	Moyen	Fort
Degré d'incertitude:	NA	?	1	2	3	

Phase concernée: Tr. = Travaux; Expl. = Exploitation

Technique de pose: E = Ensuillé; P = Posé; D = Dynamique

Il reste difficile d'estimer le niveau d'impact d'un projet de câble électrique sous-marin sur l'ensemble de l'écosystème concerné en intégrant les différents types de perturbation et les différentes phases du projet (travaux et exploitation).

Par ailleurs, la très grande majorité des fonds marins côtiers est soumise à une conjugaison de plusieurs types de pressions anthropiques. Les perturbations générées par l'installation et le fonctionnement des câbles sous-marins, même si elles sont considérées comme faibles, vont donc souvent se cumuler à celles d'autres activités humaines. La réglementation en vigueur ne demande pas spécifiquement la mise en place d'approches quantitatives pour l'étude des effets et impacts cumulés, et les données actuellement disponibles sont de toute façon insuffisantes pour ce type d'exercice. La problématique de l'évaluation des impacts cumulés devient cependant de plus en plus prégnante, en particulier là où se concentrent le plus les activités anthropiques. Une harmonisation des méthodes d'évaluation et des formats de données constitue une première étape cruciale pour comparer l'incidence environnementale des câbles électriques sous-marins à celles des autres activités humaines et analyser leurs interactions.

1. Introduction

1.1. Contexte

Des câbles électriques sous-marins sont installés partout dans le monde depuis le milieu du XX^{ème} siècle, mais leur nombre s'est accru ces dernières décennies pour raccorder des îles aux continents, pour alimenter des plateformes en mer ou des observatoires sous-marins, mais surtout pour transporter l'énergie produite par les dispositifs d'exploitation des énergies marines renouvelables (EMR). En 2015, 8000 km de câbles de grande puissance (en HVCD) étaient posés sur les fonds marins, dont 70% dans les eaux européennes (Ardelean & Minnebo, 2015). Le développement des projets EMR en Europe (4500 éoliennes, représentant 18.5 GW, installées fin 2018 ; 25 GW prévus pour 2025 ; WindEurope, 2019) entraîne dans son sillage un certain nombre de questions relatives aux impacts écologiques des structures implantées dans le milieu marin (Lindeboom et al., 2015). Certaines interrogations portent en particulier sur l'incidence de l'installation et du fonctionnement des câbles de raccordement électriques sur les écosystèmes côtiers (Gill, 2005 ; Ohman et al., 2007 ; Merck & Wasserthal, 2009). Même si la communauté scientifique et les développeurs de l'Europe du Nord contribuent depuis une quinzaine d'années à améliorer la compréhension des interactions entre les câbles électriques sous-marins et les écosystèmes côtiers, des incertitudes demeurent, notamment sur les impacts potentiels des champs électromagnétiques émis sur les espèces sensibles (Bonar et al., 2015).

Avec ses 11 millions de km² de surface maritime répartis sur quatre océans, la France présente un fort potentiel de développement des EMR (éolien posé et flottant, hydrolien, houlomoteur, énergie thermique des mers). La loi de transition énergétique pour la croissance verte fixe comme objectif 40% d'électricité renouvelable à l'horizon 2030. Le projet de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit 2,4 GW d'éolien offshore en 2023, et autour de 5 GW en 2028.

Les sites EMR sont soumis à la directive 2011/92/UE du Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2011 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement. En France, les autorisations suivantes doivent être obtenues pour développer un projet d'EMR sur le domaine public maritime :

1. une concession d'utilisation du domaine public maritime en dehors des ports,
2. une autorisation au titre de la loi sur l'eau,
3. les autorisations liées à l'implantation sur un espace protégé (étude d'incidences sur les sites Natura 2000 ou sur les parcs naturels marins le cas échéant),
4. une dérogation à l'interdiction de destruction ou de dérangement d'espèces protégées le cas échéant,

Une étude d'impact environnemental suivie d'une enquête publique sont nécessaires en amont afin d'obtenir ces autorisations. Les projets de liaisons sous-marines haute et très haute tension sont soumis à une étude d'impact systématique.

En parallèle des projets EMR, six projets d'interconnexions entre la France et ses voisins européens sont en cours de développement, dont quatre par RTE et ses partenaires. Ces projets impliqueront la pose de plusieurs centaines de kilomètres de câbles électriques sous-marins durant la prochaine décennie.

La recherche scientifique se penche actuellement sur les conséquences des modifications de l'environnement marin, qu'elles soient ponctuelles au cours des phases de travaux, ou à long terme par la présence de câbles électriques pendant toute la durée de la phase d'exploitation. Des projets de recherche dédiés s'intéressent aux impacts de ces câbles sur les organismes marins ; ils font apparaître des lacunes dans la compréhension des mécanismes entraînant ces impacts, ainsi que dans la méthodologie de leur évaluation.

En France, l'entreprise RTE est en charge des projets de raccordement électrique de parcs éoliens en mer, incluant depuis 2017 les postes électriques en mer (**Figure 1**) et développe des projets d'interconnexions sous-marines avec des pays européens. En 2011, Ifremer avait réalisé à la demande de RTE un bilan des connaissances scientifiques sur les impacts des câbles électriques sur les écosystèmes côtiers, et en particulier les compartiments benthiques et halieutiques (Carlier & Delpech, 2011). Depuis 2011, la littérature scientifique sur l'incidence environnementale des câbles électriques sous-marins s'est nettement enrichie. L'émergence de nouvelles études a justifié une nouvelle commande de RTE à Ifremer, qui consiste en une mise à jour des connaissances sur le sujet.

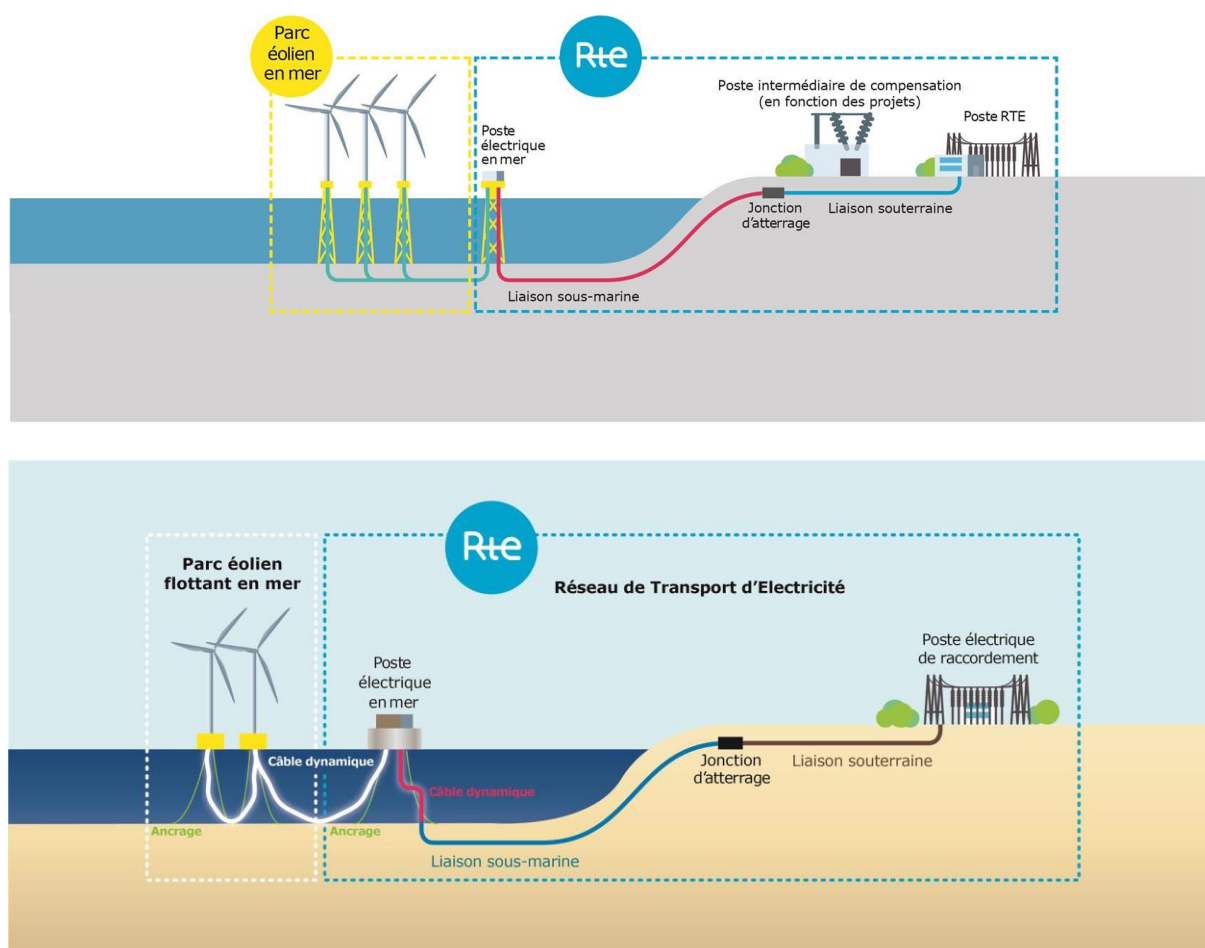


Figure 1. Schéma de raccordement d'un parc éolien posé (en haut) et flottant (en bas) en mer (RTE 2018).

1.2. Définitions

Dans ce rapport, on distinguera les phases de **travaux** et d'**exploitation** des câbles électriques sous-marins. La phase de travaux comprend la pose et le démantèlement du câble, ainsi que les travaux de maintenance et les interventions ponctuelles en cas d'évènements exceptionnels (e.g. croche par un bateau, désensouillage, rupture accidentelle).

Tout au long du rapport, on distinguera également les notions d'**effets** et d'**impacts** lorsqu'on analysera l'interaction d'un paramètre environnemental avec un récepteur de l'écosystème. Un paramètre environnemental correspond à une caractéristique physico-chimique du milieu marin (nature du fond, température, turbidité, bruit...) qui possède une variabilité naturelle propre sur chaque zone de projet de câbles sous-marins. Les **récepteurs** sont les différents compartiments de l'écosystème (biotope, benthos, poissons...), certains processus écologiques qui leur sont associés (réseau trophique, recrutement...) ainsi que les activités humaines (socio-écosystème).

Les définitions des **effets** et des **impacts** seront les mêmes que celles adoptées dans la précédente synthèse (Carlier & Delpech, 2011), qui reprenaient celles de Boehlert & Gill (2010) :

L'effet : il s'agit de la variation d'un paramètre environnemental donné, causée par une ou plusieurs pressions anthropiques identifiées, au-delà de la variabilité naturelle attendue. Cette variation est caractérisée sur le plan spatio-temporel. Dans l'espace, l'effet peut être localisé ou étendu ; dans le temps, il peut être ponctuel ou durable. L'effet est dit significatif lorsque la gamme de mesures observée pendant la perturbation est statistiquement différente de la gamme de variabilité naturelle.

L'impact : il décrit les conséquences (positives ou négatives) d'un effet (tel que défini au-dessus) sur un récepteur de l'écosystème. On parle d'impact lorsque les modifications observées au niveau du récepteur (d'ordre moléculaire, physiologique, comportemental, taxonomique, etc.) ne peuvent pas être attribuées à la seule variabilité naturelle. Il est à noter que la significativité d'un effet n'implique pas forcément la présence d'un impact. Dans ce rapport, on tente de qualifier l'impact de manière qualitative, selon quatre niveaux : négligeable / faible / moyen / fort.

La définition administrative de l'effet et de l'impact adoptée par le Ministère de l'Environnement est en adéquation avec celle adoptée par le présent rapport : « *Au cours de ses différentes phases de vie, un projet d'aménagement interagit avec son environnement et modifie certains paramètres environnementaux. L'effet décrit la conséquence objective de cette interaction sur l'environnement. L'impact est la transposition de cette conséquence sur les différents compartiments de l'environnement (écosystème, paysage et patrimoine, usages) selon une échelle de sensibilité* » (MEEM, 2017).

La **sensibilité** qualifie la probabilité qu'un récepteur soit affecté par un effet donné. Ce paramètre peut être estimé de manière physique (i.e. valeurs seuil) ou, plus fréquemment, à dire d'expert. La sensibilité conditionne en partie l'intensité de l'impact.

Le **benthos** désigne l'ensemble des organismes (animaux, végétaux) qui peuplent les fonds marins. Parmi les animaux benthiques, on trouve essentiellement des invertébrés mais aussi certaines espèces de poissons comme les poissons plats.

Certaines espèces benthiques font également partie des ressources halieutiques dès lors qu'elles sont exploitées (grands crustacés, sole, etc.). On distingue également l'épifaune benthique (animaux vivants à la surface des fonds marins) de l'endofaune benthique (animaux vivants plus ou moins profondément dans les sédiments). Parmi les végétaux, on trouve les microalgues benthiques, les macroalgues et les herbiers marins (zostères).

Les **zones fonctionnelles halieutiques** désignent les habitats (*i.e.* depuis le fond jusqu'à la surface) dans lesquels une espèce halieutique suit au moins une phase de son cycle de vie, depuis le stade larvaire jusqu'à la première reproduction. Elles sont essentielles au renouvellement de la population. On distingue :

- La frayère : il s'agit de la zone où a lieu la reproduction. Dans un grand nombre de cas, la ponte a également lieu dans cette zone puisqu'une majorité d'organismes se reproduit par fécondation externe ;
- La zone de dispersion larvaire : elle correspond à la zone au sein de laquelle les œufs et les larves se dispersent. Son emprise géographique est plus large que celle des autres zones fonctionnelles et ses limites sont mal identifiées ;
- La nurserie : il s'agit de la zone de croissance des organismes juvéniles. Elles sont caractérisées par une faible profondeur (de 0 à 20 m), une pression de prédation faible, des conditions hydrodynamiques calmes et une forte productivité. La conjonction de ces conditions maximise le taux de survie des juvéniles jusqu'à leur première maturité sexuelle. Ce sont les zones fonctionnelles les mieux documentées, elles sont généralement situées en zone côtière ;
- La zone de croissance des adultes : il s'agit de l'espace correspondant à l'aire de répartition de la population adulte. Il abrite les individus adultes entre les périodes de migration et de reproduction ;
- La voie de migration : il s'agit d'un couloir emprunté par une espèce afin de rejoindre une zone favorable à la poursuite de son cycle biologique, soit entre deux zones fonctionnelles identifiées.

Ces définitions sont tirées Delage & Le Pape (2016) et des références incluses dans cet ouvrage.

1.3. Synthèse du rapport de Carlier & Delpech 2011

Le rapport de 2011 analysait de manière exhaustive les différentes interactions possibles entre les composantes techniques des câbles électriques sous-marins (types de perturbations, phases du projet, techniques de pose) et les composantes des écosystèmes marins "récepteurs". Un tableau synthétique reprenait les principales conclusions relatives aux impacts estimés et les degrés d'incertitude associés (**Tableau 1**). L'ensemble des impacts analysés avait été estimé faible à l'exception des impacts cumulés, qui sont difficiles à évaluer.

Le rapport soulignait la forte incertitude associée à l'évaluation de l'impact des champs électromagnétiques (CEM) sur l'ensemble des récepteurs étudiés. Il établissait que la sensibilité de plusieurs espèces (appartenant à différents phylums) aux CEM était avérée. Néanmoins, reprenant les conclusions de diverses études descriptives et expérimentales, il n'apparaissait pas possible de définir de manière précise les impacts réels des CEM sur ces organismes marins.

En 2011, l'accent avait aussi été mis sur l'identification des espèces de poissons potentiellement sensibles au bruit anthropique et les retours d'expérience concernaient uniquement le bruit généré par les parcs éoliens offshore. Le rapport concluait sur la difficulté de statuer quant à un impact significatif et mesurable du bruit associé aux câbles sur le comportement de ces espèces.

Trois points spécifiques (la perturbation de l'habitat benthique, l'augmentation de turbidité et la température) étaient identifiés comme voies de recherche possibles, en lien avec la sensibilité des habitats benthiques remarquables.

Enfin, le rapport de 2011 soulignait la difficulté de quantifier et de hiérarchiser les impacts et insistait sur l'importance de réduire les incertitudes relatives aux impacts cumulés.

Tableau 1. Synthèse des impacts potentiellement engendrés par les câbles électriques sous-marins sur l'écosystème, élaborée en 2011. Le degré d'impact était qualifié de faible (vert), moyen (jaune) ou fort (rouge). Le symbole X signifiait qu'aucune interaction n'était identifiée. L'incertitude sur chaque impact était qualifiée de faible (1, vert), moyenne (2, jaune) ou forte (3, rouge) (modifié de Carlier & Delpech, 2011).

		RECEPTEURS				
		Habitat	Benthos	Poissons	Poissons migrateurs + élasmobranches	Interactions biologiques
PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX	Nature du substrat	Faible 1	Faible 1	Faible 1	Faible 1	Faible 2
	Effets dynamiques (courant + sédiment)	Faible 1	Faible 1	X	X	Faible 2
	Turbidité	Faible 1	Faible 1	Faible 1	Faible 1	Faible 2
	Chimie de l'eau	X	Faible 2	Faible 2	Faible 1	Faible 2
	Acoustique	X	Faible 1	Faible 2	Faible 3	Faible 2
	Champs électro-magnétiques	X	Faible 3	Faible 3	Faible 3	Faible 3
	Température	X	Faible 2	X	X	Faible 2
Effets cumulés		? 3	? 3	? 3	? 3	? 3

1.4. Objectifs et organisation du rapport

Le présent rapport vise à répertorier les impacts écologiques potentiels liés à la pose et à l'exploitation des câbles électriques sous-marins, et tente de hiérarchiser ces impacts potentiels sur la base du niveau d'impact attendu pour une ou plusieurs composantes des écosystèmes marins côtiers concernés et/ou du recul scientifique existant pour les différents types d'interaction. Il intègre le maximum de connaissances nouvelles acquises depuis que le rapport de 2011 a été rendu, et propose, si nécessaire, des modifications des principales conclusions apportées en 2011. Au 31 janvier 2019, cela représente l'exploitation d'un corpus bibliographique constitué de :

- 58 rapports,
- 100 articles scientifiques parus entre 1982 et 2019,
- 6 livres ou chapitres de livres,
- 4 thèses,
- 1 avis officiel émis par l'Ifremer,
- et du contenu du site internet « <https://tethys.pnnl.gov> », issu du projet Annex IV¹ de l'*International Energy Agency* (IEA) et de *Ocean Energy Systems* (OES).

Ce travail bibliographique cible principalement les câbles électriques haute tension (>33 kV) et ne traite donc pas des câbles de télécommunication. Le rapport se concentre sur les effets et impacts pouvant intervenir sur le plateau continental et ne traite donc pas des portions de câbles situées à des profondeurs supérieures à 200 m (talus continentaux, plaines océaniques). Le rapport traite des câbles de raccordement (ceux dont RTE a la charge ; Figure 1) mais pas des câbles internes aux parcs EMR (e.g. inter-éoliennes). Il concerne la période s'étalant de la pose du câble à son démantèlement, sans traiter des impacts potentiels de la fabrication des câbles ou de la phase de reconnaissance du terrain préalable au démarrage des projets. Les impacts spécifiques sur les espèces bénéficiant de mesures de protection spéciales au titre de la directive Oiseaux (UE 2009/147/CE) et les espèces de cétacés classées au titre de la directive Habitats (UE 92/43/CEE) ne sont pas traités. Le risque de collision entre des animaux marins et des bateaux présents lors de la phase de travaux est considéré comme faible, inhérent à n'importe quel type d'activité humaine nécessitant un déploiement de navires en mer, et n'est pas détaillé dans ce rapport. Le risque de collision ou d'enchevêtrement des espèces pélagiques avec un câble électrique posé sur le fond est considéré comme négligeable et ne sera pas pris en compte. Le développement des éoliennes flottantes en mer implique l'utilisation de câbles dynamiques qui sont positionnés dans la colonne d'eau. Ces câbles pourraient être davantage susceptibles d'entrer en interaction avec les espèces pélagiques de grande taille que les câbles installés sur le fond. A ce jour, cet impact potentiel n'a quasiment pas été étudié et est à rapprocher de l'impact des lignes de mouillage des éoliennes ou autres structures flottantes. L'impact global des câbles électriques sous-marins dynamiques est pour

¹ <https://tethys.pnnl.gov/stressor/emf>

l'instant considéré comme négligeable du fait de leur très faible emprise dans la colonne d'eau et de leur très petit nombre (Taormina et al., 2018, et références associées). Le rapport ne s'attarde pas sur les compartiments biologiques marins tels que le phytoplancton et le zooplancton : ces récepteurs biologiques n'étant exposés que de manière très transitoire, il paraît peu probable qu'ils soient impactés. **Le choix du plan du présent rapport se base sur le plan du rapport de 2011, par commodité. Ce plan ne doit pas être interprété comme une hiérarchisation des paramètres environnementaux en fonction du degré d'impact écologique auxquels ils renvoient, ou du niveau d'incertitude scientifique associé. On se reportera pour cela au chapitre 13.**

Différentes modifications des paramètres environnementaux sont à considérer selon les phases d'un projet de câble électrique sous-marin. Ainsi, les modifications de la turbidité et de l'environnement acoustique concernent principalement les phases de travaux (pose, maintenance et démantèlement). Dans ce cas, les effets, qui consistent en une augmentation de la turbidité et de la nuisance sonore, se produisent sur un intervalle de temps limité et ne concernent pas l'ensemble du linéaire du câble au même moment : en règle générale, le chantier procède de manière séquentielle le long du tracé du câble. A contrario, l'augmentation de température et l'émission de CEM concernent uniquement la phase d'exploitation du câble. L'effet est local, dans la zone proche du câble (< 10 m), concerne l'ensemble du linéaire et intervient sur la durée de l'exploitation prévue (plusieurs dizaines d'années). Enfin, les modifications potentielles de la chimie de l'eau de mer sont liées au remaniement sédimentaire lors de la pose et du démantèlement, et au relargage de matériaux constitutifs du câble au cours de la phase d'exploitation, en cas d'incident, et pour certaines configurations de câbles. La **Figure 2** permet de visualiser à quelles phases du cycle de vie du câble électrique sous-marin interviennent les modifications des différents paramètres de l'environnement physique.

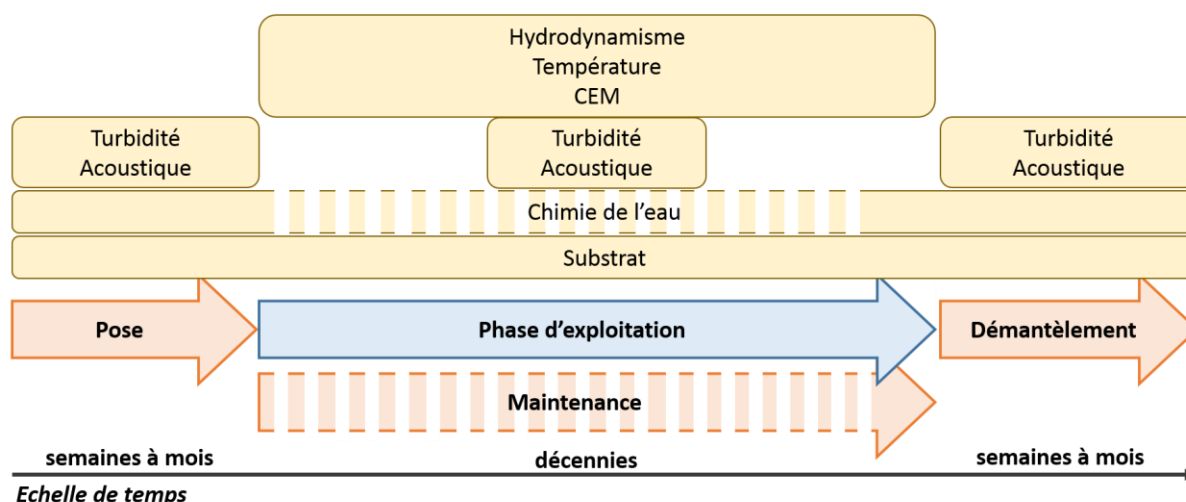


Figure 2. Occurrence des modifications potentielles des paramètres environnementaux (étiquettes jaunes) en fonction des différentes phases d'un projet de câble électrique sous-marin (flèches orange pour la phase de travaux et flèche bleue pour la phase d'exploitation). Au cours de la phase d'exploitation, les opérations de maintenance sont ponctuelles dans le temps, elles peuvent entraîner des modifications de la chimie de l'eau (action et effet matérialisés en pointillés).

Au vu des principales sources d'incertitudes identifiées en 2011, la présente synthèse tente d'approfondir la partie relative aux impacts des CEM et pousse davantage la réflexion sur les effets et impacts cumulés. Les principaux travaux identifiés se basent sur une approche semi-quantitative spatialisée pour estimer un facteur de risque associé au cumul de différentes pressions en un point donné (Halpern et al., 2008; Holon et al., 2015). Il n'y a pas d'évaluation des impacts cumulés à proprement parler. Les travaux les plus récents soulignent la nécessité d'adopter une approche de précaution à visée écosystémique, à l'instar des modèles développés pour la gestion des stocks exploités par la pêche, et de développer une méthodologie adéquate de prise en compte des incertitudes (Stelzenmüller et al., 2018). On peut mentionner que des travaux sont en cours, notamment à l'initiative du Ministère en charge de l'environnement, pour évaluer les impacts cumulés (Groupe de travail ECUME² ; rapport du CGEDD sur la mise en œuvre de la séquence ERC en mer³). Il est donc important dans le cadre de ce rapport d'identifier les axes de recherche prioritaires à développer relativement à cette problématique.

Les conclusions du présent rapport prennent en compte l'évolution de l'état de l'art depuis le rapport de 2011, et identifient à nouveau les pistes de recherche à privilégier.

² Groupe de travail sur les effets cumulés des projets d'énergies renouvelables en mer (MTES/DEB/2018-2019).

³ http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/010966-01_rapport.pdf

2. Le substrat

Cette partie traite des modifications du substrat et de la topographie des fonds, durant les phases de travaux et d'exploitation d'un câble électrique sous-marins. Les effets associés se produisant à la fois sur le court terme (remaniement du substrat naturel en phase travaux) et sur le long terme (présence de substrat artificiel pendant toute la phase d'exploitation), ce chapitre est structuré en deux sous-ensembles. Le rapport de 2011 établissait que les impacts engendrés par les changements de la nature du substrat étaient globalement faibles pour les différents compartiments de l'écosystème (habitats benthiques, poissons) et ce, avec un bon niveau de certitude. L'impact sur les interactions biologiques à long terme (par exemple l'effet « récif » sur la durée d'exploitation d'un câble) était également jugé faible, mais plus difficile à évaluer.

2.1. Modification du substrat induite par la phase de travaux

2.1.1. Effets attendus

La phase de travaux entraîne des modifications physiques du substrat plus ou moins importantes selon la nature et la durée des travaux envisagés. L'emprise spatiale du chantier d'installation est généralement très limitée, de 2 à 8 m de large sur la route du câble, en fonction des outils déployés (Carter et al., 2009). Sur la zone d'atterrissage accessible aux engins terrestres (passage des pelles mécaniques sur l'estran), l'emprise du chantier peut atteindre centaines de mètres carrés. Lorsque le câble est ensouillé, le creusement de la tranchée, et dans une moindre mesure le passage de l'engin d'ensouillage, modifient la morphologie des fonds. En présence de dunes sous-marines sur le tracé du câble, il peut être nécessaire de procéder à un aplanissement et une destruction partielle de celle-ci. L'effet sera alors fonction du rapport entre le volume de sédiment remanié et le volume total de la dune. En présence d'une zone sableuse modelée en rides, il peut être nécessaire de niveler les fonds afin d'aplanir la surface et ainsi faciliter le passage de l'engin. Cette opération peut par exemple impliquer l'utilisation d'une drague qui va alors rejeter le sédiment à proximité.

La profondeur d'ensouillage des câbles dépend de la nature du substrat, de l'hydrodynamisme et des activités maritimes s'exerçant au droit de l'ouvrage. Sur une zone concernée par des mouvements sédimentaires importants, la profondeur peut être augmentée afin de parer aux risques d'érosion. La largeur de la tranchée peut varier de 0,7 à 1 m. Les risques d'agression du câble étant plus élevés pour un substrat meuble, la profondeur d'ensouillage sera supérieure à celle nécessaire pour un substrat dur. L'ensouillage peut être réalisé par trois principales méthodes, chacune ayant un effet spécifique sur le substrat (RTE, 2014):

- le *water jetting* : utilisation d'un jet d'eau sous pression pour les substrats meubles tels que le sable ou la vase ;
- la charrue : principe d'une charrue qui ouvre un sillon dans le sédiment, utilisée pour un substrat présentant peu de cohésion (galets, graviers, cailloutis tendres) ;
- la trancheuse mécanique : utilisée pour couper un substrat dur de type rocheux ou de cailloutis agglomérés, cette machine suit le principe d'une scie circulaire à roue ou à chaîne.

Après la pose, il est possible de laisser la tranchée se refermer naturellement. En effet, dans les zones particulièrement dynamiques, les conditions hydro-sédimentaires et la granulométrie du sédiment permettent d'éviter des manœuvres de comblement supplémentaires. Lorsque les câbles sont ensouillés dans des sédiments consolidés et dans des environnements où le transport sédimentaire est limité, les tranchées peuvent rester visibles plusieurs années (**Figure 3** ; Kraus & Carter, 2018).

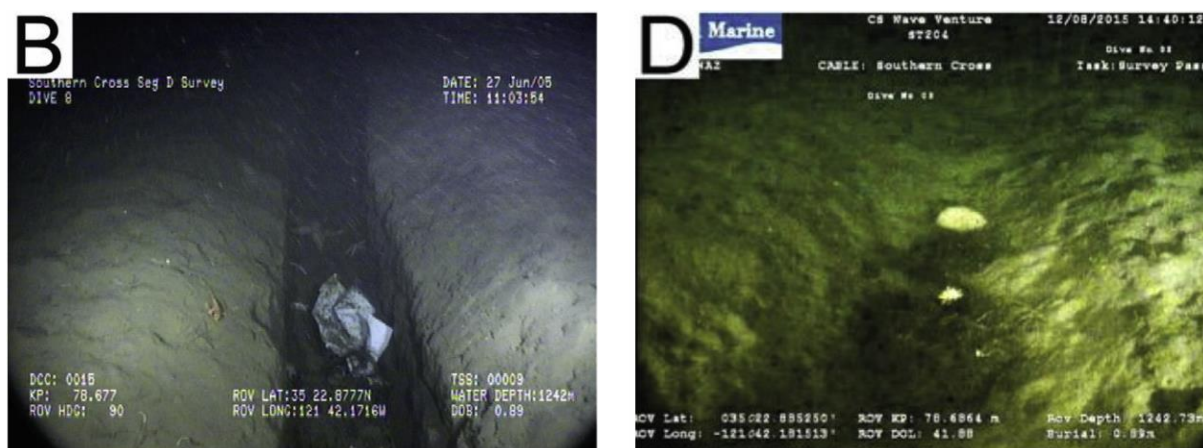


Figure 3. Illustrations du comblement de la souille créée par la pose d'un câble sur la marge continentale californienne 5 ans (B) et 15 ans (D) après son installation (modifié d'après Kraus & Carter, 2018).

Il arrive que des interventions de maintenance ou de réparation soient requises. Il peut alors être nécessaire de désensouiller le câble et d'effectuer une jonction avec un segment de secours avant réensouillage. Selon la longueur de câble rajoutée, une boucle plus ou moins grande sera réensouillée ou protégée par des enrochements ou des matelas de béton, affectant donc le substrat sur une aire plus grande que celle concernée par l'installation initiale. La phase de réparation peut s'étaler sur plusieurs semaines voire plusieurs mois (CREOCEAN, 2012). Les effets associés aux opérations de maintenance des câbles sont en similaires à ceux entraînés par leur pose.

2.1.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

L'installation d'un câble sur le fond marin peut perturber l'écosystème benthique sur l'ensemble de son tracé, mais sur une bande le plus souvent très étroite : la perturbation y est maximale sur la largeur de la tranchée (< 1 m) et plus limitée sur les traces des moyens d'ensouillage (< 10 m). L'action des engins déployés pour préparer le corridor (déblaiement), poser le câble et ses structures de stabilisation, assurer la maintenance et démanteler le câble a un impact direct sur la flore et la faune marine par écrasement, déplacement et altération des habitats. Les espèces benthiques peu mobiles ou fixées sont les plus impactées par le remaniement du substrat, alors que les espèces plus mobiles (crustacés, poissons benthiques) peuvent fuir la zone de travaux.

Les impacts écologiques significatifs concernent les espèces et habitats benthiques présentant au moins l'une des trois caractéristiques suivantes :

- i) une faible représentation dans le milieu marin (espèce rare ou en régression par exemple) et une localisation sur la route du câble,

- ii) de faibles capacités de résilience (espèces généralement fixées, longévives, à faible taux de renouvellement et à croissance très lente),
- iii) un rôle écologique essentiel, notamment les espèces dites « ingénieur » (herbiers, récifs bio-construits) abritant une forte biodiversité et les zones de frayère et de nourricerie.

Les habitats benthiques vulnérables (remplissant au moins un des trois critères précédant) font l'objet de recommandations (voir paragraphe 11). A titre d'exemple, la pose de trois câbles électriques sur des herbiers de phanérogame (*Posidonia oceanica*, espèce « ingénieur » qui justifie un classement en zone protégée) situés entre la Sardaigne et l'Italie démontre que certaines méthodes d'installation (pose et ancrage) peuvent être menées avec des impacts négligeables (surfaces d'herbier détruites ou endommagées très réduites) sur l'état écologique des habitats remarquables traversés (Bacci et al., 2013). En revanche, même lorsque le câble est fixé pour empêcher tout phénomène de ragage, des dommages (taux de mortalité accru, couverture plus faible, par comparaison avec des sites témoins) sont constatés localement pour d'autres types d'habitats benthiques vulnérables. C'est par exemple le cas de récifs d'éponges en milieu plus profond (remplissant le critère ii), où l'impact maximal n'a pas été mesuré immédiatement après la pose du câble, mais un an après, sur un suivi de 4 ans (Dunham et al., 2015).

Concernant les invertébrés vivant dans les sédiments meubles (endofaune), la littérature montre que l'impact de la pose des câbles est minime. En effet, la perturbation est très localisée tandis que les espèces de l'endofaune de substrat meuble ont généralement une aire de répartition vaste par rapport à l'emprise du câble. De plus, une majorité de ces espèces sont résilientes (Andrulewicz et al., 2003).

2.1.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

Le principal risque d'impact sur les espèces halieutiques relatif à la modification du substrat pendant la période de travaux est la destruction de zones fonctionnelles halieutiques, qu'il s'agisse d'une frayère, d'une nourricerie ou d'une zone de migration. L'impact sur les zones fonctionnelles peut se révéler faible à moyen s'il concerne des espèces de poissons dont l'état des populations est déjà préoccupant, notamment durant la phase benthique de leur cycle de vie (œufs, très jeunes individus) (Hammar et al., 2014).

Bien que la majorité des espèces halieutiques pondent dans la colonne d'eau (Asch & Checkley Jr., 2013; Lelièvre et al., 2014), certaines espèces telles que la raie, la seiche ou l'encornet fixent leurs œufs à des structures du fond d'origine humaine (casiers de pêcheurs par exemple) et naturelles (végétaux marins) (Hanlon & Messenger, 2017; Hoff, 2010). D'autres espèces pondent à même le sédiment, comme la daurade grise *Spondyllosoma cantharus* et le hareng *Clupea harengus* (Avrilla, 1980; Soletchnik, 1982). La destruction d'assemblages benthiques propices à la ponte et/ou des structures physiques présentes sur le fond peut donc avoir un impact négatif sur le renouvellement de ces espèces substrat-dépendantes (Delage & Le Pape, 2016). Les travaux de pose et d'ensouillage sur de telles zones de frayère entraîneront la destruction des œufs, et selon l'importance de la frayère, pourront impacter le recrutement d'une population sur une année donnée. Même si elle a lieu pendant la phase travaux, une dégradation ponctuelle d'une zone de frayère peut impacter à plus long terme la population halieutique concernée et contribuer à la diminution de son abondance. Des précautions permettant de

minimiser l'impact de la modification de substrat sur les populations halieutiques en adaptant le phasage de la période de travaux sont précisées au chapitre 11.

Les zones de nourricerie sont généralement situées à des profondeurs inférieures à 20 m. La situation côtière de ces zones fonctionnelles les rend susceptibles de se trouver sur les tracés d'atterrissage des câbles et d'être modifiées au cours de la phase de travaux. Les modifications de substrat au sein de ces zones peuvent avoir des répercussions négatives sur le recrutement⁴ des espèces halieutiques qui leur sont associées (Delage & Le Pape, 2016; Rochette, 2011). L'installation d'un câble électrique dans une zone de nourricerie aura donc un impact négatif sur les populations halieutiques. L'intensité de cet impact pourra être accentuée par la présence d'autres activités anthropiques dans le périmètre de la zone de nourricerie (*i.e.* usages récréatifs en zone côtière et intertidale, activités industrielles en mer).

Enfin, concernant les populations adultes d'espèces inféodées aux fonds marins, la phase de travaux peut perturber leurs déplacements de part et d'autre des zones d'installation des câbles, en particulier en période de migration (*i.e.* araignées dans le golfe normand-breton - Ybert et al., 2016).

La localisation des zones fonctionnelles halieutiques étant prise en compte lors de la détermination du tracé de pose du câble et l'empreinte des travaux étant faible, les impacts sur les ressources halieutiques sont théoriquement minimales. Cependant, deux considérations tempèrent cette conclusion :

- **L'incertitude sur la localisation** : selon l'espèce considérée et la zone géographique concernée, l'identification des zones fonctionnelles halieutiques n'est pas toujours exhaustive et leur localisation peut être imprécise. On citera par exemple les travaux en cours sur l'identification de telles zones pour les différentes espèces de lançon (Laugier, 2015), qui sont présentes dans le réseau trophique des principales espèces halieutiques des façades maritimes Atlantique et Manche-Mer du Nord. D'autre part, les suivis halieutiques conduits lors de l'EIE peuvent permettre de localiser, infirmer ou confirmer la présence de zone fonctionnelle, mais uniquement dans le périmètre du projet.
- **La variabilité de la localisation** : la localisation des zones fonctionnelles halieutiques n'est pas immuable. Les modifications climatiques peuvent entraîner une modification de l'aire de répartition de certaines espèces, ainsi qu'un déplacement des zones fonctionnelles associées (Fulford et al., 2014). Il faut alors s'assurer au cours des phases de maintenance et de démantèlement du projet que la localisation des zones fonctionnelles n'a pas évolué depuis l'EIE et réévaluer, le cas échéant, le niveau d'impact au regard de la nouvelle localisation de ces zones

Ces conclusions sont à remettre en perspective dans le cadre des projets d'installation de câbles sous-marins. Les zones impactées par les travaux sont localisées et leurs surfaces sont bien inférieures aux surfaces impactées par d'autres activités anthropiques opérant un remaniement du sédiment (*i.e.* extraction de granulats, dragage et clapage) (Foden et al., 2011). Néanmoins, à plus large échelle, les impacts induits par les diverses activités anthropiques peuvent se cumuler à l'échelle d'une population et entraîner une diminution de biomasse. A titre d'exemple,

⁴ En halieutique, le recrutement d'une espèce donnée correspond à l'entrée dans la pêche de nouveaux individus, qui ont atteint la taille minimum de capture et/ou la 1^{ère} maturité sexuelle. Il est caractérisé par un indice de recrutement spécifique, calculé annuellement à partir de l'abondance des juvéniles.

la poldérisation des habitats de nourriceries de l'estuaire de Seine a conduit à une réduction de 33% de la surface totale des vasières intertidales. Combinée à l'effet des autres pressions (*i.e.* extraction de granulats, pêche), la réduction de l'efficacité de la fonction de nourricerie de cette zone a été estimée à 42% et impacte le renouvellement de la population de Manche Est (Kostecki & Le Pape, 2011; Rochette, 2011). Il convient donc de favoriser une approche de précaution et d'éviter les impacts sur zones fonctionnelles halieutiques dès qu'une alternative est possible.

2.2. Modification du substrat au cours de la phase d'exploitation

2.2.1. Effets attendus

La présence sur le long terme de structures artificielles posées sur le fond (câble non ensouillé, structures de protection et de stabilisation) constitue une modification du substrat pouvant entraîner des impacts sur la flore et la faune associées. Lorsqu'ils ne peuvent pas être ensouillés, les câbles sont protégés par des structures de tailles moyennes, comme des matelas de béton de quelques mètres carrés et de moins de 50 cm de hauteur, ou par des enrochements pouvant atteindre 1.5 à 2 m de hauteur et 10 à 15 m de largeur (RTE, 2014). En outre, lorsqu'un câble non ensouillé est mal stabilisé, des phénomènes d'abrasion liés au ragage peuvent avoir lieu, sur des surfaces limitées.

Lorsque les câbles sont ensouillés dans des sédiments consolidés et dans des environnements où le transport sédimentaire est limité, les tranchées peuvent rester visibles plusieurs années (Kraus & Carter, 2018).

2.2.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

Au cours de sa phase d'exploitation, la présence physique durable d'un câble sous-marin (électrique ou de télécommunication) et de ses éventuelles structures de protection et de stabilisation (matelas de béton, enrochements, coquilles) peut induire des changements de biodiversité benthique. On peut distinguer trois types de changement de biodiversité qui renvoient à des niveaux d'impact potentiel et à une localisation dans l'espace très différents :

- **L'effet « récif »**⁵ : il s'agit du phénomène de colonisation biologique ayant lieu sur la plupart des objets anthropiques immergés et qui évolue (en termes de diversité, biomasse et abondance des organismes formant cette communauté benthique) en fonction de la durée d'immersion de l'objet (Langhamer, 2012). La communauté benthique de substrat dur qui colonise les récifs artificiels, que l'on peut aussi qualifier de biofouling, diffère généralement de la communauté installée sur le substrat dur naturel environnant par sa composition taxonomique (floristique et/ou faunistique) (Thanner et al., 2006). Le degré de ressemblance faunistique entre la communauté « artificielle » et la communauté « naturelle » varie en fonction de plusieurs facteurs (nature du matériau utilisé, configuration et orientation de la

⁵ L'expression effet « récif » est conservée car c'est une appellation commune ; mais conformément à nos définitions de départ, on le considère bien comme un impact.

structure artificielle ; durée et saison d'immersion). Lorsque le degré de similarité taxonomique est quantifié, il reste généralement inférieur à 80% (Thanner et al., 2006). La différence de communauté semble se vérifier aussi pour les câbles non ensouillés et leurs structures de protection et de stabilisation (Patry et al., 2018 ; Thiesse-Metral, 2018) bien que cette problématique soit très peu abordée. La dynamique temporelle de la colonisation des câbles, et en particulier la durée au bout de laquelle la communauté benthique se stabilise, restent également très peu étudiées. Sherwood et al. (2016) étudient la colonisation biologique d'un câble HVDC et de son câble de retour métallique installés au niveau de *Bass Strait* au Sud-est de l'Australie. Sur sa portion non ensouillée, ce câble fournit une surface colonisable similaire à un fond de pierre et constitue rapidement un nouvel habitat pour les espèces de récif, et en particulier un refuge pour les oursins. Les auteurs concluent qu'en trois ans et demi, la surface du câble est couverte d'espèces comparables à celles trouvées dans le récif environnant, sans pour autant chercher à quantifier le degré de ressemblance entre les deux communautés. Globalement, l'effet « récif » constitue un impact moyen sur la communauté d'invertébrés benthiques dans le sens où la composition en espèce peut être très différente de la composition initiale, mais sans que cela soit forcément synonyme de dégradation.

Cette problématique de l'effet « récif » dépasse largement le cas des câbles sous-marins non ensouillés (électriques ou non) et a été abordée depuis plusieurs décennies pour divers types de récif artificiel. Pour autant, les conclusions de ces nombreux cas d'étude sont difficilement généralisables, et les suivis pluriannuels ciblant spécifiquement les câbles électriques sous-marins restent rares.

A notre connaissance, il n'existe pas d'étude sur la colonisation biologique qui pourrait s'établir sur des portions de câbles électriques sous-marins en pleine-eau (par exemple pour les projets EMR flottants). Toutefois, des estimations de diversité ou de biomasse pourraient être effectuées par analogie avec le biofouling que l'on retrouve sur d'autres structures en pleine-eau telles que des bouées (Langhamer et al., 2009) ou les fondations d'éoliennes en mer (De Mesel et al., 2015). Des projets sont actuellement en cours pour approfondir ces connaissances (projets ANR-FEM « APPEAL », « ABIOP » et « ABIOP+ »⁶).

- L'influence du câble sur le milieu naturel environnant : le récif artificiel (que constituent le câble non ensouillé et ses éventuelles structures de protection et de stabilisation) influence aussi la communauté benthique adjacente (qu'elle soit associée à un substrat dur ou meuble). On fait référence ici :

- i) au changement de la dynamique sédimentaire au voisinage immédiat du câble proprement dit (s'il est posé et d'un grand diamètre) ou de ses structures de protections, lesquels modifient l'hydrodynamisme local (c'est-à-dire sur une largeur inférieure à 5m). Cela se manifeste par une accumulation de sédiment de granulométrie différente ou au contraire un affouillement,
- ii) à l'augmentation de la teneur en matière organique dans le sédiment adjacent, lorsque la colonisation biologique est très importante sur le câble ou ses structures de protection/stabilisation, et que les conditions hydrodynamiques sont calmes.

⁶ <https://www.france-energies-marines.org/R-D/Projets-en-cours/APPEAL> et <https://www.france-energies-marines.org/R-D/Projets-en-cours/ABIOP>

Au regard de ce qui se passe autour de dizaines de fondations d'éoliennes d'un parc industriel offshore, ce type d'impact est négligeable quand on ne considère que la zone de raccordement électrique (Wilding, 2014).

Dès lors que le câble non ensouillé est fixé correctement sur le fond et qu'il ne se déplace pas, il n'y a pas d'altération directe des habitats et des espèces présentes : on ne relève pas de changement significatif de la biodiversité benthique ordinaire (qu'elle soit exprimée en termes de richesse spécifique, de densité d'organismes, de taux de recouvrement des espèces) dans l'environnement immédiat des câbles par rapport à des zones témoins (Andrulewicz et al., 2003; Dunham et al., 2015; Kogan et al., 2006; Sherwood et al., 2016).

Toutefois, moins d'une dizaine d'études sont publiées et chacune n'aborde qu'une fraction de la biodiversité benthique existante (endofaune vs. épifaune ; macro vs. mégafaune) et des indices de diversité utilisables.

- **L'effet « réserve »**⁷ : lorsqu'un risque de croche existe (en particulier lorsque le câble n'est pas ensouillé), les usages concernés sont généralement interdits sur la route du câble. Or, ces usages ont par ailleurs un impact écologique avéré sur les fonds marins (pêche aux arts trainants, mouillage de navires, clapage, etc.). Ces zones d'interdiction représentant un corridor de plusieurs centaines de mètre de large, ou plusieurs km² dans le cas du réseau de câbles au sein des parcs éoliens, les restrictions d'usage peuvent donc conduire à une amélioration de l'état écologique des communautés benthiques et de leurs indices de « santé » par rapport à ceux mesurés pour les communautés qui se trouvent en dehors de la zone de restriction. Ce type d'impact, que l'on peut qualifier d'indirect et de positif, est démontré à l'échelle de parcs éoliens en mer fermés aux autres activités humaines (Lindeboom et al., 2011) mais n'a pas été étudié pour des corridors de câble. Cette problématique est actuellement abordée au niveau de l'interconnexion entre Jersey et la presqu'île du Cotentin, dans le cadre du projet de recherche ANR-FEM « SPECIES »⁸. Pour ce qui concerne les câbles dynamiques, l'effet « réserve » est faible si l'on ne considère que les raccordements de parcs EMR (périmètre de cette synthèse bibliographique), mais il peut être plus important dès que l'on considère le réseau de câbles dynamiques internes aux parcs EMR. Cette question est actuellement abordée dans le cadre du projet APPEAL.

Pour ce qui concerne l'effet « récif » et l'effet du câble sur le milieu environnant, on peut noter que l'impact sur le fonctionnement global des écosystèmes qui accueillent des câbles électriques sous-marins est a priori négligeable. En revanche, l'effet « réserve » qui tend à favoriser les communautés d'espèces peut prévaloir sur des échelles spatiales dépassant l'emprise simple de la structure considérée et peut éventuellement modifier le fonctionnement global de l'écosystème « hôte » (Langhamer, 2012).

2.2.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

Deux types d'impact direct peuvent être induits par la modification du substrat suite à la pose d'un câble :

⁷ De même ici, c'est une appellation commune, mais on le considère comme un impact.

⁸ <https://www.france-energies-marines.org/R-D/Projets-en-cours/SPECIES>

- **L'effet « récif »** : Il faut distinguer l'effet « récif », résultant de la colonisation opportuniste d'un ouvrage industriel, des récifs artificiels mis en œuvre à des fins de restauration et/ou d'amélioration de la productivité halieutique. La présence d'un nouveau type de substrat au sein du paysage benthique peut favoriser l'extension de la répartition spatiale de certaines espèces, augmentant localement la richesse spécifique et pouvant créer un corridor de colonisation (Gérard et al., 2008, et références associées). Lorsque les câbles ne sont pas ensouillés, ils peuvent offrir un habitat pour certaines espèces benthiques d'intérêt commercial. Par exemple, le homard et le tourteau fréquentent durablement les structures de protection (matelas de béton) stabilisant certains câbles de raccordement (Hooper & Austen, 2014 ; Dufournaud, 2018). Love et al. (2017a) remarquent que des portions de câble reposant sur un substrat sableux fournissent un habitat favorable pour plusieurs espèces de limande.

- **L'effet « réserve »** : Il découle des restrictions d'usages associées à la présence du câble, et notamment de l'interdiction totale ou partielle de la pêche aux engins trainants. L'effet « réserve » se caractérise par une augmentation locale de la densité, de la taille des individus et de la biomasse totale. Par extension, l'effet « réserve » peut mener à une augmentation du niveau trophique moyen et de la diversité spécifique (Mesnildrey et al., 2010, et références associées).

Roach et al. (2018) étudient les conséquences écologiques d'une fermeture d'un an puis de la réouverture d'une zone de pêche du homard *Homarus gammarus*, facilitée par l'implantation d'un champ d'éoliennes offshore sur la côte Nord-est du Royaume Uni. Les résultats indiquent que la fermeture temporaire de la pêche entraîne une augmentation de l'abondance et de la taille moyenne des individus à l'intérieur du périmètre du parc. A la réouverture de la zone de pêche, les Captures Par Unité d'Effort (CPUE) moyennes augmentent temporairement avant de revenir à des valeurs s'approchant de celles observées sur les zones adjacentes, ce qui souligne l'effet « réserve » du parc.

Un impact indirect de la modification du substrat sur les ressources halieutiques peut être envisagé. Certaines espèces de poissons opportunistes peuvent par exemple être attirées vers la zone de présence du câble si les modifications de l'assemblage benthique (voir paragraphe 2.2.2) vont dans le sens d'un environnement rendant disponible une plus grande quantité de nourriture. Au contraire, une modification de l'assemblage benthique peut être défavorable à la présence de certaines espèces halieutiques, ce qui a par exemple été constaté sur des sites d'extraction de granulats (Desprez et al., 2010). A notre connaissance, ce type de phénomène n'a pas été constaté dans le cas de câbles électriques sous-marins.

Résumé

En phase de travaux, l'ensouillage du câble modifie fortement le substrat sur une étroite bande correspondant au passage des engins le long du corridor du câble (remaniement sédimentaire, creusement de tranchée) ou à l'installation de structures de protection/stabilisation (matelas de béton, enrochement). L'ensouillage modifie faiblement les zones de part et d'autre du corridor (redéposition de particules fines). Du fait de la faible emprise spatiale et du caractère ponctuel des travaux, l'impact est jugé globalement **faible** sur les communautés benthiques, et **négligeable** sur les ressources halieutiques, les poissons migrateurs et les élasmobranches, que le câble soit simplement posé sur le fond ou ensouillé. Toutefois, si la route du câble empiète sur des espèces ou habitats benthiques vulnérables, peu communs ou assurant des fonctions écologiques essentielles, l'impact sur le benthos et pour les espèces halieutiques sera qualifié de **moyen**, que le câble soit ensouillé ou posé avec des structures de protection/stabilisation. L'impact des câbles dynamiques est jugé **négligeable**. Ces degrés d'impact sont estimés avec un recul scientifique suffisant.

En phase d'exploitation, l'effet « récif » (existant uniquement si le câble est posé et/ou protégé) constitue un impact **moyen** sur la communauté d'invertébrés benthiques (dans le sens où la composition en espèce peut être très différente de la composition initiale, mais sans que cela soit forcément synonyme de dégradation), **négligeable** à **faible** sur les poissons. L'impact des câbles dynamiques est jugé négligeable, avec un niveau d'incertitude moyen. L'impact lié à l'effet « récif » est localisé sur le corridor du câble. En cas de restriction d'usages impactant les fonds (pêche aux arts trainants), l'effet « réserve » engendre un impact sur le benthos qualifié de **moyen** (dans le sens d'une amélioration de l'état écologique) pour les câbles ensouillés ou posés, car il concerne une surface plus importante (bande de quelques centaines de mètres de large) ; mais cet impact est faible pour les câbles dynamiques. Le niveau d'incertitude scientifique est jugé également moyen. L'impact associé à l'effet « réserve » est estimé **faible** pour les poissons.

3. La turbidité

3.1. Effets attendus

La phase de travaux provoque une augmentation de la turbidité sur le linéaire du câble et dans les zones proches, avec un effet plus ou moins important selon le type de travaux réalisés, la nature du fond et l'hydrodynamisme au moment des travaux. L'augmentation de turbidité est limitée à la durée de l'installation ou à peine plus (quelques heures ou jours). La remise en suspension de particules fines durant l'ensouillage ou le démantèlement des câbles et leur redéposition peuvent avoir un effet à plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de mètres de la route du câble. Le même type de perturbation peut se produire lors de l'étape de préparation de la route du câble (lorsqu'elle est nécessaire), réalisée par dragage. Mais dans ce cas, l'effet peut difficilement être comparé avec l'augmentation de turbidité générée par les extractions de granulats car le nivellement des fonds préalable à l'installation d'un câble n'entraîne *a priori* qu'un seul passage d'engin et beaucoup moins de creusement (voir Carlier & Delpech, 2011). Par ailleurs, la remise en suspension du sédiment est également susceptible de remobiliser des contaminants dans la colonne d'eau (voir chapitre 4).

Lors de l'installation du raccordement du parc éolien offshore de Nysted (câble de 132 kV, ensouillé à 1,3 m sous la surface du sédiment), des mesures de turbidité journalière effectuées au voisinage des travaux révélaient que les taux ne dépassaient pas 15 mg/l (DONG Energy et al., 2006).

Fissel & Jiang (2011) utilisent le modèle COCIRM-SED afin de prédire les quantités de matière mises en suspension et les schémas de transport et de déposition de sédiments associés à différents chantiers sous-marins. Ce modèle est composé de six modules permettant de modéliser la circulation de l'eau, les vagues, le transport de sédiments, les caractéristiques morphodynamiques, la qualité de l'eau et le suivi des particules. Lors de l'application de ce modèle au banc Roberts en Colombie-Britannique (Canada), l'augmentation de turbidité résultant des travaux de pose d'un nouveau câble électrique et de démantèlement d'un câble est modélisée. Dans cette zone, le substrat est principalement composé de sable, avec une faible proportion de limon et d'argile. Les valeurs de particules en suspension peuvent atteindre les 50 mg/l lorsque la turbidité augmente suite à des événements naturels. Durant la phase de travaux, des valeurs de particules en suspension supérieures à 10 000 mg/l et supérieures à 1 000 mg/l sont prédites respectivement près du fond et près de la surface, dans la zone proche des travaux (< 10 m). L'aire totale des zones présentant des niveaux de particules en suspension supérieurs à 75 mg/l est en moyenne inférieure à 0,12 km² (représentant environ 400 m de linéaire de câble ; **Figure 4**). L'augmentation de turbidité associée à la phase de travaux est limitée dans le temps (quelques heures), avec une dissipation de cet effet plus ou moins rapide selon les conditions physiques de l'environnement. Les aires totales des zones présentant des niveaux de particules en suspension supérieurs à 75 mg/l et supérieurs à 25 mg/l sont nulles respectivement au bout de deux et trois heures. Les résultats de cette étude ont été obtenus par modélisation et doivent donc être interprétés avec précaution.

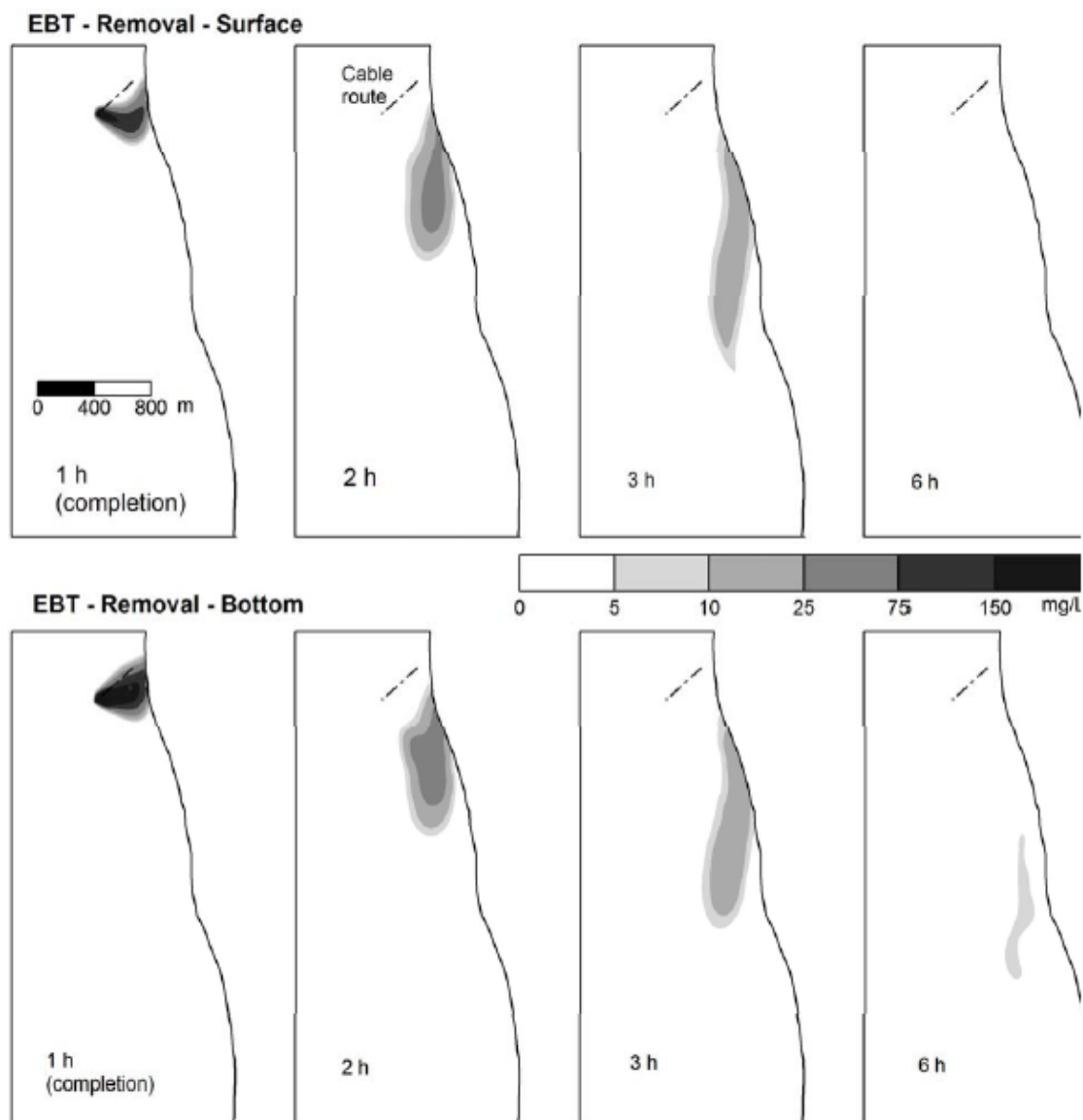


Figure 4. Etendue spatiale et concentration en matière en suspension du panache turbide généré par le démantèlement d'un câble électrique de 138 kV (Fissel & Jiang, 2011).

Dans une autre étude, James et al. (2017) comparent des mesures *in situ* de particules en suspension avec des résultats de modélisation lors de l'ensouillage d'un câble. Ils n'observent pas de modification significative de la turbidité mesurée à 5 m du linéaire du câble (valeur maximale de 5,57 (± 0.33) mg/l sur le fond et de 1,31 (± 0.20) mg/l en surface), alors que la modélisation indique des valeurs allant jusqu'à 500 mg/l. Les auteurs mettent en avant les limites de la modélisation dues à la complexité du milieu naturel et aux interactions entre différents paramètres physico-chimiques que les modèles ne peuvent pas prendre en compte à ce jour, et les limites inhérentes à l'échantillonnage terrain contraint par les conditions météorologiques.

3.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

Les organismes sessiles (fixés sur le fond) ou peu mobiles sont évidemment plus exposés à l'augmentation de turbidité que les organismes suffisamment mobiles pour échapper à cette perturbation. En outre, on trouve dans cette première catégorie une majorité de filtreurs (ou suspensivores) qui utilisent la filtration de l'eau de mer non seulement pour respirer (à l'aide de branchies) mais également pour se nourrir (en captant les particules alimentaires au niveau de branchies ou d'appendices buccaux). L'impact écologique potentiel peut donc se traduire par un étouffement et/ou une incapacité à se nourrir correctement.

Le niveau d'impact sur les invertébrés dépend également du contexte écologique de la zone de travaux, c'est-à-dire du seuil de tolérance des organismes benthiques présents, qui dépend lui-même du niveau de turbidité naturelle de la zone. L'impact est d'autant moindre que les invertébrés sont naturellement soumis à une forte turbidité et/ou à de fortes variations de ce paramètre (par exemple au sein ou à proximité d'un estuaire, ou sur une zone peu profonde soumise à un régime de vent fort). A l'inverse l'impact peut être fort pour des espèces fragiles et longévives (coraux, herbiers, maerl), *a fortiori* lorsqu'elles sont situées dans des environnements où l'hydrodynamisme est insuffisant pour « nettoyer » rapidement les particules fines qui se sont redéposées. En effet, l'accumulation de particules fines sur les parties vitales d'organismes fixés (polypes de coraux) peut alors représenter une altération durable (Jørgensen et al., 2011).

L'augmentation du taux de particules en suspension et la redéposition de particules fines peut altérer temporairement la respiration et/ou la nutrition des invertébrés benthiques filtreurs (Szostek et al., 2013, et références associées). En effet, la remise en suspension du sédiment a pour effet d'augmenter la fraction minérale de la matière en suspension, au détriment de la fraction organique, ce qui diminue la qualité de la nourriture. Par conséquent, une augmentation significative de la turbidité peut altérer la croissance de certains organismes benthiques, mais de manière temporaire, ce qui peut se matérialiser par un arrêt de croissance visible sur les valves de certains bivalves.

Le long du raccordement du parc éolien offshore de Nysted en mer Baltique, l'augmentation de la turbidité et le phénomène de redéposition dus aux travaux d'excavation de la tranchée du câble ont pu contribuer à une diminution de la densité de la macrofaune benthique et de l'herbier et à proximité de la route du câble, sur une surface évaluée à 0,013 km² (DONG Energy et al., 2006). A notre connaissance, il n'y a pas d'autres études portant spécifiquement sur l'impact potentiel de la turbidité liée aux câbles sous-marins.

Les impacts attendus d'une augmentation de la turbidité sur le compartiment benthique sont localisés (mais sur une emprise spatiale supérieure à celle du câble lui-même) et à court terme (quelques heures à quelques jours). Ils peuvent être considérés comme négligeables à faibles. Cette conclusion ne s'applique cependant qu'au cas des câbles de raccordement. En effet, les impacts peuvent être plus importants dans le cas de l'installation du réseau de câbles internes d'un parc EMR commercial (câbles inter-éoliennes par exemple), où les emprises des effets de chaque câble peuvent se superposer partiellement.

3.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

L'impact d'une augmentation de la turbidité sur les espèces halieutiques dépend du niveau d'exposition et de sa durée. Il se traduit par des réponses variées, représentatives d'un stress physiologique (e.g. accélération de la respiration, toux, modification de l'activité de nage). L'intensité de la réponse dépend de la sensibilité de l'espèce aux variations de turbidité : les espèces estuariennes, habituées aux environnements turbides, seront peu sensibles ; pour les espèces de poisson les plus sensibles, tel que le bar rayé *Morone saxatilis*, l'augmentation de la turbidité peut entraîner une mortalité directe par altération des voies respiratoires (Wilber & Clarke, 2001, et références associées). La sensibilité des espèces dépend également du stade de vie considéré : chez la morue *Gadus morhua* au stade embryonnaire et larvaire, l'augmentation de turbidité est source de mortalité et s'ajoute à la mortalité naturelle (Hammar et al., 2014).

Fiksen et al. (2002) utilisent un modèle de prédiction du taux de survie de larves de hareng au bout de 50 jours en cas d'augmentation de la turbidité. Le modèle inclut des paramètres relatifs à la capacité à trouver et à capturer des proies, à la croissance et au métabolisme de l'espèce étudiée. Pour une augmentation de la turbidité induite par une augmentation de chlorophylle *a* de 0 à 5 mg/m³, les résultats de la modélisation indiquent une diminution de la luminosité associée à une réduction de la capacité des prédateurs à capturer les larves, ainsi que de la capacité des larves à se nourrir sur le zooplancton. La survie des larves est donc à la fois augmentée car la prédation est moindre, et diminuée car la capacité des larves à s'alimenter est affectée.

La vision des larves de flétan (*Hippoglossus hippoglossus*) a été largement étudiée, ce qui en fait une excellente espèce pour étudier l'effet de la turbidité sur le comportement de prédation (Helvik et al., 2001). En théorie, la distance à laquelle un poisson réagit à une proie potentielle est inversement proportionnelle à la turbidité, à l'augmentation de luminosité, à la taille et au nombre de proies. La larve de flétan s'alimente en approchant ses proies du dessous. Dans leur étude, Cutts & Batty (2005) suggèrent que l'augmentation de turbidité pourrait inciter les larves à se nourrir en augmentant le contraste perçu par la larve entre sa proie *Artemia* sp. nauplii et l'arrière-plan clair. L'étude souligne que les impacts peuvent être très différents d'une espèce à l'autre et d'un environnement à l'autre. Une étude complémentaire a par la suite été réalisée par Batty et al. (2006) sur des larves de morue et aucun effet significatif n'a pu être identifié.

Les résultats obtenus dans le cadre de différentes études consultées montrent qu'il est difficile de tirer des conclusions concrètes sur l'aspect positif ou négatif de l'impact d'une augmentation de turbidité. Dans le cas des câbles, l'impact attendu reste négligeable (câble posé ou protégé) à faible (enfouissement).

Résumé

L'augmentation de turbidité n'intervient qu'au cours de la phase de **travaux** pour l'installation de câbles. Elle est temporaire (quelques heures sur un point fixe) et son extension spatiale est au maximum de l'ordre du km². Les impacts sur le benthos et les poissons sont estimés **négligeables** (pour les câbles posés) à **faibles** (pour les câbles ensouillés) et sont localisés sur un corridor de moins d'un km de large. Dans le cas d'un câble posé et protégé par des enrochements, l'impact sur le benthos devient faible, du fait de la perturbation générée par la mise en place des enrochements. Les modèles développés pour étudier l'augmentation de turbidité sont conservateurs, et les quelques mesures de concentrations en matière en suspension *in-situ* peuvent différer fortement des prédictions de modèle.

Pour le compartiment benthique, les impacts sont attendus pour les organismes sessiles, avec une forte sensibilité (espèces fragiles et/ou longévives) vis-à-vis de la redéposition de particules fines, dans les environnements habituellement peu turbides et à faible hydrodynamisme. Ils peuvent se manifester par des retards de croissance et/ou du recrutement.

Pour les ressources halieutiques, l'augmentation de turbidité peut engendrer un stress physiologique dont l'importance dépend de l'espèce – les espèces estuariennes par exemple y seront moins sensibles que les espèces démersales du large- et du stade de vie. Un impact est également possible sur le comportement, influençant par exemple la prédation, mais la littérature existante ne concerne que le stade larvaire.

L'incertitude scientifique est jugée faible quel que soit le type d'interaction considéré avec l'augmentation de la turbidité.

4. L'hydrodynamisme

Le rapport de 2011 établissait que les impacts engendrés par les changements de l'hydrodynamisme étaient globalement faibles pour les différents compartiments de l'écosystème (habitats benthiques, poissons) (Carlier & Delpech, 2011). Ce type de changement intervient au cours de la phase d'exploitation.

4.1. Effets attendus

Lorsque les câbles sont ensouillés dans des sédiments consolidés et dans des environnements où le transport sédimentaire est limité, les tranchées peuvent rester visibles plusieurs années (Kraus & Carter, 2018). Dans ce contexte, l'hydrodynamisme peut être modifié très localement, c'est-à-dire sur une largeur de l'ordre du mètre (**Figure 3**).

Dans le cas de câbles non ensouillés et/ou protégés, la présence de structures physiques sur le fond assurant la protection et la stabilisation du câble (matelas de béton, enrochement) peut modifier les conditions hydrodynamiques du milieu sur une bande plus large si ces structures sont de dimensions importantes (hauteur > 1 m). Généralement, compte-tenu des faibles hauteurs et volumes de ces structures, cet effet est très localisé (< 5 m). L'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire étant deux paramètres environnementaux étroitement liés, la perturbation de l'hydrodynamisme peut se matérialiser par la présence d'une étroite bande de sédiment remanié le long des câbles posés sur le fond (Taormina et al., 2018) (**Figure 5A**). Dans les environnements à très fort hydrodynamisme et où le fond est constitué de roches et de gros blocs, le diamètre du câble ou de ses protections sont de dimension similaire aux irrégularités topographiques et les perturbations de l'hydrodynamisme y sont donc négligeables (**Figure 5B**).

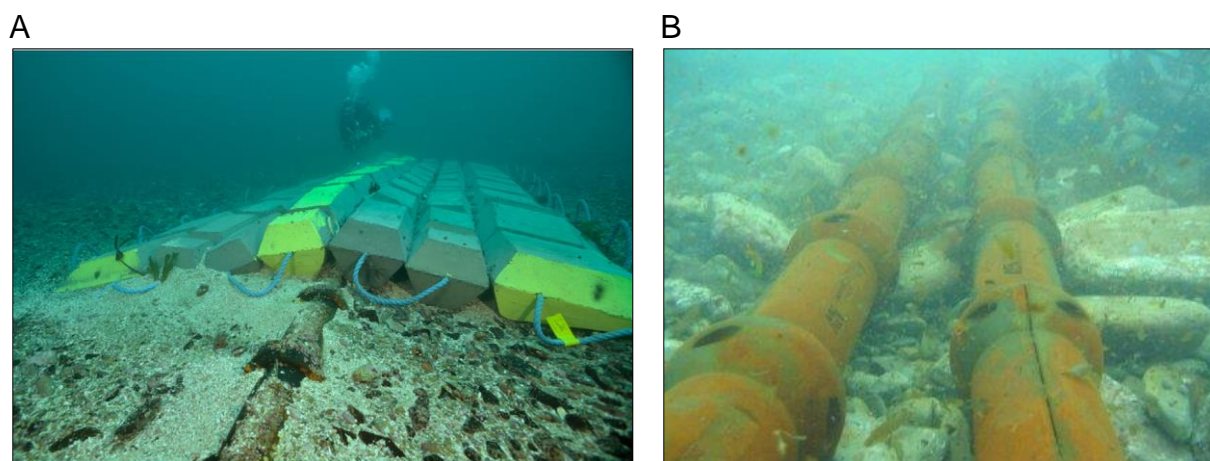


Figure 5. A. Dépôt de sable grossier le long du câble de raccordement électrique du site pilote hydrolien de Paimpol-Bréhat et de ses structures de protection (© IFREMER, 2013). B. Câbles posés sur le fond sur un site de l'European Marine Energy Center (© EMEC).

4.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

A notre connaissance, il n'existe pas d'études sur les changements de biodiversité benthique induits par une modification de l'hydrodynamisme due à la présence d'un câble non ensouillé ou de ses structures de protections. En théorie, ce type de perturbation peut logiquement s'accompagner d'une modification de la nature du sédiment (granulométrie) et donc d'un changement de la communauté benthique (endofaune en particulier) (voir aussi la partie 1.6.2 : influence du câble sur le milieu naturel environnant). Là encore, lorsque ce type d'impact se manifeste, il reste vraisemblablement très localisé dans l'espace (< 10 m de part et d'autre du câble). Dans des zones à forts courants, où l'hydrodynamisme est naturellement très perturbé, cet impact est négligeable (**Figure 5B**).

4.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

A ce jour, aucune étude ne s'est penchée sur cette problématique particulière. Globalement, la modification des conditions hydrodynamiques ne devrait pas entraîner d'impact significatif sur les ressources halieutiques. La dispersion des œufs et des larves au sein de la colonne d'eau est influencée par les courants, or la modification de l'hydrodynamisme liée à la présence d'un câble n'est pas de nature à modifier la courantologie dans la colonne d'eau, même en zone côtière peu profonde. A l'image de ce que l'on conclut pour le benthos, cela ne constitue pas un enjeu environnemental.

Résumé

L'impact d'un câble sous-marin sur l'hydrodynamisme n'est considéré comme un enjeu environnemental que dans les cas où le câble est recouvert par des structures de dimensions importantes par comparaison avec le niveau de variation topographique du fond (par exemple de gros enrochements sur un fond plat). La perturbation de l'hydrodynamisme est négligeable dans les autres cas. Eventuellement, elle peut engendrer la présence d'une étroite bande de sédiment remanié (sur une largeur inférieure à 5 m ; cf partie 2.2.1) le long des protections de câbles, laquelle peut modifier très localement la biodiversité benthique (endofaune). Par conséquent, les impacts sur le benthos et les poissons (y compris poissons migrateurs et élasmobranches) sont considérés comme **négligeables à faibles**, avec un recul scientifique suffisant.

En dépit du fait qu'aucune étude ciblée n'ait été trouvée dans la littérature, que ce soit pour les organismes benthiques ou pour les ressources halieutiques, le niveau d'incertitude scientifique est jugé faible.

5. La température

En 2011, les connaissances disponibles sur l'impact potentiel de l'échauffement lié au fonctionnement des câbles sous-marins étaient très limitées. Elles suggéraient que l'élévation de température ne pouvait pas dépasser 2°C à 80 cm d'un câble ensouillé à 1 m sous le fond marin, autrement dit à 20 cm sous la surface du sédiment. L'impact sur l'écosystème benthique était jugé négligeable à faible (Carlier & Delpech, 2011).

5.1. Effets attendus

Les changements de température induits par les câbles électriques sous-marins en fonctionnement restent peu documentés. Dans l'étude d'impact du projet FAB (interconnexion France-Angleterre passant par Aurigny), RTE indique que des mesures relatives à l'échauffement du sol par ses liaisons souterraines terrestres ont été réalisées en 2010 et 2011. Celles-ci montraient une augmentation de température moyenne comprise entre 0.5°C et 2°C à 30 cm de profondeur (RTE, 2016); la distance au câble n'est pas précisée, on suppose donc que cette mesure est prise à la verticale du câble. Théoriquement, la chaleur émise par les câbles est plus rapidement dissipée au niveau du plancher marin du fait d'une température de l'eau en moyenne inférieure à celle de l'air et d'une plus grande conductivité thermique.

Deux études récentes révèlent que le niveau d'échauffement est très variable en fonction de la nature du sédiment dans lequel le câble est ensouillé (Emeana et al., 2016 ; Müller et al., 2016). A partir d'une structure expérimentale théorique, Emeana et al. (2016) ont modélisé le régime de transfert de la chaleur à l'équilibre et la distribution radiale normalisée des températures autour d'une source de chaleur de type câble électrique. Les résultats obtenus indiquent en particulier une modification du régime de transfert de chaleur à l'équilibre, lequel passe de la conduction à la convection en fonction de la perméabilité du sédiment – donc de la granulométrie – et du différentiel de température imposé par la source de chaleur (**Figure 6**).

Les risques associés au phénomène d'un transfert de chaleur par convection pour le milieu marin sont identifiés par Emeana et al. (2016) comme « *la réduction de la tension de cisaillement de surface (et la fluidisation), une augmentation de la capacité d'érosion et d'affouillement des fonds* ». Les auteurs soulignent que ces phénomènes augmentent les risques de désensouillage des câbles. D'autres effets possibles sont évoqués sur les cycles biochimiques, en particulier sur la dégradation de la matière organique solide, la recristallisation et la déshydratation des minéraux argileux, la mobilisation d'éléments métalliques potentiellement toxiques et la précipitation du carbonate de calcium (Emeana et al., 2016). Dans le cas d'un câble ensouillé à 1 m de profondeur, le régime de convection de la chaleur modélisé à partir des résultats de l'expérimentation indique une augmentation de la température comprise entre 5 et 14°C dans les 20 premiers centimètres du sédiment, où l'on retrouve la majeure partie des invertébrés benthiques.

Les travaux d'Emeana et al. (2016), basés sur expérimentation en laboratoire, remettent en cause les résultats de modèles antérieurs qui stipulaient que la température du sédiment n'augmentait pas de plus de 2°C à 20 cm sous la surface du fond marin pour un câble ensouillé à 1 m de profondeur (Meißner & Sordyl, 2006). Cependant, cette expérimentation ne prend pas en compte le renouvellement constant de la masse d'eau à la surface du sédiment.

Néanmoins, les travaux de Müller et al. (2016) indiquent que, en mer Baltique et en mer du Nord, les variations saisonnières de température de l'eau de mer influent d'avantage sur la température du sédiment (avec une amplitude de 16°C à l'échelle d'une année) qu'un câble en fonctionnement. On notera la faible profondeur des zones étudiées dont le régime thermique est très différent de celui des océans ouverts. La nature du sédiment reste déterminante pour les niveaux d'échauffement observés, qui n'excèdent pas 2°C à 20 cm sous la surface du sédiment d'après les modèles testés, et ce, quelle que soit la diffusivité thermique considérée. Ils n'observent pas de phénomène de convection dans ces conditions.

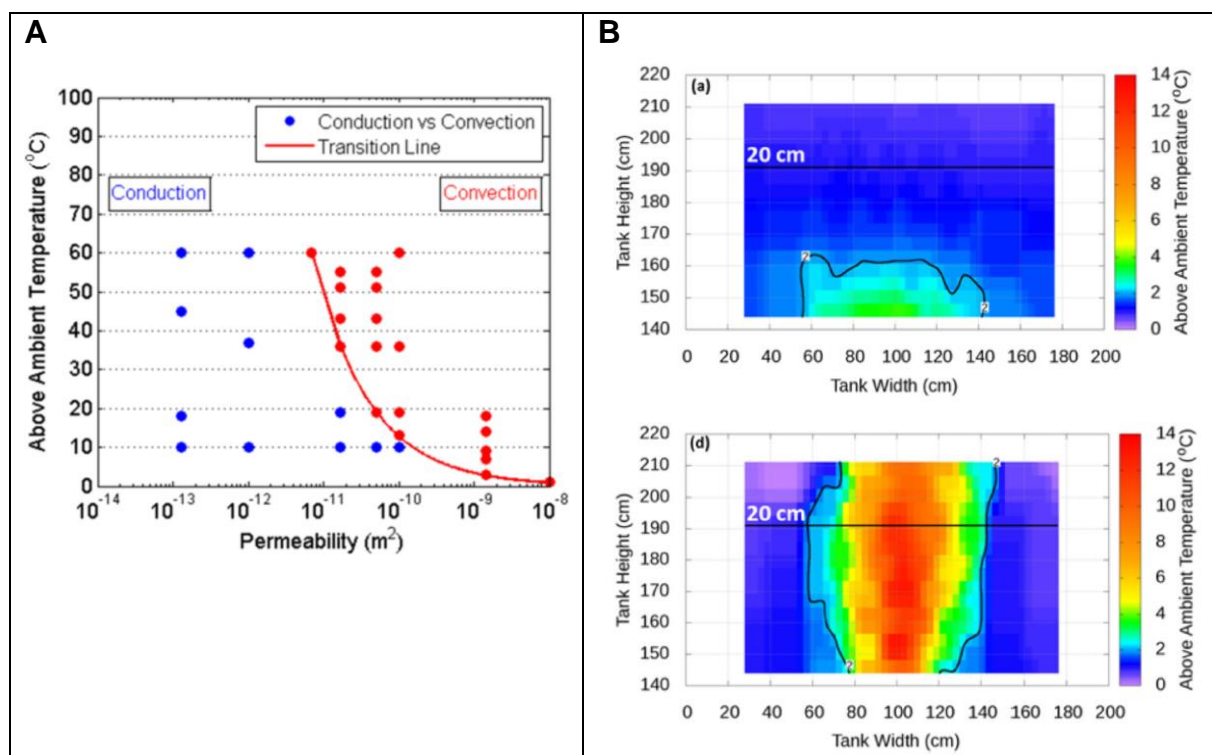


Figure 6. A : Evolution du régime de transfert de la chaleur en état stable en fonction de la perméabilité du sédiment et du différentiel de température imposé par une source de chaleur à sa surface. B : Echauffement du sédiment mesuré au-dessus d'un câble (non visible, situé à la hauteur 110 cm) pour un différentiel de température à la surface du câble de 18°C par rapport au milieu ambiant, avec un sédiment peu perméable (en haut) et perméable (en bas) (reproduit de Emeana et al., 2016).

Des modèles d'échauffement du sédiment au-dessus de câbles installés en mer Baltique et en mer du Nord, prenant en compte la variation annuelle de la température de la masse d'eau, montrent que la limite des 2°C n'est pas dépassée, quelles que soient les propriétés physiques du sédiment (Müller et al., 2016). Des mesures réalisées autour de deux câbles CA (33 et 132 kV) du parc éolien en mer de Nysted ont montré une élévation de température maximum de 2.5°C à 50 cm sous la surface du sédiment et à 50 cm des câbles (Meißner & Sordyl, 2006). Dans ce cas, les fonds étaient constitués de sables moyens favorisant la dispersion de chaleur.

Ces recherches montrent que les changements de température induits par les câbles électriques en fonctionnement nécessitent d'être mieux caractérisés par des

mesures *in situ*. De même, la caractérisation des effets associés doit être améliorée pour prévenir les risques physiques et biochimiques évoqués en cas de mise en place d'un régime de convection dû à l'échauffement.

5.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

Les changements de température peuvent potentiellement avoir des implications fortes dans la physiologie, la reproduction, la survie et la distribution spatiale des invertébrés benthiques endogés, qui vivent généralement dans les 20 premiers centimètres des sédiments marins (Acuna et al., 2008). En théorie, des changements de communautés peuvent être attendus du fait de l'évitement des espèces les moins tolérantes et de la plus forte fréquentation des espèces les plus tolérantes, mais sur des distances maximums de quelques dizaines de centimètres par rapport au câble.

Une des rares études expérimentales a été menée sur deux espèces d'invertébrés benthiques marins soumis à des variations de température plus fortes que celles induites par les câbles (jusqu'à +20°C par rapport à une température ambiante de 23°C). Lors de cette expérience, le ver *Marenzelleria viridis*, vivant dans un tube jusqu'à 30 cm de profondeur, évite la zone où l'échauffement dépasse 10°C. En revanche, le crustacé *Corophium volutator*, qui vit dans un tube ne dépassant pas 3 cm de profondeur, n'est pas affecté (OSPAR, 2008).

Par ailleurs, de nombreuses études portent sur l'influence d'un changement global de température (Mat et al., 2017, et références citées) mais leurs conclusions sont difficilement transposables à l'effet local des câbles électriques sous-marins. Néanmoins, quelques études *in situ* ont été menées sur les changements potentiels de la communauté benthique ou des processus microbiologiques (activité bactérienne) en réponse à une augmentation locale de la température du substrat. En particulier, une expérimentation *in situ* consistant à chauffer des supports artificiels (+2°C) a permis de mettre en évidence des changements de composition faunistique et de biomasse, ainsi qu'une représentation accrue d'espèces invasives et potentiellement nuisibles (Smale & Wernberg, 2012).

5.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

Les conséquences écologiques d'une augmentation globale de la température des océans ont été relativement bien étudiées et restent un sujet de recherche porteur. Il a été montré que l'élévation globale de la température impacte la croissance et la fécondité de plusieurs espèces (Pörtner et al., 2001; Wood & McDonald, 1997), ainsi que les performances de nage et la consommation d'oxygène (Lee et al., 2003). Cet impact peut être positif ou négatif selon le niveau trophique de l'espèce considérée et la localisation de la population étudiée au sein de l'aire de répartition de l'espèce. En revanche, il est plus complexe de trouver des études traitant des conséquences d'une augmentation localisée de la température.

Les poissons ayant la possibilité de se déplacer rapidement, on peut supposer que l'impact qu'ils subissent est négligeable, du moins au stade adulte. Il est cependant probable que l'impact d'une élévation de température localisée soit plus marqué pour les œufs enfouis dans le substrat et pour les espèces inféodées au fond. L'augmentation de température peut diminuer la durée d'incubation des œufs. L'impact peut être négatif si l'éclosion anticipée arrive à un moment où les conditions

sont défavorables à la survie des larves (bas niveau de nutriments, conditions hydrodynamiques inadéquates...) (Wood & McDonald, 1997).

Une étude de Worden et al. (2006) démontre que plusieurs paramètres liés à la performance cardiaque du homard *Homarus americanus* sont dépendants de la température. Cependant, la performance cardiaque reste relativement constante pour les différentes gammes de températures testées (2 à 22 °C) grâce à la compensation des réponses des différents paramètres.

Résumé

La modification de la température ne concerne que la phase d'exploitation des câbles électriques ensouillés. Le passage du courant électrique dans le câble induit localement une élévation de la température du sédiment dont l'amplitude varie selon la nature du fond et la puissance du câble. Dans le cas des câbles posés, l'échauffement est immédiatement dissipé par la masse d'eau. Dans le cas des câbles ensouillés, les sédiments les plus perméables (granulométrie élevée) sont les plus susceptibles de propager l'augmentation de température au-dessus du câble. De récentes expérimentations en laboratoire, reproduisant des conditions de raccordement électrique réalistes, révèlent que l'augmentation de température peut atteindre 14°C à 80 cm d'un câble ensouillé à 1 mètre dans un sédiment très perméable, mais sans prise en compte de la dissipation par la masse d'eau. Les études intégrant l'influence de la masse d'eau concluent que l'échauffement ne dépasse pas 2°C à la même distance du câble.

L'impact de la modification de la température est jugé globalement **négligeable** pour tous les compartiments considérés, principalement en raison du caractère très localisé dans l'espace (< 1 m du câble) de cet effet. Concernant les ressources halieutiques, un impact peut être attendu sur le développement des œufs et certaines espèces peu mobiles inféodées au fond (crustacés et poissons plats) qui seraient présents à proximité du câble. Du fait du faible nombre d'analyse des effets *in situ*, l'incertitude scientifique sur le niveau d'impact est jugée moyenne pour les câbles ensouillés.

6. La chimie de l'eau et des sédiments

La synthèse bibliographique de 2011 n'était pas en mesure d'évaluer rigoureusement l'impact écologique d'une potentielle pollution chimique liée aux câbles électriques sous-marins, fautes de résultats disponibles, mais jugeait cet impact globalement faible (Carlier & Delpech, 2011).

6.1. Effets attendus

Les risques potentiels de pollution liés aux câbles renvoient à des échelles d'intensité et de temps différentes, selon qu'ils interviennent durant la phase de travaux ou d'exploitation :

- Pendant la phase de travaux (préparation de la route du câble ; ensouillage ; démantèlement), il peut se produire une remise en suspension de particules toxiques déjà présentes dans le sédiment, qui peuvent être métalliques (nickel, arsenic, chrome, cuivre...) ou organiques (HAP, PCB...). Les plus fortes concentrations de polluants se trouvent généralement près des côtes (en particulier les estuaires, les zones portuaires et industrielles) et/ou dans les secteurs à faible hydrodynamisme. La remise en suspension de ces sédiments contaminés peut occasionner une exposition de forte intensité ; la durée de l'exposition est fonction de la vitesse de redéposition et de l'accessibilité des polluants remobilisés pour les organismes. Plus au large, le risque est plus faible mais certaines zones peuvent être très contaminées (anciennes zones de clapage⁹) et doivent par conséquent être évitées. Le choix de la route du câble est déterminant pour minimiser ce risque de remise en suspension des particules toxiques.
- Dans le cas des forages dirigés horizontaux (HDD) réalisés pour l'atterrissage des câbles, les boues de forage, constituées principalement de bentonite (argile) et d'eau, peuvent potentiellement être une source de contamination, en fonction des additifs qu'elles contiennent et du traitement qu'elles subissent à l'issue des travaux.
- Un effet pouvant intervenir lors de la phase d'exploitation des câbles CC monopolaires utilisant un système d'électrodes en mer pour le courant de retour est la diffusion de produits d'électrolyse toxiques dans le milieu (Sutton et al., 2017). Une douzaine de câble HVDC de ce type sont actuellement en service dans le monde. Des chlorines et de l'oxygène sont produits au niveau de l'anode conduisant à la formation d'hypochlorite, et de l'hydrogène et des hydroxydes de calcium et de magnésium sont libérés au niveau de la cathode (Tricas et al., 2011). Ce type de technologie n'est plus d'actualité pour les projets de câbles actuels.
- La détérioration des câbles en phase d'exploitation peut entraîner la libération de fluides et de contaminants. Pour les câbles remplis d'huile, les fluides d'alkylbenzène linéaire (LAB) ont été utilisés jusque dans les années 90 comme agent d'isolation. Le taux de biodégradation est fonction

⁹ Le clapage ne serait désormais plus autorisé si le sédiment dragué est contaminé

des conditions de température, d'hydrodynamisme et des types de microorganismes présents dans la zone. Dans l'eau de mer et en conditions aérobies, le LAB subit une biodégradation rapide (80 à 99% en 21 jours) avec une minéralisation complète par les microorganismes (en produisant du dioxyde de carbone et de l'eau). Dans des conditions anaérobiques (sédiments marins), le LAB se biodégrade lentement car il a une forte affinité avec les sédiments et la matière organique. Il est connu pour persister dans les sédiments aquatiques entre 10 et 20 ans (Meißner et al., 2006). Pour les câbles plus récents, des métaux contenus dans le câble (matériaux conducteurs et de protection) peuvent se dissoudre sur le long terme.

D'autre part, on peut évoquer les effets potentiels indirects induits par les activités maritimes associées à la mise en place des câbles lors de la phase de travaux :

- Pollution accidentelle en cas de fuites d'hydrocarbure ou de fluide hydraulique provenant des navires lors des opérations de pose ou de maintenance (effet potentiellement étendu mais dont la probabilité est extrêmement faible).
- Apport de substances toxiques dans l'environnement contenues dans les produits antifouling des coques des bateaux (effet local et ponctuel). Parmi les composés chimiques qui inhibent le développement des organismes marins, le tributylétain (TBT) est interdit dans les peintures antifouling depuis 1987, à cause de sa forte toxicité à faible concentration. Des biocides alternatifs censés être moins nocifs pour l'environnement ont été développés, utilisant principalement des composés de cuivre (Cao et al., 2011).

6.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

Très peu d'information a été trouvée sur l'impact potentiel d'une pollution chimique liée (directement ou indirectement) aux câbles électriques sous-marins par rapport à ce qui était rapporté dans la synthèse bibliographique de 2011. En dépit du peu de connaissances existantes sur cette problématique, l'impact sur le benthos peut être globalement qualifié de négligeable pour les câbles posés à faible pour les câbles ensouillés (Taormina et al., 2018). Le risque principal provient du fait que des contaminants qui seraient déjà présents dans les sédiments pourraient être relargués pendant la phase de travaux (installation et démantèlement) du câble. Ces contaminants remobilisés au-dessus de l'interface eau-sédiment pourraient impacter les espèces benthiques sessiles ou peu mobiles dans l'environnement proche de la zone de travaux, c'est-à-dire sur des surfaces équivalentes ou inférieures à celles concernées par l'augmentation de turbidité (voir partie 2.3.1), et ce, en fonction du niveau de sensibilité des espèces présentes. Cependant, comme l'étude d'impact réglementaire prévoit qu'une analyse de la toxicité des sédiments doit obligatoirement être réalisée avant toute installation sur une zone potentiellement contaminée (Merck & Wasserthal, 2009), ce risque peut être considérablement réduit en déplaçant le tracé vers une zone moins contaminée.

L'impact sur le benthos des électrodes en mer utilisées pour certains câbles HVDC (*i.e.* câbles monopolaires, très peu développés à l'échelle mondiale du fait des contraintes d'entretien des électrodes) est jugé négligeable dans une revue des

études d'impact réglementaires associées à divers projets européens et américains (Sutton et al., 2017).

Un autre risque pour le compartiment benthique est l'impact indirect (au sens où il n'est pas directement lié au câble) d'une pollution aux hydrocarbures causée par un navire d'intervention pendant les phases de travaux et de maintenance. Si les impacts des hydrocarbures sur les organismes benthiques sont avérés et bien documentés, ce type d'impact est jugé négligeable dans le contexte des projets d'installation des câbles sous-marins, compte tenu de la faible probabilité de ces pollutions accidentelles.

6.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

La remise en suspension de particules toxiques peut aussi avoir des conséquences létales sur les œufs et larves de poissons. Dans les cas où des zones contaminées ne pourraient pas être évitées, l'impact potentiel sur les poissons dépendra des conditions hydrodynamiques du milieu.

Dans le cas des câbles monopolaires, aucune étude, à ce jour, ne permet de conclure à un impact du chlore ou du brome diffusé par les électrodes sur les ressources halieutiques (Sutton et al., 2017).

Concernant les risques associés aux navires d'intervention, le TBT a un impact négatif sur la reproduction des poissons (Cao et al., 2011). Les biocides plus récents restent toxiques pour les crustacés et les poissons, en particulier pour les œufs et les larves (Amara et al., 2018; Guardiola et al., 2012; Karlsson & Eklund, 2004; Katranitsas et al., 2003). Cet impact est cependant négligeable dans le contexte de la présence, limitée dans le temps, de plusieurs navires d'intervention pour la phase travaux, et au regard du trafic maritime lié aux autres activités humaines sur la même zone.

Résumé

En phase de travaux, l'impact écologique potentiel des perturbations chimiques est principalement lié au niveau de pollution du sédiment sur la route du câble et à la technique de pose. L'impact sur le benthos et les poissons sédentaires est jugé globalement **faible** dans le cas des câbles ensouillés et **négligeable** pour les câbles posés. Cependant, en cas de remaniement de sédiments très pollués, ce qui peut facilement être évité, l'impact pourrait être moyen à fort sur les espèces sessiles, voire sur les poissons au stade précoce de développement.

En phase d'exploitation, le risque est lié au relargage de composés toxiques pour la flore et la faune marines dans des cas très spécifiques (à proximité d'électrodes de câbles monopolaires ; en cas de fuite d'huile isolant certains types de câbles) et qui renvoient à des techniques d'installation qui semblent désormais obsolètes. Par conséquent, l'impact potentiel sur les différents récepteurs biologiques est jugé globalement **négligeable**. Pour ce type de perturbation, et en dépit du peu d'information disponible, le niveau d'incertitude scientifique est qualifié de faible.

7. L'acoustique

Au moment de la rédaction du rapport de 2011, très peu de travaux traitaient du bruit anthropique lié aux projets de raccordement électrique sous-marins et il apparaissait nécessaire de mieux caractériser la signature sonore des principales méthodes d'ensouillage en fonction du substrat. Pour évaluer le risque écologique, un besoin était aussi d'identifier les seuils de sensibilité des principales espèces (mammifères et poissons) pouvant être perturbées par le bruit anthropique généré par l'installation des câbles.

Pour les organismes marins, les risques potentiels liés aux nuisances sonores regroupent la perte temporaire ou permanente d'audition, l'altération des comportements naturels et des déplacements, la perte d'habitat, l'occultation de sons biologiques importants (phénomène de masquage) et l'augmentation de la vulnérabilité à la prédation (Bonar et al., 2015).

7.1. Effets attendus

Les modifications du bruit sous-marin et les impacts potentiels à attendre concernent essentiellement la phase de travaux (installation et démantèlement) du câble. Toutefois, pendant la phase d'exploitation, et dans les cas où il n'est pas ensouillé, le câble peut éventuellement produire du bruit s'il vibre ou s'il se déplace à la surface du substrat sous l'action du courant et/ou de la houle (s'il n'est pas suffisamment stabilisé).

Lors de la phase d'installation, les principales sources de bruit sont les navires câbliers, le navire tractant l'outil d'ensouillage (e.g. la charrue), les navires accompagnateurs et l'outil d'ensouillage utilisé pour creuser une tranchée sous-marine qui protégera le câble. Peuvent être également requises i) des activités de forage ou de déblaiement, en cas de présence de dunes ou d'obstacles sur le tracé prévisionnel du câble, ii) des activités de pose de structures de stabilisation et de protection (enrochements ; matelas de béton). Lors de la pose d'un câble, la fréquence et l'intensité du bruit dépendent de la méthode utilisée (simple pose ; ensouillage par *jetting* ou *trenching* ; forage horizontal dirigé) et de la nature du substrat (Nedwell & Howell, 2004). Du bruit peut également être généré en phase d'exploitation par vibration des câbles sous-marins mais cette question reste extrêmement peu documentée.

Des enregistrements de bruit lors du creusement d'une tranchée sur un fond sablo-graveleux ont révélé des niveaux maximum de 178 dB re 1 μ Pa à 1 m des travaux (Nedwell & Howell, 2004). Des données plus récentes, obtenues pour le creusement d'une tranchée sur un fond plus sableux, montrent des niveaux de bruit plus élevés (188.5 dB re 1 μ Pa) (Bald et al., 2015). Les niveaux de bruit enregistrés pour la pose d'un câble sur le site éolien offshore posé de Béatrice (US) est inférieur aux activités d'installation de fondations d'éoliennes par *pile driving* (Nedwell et al., 2012a). Les vibrations émises par les câbles en CA en phase d'exploitation peuvent induire des niveaux de bruit moins élevés. 100 dB re 1 μ Pa ont par exemple été enregistrés pour un câble canadien de 138 kV (JASCO Research Ltd., 2006). Cet effet est certes moins fort qu'en phase travaux, mais elle est durable. De manière générale, on peut affirmer que le bruit associé aux activités de raccordement électrique sous-marin est nettement inférieur au bruit généré par les activités de dragage, de détection sismique (230 à 260 dB) ou d'installation de pieux par battage (200 à 280 dB) (**Figure 7**). A titre de comparaison, un navire de 19 m naviguant à 10

nœuds, ou le fonctionnement du prototype d'hydrolienne de Paimpol-Bréhat émettent tous les deux des niveaux de bruit de 118 à 152 dB re 1μPa à 1 m (Lossent et al., 2018).

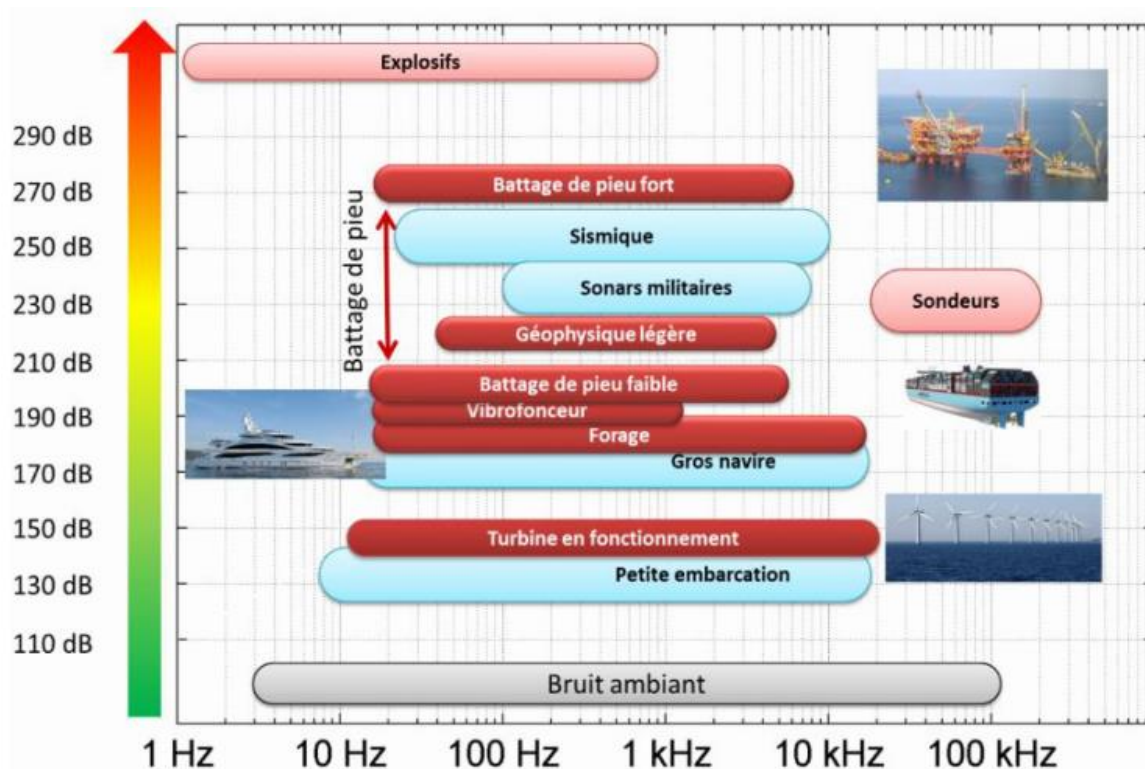


Figure 7. Echelle du bruit anthropique émis par différentes activités en mer (Lossent et al., 2018).

L'impact sur les composantes biologiques est estimé avec la métrique $dB_{ht(Esp\grave{e}ce)}$ qui donne le niveau de bruit perçu par une espèce (Nedwell et al., 2012a). Il représente la différence entre le seuil de sensibilité d'une espèce donnée et le niveau de bruit anthropique émis. Le dB_{ht} associé à une même perturbation sonore est donc fonction des capacités auditives de chaque espèce. Il sera par exemple de 70 dB_{ht} (*Salmo salar*) pour le saumon (*Salmo salar*) et de 110 dB_{ht} (*Tursiops truncatus*) pour le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) dans le cas du battage de pieux. Ces valeurs seuil sont ensuite utilisées pour modéliser des périmètres de sensibilité des espèces et d'impact potentiel autour d'une source de bruit anthropique (Nedwell et al., 2012a).

Le critère « SEL » (*Sound Exposure Level*) est également utilisé pour évaluer l'impact d'une perturbation sonore sur les organismes marins. Il prend en compte la durée et l'intensité de la perturbation sonore. Par ailleurs, le modèle SPEAR (*Simple Propagation Estimator and Ranking*) permet d'estimer l'aire d'impact potentiel dû à un type d'activité (Nedwell et al., 2012a). La **Figure 8** illustre les différences de distance d'impact potentiel en fonction des activités anthropiques en mer et pour deux espèces animales de sensibilité acoustique différente : le grand dauphin et le hareng (*Clupea harengus*). Si le creusement de tranchée n'affecte pas le hareng, la distance d'impact potentiel sur le grand dauphin est estimée à environ 700 m d'après le schéma en échelle logarithmique. Cette valeur est bien inférieure à ce qui est attendu des activités de prospection sismique et de battage de pieux, par ordre d'importance croissant.

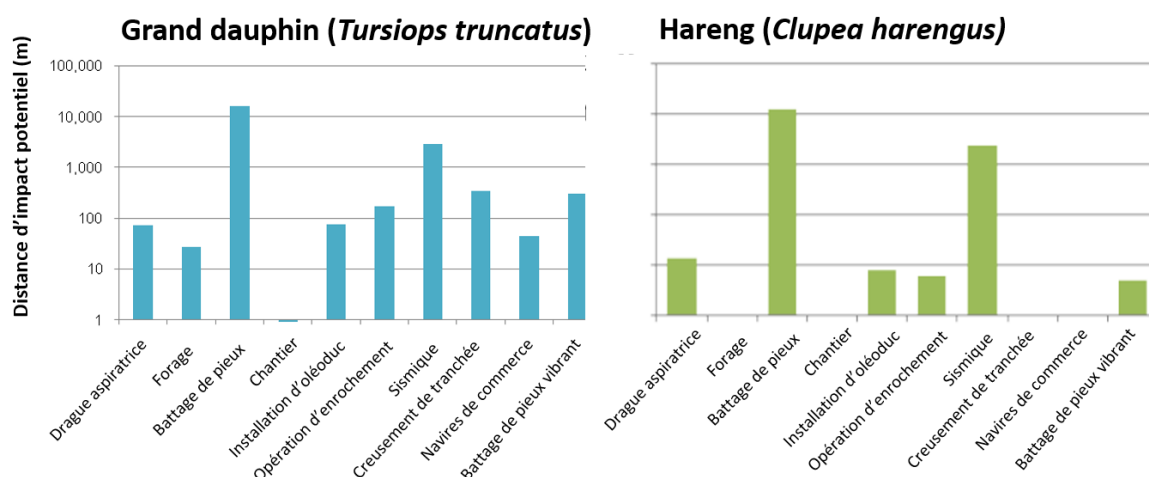


Figure 8. Etendue géographique de l'impact acoustique de différents types d'activités en mer estimée pour le grand dauphin et pour le hareng à l'aide du modèle SPEAR (Nedwell et al., 2012a, b).

Bien qu'ils n'intègrent qu'un nombre réduit de données environnementales, les modèles existants de propagation du bruit sous-marin sont aboutis et peuvent prendre en compte les spécificités de topographie, de profondeur et de niveau sonore (Jensen et al., 2011). Dans le cadre des études d'impact cependant, Farcas et al. (2016) déplorent que les modèles mis en œuvre soient trop simples et rarement validés par des observations de terrain, engendrant une importante variabilité dans les prédictions d'exposition sonore et limitant la capacité d'évaluation des dits impacts (Farcas et al., 2016, et références associées). Les modèles physiques ou numériques existants ont été développés pour évaluer les niveaux sonores émis par le battage de pieux (Fricke & Rolfes, 2015; Lippert & von Estorff, 2014) et par les bateaux (Merchant et al., 2014). A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature de modèle spécifique aux opérations d'ensouillage des câbles.

7.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

Sans même parler du bruit associé aux projets de câbles électriques sous-marins, l'étude de l'impact du bruit anthropique sur les invertébrés marins est un domaine de recherche très récent pour lequel les données sont très parcellaires. En fonction des espèces étudiées (le plus souvent en laboratoire) et des niveaux de bruit testés, les réponses des organismes vont d'une absence de réaction à la mortalité (Voir la revue de Aguilar de Soto, 2016 pour plus de détails).

On peut ensuite établir la correspondance entre les fréquences et intensités prévues et la sensibilité des espèces présentes sur le site.

Même s'il est maintenant admis que de très nombreuses espèces (y compris des invertébrés benthiques) sont capables de détecter et d'émettre des sons, aucune donnée ne permet d'établir si les câbles peuvent avoir un impact sur le benthos, que ce soit en phases de travaux ou d'exploitation.

7.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

7.3.3. Considérations générales

La connaissance de la sensibilité acoustique de l'espèce est primordiale pour évaluer les impacts possibles d'une exposition au bruit chez les poissons. On distingue pour cela les espèces sans vessie natatoire, les espèces munies d'une vessie natatoire mais n'intervenant pas dans la perception auditive, et les espèces munies d'une vessie natatoire intervenant dans la perception auditive. Enfin, les stades de vie entrent en jeu dans la sensibilité des individus (phase embryonnaire, larvaire, juvénile, adulte) (Popper et al., 2014, et références associées).

En fonction de ces spécificités physiologiques, l'impact peut se caractériser par des lésions physiques au niveau du système auditif et/ou des organes internes. Les autres manifestations des impacts associés aux nuisances sonores incluent l'augmentation du niveau de stress, la perte du sommeil, des changements hormonaux, des changements comportementaux et/ou physiologiques, des perturbations de capacité de communication entre individus, des dommages physiques causés aux tissus non impliqués dans le processus auditif, la mort dans les cas les plus extrêmes (Dooling et al., 2015). En fonction du niveau d'exposition, ces impacts sont temporaires ou permanents, et peuvent se cumuler (**Figure 9**). L'exposition au bruit anthropique peut donc impacter la condition des individus, leur capacité de reproduction et leur probabilité de survie.

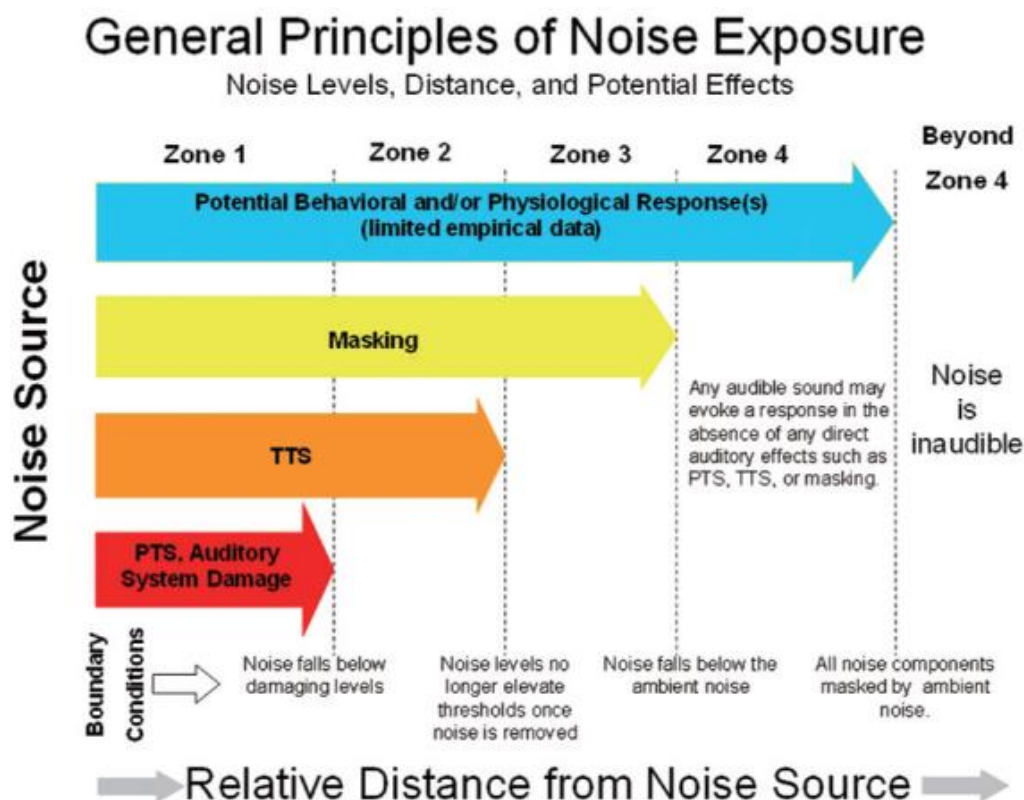


Figure 9. Représentation des impacts théoriques possibles sur les organismes vivants mobiles, tels que les poissons, d'une exposition au bruit anthropique en fonction du niveau sonore et de la distance à la source de ce bruit (PTS : *permanent threshold shift*, TTS : *temporary threshold shift*) (reproduit de Dooling et al., 2015).

7.3.4. Les expériences en milieu contrôlé

La sensibilité acoustique du bar est comprise entre 100 et 1000 Hz (Lovell, 2003, dans Spiga et al., 2017). La proximité de ce spectre avec celui caractérisant les activités anthropiques en mer en fait un bon sujet d'étude. Les bars (*Dicentrarchus labrax*) exposés à un bruit de forage ont une augmentation significative du taux moyen de ventilation, utilisé comme proxy du niveau de stress et estimé par comptage des battements d'opercule (Spiga et al., 2017). La réponse comportementale des juvéniles indique une réduction de la perception des prédateurs avec l'augmentation du niveau sonore (battage de pieux), alors que leur vigilance est augmentée par le stress. Un niveau sonore moindre (forage) permet de conserver les capacités de perception des prédateurs (Spiga et al., 2017). Cet exemple illustre la diversité du spectre de réponses possibles et les interactions entre stress et comportement.

En mer Adriatique, le corb (*Sciaena umbra*), la castagnole (*Chromis chromis*) et le gobie ensanglanté (*Gobius cruentatus*) utilisent des signaux sonores spécifiques pour la reproduction et la reconnaissance (de 100 à 1000 Hz) ; la fréquence de ces signaux est similaire à celles des navires de commerce et de tourisme, très nombreux dans la zone (Sebastianutto et al., 2008, dans Codarin et al., 2009). Codarin et al. (2009) démontrent une réduction significative de la distance à laquelle les communications entre individus d'une même espèce sont perceptibles en cas de bruit anthropique, passant de plusieurs centaines de mètre, à 1 mètre. Une étude complémentaire identifie une modification des comportements associés au succès reproducteur (augmentation du temps passé à la protection du nid) au détriment d'autres fonctions, pouvant *in fine* impacter la condition des individus (Picciulin et al., 2010).

Les réponses comportementales des poissons et leur vitesse de récupération pourraient dépendre de la structure temporelle de l'exposition au bruit. Neo et al. (2014) ont mené une expérience sur des bars en bassin extérieur exposés à quatre modalités de bruit différentes : continu ou intermittent, et d'intensité constante ou variable. Pour tous les types de bruit, les réponses comportementales étaient similaires, avec une augmentation de la vitesse de nage, un renforcement de la cohésion de groupe et une nage davantage localisée au fond du bassin. Cependant, les individus exposés à un bruit intermittent mettaient significativement plus de temps à revenir au comportement exprimé avant l'exposition au bruit. Ces résultats suggèrent que les sons intermittents pourraient avoir un impact plus important que les sons continus.

Wale et al. (2013) ont mené des expériences en bassin contrôlé sur le crabe vert *Carcinus maenas* afin d'évaluer l'impact du bruit de bateau sur les comportements de recherche de nourriture et d'échappement aux prédateurs. Aucun impact n'a été détecté sur la capacité à trouver une source de nourriture, sur la vitesse à laquelle elle était trouvée, ou sur la capacité à détecter et répondre à une attaque simulée de prédateur. En revanche, les crabes exposés au bruit de bateau étaient perturbés pendant qu'ils mangeaient et étaient plus lents à se retirer dans l'abri en cas d'attaque simulée. Cette étude suggère que le bruit d'origine anthropique pourrait augmenter les risques de malnutrition et de prédation.

L'ensemble des résultats d'expériences en milieu contrôlé est à relativiser pour des poissons en conditions réelles qui ont la possibilité de s'éloigner de la source du bruit. Les espèces inféodées au fond et/ou territoriales seront cependant moins susceptibles de se déplacer sur de grandes distances et pourraient subir le bruit

causé par les travaux. D'autre part, les conditions expérimentales auxquelles les animaux sont exposés peuvent poser des problèmes d'interprétation et d'extrapolation. Les études menées en milieu contrôlé peuvent induire un biais de comportement et l'utilisation de bassins peut modifier le champ acoustique perçu par les poissons par rapport à un environnement naturel (Carroll et al., 2016). Il est donc important de comparer les résultats avec les conclusions d'études de terrain.

7.3.5. Les expériences de terrain

Mueller-Blenkle et al. (2010) étudient la réponse comportementale des morues et des soles face aux bruits de forage et de battage de pieux. L'impact du battage de pieux sort du cadre de cette étude, cependant l'activité de forage est à envisager lors de la pose d'un câble. Dans cette étude, des morues et des soles sont maintenues dans deux enclos de 40 m délimités par des filets. Leurs mouvements sont analysés à l'aide d'un système de suivi acoustique. Durant les expériences, le niveau de pression du son et le déplacement des particules sont mesurés. Pour les deux espèces, une réponse significative est observée pour des niveaux de pression de son relativement bas (144-156 dB pour la sole, 140-161 dB pour la morue) : la sole nage plus rapidement au cours de la période de bruit tandis que la morue s'immobilise lors de la mise en route et de l'arrêt du bruit. Les deux espèces effectuent des mouvements directionnels pour s'éloigner de la source du bruit. Les résultats montrent une grande variabilité de réponses comportementales selon les individus et une diminution de la réponse en cas d'expositions répétées.

A l'échelle d'une population, les nuisances sonores peuvent induire des impacts négatifs potentiels résultant d'un enchaînement de conséquences au niveau individuel. Dans le cas où l'exposition au bruit perturberait les routes de migration ou le succès de reproduction, le recrutement pourrait être affecté, induisant un impact négatif sur la population (Popper et al., 2014). Costa (2012) propose de mener une évaluation quantitative des impacts induits par les nuisances sonores en modélisant les modifications d'allocation énergétique entre les différents processus vitaux (e.g. croissance, reproduction, prédation). Il est aussi possible d'estimer quantitativement les gammes de perturbations que les animaux peuvent tolérer et d'établir le lien avec les processus populationnels (Costa, 2012) ; cette notion d'interaction entre paramètres environnementaux sera traitée à la section 9 de ce rapport, en lien avec les impacts cumulés.

Résumé

On dispose de peu de données permettant de caractériser le bruit émis par les différentes activités de la phase travaux (ensouillage, forage, mise en place de protections).

L'impact écologique sur le benthos est jugé **faible**. Cependant, comme les études sur l'impact du bruit anthropique sur les invertébrés benthiques sont très récentes, rares et ne concernent pas les projets de câbles sous-marins, le degré d'incertitude scientifique est jugé moyen.

Les études portant sur l'impact des nuisances sonores sur les ressources halieutiques sont principalement menées en milieu contrôlé. Le comportement anti-prédation, le niveau de stress et la capacité à se nourrir peuvent être affectés par la présence d'un environnement sonore inhabituel. Cependant pour les espèces mobiles, il est probable qu'un simple comportement de fuite soit adopté et que les conséquences soient donc minimales. L'impact sur les poissons (y compris les poissons migrateurs et les élasmobranches) est jugé **faible**, avec un faible niveau d'incertitude scientifique. En revanche, l'impact sur certaines espèces sessiles pourrait être plus important, mais les données scientifiques sont quasi-inexistantes.

8. Les champs électromagnétiques

Le rapport de 2011 établissait que, sur la base des connaissances disponibles à l'époque, l'impact écologique lié à l'émission de champs électromagnétiques (CEM) par les câbles électriques sous-marins pouvait être considéré comme faible mais était associé à un manque de recul scientifique certain. Compte tenu du fait que de nombreux groupes d'organismes marins sont sensibles aux variations de champs électriques et/ou magnétiques et que le nombre et la puissance des câbles électriques sous-marins étaient amenés à augmenter, le rapport insistait sur le besoin de recherches scientifiques sur cette problématique (Carlier & Delpech, 2011).

8.1. Caractérisation des champs électromagnétiques et effets attendus

8.1.1. Rappels théoriques

Le terme « Champ ElectroMagnétique » (CEM) est général et inclut le champ électrique (CE), mesuré en volts par mètre (V/m), et le champ magnétique (CM), mesuré en teslas (T). Il importe donc de distinguer les champs électriques des champs magnétiques qui, dans les cas qui nous intéressent, sont indépendants les uns des autres (à quelques exceptions près).

En premier lieu, plusieurs propriétés importantes des CEM doivent être rappelées ici :

- Les champs auxquels on s'intéresse ici sont statiques, caractérisés par des basses fréquences (50-60 Hz), et ne constituent pas des ondes électromagnétiques telles que celles générées par les téléphones mobiles ou les antennes, et plus généralement tous les équipements de communication utilisant les ondes radio ou radar. Les CEM associés aux câbles électriques sous-marins sont peu énergétiques, excluant tout effet ionisant ou « *cell disruptive* » (Worzyk, 2009).
- A un point donné à proximité d'un câble en fonctionnement, l'intensité du CM est directement proportionnelle à l'intensité du courant électrique (exprimée en ampères ; A).
- L'intensité de ces champs décroît en fonction de la distance au câble :
 - Pour un câble monopolaire, le champ magnétique décroît en $1/d$, d étant la distance calculée depuis le centre de la conduction.
 - Dans le cas d'un bicâble en courant continu (CC) non jointif, le CM diminue en $1/d$.
 - Dans le cas d'un tricâble en courant alternatif (CA), ou d'un bicâble (CC) jointif (deux câbles en opposition de phase), les champs générés par chacun des câbles se compensent mutuellement et le champ diminue alors en $1/d^2$.
- Le CE augmente avec le voltage du câble, mais en fonctionnement normal, un câble ne génère pas directement de champ électrique car celui-ci est confiné à l'intérieur du câble grâce à une armure métallique isolante (**Figure 10**).
- En revanche, de faibles CE peuvent être indirectement induits par un câble en fonctionnement lorsqu'un courant marin ou un organisme mobile circule au sein du CM émis par ce câble (**Figure 10**). Ce phénomène d'induction s'observe par exemple quand les mouvements de la mer dans le champ

magnétique terrestre génèrent un champ électrique statique, dont l'intensité varie localement (courants) et dans le temps (marées). Le CM terrestre étant d'environ $50 \mu\text{T}$ sous les latitudes métropolitaines, des courants marins de 1 à 5 m/s génèrent un CE induit de 50 à $250 \mu\text{V/m}$ (RTE). Un poisson en mouvement représente également un ensemble de charges électriques en mouvement, donc son déplacement dans un CM va induire un CE interne, proportionnel à la vitesse du poisson et dépendant de ses caractéristiques morphologiques (résistance interne et résistance de la peau). Toujours au sein du CM terrestre ($50 \mu\text{T}$), un poisson nageant à 1 m/s génère un CE induit de l'ordre de $40 \mu\text{V/m}$ (RTE).

- Une tension et un courant alternatifs sinusoïdaux parcourent les câbles CA à une fréquence donnée (50 ou 60 Hz). Les champs électriques et magnétiques varient donc aussi dans le temps à la même fréquence. Le courant alternatif génère un CM alternatif qui crée un CE induit de quelque $\mu\text{V/m}$ à l'extérieur du câble.

On peut poser raisonnablement l'hypothèse que les espèces marines potentiellement impactées par les CEM sont principalement les espèces benthiques et benthodémersales du fait de leur proximité avec le fond marin durant la majeure partie de leur cycle de vie, ainsi que les espèces électro- et magnéto-sensibles.

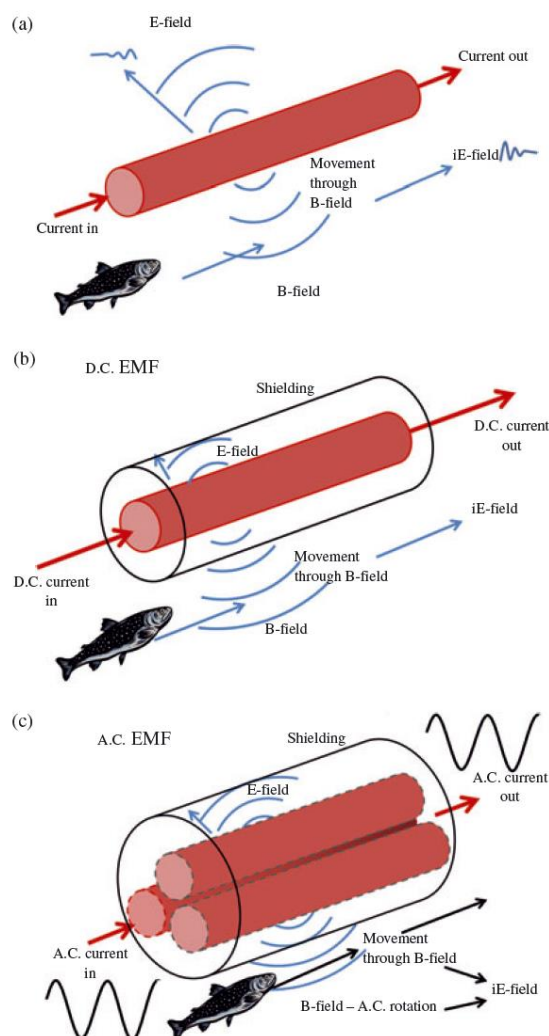


Figure 10. Champs électriques et magnétiques associés à différentes configurations de câbles électriques sous-marins (modifié d'après Gill et al., 2012)

Le champ magnétique induit par un courant alternatif triphasé a une polarité cyclique qui diffère des champs géomagnétiques naturels. En revanche, les champs électriques et magnétiques produits par un câble de courant continu sont statiques. Puisque les champs magnétiques induits par des câbles CC et CA sont différents, ils sont potentiellement perçus différemment par les organismes aquatiques. Ni les sédiments ni l'eau salée n'ont de propriétés magnétiques significatives. Par conséquent, le fait d'enterrer un câble n'affecte pas le champ magnétique. Cependant, enterrer le câble présente l'avantage d'éviter aux organismes marins d'entrer en contact avec la surface du câble, où l'intensité du CM est la plus forte (Cada et al., 2011).

Le champ magnétique généré par un câble électrique en fonctionnement (HVDC) et les anomalies de champ associées (par comparaison avec le champ magnétique naturel ambiant) peuvent être facilement modélisés (Kavet et al., 2016). Les valeurs de champs magnétiques issues de la modélisation sont très étroitement corrélées avec les valeurs mesurées sur le terrain avec un magnétomètre (corrélation de Pearson de 0,999) (**Figure 11** ; Hutchison et al., 2018). La présence de structures artificielles (e.g. piles de pont métalliques) à proximité des câbles électriques sous-marins peut perturber le champ magnétique ambiant et générer un biais important entre les valeurs modélisées pour un câble et les valeurs mesurées *in situ* (Kavet et al., 2016).

Une étude de terrain destinée à mesurer le champ magnétique émis par un câble HVDC à l'aide d'un dispositif SEMLA (*Swedish ElectroMagnetic Low-noise Apparatus*) a mis en évidence la présence d'un champ magnétique de courant alternatif qui n'était pas attendu par les résultats de modélisation (Hutchison et al., 2018). Les auteurs soulignent que les CEM mesurés ne sont pas constants, des variations spatiales et temporelles sont à prendre en compte lors de l'étude des impacts sur les organismes marins. Un résultat similaire a pu être obtenu sur la liaison IFA 2000, cette manifestation est associée à un reliquat de la conversion du CA en CC (RTE, comm. pers.).

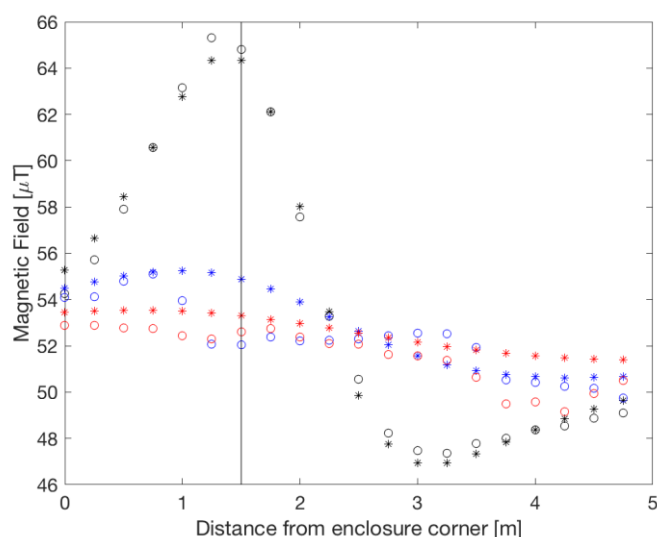


Figure 11. Comparaison des valeurs de champ magnétique (CC) mesurées (symbolisées par des étoiles) et modélisées (symbolisées par des cercles) à l'intérieur d'un enclos de traitement positionné au-dessus d'un câble CC bipolaire (symbolisé par la ligne verticale noire) transportant un courant électrique de 1175 A (Hutchison et al., 2018). Les couleurs noire, bleue et rouge représentent respectivement le fond, 1,25 m et 2,5 m au-dessus du fond.

8.1.2. Dimensionnement et configuration des câbles

Le choix du système de transport du courant électrique est déterminé par la capacité et la longueur de la ligne de transmission. Pour la transmission d'électricité sur de courtes distances, les câbles triphasés CA sont les plus communs. Ainsi, la transmission CA est souvent utilisée pour alimenter les plateformes offshore et pour raccorder les champs éoliens offshore. Les lignes de haute tension de courant continu (HVDC) sont en revanche privilégiées pour le transport sur de plus longues distances (> 50 km). Parmi les câbles HVDC, on distingue les configurations monopolaire et bipolaire. Le système monopolaire est caractérisé par un courant de retour porté par l'eau de mer ou par un conducteur de retour séparé. Sans conducteur de retour, le courant passe dans l'eau de mer via des électrodes, en général des anodes en graphite et des cathodes en titane qui sont localisées sur le fond. Il est à noter que ces systèmes monopolaires ne remplissent plus les critères des standards environnementaux de la plupart des pays occidentaux principalement à cause des produits de l'électrolyse mais aussi du fait d'importants champs électromagnétiques (Sutton et al., 2017). Si certains câbles de ce type sont toujours en fonctionnement actuellement, cette technique de raccordement est désormais abandonnée. Le système bipolaire est caractérisé par une paire de conducteurs de polarités opposées. Le système peut être composé de deux câbles distincts placés de sorte que les polarités soient opposées ou d'un unique câble bipolaire à deux conducteurs, moins puissant (du fait de l'échauffement mutuel entre ces deux câbles jointifs) que le système à deux câbles (Meißner et al., 2006).

8.1.3. Effets attendus sur les espèces marines

De nombreuses espèces marines, appartenant à divers phylums (groupes zoologiques) sont capables de détecter les CE et/ou les CM (Kirschvink, 1997). On en trouve parmi les crustacés, les reptiles (tortues de mer), les élaémobranches, les autres poissons et les mammifères marins. L'aptitude à détecter les CE intervient notamment dans la détection de proies et les élaémobranches (requins et raies) sont capables de détecter de très faibles CE jusqu'à 5 à 20 nV/cm (Kalmijn, 1982; Tricas & New, 1997). L'aptitude à détecter les CM est utilisée pour l'orientation dans l'espace (migration ; déplacements vers des zones de reproduction ou de ponte) (Putman et al., 2014). Dans les deux cas, ces fonctions sont d'une importance vitale à l'échelle de l'individu, comme à l'échelle de la population. Les CEM artificiels émis par les câbles électriques sous-marins peuvent potentiellement impacter la capacité de ces espèces à détecter et répondre aux signatures électromagnétiques naturelles (Copping et al., 2016).

Les mécanismes impliqués dans la détection des CM restent à ce jour peu compris par la communauté scientifique. Trois principales hypothèses sont retenues par Nordmann et al. (2017) : un magnétorécepteur à sensibilité mécanique, un mécanisme chimique comparable à la perception de la lumière par les cellules photosensibles, et un système d'induction électromagnétique au sein de structures accessoires qui transformeraient les stimuli magnétiques en information électrique. Les résultats des études menées sur l'impact des CEM émis par les dispositifs à terre sur les organismes terrestres (par exemple le fait que les champs électriques statiques associés aux câbles HVDC soient perçus par les invertébrés et puissent affecter certaines de leurs fonctions physiologiques ; Schmiedchen et al. (2018)) sont difficilement transposables au contexte marin.

8.2. Impacts potentiels sur le compartiment benthique

8.2.1. Les expériences en milieu contrôlé

Des expérimentations ont été menées sur plusieurs modèles biologiques représentant le groupe des invertébrés marins (la crevette grise *Crangon crangon*, le crabe *Rhithropanopeus harrisii*, le crustacé isopode *Saduria entomon* et la moule bleue *Mytilus edulis*). Ces organismes ont été exposés pendant plusieurs semaines à un champ magnétique statique de 3,7 mT, une valeur qui est deux ordres de grandeur au-dessus de l'intensité du CM terrestre (Bochert & Zettler, 2004) et qui est nettement supérieure aux valeurs attendues pour les câbles en fonctionnement (voir Annexe 2). Les résultats n'ont révélé aucune différence (en termes de taux de survie) avec les groupes « témoin ». La moule, maintenue dans les mêmes conditions pendant 3 mois en période de reproduction (printemps) n'a pas montré non plus de différences (du point de vue de l'indice gonadique et de l'indice de condition) avec le groupe témoin.

Sans parler d'impact réel, d'autres études ont démontré une sensibilité aux champs magnétiques artificiels pour *C. crangon*, l'isopode *Idotea baltica* et les espèces de crustacés amphipodes *Talorchestia martensii* et *Talitrus saltator*, mais les auteurs ne précisent pas les intensités de CM testées (Greater Gabbard Offshore Winds, 2005).

Une étude expérimentale menée sur des individus adultes de néréis (*Hediste diversicolor*) et de tellines (*Limecola balthica*) exposés pendant 12 jours à un champ électromagnétique de 1 mT (50 Hz) a montré que les individus présentaient significativement plus d'anomalies dans les cellules du coelome (le « sang » des invertébrés marins) et des branchies par rapport aux individus témoins. Davantage d'anomalies au niveau moléculaire sont également rapportées (Stankevičiūtė et al., 2019). Les taux de mortalité observés à l'issue de l'expérience étaient très faibles (< 1% pour la néréis et < 10% pour la telline) et similaires dans les deux conditions.

Des expériences ont également été menées sur des crabes de Dungeness (*Metacarcinus magister*) exposés durant trois jours à un CM artificiel statique de 3 mT afin d'étudier leur réponse comportementale et l'impact potentiel du CM sur leur capacité à détecter la nourriture (Woodruff et al., 2012). Le taux de mouvement des antennules, utilisé comme indicateur de détection de nourriture, n'est pas significativement différent entre les individus exposés au CM et les individus non exposés. Les auteurs précisent que certaines données ont dû être exclues de l'analyse : le nombre total de mouvement des antennules ne pouvait pas toujours être comptabilisé car les antennules n'étaient parfois pas visibles sur les vidéos. Cette étude analyse également le comportement des crabes en répertoriant trois types d'activité : enterré, actif et immobile. L'exposition à un CM de 1 mT n'induit pas de différence significative sur la proportion de crabes actifs et immobiles. Le temps passé à rester enterré n'est pas non plus affecté. En revanche, sur les deux premiers jours de l'expérience, le nombre de changement d'activité est significativement plus élevé pour les crabes exposés au CM. Cette conclusion n'est plus valable pour le troisième jour, suggérant une perception suivie d'une réponse comportementale initiale puis une possible acclimatation du crabe au CM. Cette expérience a été réitérée en ajoutant un quatrième jour d'exposition au CM (Woodruff et al., 2013). Cette fois, aucune différence significative n'est observée pour le nombre de changement d'activité. L'expérience a également été menée sur le homard américain

(*Homarus americanus*) et aucune différence significative de comportement n'est observée.

8.2.2. Les expériences de terrain

A notre connaissance, les retours d'expériences obtenus sur le terrain et ciblant le compartiment benthique ne concernent jusqu'ici que des espèces animales qui présentent un intérêt commercial. Ces connaissances sont par conséquent détaillées dans la partie suivante 8.3.

Il mérite donc d'être souligné ici que nous n'avons trouvé aucune donnée expérimentale de terrain publiée (dans des journaux à comité de lecture) qui concerne la biodiversité benthique (animale, végétale ou microbienne) que l'on pourrait qualifier d'ordinaire. Cela représente un défaut de connaissance notable.

Il existe toutefois dans la littérature grise des résultats d'étude de terrain qui n'ont pas encore été publiés dans des journaux à comité de lecture. L'une de ces études, réalisée par le bureau d'étude TBM Environnement et l'Ifremer à la demande de RTE, concerne les communautés d'invertébrés benthiques fixées sur les câbles électriques de raccordement non ensouillés (CA ; 90 kV) existant entre le Cotentin et l'île de Jersey (Patry et al., 2018). Cette étude a consisté à comparer la colonisation biologique (diversité des communautés d'organismes benthiques fixés sur les câbles) sur un câble en fonctionnement (Normandie 2 ; N2) et sur un autre câble en arrêt de fonctionnement depuis 4 ans, identique au premier et installé dans le même corridor (Normandie 1 ; N1). Si le nombre d'espèces présentes était légèrement plus faible sur N1 que sur N2, les indices de diversité testés prenant en compte le nombre d'espèces et leur abondance n'ont pas montré de différences significatives.

8.3. Impacts potentiels sur les ressources halieutiques

Le rapport de 2011 identifiait plusieurs pistes de recherche à privilégier, en particulier l'approfondissement des études portant sur l'impact des CEM sur la migration des espèces magnétosensibles, en mettant l'accent sur des études *in situ* et en utilisant des techniques de marquage pour l'analyse des déplacements des individus adultes. Les auteurs soulignaient que l'aspect le moins documenté concernant l'impact des CEM était l'étude des réponses comportementales, ce qui pouvait s'expliquer par la difficulté de mise en œuvre de procédés expérimentaux fiables pour de telles analyses. L'impact des CEM sur les phases précoces du cycle de vie des espèces (œufs, larves et juvéniles) était également identifié comme une importante piste de recherche.

8.3.1. Les expériences en milieu contrôlé

Impact potentiel sur les stades embryonnaire et larvaire

En conditions expérimentales, les embryons d'espèces électrosensibles sont capables de détecter des champs électriques artificiels. Ils présentent alors un comportement qui, en milieu naturel, leur permettrait d'éviter la prédation. Plusieurs études montrent que des embryons de requin et de raie contenus dans leur capsule cessent les mouvements respiratoires de leurs ouïes lors d'une exposition à un champ électrique artificiel (Ball et al., 2016; Kempster et al., 2013). Cette réponse comportementale est attendue lorsque les embryons veulent éviter la prédation.

L'impact potentiel du CM sur les stades embryonnaire et larvaire a été testé avec des intensités de champ censées représenter la fourchette haute des conditions pouvant être rencontrées dans le milieu naturel en présence de câbles électriques en fonctionnement. Ainsi, le *Pacific Northwest National Laboratory* a mené plusieurs expérimentations avec des intensités de CM de 0,1 à 3 mT à l'aide de bobines d'Helmholtz. Il en ressort que le succès de fertilisation des œufs de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) n'est pas impacté par une exposition à un CM constant de 3 mT (Woodruff et al., 2012). En revanche, une exposition à ce même CM entre le dixième et le vingtième jour après la fertilisation provoque un retard apparent de développement. Aucune différence significative n'est observée sur le développement et la survie des larves de flétan de l'Atlantique (*Hippoglossus hippoglossus*) et de cardeau californien (*Paralichthys californicus*) soumis à un CM de 0,1 à 3 mT (Schultz et al., 2010 ; Woodruff et al., 2012). Des larves de salmonidés (*Salmo trutta* et *Oncorhynchus mykiss*) élevés dans un milieu exposé à un CM de 0,15 à 4,2 mT (généré à l'aide d'aimants) présentent des orientations de nage altérées par rapport aux individus élevés avec un champ magnétique naturel (Formicki et al., 1997, 2004).

Tout récemment, une étude expérimentale menée avec des stades embryonnaires et larvaires de truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) exposées pendant 40 jours à un champ électromagnétique de 1 mT (50 Hz) a montré que les individus présentaient des signes de toxicité au niveau cellulaire et moléculaire (Stankevičiūtė et al., 2019). A l'issue de l'expérimentation, les taux de mortalité étaient minimes (< 1%) et similaires dans les deux conditions (perturbée et témoin). Les conséquences de ces toxicités sur le développement et l'espérance de vie à long terme des individus restent à étudier.

Impact potentiel sur le stade juvénile

Putman et al. (2014) étudient les préférences d'orientation de juvéniles de truite arc-en-ciel élevées aux limites nord et sud de leur distribution géographique. Les résultats indiquent que l'exposition à des champs magnétiques artificiels lors de la croissance des individus pouvait affecter leur survie et leur capacité à retrouver leur rivière natale. De plus, les individus élevés en milieu exposé à un champ artificiel rencontrent des difficultés à s'orienter correctement pour rejoindre les zones de croissance des adultes.

Woodruff et al. (2012) étudient l'impact des CEM sur la capacité de détection d'un prédateur et sur la production de cortisol et de mélatonine pour les juvéniles de saumon argenté *Oncorhynchus kisutch*. Les résultats n'indiquent pas d'impact clair du CEM sur la capacité de détection d'un prédateur. L'exposition au CEM n'affecte pas la production de cortisol. En revanche, la production de mélatonine, qui joue un rôle dans la smoltification¹⁰ (Porter et al., 1998) et la croissance (Handeland et al., 2013) des salmonidés est modifiée : dans le groupe contrôle, les niveaux de mélatonine sont plus stables et plus élevés que dans le groupe exposé au CEM. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Reiter (1995) sur la diminution de la production de mélatonine induite par l'exposition à un CEM. En revanche, l'étude de Lerchl et al. (1998) montre que l'exposition à un CEM induit une augmentation

¹⁰ Série de changements physiques et physiologiques contrôlés par des hormones permettant aux salmonidés anadromes (les smolts) de migrer de l'eau douce à l'eau de mer. Par extension, « smolt » est le nom donné au tacon (juvénile) de saumon sauvage au moment où il a atteint la maturité.

significative des niveaux de mélatonine chez la truite mouchetée *Salvelinus fontinalis*.

Impact potentiel sur le stade adulte

Il a été démontré que le saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) utilise le champ magnétique terrestre lors de sa migration de reproduction (Putman et al., 2013). Ces résultats, confirmés par Hays (2013), constituent une preuve empirique que le saumon rouge utilise une imprégnation du champ magnétique terrestre existant lors de son premier départ en mer, afin de s'orienter pour le retour à sa rivière natale. La présence d'un champ magnétique artificiel est par conséquent susceptible d'affecter la capacité de certaines espèces migratrices, telles que le saumon, à s'orienter.

Des expérimentations récentes ont été menées en milieu contrôlé sur des tourteaux (*Cancer pagurus*) pour mesurer les conséquences d'une exposition à un CM artificiel, d'une intensité de 2,8 mT, créé à l'aide de bobines d'Helmholtz. Les résultats révèlent une modification significative (mais faible) du rythme circadien des taux de L-Lactate et de D-Glucose dans l'hémolymphe. Ces molécules interviennent respectivement dans l'efficacité de la fonction respiratoire (le taux de Lactate augmentant avec l'hypoxie) et dans la tonicité musculaire des individus. Des recherches plus approfondies sont cependant nécessaires pour comprendre les implications de ces perturbations sur la condition. D'autres impacts significatifs ont été constatés, à savoir une diminution du temps passé à errer pour chercher sa nourriture et une attirance vers la source de CM (Scott et al., 2018).

Il a été également démontré que la roussette (*Scyliorhinus canicula*), qui est un élasmobranche, est incapable de différencier le champ électrique biologique généré par une proie d'un champ électrique artificiel équivalent (Kimber et al., 2011). Par ailleurs, la roussette est capable d'apprendre que le champ électrique artificiel ne fournit pas de nourriture et ignore ce stimulus après quelques essais (Kimber et al., 2014). Des études complémentaires seraient nécessaires pour identifier si cette capacité d'apprentissage est vraie pour l'ensemble des élasmobranches.

8.3.2. Les expériences de terrain

Le rapport de 2011 mentionnait plusieurs études *in situ* menées en mer Baltique. Les modèles de migration de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) ont été analysés par télémétrie au niveau de la traversée d'un câble électrique (CA) submergé, l'intensité du CM produit par ce câble étant de 5 μ T à 60 m de distance. Les résultats tendaient à montrer que la trajectoire des poissons était déviée au niveau du câble, mais la faible résolution spatiale de la méthodologie employée n'avait pas permis d'apporter des preuves solides. Au niveau d'un parc éolien offshore, la même technique appliquée à la même espèce n'avait pas permis de mettre en évidence un changement dans le comportement migrateur, du moins pas au-delà de 500 m des éoliennes. Au sein du parc, l'analyse de taux de captures montrait que la présence de l'anguille dépendait de l'activité des éoliennes (en marche ou arrêtées), mais il n'avait pas pu être déterminé clairement si cet impact était lié au bruit des éoliennes ou à l'électromagnétisme. Enfin, une étude menée en mer Baltique (proche de l'île d'Öland) montrait que la vitesse de nage des anguilles était significativement plus faible à hauteur d'un câble non ensouillé (CA ; 130 kV) que sur les portions de leur route de migration localisées au nord et au sud de la zone du câble (Westerberg et Lagenfelt, 2008). Aucune information plus détaillée sur le comportement des anguilles au-dessus du câble n'a pu être acquise, si bien que

les mécanismes physiologiques expliquant le ralentissement des poissons restent inconnus. Les auteurs jugeaient que l'impact du câble sur la migration des anguilles est faible et que ce câble ne constitue en aucun cas un obstacle au déplacement de cette espèce.

Deux études américaines récentes, indépendantes l'une de l'autre, ont examiné le comportement de plusieurs espèces de crustacés (possédant une valeur commerciale) au voisinage immédiat de plusieurs câbles électriques sous-marins (CC et CA) en fonctionnement. Bien que ces deux études ne donnent pas des résultats totalement convergeant, aucune d'elles ne met en évidence d'impact négatif sur la survie ou le comportement vital des espèces ciblées.

La première étude (Love et al., 2017b) porte sur deux espèces de crabe (*Cancer productus* et *Metacarcinus magister*) à proximité de deux câbles électriques CA localisés en Californie du Sud (Chenal de Santa Barbara ; SBC) et à Puget Sound (Ile de San Juan ; SJI). Les câbles SBC et SJI ont des tensions respectives de 35 kV et 69 kV. L'expérience consiste à déployer le long des câbles de nombreuses cages expérimentales comportant deux casiers accolés à une chambre centrale. Après les avoir introduit dans la chambre centrale, on laisse aux crabes le choix de traverser le câble en tension avant d'entrer dans un casier, ou d'aller dans le sens opposé au câble pour entrer dans l'autre casier. Les intensités de CM mesurées s'échelonnent de 13,8 à 116,8 μ T pour le câble SBC et de 24,6 à 42,8 μ T pour le câble SJI. Les résultats montrent que la présence du CM n'induit pas de différence de capturabilité, que le câble soit ensouillé ou pas. D'après cette étude, le câble en fonctionnement ne semble pas constituer un frein au déplacement du crabe.

La deuxième étude (Hutchison et al., 2018) porte sur l'impact potentiel du CM émis par un câble HVDC d'une puissance de 330 MW (1175 A) sur le homard américain (*Homarus americanus*). La méthode est basée sur la télémétrie acoustique 3D afin de quantifier les mouvements des animaux dans deux enclos installés en mer : un enclos « perturbé » situé à proximité immédiate du câble HVDC, soumis à un champ magnétique de 47,9 à 65,3 μ T ; et un enclos « témoin » où règne un champ magnétique naturel (51,3 μ T). Les résultats montrent que le câble ne constitue pas une barrière au mouvement pour le homard. Une différence significative de comportement est toutefois observée : les individus exposés au CM du câble passent davantage de temps au centre de leur enclos que les individus « témoin ». Il est difficile d'attribuer ce changement de comportement au seul effet du CM car de nombreux autres paramètres environnementaux peuvent influencer ce comportement (courants, présence de nutriments, sédiment, température...).

Une étude de terrain a été conduite par Kavet et al. (2016) afin d'évaluer l'impact de l'activation d'un câble électrique sur le comportement migratoire du saumon royal *Oncorhynchus tshawytscha* et de l'esturgeon vert *Acipenser medirostris* en baie de San Francisco. Globalement, les auteurs concluent que les smolts de saumon royal semblent attirés par le câble une fois activé, mais que le succès de migration à travers la baie de San Francisco ne semble pas impacté. L'activité du câble induit des effets opposés sur les migrations de départ et de retour de l'esturgeon vert. Après activation du câble, la durée des migrations de départ est significativement plus longue tandis que la durée des migrations de retour est significativement plus courte. Cependant, une unique année de données (2011) étant disponible après activation du câble, la prudence est de mise quant à l'interprétation des résultats.

Hutchison et al. (2018) mènent une étude de terrain de deux ans sur l'effet des CM sur les pocheteaux *Leucoraja erinacea* (autre élaémobranche). Les résultats montrent que le câble ne constitue pas une barrière au passage des animaux. Les

zones de fort CM ($> 52,6 \mu\text{T}$) sont associées à une distance parcourue plus grande et à une plus grande proportion de larges tours. Pour le pocheteau, le comportement adopté lors d'une exposition à un CM induit ainsi un coût énergétique plus élevé.

8.3.3. Les expériences sur l'ichtyofaune non halieutique

L'impact potentiel des champs magnétiques sur le développement embryonnaire du poisson-zèbre est étudié par Skauli et al. (2000). Les embryons sont exposés à un CA de 50 Hz et à un champ magnétique de $1000 \mu\text{T}$, une valeur nettement supérieure à celle induite par les câbles électriques en fonctionnement (voir Annexe 1). De manière similaire aux conclusions de Lee & Yang (2014), l'éclosion arrive à terme sans que des différences soient observées dans la mortalité ou dans les malformations axiales.

Piccinetti et al. (2018) étudient l'effet biologique de l'exposition d'embryons de poisson zèbre à un CM avec une fréquence de 100 MHz, ce qui est très supérieur à la fréquence de 50 Hz des câbles électriques. Le développement embryonnaire est affecté : une croissance réduite est observée 48 h après fécondation ainsi qu'une augmentation de la transcription de gènes du stress, une activation de processus d'apoptose et d'autophagie, et une modification du métabolisme du cholestérol. Cependant, 72 h après fécondation, les impacts s'estompent et les embryons atteignent l'éclosion de manière similaire au groupe contrôle.

Lee & Yang (2014) étudient l'influence du CM sur le développement embryonnaire du médaka (*Oryzias latipes*), un poisson d'eau douce capable de survivre dans des conditions environnementales extrêmes. Les embryons sont exposés à un CM de 3,2 kHz à des intensités de 0,12, 15, 25 ou $60 \mu\text{T}$ en continu jusqu'à l'éclosion. Le groupe exposé à $0,12 \mu\text{T}$ est utilisé comme groupe contrôle. Le développement embryonnaire est analysé, ainsi que le comportement d'anxiété quatre jours après éclosion. Les embryons exposés aux trois types de CM montrent un développement plus rapide sur les points suivants : nombre de somites, largeur et longueur des yeux, densité de pigmentation des yeux, largeur du mésencéphale, développement de la tête, jour de l'éclosion. Le groupe exposé à $60 \mu\text{T}$ présente un niveau significativement plus élevé de comportements d'anxiété et l'éclosion arrive en moyenne 4,5 jours plus vite que pour le groupe contrôle. Pour l'ensemble des groupes, aucunes malformations ni différences de mortalité ou de longueur du corps à l'éclosion ne sont constatées.

Une étude récente a montré que le krill (*Gondogeneia antarctica*) se déplace avec une orientation magnétique qui est fortement affectée par les CM de 20 nT et de 2 nT. Les champs magnétiques faibles sont donc capables de désorienter cette espèce (Tomanova & Vacha, 2016).

Enfin, une étude récente a examiné la diversité et l'abondance de l'assemblage de poissons récifaux à proximité d'un câble fonctionnant alternativement en CA ou en CC, par rapport à une condition témoin où le courant dans le câble est stoppé (Kilfoyle et al., 2018). L'expérience a été menée sur trois sites répartis le long de ce câble et aucune différence significative n'a été trouvée entre les trois conditions (CA, CC, témoin), que ce soit en termes de richesse spécifique ou d'abondance.

Résumé

La compréhension des interactions entre les CEM engendrés par les câbles en phase d'exploitation et les organismes marins a progressé significativement depuis l'étude de 2011, mais des incertitudes demeurent. En termes d'effet, il est clairement montré que l'intensité du CM décroît rapidement avec la distance au câble.

Globalement, toutes études confondues, un impact significatif est trouvé dans un tiers des cas. Les 2/3 des résultats répertoriés sont issus d'expérimentations en milieu contrôlé à l'échelle individuelle. Leur transposition à l'échelle de la population dans un contexte écologique naturel reste très compliquée car cela nécessite de mettre en œuvre des modèles de croissance complexe intégrant des paramètres physiologiques essentiels (qui ne sont disponibles que pour un nombre très limité d'espèces marines).

Les intensités de CM testées, notamment en expérimental, sont souvent supérieures (parfois de plusieurs ordres de grandeur) à celles attendues pour les câbles actuellement en fonctionnement. S'ils ne sont pas toujours transposables à ce qui prévaut en milieu naturel, ces résultats aident à identifier les seuils critiques de CM.

Que ce soit sur les modèles biologiques benthiques (essentiellement des crustacés) ou halieutiques (essentiellement des poissons salmonidés), les CM testés impactent peu la survie des individus, mais peuvent affecter leur développement au stade embryonnaire. Pour une espèce donnée, les résultats de différentes études indépendantes divergent. Les études *in situ* conduites avec des intensités de CM comparables à celles attendues pour les câbles en fonctionnement indiquent que les câbles ne constituent pas une barrière au mouvement pour des espèces testées. Cependant, ces études *in situ* restent insuffisantes et l'impact sur les crustacés reste incertain. Les CM semblent avoir un impact sur la croissance de certains salmonidés et sur leur capacité à retrouver leur rivière natale.

Les études sur l'impact des CE restent rares. Chez les élaémobranthes, le comportement anti-prédation et l'alimentation semblent être affectés par l'exposition à un CE, bien qu'une capacité d'adaptation semble possible.

Sur la base de la présente analyse bibliographique, l'impact est jugé globalement **moyen** pour les poissons migrateurs et les élaémobranthes, dans le cas des câbles posés et dynamiques (avec des niveaux d'incertitudes respectivement moyen et fort), et **faible** dans tous les autres cas (avec un niveau d'incertitude moyen).

9. Interactions attendus avec les autres activités anthropiques

Le rapport de 2011 abordait exclusivement les effets de l'installation de câbles électriques sous-marins sur l'activité de pêche. Pour autant, les zones économiques exclusives (ZEE) sont fortement occupées par une diversité d'activités anthropiques. Les usages halieutiques, la navigation maritime et aérienne, l'extraction de ressources naturelles et les activités de loisirs sont tous susceptibles de générer des conflits d'usages autour de l'installation d'un câble électrique sous-marin (MEEM, 2017). L'activité de pêche reste la plus concernée devant le transport, comme le montre la **Figure 12**.

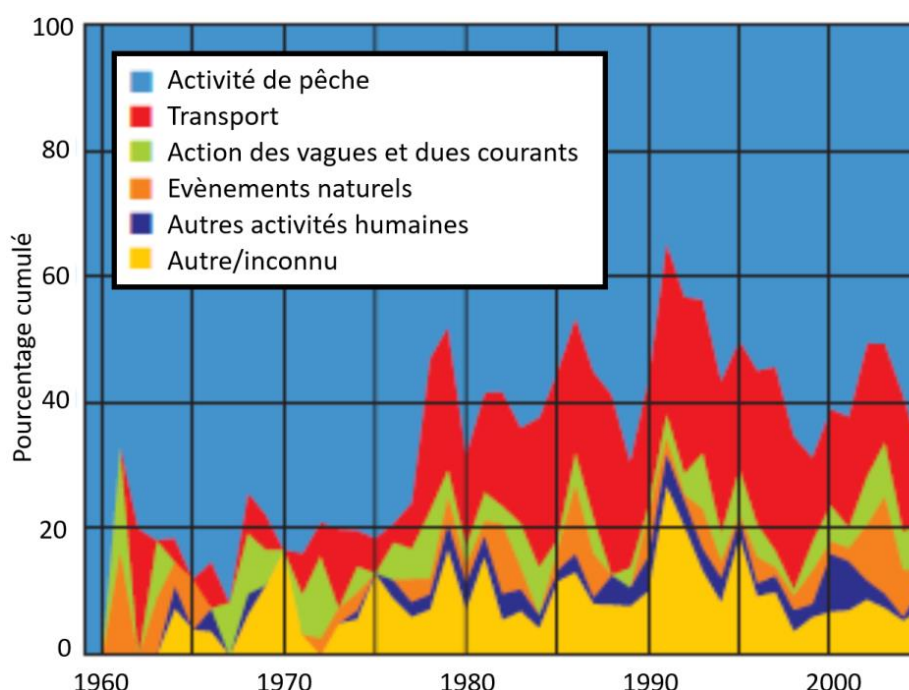


Figure 12. Causes de défaillances de câble enregistrées entre 1959 et 2005. Les données montrent que les activités les plus fréquemment impliquées sont la pêche et le transport, généralement par moins de 200 m de profondeur (modifié de (Wood & Carter, 2008).

9.1. Interactions lors de la phase de travaux

Par mesure de sécurité, l'accès à la zone correspondant au tracé du câble est restreint lors des phases de travaux (installation, démantèlement, maintenance). Ces phases de travaux correspondent à une période pouvant s'étaler de quelques jours à quelques semaines.

Pour l'activité de pêche, l'inaccessibilité de la zone peut forcer les pêcheurs à modifier leurs trajets et leurs zones de pêche de manière temporaire. Les conséquences associées sont une augmentation de la consommation de carburant et une réduction du temps consacré à l'activité de pêche. La concertation et la communication, respectivement en amont des phases d'installation et de

démantèlement et au moment des phases de maintenance, permettent la prise en compte des besoins de chaque partie prenante pour aboutir à un consensus.

Les activités de transport concernent les marchandises et les passagers. Comme pour la pêche, les restrictions d'usage associées aux phases de travaux pourront générer des modifications dans les trajets et les temps de transit des navires. Les mesures nécessaires sont adoptées en lien avec les autorités maritimes.

En zone côtière (à moins de 3 miles des côtes) et sur le littoral, les restrictions d'accès au cours des phases de travaux affecteront directement les activités économiques et touristiques. Les conséquences sont une incapacité totale ou partielle d'exercice, le calendrier du projet devra permettre de limiter ce type d'impact.

Les interactions avec d'autres usages apparaissent négligeables.

9.2. Interactions lors de la phase d'exploitation

En phase d'exploitation, les interactions associées à la présence des câbles sont apparentées aux dommages causés par d'autres activités anthropiques sur les câbles eux-mêmes (*i.e.* désensouillage, rupture accidentelle), et aux obstacles à la navigation ou à la pratique de la pêche (dans le cas où les câbles ne sont pas ensouillés). Les activités d'extraction ne sont pas compatibles avec la présence de câbles.

Concernant l'activité de pêche, les engins trainants de fond (*i.e.* chaluts de fond et dragues) sont les plus susceptibles d'entrer en interaction avec les câbles sous-marins. Les conséquences potentielles sont d'une part un endommagement des câbles, d'autre part un danger pour les pêcheurs à bord du bateau (*i.e.* croche, naufrage). La pénétration maximale des panneaux de chalutiers reste limitée pour toute une gamme de types de chalut et de types de substrat (Rességuier et al., 2009). La systématisation de l'ensouillage des câbles sous-marins depuis les années 1980 a considérablement diminué le risque d'incidents. Cette méthode n'est cependant pas applicable sur tous les types de substrat. De manière indirecte, les effets supposés ou réels des câbles électriques sous-marins peuvent impacter le milieu physique (perturbation des fonds) et la ressource halieutique qui en dépend (diminution des captures). Ces effets ont été abordés dans les sections précédentes ; l'intensité des impacts associés pour l'activité de pêche reste difficilement mesurable (voir chapitres précédents / Ressources halieutiques). Dans le cas où l'ensouillage n'est pas possible, des restrictions à la pratique des arts trainants sont mises en œuvre.

Concernant la navigation en mer, la pénétration des ancres dans le substrat et leur ragage constituent les risques les plus marqués d'endommagement des câbles électriques sous-marins (Osthoff et al., 2017). Le risque d'endommagement diminue à mesure que la profondeur d'ensouillage des câbles augmente (**Tableau 2**). Le type de sédiment et le poids du dispositif d'ancrage influencent le niveau de pénétration, en lien direct avec la profondeur d'ensouillage à prendre en compte pour préserver l'intégrité du câble (Jensen et al., 2009) (**Figure 13**).

Comme pour les phases de travaux, les interactions avec d'autres usages apparaissent négligeables pour la phase d'exploitation.

Tableau 2. Description des mécanismes d'interaction identifiés par Osthoff et al. (2017) entre un câble électrique sous-marin et une ancre selon la profondeur d'ensouillage. Des précisions sont données sur les profondeurs d'ensouillage recommandée

Profondeur d'ensouillage théorique étudiée	Mécanisme d'interaction mis en jeu entre un câble sous-marin et une ancre
0,3 m	La patte de l'ancre accroche le câble. L'ancre et le câble sont soulevés simultanément.
0,5 m	La patte de l'ancre est soulevée et glisse au-dessus du câble.
1,5 m	L'ancre balaye le fond sans contact direct avec le câble et presque aucun mouvement de câble n'a lieu. Profondeur d'ensouillage minimum recommandée par la législation allemande en vigueur.
3 m	Profondeur d'ensouillage minimum recommandée par la législation allemande en vigueur dans les zones équipées d'un dispositif de séparation du trafic maritime

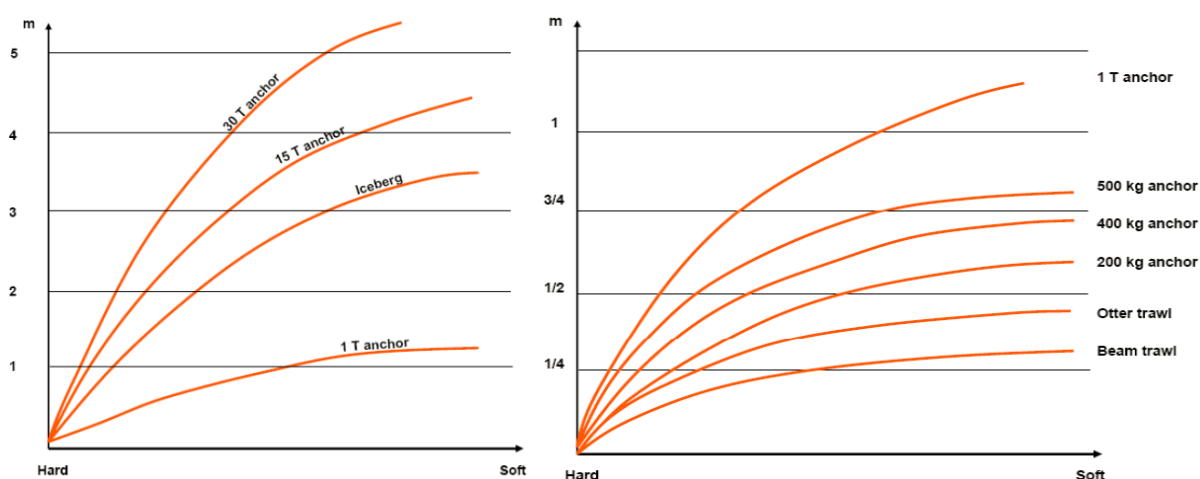


Figure 13. Profondeur de pénétration d'une ancre en fonction de la dureté du substrat et du poids de l'ancre elle-même (reproduit de Jensen et al., 2009). Les cas spécifiques des chaluts de fond (*otter trawl*) et des chaluts à perche (*beam trawl*) sont également présentés.

Résumé

La navigation maritime et la pêche sont les activités les plus concernées par les risques d'interaction avec des câbles sous-marins. Les interactions sont caractérisées par des restrictions d'usage, l'endommagement du câble et les risques portés à la sécurité des navires. L'ensouillage du câble et le choix de la profondeur d'ensouillage sont des mesures efficaces pour réduire les risques d'interaction. Les activités d'extraction sont incompatibles avec la présence de câbles sous-marins.

Au vu de l'emprise spatiale du câble, qui reste limitée, et du caractère temporaire des principales restrictions, l'impact est estimé **négligeable** à **faible** pour les autres activités anthropiques.

10. Prise en compte des impacts cumulés

Le rapport de 2011 mentionnait les impacts cumulés au titre des recommandations dans le cadre du suivi des impacts, sans précision supplémentaire. La prise en compte des impacts cumulés répond à une demande administrative d'une part, et constitue d'autre part un domaine de recherche à part entière. A ce titre, la notion d'impact cumulé telle qu'envisagée dans le cadre de ce rapport est définie, des éléments de contexte administratif et scientifique sont apportés ainsi qu'un bilan des sources potentielles d'impacts cumulés à l'échelle d'un projet de câble électrique sous-marin.

10.1. Définition et mise en contexte

10.1.1. Définition

Les impacts cumulés sont définis par la Commission européenne comme des « *changements subis par l'environnement en raison de l'action combinée de plusieurs activités humaines impactantes passées, présentes et futures* ». Selon cette définition, le terme « cumulé » fait donc référence à au moins deux types de projets différents, et englobe les dimensions temporelle et spatiale, ainsi que les effets directs et indirects (MEEM, 2017).

Scientifiquement, l'évaluation des impacts cumulés demande le développement préalable d'un vocabulaire et d'une approche standardisés (Judd et al., 2015). Les effets cumulés correspondent à la somme des pressions en provenance de plusieurs activités anthropiques, qu'elles soient ponctuelles ou permanentes, localisées ou diffuses (**Figure 14**). L'impact cumulé peut se caractériser par récepteurs de l'écosystème, à différentes échelles biologiques, ainsi qu'à différentes échelles de temps et d'espace. Il convient d'adapter l'échelle d'étude, dans le temps et dans l'espace, à la problématique traitée.

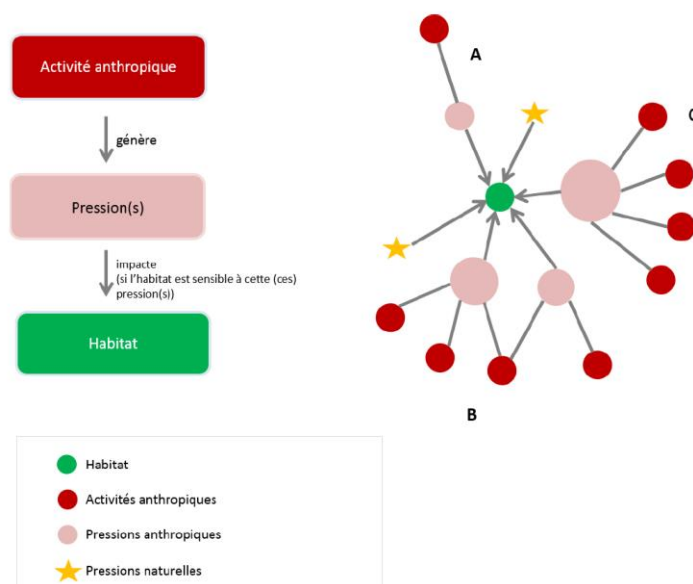


Figure 14. Représentation du phénomène d'effets cumulés s'exerçant sur un récepteur. Le récepteur choisi dans cet exemple est l'habitat (reproduit de La Rivière et al., 2016)

Pour ce rapport, nous adoptons une définition plus étroite des impacts cumulés, en ne prenant en compte que les impacts potentiellement induits par les câbles électriques sous-marins. Il faut cependant souligner que dans le contexte du raccordement électrique d'un parc éolien offshore industriel, les impacts liés au câble de raccordement doivent nécessairement être appréhendés au regard des impacts générés par l'installation et/ou le fonctionnement du parc éolien et en particulier de son réseau interne de câbles électriques sous-marins.

10.1.2. Cadre législatif

La législation européenne impose aux Etats membres de l'Union de mettre en place des mesures d'évaluation et de gestion relatives à l'impact des activités marines sur l'environnement. L'amendement 11/97/CE à la directive 85/337/CEE impose la prise en compte des effets cumulés lors des études d'impacts environnementaux.

De plus, la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (2008/56/EC) indique la nécessité d'appliquer une approche de gestion écosystémique des activités humaines relatives au milieu marin. Il appartient aux gouvernements de veiller à ce que la pression anthropique globale s'exerçant sur les écosystèmes marins reste à des niveaux compatibles avec l'atteinte d'un bon état environnemental et à ce que les principaux impacts cumulés soient pris en compte dans l'analyse.

En France, l'article R122-5 du code de l'environnement modifié par le décret n°2017-626 du 25 avril 2017 - art. 3 précise également que les études d'impact doivent traiter du « *cumul des incidences avec d'autres projets existants ou approuvés, en tenant compte le cas échéant des problèmes environnementaux relatifs à l'utilisation des ressources naturelles et des zones revêtant une importance particulière pour l'environnement susceptibles d'être touchées* ».

10.1.3. Cadre scientifique

L'objectif de la démarche scientifique associée à l'estimation des impacts cumulés est de comprendre l'incidence globale des activités anthropiques, y compris des pressions diffuses telles que le changement climatique, sur l'intégrité d'un organisme à l'échelle de son cycle de vie (e.g. développement, survie, capacité à se nourrir, reproduction). Par extension, on cherche à évaluer cette incidence à l'échelle d'une population (i.e. unité assurant le maintien d'une espèce), d'un groupe fonctionnel (i.e. l'ensemble des organismes qui assurent un même rôle au sein d'un écosystème) et/ou d'une communauté (i.e. ensemble de populations de deux espèces ou plus occupant un même espace géographique), et enfin d'un écosystème (Halpern & Fujita, 2013). Pour illustrer la diversité des cas de figure possibles dans la prise en compte des impacts cumulés, une espèce benthique sessile avec une durée de vie courte demandera de prendre en compte les impacts de divers projets localement. A l'inverse, une espèce pélagique mobile et longévive demandera de considérer les impacts de projets et activités affectant les zones fonctionnelles importantes de l'espèce (i.e. reproduction ; nourricerie ; couloir de migration). Dans ces deux cas, les échelles spatiales et temporelles considérées diffèrent. L'introduction des notions de populations, de communautés et d'écosystème amène un surplus de complexité pour l'évaluation des impacts cumulés.

En lien avec les politiques internationales encadrant les activités anthropiques en mer (i.e. planification spatiale des activités), les outils développés pour estimer les

impacts cumulés se sont d'abord concentrés sur les aspects spatiaux. Ils s'intéressent davantage aux pressions cumulées qu'aux impacts et à leur quantification (Halpern et al., 2008; Judd et al., 2015; Stelzenmüller et al., 2018). Récemment, des approches dérivées des process industriels ont été élaborées pour définir un cadre méthodologique de prise en compte des effets cumulés (Cormier et al., 2019; Gimpel et al., 2013).

La caractérisation des interactions entre les différentes pressions (*i.e.* addition, synergie, antagonisme) demeure un champ de recherche à part entière (Knights et al., 2013). Les impacts cumulés sont donc également étudiés catégorie par catégorie, et compartiment par compartiment. Costa (2012) étudie l'influence couplée d'effets environnementaux et de la pression acoustique en termes de coûts énergétiques pour les individus, et par extension pour une population. Raoux (2017) étudie l'impact sur le réseau trophique de la construction d'un champ d'éoliennes en baie de Seine, une zone déjà fortement anthropisée.

Quelle que soit l'approche choisie, la caractérisation des impacts cumulés fait face à de nombreux défis. La couverture spatiale et la qualité des données disponibles, la prise en compte de la dimension temporelle, du niveau d'incertitude et de la partialité de l'information sont parmi les limitations inhérentes aux méthodes existantes (Dailianis et al., 2018).

10.1.4. Application dans le cadre d'un projet industriel

Au cours de la durée de vie d'un projet de câble électrique sous-marin, la nature des impacts attendus et leur intensité varient (voir **Figure 2**, p.19). Dans le cadre de ce rapport, le cumul d'impact porte sur la conjugaison de différents types d'impact sur un même récepteur, et/ou sur le cumul dans le temps (durant les phases d'installation et d'exploitation) ou dans l'espace (plusieurs câbles sur un même site) d'un même type d'impact. A l'échelle d'un projet, il est possible de répertorier les impacts intervenant aux différentes phases de vie et d'évaluer leur intensité et leur emprise spatiale.

Dans le périmètre d'étude défini juste au-dessus, l'évaluation des impacts cumulés peut être abordée à différentes échelles de temps et d'espace, par compartiment biologique et/ou à l'échelle de l'écosystème dans le cadre d'un même projet industriel. Ainsi, une espèce sessile peut être impactée par un même câble tout au long de son cycle de vie (*i.e.* accumulation temporelle avec une composante spatiale négligeable à nulle), tandis qu'une espèce mobile est susceptible de cumuler les impacts induits par différents câbles et/ou activités au cours de sa vie (*i.e.* accumulation spatiale avec une composante temporelle possible). Une attention particulière devra être apportée aux zones de concentration de câbles (*e.g.* surface totale de sédiment remanié, superposition de CEM adjacents, cumul des échauffements, etc., au niveau du poste de livraison en mer d'un parc éolien, où convergent plusieurs câbles inter-éoliennes), ainsi qu'à l'identification des pressions pouvant opérer de manière concomitante (*e.g.* modification du CEM se conjuguant à une augmentation de la température en phase d'exploitation, effets du bruit et de l'augmentation de turbidité en phase de travaux).

10.1.5. Identification des projets en cours et à venir

Le développement des projets d'interconnexion et d'EMR s'accompagne d'une multiplication des câbles électriques sous-marins dont le linéaire total devrait augmenter sensiblement au cours des années à venir. En France, l'éolien flottant n'encore qu'au stade expérimental et des fermes pilotes sont en cours de développement sur les façades Atlantique et Méditerranée. Le projet de PPE (Planification pluriannuelle de l'énergie) prévoit de premiers appels d'offre commerciaux avant 2023, démontrant la volonté de développer ce secteur¹¹. Le premier parc éolien flottant opérationnel, d'une capacité de 30 MW, a démarré sa production en octobre 2017 au large de l'Ecosse (projet Hywind), avec un câble sous-marin d'export de 27,5 km de long. Hywind peut fonctionner dans des eaux d'une profondeur allant jusqu'à 800 mètres. Le succès de ce projet ouvre la voie au développement de la technologie éolienne flottante, ce qui pourra à terme rendre accessible des zones très éloignées de la côte. Cela impliquera dans le même temps le déploiement d'un important linéaire de câbles.

Dans la zone maritime entourant la France, on peut estimer d'ici 2025 un linéaire de câbles sous-marins de 1700 km dont 1450 km issus des interconnexions, 20 km issus du raccordement à des projets d'hydroliennes, 150 km et 100 km issus du raccordement à des champs éoliens offshore fixés et flottants respectivement (**Tableau 3**).

¹¹ Le Projet de Programmation Pluriannuelle de l'Energie (automne 2018) prévoit ainsi un appel d'offre de 250 MW en Bretagne Sud en 2021 et un appel d'offre de 250 MW en Méditerranée en 2022..

Tableau 3. 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.

	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, 46 km	1986
	BRITNED, 1 GW (Angleterre – Hollande)	HVDC 450 kV, 250 km	2011
	ELECLINK, 1 GW (France - Royaume-Uni)	320 kV HVDC, 51 km de câble à l'intérieur du tunnel sous la Manche	2019
	NEMO, 1 GW (Belgique - Royaume-Uni)	130 km	2018
	IFA2, 1 GW (Southampton - Calvados)	HVDC, 200 km	2020
	FAB, 1,4 GW (France-Aurigny-Grande Bretagne)	Double liaison HVDC, 220 km (30,5 km en France)	2022
	CELTIC INTERCONNECTOR, 0,7 GW (France - Irlande)	HVDC, 500 km	2025
	Golfe de Gascogne, 5 GW (France-Espagne)	Double liaison HVDC, 280 km AC ; 140 km (32 km en France)	2025 ?
	GRIDLINK, 1,4 GW (France - Royaume-Uni)		
EOLIEN EN MER	Dieppe-Le Tréport, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 24 km	2022/2023
	Fécamp, 498 MW (83 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 18 km	2021/2022
	Courseulles sur Mer, 450 MW (75 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 16 km	2021/2022
	St-Brieuc, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 33 km	2021/2022
	St-Nazaire, 480 MW (80 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 33 km	2021/2022
	Ile d'Yeu/Noirmoutier, 496 MW (62 éoliennes)	Double liaison 225 kV, AC, 27 km	2022/2023
	Appel d'offre au large de Dunkerque, 250 à 750 MW	?	?
FERMES PILOTES EOLIEN FLOTTANT	« Provence Grand Large », zone de Faraman en Méditerranée, 24 MW (3 éoliennes)	33 kV AC, 30 km	2020/2021
	« Les éoliennes flottantes du golfe du Lion », zone de Leucate en Méditerranée, 24 MW (4 éoliennes)	63 kV, AC, 18 km	2020/2021
	« Les éoliennes flottantes de Groix », Groix en Bretagne, 24 MW (4 éoliennes)	63kV, AC 30 km	2020/2021
	« Eolmed », Gruissan en Méditerranée, 24 MW (4 éoliennes)	33 kV, AC, 27 km	2020/2021
HYDROLIEN	Paimpol Bréhat, 8 MW, 10 kV (4 hydroliennes)	15 km	En attente
	SEM-REV, 20 kV	20 km	2018
	Normandie Hydro, Raz-Blanchard 14 MW (7 hydroliennes)	3 km ?	2020
	Sabella D10	2 km	2015

10.2.Méthode d'évaluation des impacts cumulés

Différentes méthodes d'évaluation des impacts cumulés sont présentées. Celles-ci retracent l'évolution des connaissances et des théories scientifiques qui encadrent la problématique des impacts cumulés.

10.2.1. L'approche DPSIR (Driver, Pression, Impact, Réponse)

L'approche DPSIR a été développée dès 1979 mais sa généralisation pour la prise en compte des impacts environnementaux intervient à la fin des années 1990 (Smeets & Weterings, 1999). Elle fournit un cadre systématique pour lister les sources de pression et les pressions engendrées par les activités humaines, et leurs effets et impacts sur l'environnement. La méthode a pour objectif initial l'élaboration des politiques de gestion, elle est largement utilisée au cours des années 2000 pour développer les futurs indicateurs du BEE dans le cadre de la DCE et de la DCSMM (Atkins et al., 2011; Borja et al., 2006, et références associées).

Récemment, Platteeuw et al. (2017) utilisent l'approche DPSIR (*Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses*) afin de mener une évaluation d'impacts cumulés d'un parc éolien offshore en six étapes :

- 1) Identifier les pressions que pourraient causer les activités envisagées.
- 2) Identifier les habitats et espèces qui pourraient être affectés par ces pressions.
- 3) Décrire toutes les autres activités qui pourraient affecter les mêmes espèces.
- 4) Décrire la nature (en termes de pression) et l'échelle des effets cumulés de toutes les activités sélectionnées à l'étape 3 sur les habitats et espèces sélectionnées.
- 5) Evaluer la significativité des effets sur les habitats et espèces sélectionnées.
- 6) Si nécessaire, adapter l'activité en prenant des mesures pour éviter que l'activité ne cause d'effets significatifs.

Cette approche souffre cependant de sa sensibilité aux intérêts de l'utilisateur : en fonction de l'objectif recherché, la hiérarchisation des pressions et des effets est susceptible de modifier les résultats obtenus (Carr et al., 2007; Svarstad et al., 2008).

10.2.2. La cartographie comme outil de gestion

L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) permet de stocker des données de pression spatialisées. Ils permettent de représenter et d'analyser, pour différentes espèces sensibles, la localisation et l'étendue des zones où elles seront perturbées par l'installation d'un câble. L'une des applications récurrentes de ce type d'outil est la cartographie du bruit généré par les projets industriels en mer (Nedwell et al., 2012a). Goodsir et al. (2015) étudient les pressions résultant de la juxtaposition de différentes activités anthropiques (e.g. extraction de granulats, pêche, forages pétroliers, EMR et câbles de télécommunication) en Atlantique Nord-est : des options de gestion sont testées afin de réduire les pressions introduites, et les bénéfices sont mesurés en termes de réduction de la surface de fond marin impactée. Le principe de précaution prévaut dans les zones où peu de données sont disponibles. Lorsque les données sont suffisantes, des scénarios de gestion peuvent être testés et les cartes générées peuvent devenir une aide à la décision pour le tracé de pose d'un câble ou le choix des dates de travaux.

La méthode CUMULEO, développée par IMARES, consiste à évaluer la contribution de différentes activités humaines à l'impact cumulé global sur une zone donnée d'un point de vue spatial (Van der Wal & Tamis, 2014). Cet outil prend en compte l'intensité de chaque pression, le niveau d'effet relatif de chaque pression par unité de surface et la sensibilité relative des récepteurs à chaque type de pression. En mer du Nord, la méthode CUMULEO a permis d'estimer que l'aire affectée par les impacts écologiques cumulés des parcs éoliens en mer représente 0,03% de la surface totale. A titre de comparaison, les impacts cumulés de la pêche affectent 13% de cette même zone. D'autres cas d'études contemporains basés sur des méthodes différentes de prise en compte des pressions cumulées ont conduit à des résultats équivalents (Andersen et al., 2013).

Les données temporelles peuvent également être incluses afin de représenter l'évolution temporelle de l'intensité des impacts et leur localisation. La superposition de couches d'information permet d'analyser plus facilement l'empreinte de plusieurs projets et de visualiser rapidement les zones les plus sensibles du point de vue écologique (par exemple les zones fonctionnelles halieutiques) et/ou celles qui risquent d'être les plus impactées par les projets.

Si l'approche cartographique semble plus objective que l'approche DPSIR, le critère de poids (« sensibilité ») donné à chaque couche d'information géographique (*i.e.* activité) reste souvent fonction du dire d'expert. La méthode est donc semi-quantitative ; Elle permet avant tout une visualisation spatio-temporelle des cumuls d'effets, facilitant la gestion des risques. Il ne s'agit pas d'une estimation des impacts cumulés.

10.2.3. Impacts cumulés à l'échelle de la population

Pour un organisme inféodé à une zone sélectionnée pour un projet, la présence de plusieurs câbles dans son environnement proche peut entraîner un cumul de perturbations dont l'intensité globale peut engendrer un impact, quand bien même chaque perturbation considérée indépendamment ne serait pas impactante. En outre, un même effet peut induire des impacts différents selon le stade de vie de l'espèce considérée. Pour la morue par exemple, l'impact du bruit intense produit par le battage de pieu est jugé mineur pour les individus adultes en dehors des périodes de reproduction, modéré pour les jeunes recrues et sévère pour les adultes pendant la période de reproduction (Hammar et al., 2014).

Hammar et al. (2014) utilisent une approche de classification par pondération afin d'évaluer les impacts cumulés de six sources de perturbation (dont la pose et le fonctionnement de câbles électriques) induites par le projet de parc éolien offshore de Kattegat sur une population de morue *Gadus morhua*. Leur méthode consiste à attribuer à chaque source une note de magnitude (intensité d'impact) et une note de vraisemblance (probabilité que l'impact se produise) en fonction de l'impact attendu sur les différents stades de vie¹² de l'espèce considérée. Ces deux notes sont ensuite multipliées pour obtenir une valeur de risque écologique. Les résultats montrent que la construction du champ éolien induit un risque important pour la morue, qui peut cependant être considérablement réduit en évitant certains types de travaux au cours de la période de reproduction.

¹² Les stades de vie ont été regroupés en trois catégories : individus de moins de trois mois (œufs et larves), individus de plus de trois mois immatures (juvéniles et adultes immatures) et individus matures.

10.2.4. Approche écosystémique

L'approche écosystémique consiste à évaluer les impacts cumulés en prenant en compte l'ensemble des paramètres environnementaux, les impacts subis par l'ensemble des récepteurs et les interactions. Au titre des impacts cumulés, cette approche reste relativement récente.

En France, le Département des Milieux Marins de l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) propose des critères pour associer un niveau d'enjeu à chaque espèce ou habitat marin étudié, permettant de hiérarchiser les enjeux écologiques dans le cadre de la DCSMM. Les critères considérés sont :

- 1) **La représentativité** : part de surface totale occupée par un habitat ou aire de répartition d'une espèce.
- 2) **La sensibilité ou vulnérabilité** : la sensibilité renseigne sur la propension intrinsèque d'un enjeu à être détruit ou dégradé par une pression et sur sa capacité de récupération (e.g. une espèce rare à faible résilience aura une note de sensibilité élevée). La vulnérabilité est le risque de voir l'enjeu disparaître ou être dégradé, il s'agit d'une sensibilité à plus large échelle (temporelle et géographique), par exemple une espèce dont les stocks mondiaux sont impactés.
- 3) **La fonctionnalité** : caractère déterminant ou non de l'enjeu pour le fonctionnement global du secteur considéré (espèce clef de voute, zone fonctionnelle halieutique, zone de production primaire...)
- 4) **La spécificité** : critères qui montrent la singularité de l'enjeu (site isolé, faciès particulier, sous-population...)

Les indices peuvent ensuite être combinés avec des données de distribution géographique et être utilisés dans les évaluations d'impacts cumulés (Michel & Toison, 2017). Comme pour l'approche DPSIR présentée plus haut, ce type de méthode reste sensible aux objectifs recherchés par l'utilisateur.

La prise en compte de l'ensemble des impacts, récepteurs et interactions requiert la collecte d'un grand nombre de données à partir de projets passés afin de construire et valider des modèles de prédiction. La mise en place d'un cadre d'évaluation standardisé et une mise en commun des données de différents projets seront nécessaires à l'aboutissement de ce type de travail, et pourront bénéficier à la stratégie de développement des énergies marines renouvelables (Willstead et al., 2017).

10.3.Limites de l'approche développée

En pratique, la prise en compte de l'ensemble de ces paramètres par un développeur de projet n'est pas réaliste : les données écologiques disponibles restent à ce jour insuffisantes et la complexité des modèles quantitatifs associés dépassent le cadre administratif fixé pour les études d'impact (Judd et al., 2015).

Cependant, il est probable que la réglementation évolue dans le sens d'attentes plus précises pour ce qui est de l'évaluation des impacts cumulés. Il deviendrait alors indispensable que les instances gouvernementales mettent en place un cadre harmonisé pour l'évaluation de ces impacts en définissant les échelles spatiales et temporelles pertinentes, et une grille de lecture commune définissant l'intensité des

effets et impacts. Idéalement, cette harmonisation devrait se faire à un niveau international, à travers les organismes tels que le Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM) ou la commission OSPAR.

Dans notre cas, l'expansion du réseau de câbles électriques sous-marins peut conduire à des impacts cumulés potentiellement néfastes pour l'environnement, mais qui restent difficilement prévisibles, et pour lesquels le recul scientifique est faible. A titre d'exemple, dans les cas (fréquents) où plusieurs câbles empruntent un même corridor, la disposition même des câbles (écartement) fera que les CEM attendus pour chaque câble considéré isolément pourront se cumuler de façon additionnelle ou antagoniste (annulation du CEM localement). Ceci constitue d'ailleurs une problématique de recherche à approfondir.

Même si ce n'est pas traité dans ce rapport, on gardera donc à l'esprit que les impacts potentiels d'un câble électrique sur une même population ou un même habitat peuvent se cumuler avec les impacts induits par d'autres activités anthropiques (locales ou éloignées). A titre d'exemple, une population déjà affaiblie par la surpêche risque d'être plus sensible à la destruction d'une zone de frayère induite par la pose d'un câble électrique.

Résumé

Bien que le cadre législatif soit défini et que les impacts cumulés soient pris en compte dans les études d'impact d'un point de vue administratif, les méthodologies restent encore peu développées pour caractériser les impacts cumulés d'un point de vue scientifique. Les perturbations générées par l'installation et le fonctionnement des câbles sous-marins, même si elles sont considérées comme faibles, vont se cumuler à celles d'autres activités humaines. La réglementation en vigueur ne demande pas spécifiquement la mise en place d'approches quantitatives pour l'étude des effets et impacts cumulés, et les données actuellement disponibles sont généralement insuffisantes pour ce type d'exercice. La problématique de l'évaluation des impacts cumulés devient cependant de plus en plus prégnante, en particulier là où se concentrent le plus les activités anthropiques. Une harmonisation des méthodes et des formats de données constitue une première étape cruciale.

11. Mesure ERC (« Eviter, Réduire, Compenser »)

Le rapport de 2011 mentionnait plusieurs références bibliographiques faisant état de recommandations pour l'installation et l'exploitation de câbles électriques sous-marins, parmi lesquelles : le rapport de la commission OSPAR (OSPAR, 2008), le guide du projet européen EQUIMAR (Moura et al., 2010) et les rapports du COWRIE (Gill et al., 2005, 2009). Le rapport OSPAR signale que les mesures d'atténuation doivent être appliquées selon le principe de précaution.

La séquence Eviter-Réduire-Compenser (ERC) est inscrite dans la loi du 10 juillet 1976 pour la protection de la Nature. Elle a été confortée dans la loi du 8 août 1976 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages et plus particulièrement dans l'article L.11-1 du code de l'environnement : « *Ce principe implique d'éviter les atteintes à la biodiversité et aux services qu'elle fournit ; à défaut, d'en réduire la portée ; enfin, en dernier lieu, de compenser les atteintes qui n'ont pu être évitées ni réduites, en tenant compte des espèces, des habitats naturels et des fonctions écologiques affectées. Ce principe doit viser un objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire tendre vers un gain de biodiversité* ».

Les mesures ERC peuvent être « amont », géographiques, temporelles, techniques ou stratégiques (CGDD, 2018). De manière générale, les mesures permettant de minimiser les impacts environnementaux prévisibles des câbles électriques sous-marins incluent :

- le choix du tracé,
- le choix de la période de travaux,
- la conception du câble,
- le choix du moyen d'ensouillage,
- l'utilisation de matériaux inertes lorsqu'une protection par recouvrement est nécessaire.

11.1.Recommandations pour éviter les impacts

Sur la base des connaissances actuelles, des mesures d'évitement peuvent être adoptées pour éviter certains impacts des câbles électriques sous-marins sur l'environnement côtier. Leur identification est une étape essentielle (parfois appelée *scoping process*), qui consiste à anticiper le plus en amont possible les questions environnementales clés devant faire l'objet d'une attention particulière (Moura et al., 2010). Pour cela, l'utilisation de checklists ou de matrices (basées sur le modèle de la matrice de Leopold par exemple) sont des approches courantes (Bald et al., 2010).

11.1.1. Etat des lieux

Evitement géographique en amont

En amont de la phase de travaux, l'entreprise doit se prononcer sur le tracé du câble et en particulier la zone d'atterrage. Ces choix sont d'une importance capitale pour l'atténuation des impacts potentiels sur les espèces et habitats marins mais aussi terrestres (du fait de l'atterrage).

Il est primordial de considérer les zones classées au titre de la préservation du milieu marin. Les aires marines protégées (AMP) sont des zones géographiques

classées au titre (i) du maintien en bon état des espèces et habitats (avec un statut d'espèce rare ou menacée, avec un intérêt patrimonial ; espèces halieutiques exploitées faisant l'objet de mesures de gestion particulières; présence importante au regard de sa répartition biogéographique) et (ii) du maintien de fonctionnalités écologiques clés (frayères, nourriceries, productivité élevée, repos, alimentation, migration...). Ces espaces réglementés, signalant une sensibilité écologique particulière, sont répertoriés dans plusieurs bases de données accessibles (e.g. INPN – MNHN ; REBENT – Ifremer ; SEXTANT – Ifremer ; futur SIMM – AFB).

Une attention particulière doit être donnée aux organismes (animaux ou végétaux) « vulnérables » (remplissant au moins un des trois critères mentionnés au paragraphe 2.1.2). Il s'agit en particulier des organismes constructeurs de récifs aussi appelés espèces ingénieur. Dans la zone Atlantique Nord-est, on peut citer (du large vers la côte) les bancs de modioles (*Modiolus modiolus*), *Sabellaria spinulosa*, les bancs de maerl, les herbiers (*Zostera* spp.), les récifs d'hermelles (*Sabellaria alveolata*). En Méditerranée on trouve plus particulièrement des massifs de coralligène et des herbiers de Posidonie (famille des Posidoniaceae). La plupart de ces organismes, en raison de leur durée de vie longue et de leur croissance lente, sont susceptibles d'être éliminés directement (avec la destruction de leur habitat) ou indirectement (*via* le remaniement sédimentaire ou la redéposition de particules fines). Une longue période de restauration serait nécessaire en cas de dégradation (Jørgensen et al., 2011).

De même, une attention particulière doit être portée aux habitats benthiques vulnérables. Afin de couvrir toute la diversité de la faune le long du tracé prévisionnel du câble, tous les types de substrat doivent être inventoriés, depuis les fonds crayeux, les sables, cailloutis et graviers, ainsi que les structures rocheuses sous-marines (monts sous-marins), pentes et talus sous-marins. A titre d'exemple, la croissance très lente des coraux et éponges rend la période de restauration de ces habitats extrêmement longue, de plusieurs décennies à plusieurs siècles, voire dans certains cas ne pas produire. Ces habitats doivent donc être épargnés chaque fois qu'une route alternative est possible. Lorsqu'un habitat vulnérable est identifié sur le tracé du câble sans possibilité de contournement, la technique de pose qui provoque le moins de dégâts sur les fonds marins doit être privilégiée pour préserver au maximum l'intégrité de cet habitat.

Lorsque l'information fait défaut ou n'est pas disponible, il est recommandé d'effectuer des reconnaissances *in situ* (par imagerie, prélèvements biologiques,...) sur les différentes routes envisagées afin de prendre en compte la composante biologique dans le choix définitif du tracé. Ces travaux de reconnaissance interviennent alors après la réalisation d'un modèle numérique de terrain, lequel permet de positionner les stations ou les transects les plus pertinents. La zone d'observation doit prendre en compte tous les types de substrat que le câble sera susceptible de traverser (fonds meubles, roches,...).

Concernant l'ichtyofaune, les zones fonctionnelles halieutiques (*i.e.* nourriceries, frayères, voies de migration) doivent être évitées au moment du choix du tracé du câble. Ces zones constituent des espaces essentiels au renouvellement des populations de poissons et font l'objet d'un effort de protection spécifique (**Décret n°2017-568 du 19 avril 2017**). En particulier, la caractéristique côtière des zones de nourriceries les rendent les plus susceptibles d'être impactées par la mise en place de câbles sous-marins, une étude bibliographique *ad hoc* doit donc être menée relativement à ces espaces de conservation. Au large, l'évitement des zones de frayères est à privilégier (Delage & Le Pape, 2016).

Evitement technique

Concernant l'atterrissage du câble, la liaison entre la partie subtidale et le poste d'atterrissage à terre peut se faire grâce à des techniques de forage dirigé, technique connue sous le nom de creusement directionnel horizontal (*Horizontal Directional Drilling*, HDD), dont la principale caractéristique est de ne pas générer de destruction d'habitat sur la zone intertidale puisque cette section est parcourue en souterrain (Vize et al., 2008 ; Bald et al., 2010). Des risques de pollution liés aux éléments de lubrification persistent. Cette alternative au creusement d'une tranchée permet cependant d'éviter les habitats particulièrement sensibles du point de vue écologique. La faisabilité du creusement directionnel est liée au site, celui n'étant pas approprié à tous les types de sédiment, et nécessite une évaluation géotechnique soignée. Actuellement, la longueur maximale d'une telle conduite est limitée à quelques centaines de mètres.

Le choix de la route du câble est déterminant vis-à-vis du risque de remobilisation de contaminants dans les sédiments. Comme la localisation des zones contaminées n'est pas toujours connue avec précision, des études de la qualité des sédiments préalables aux travaux permettent de prendre en compte ce risque dans la conception du projet. Si une technique perturbant les sédiments est utilisée pour la pose du câble (creusement de tranchée), une évaluation du niveau de contaminants dans les sédiments devra être menée avant l'installation (Polagye et al., 2011). En dehors des points de suivi habituels (ROCCH de l'Ifremer), le niveau de pollution des fonds marins n'est malheureusement pas toujours connu avec précision. Par ailleurs, lorsque le câble est posé sur le fond et protégé (e.g. enrochements, matelas de béton), une attention particulière doit être apportée à l'utilisation de matériaux inertes pour la protection et la stabilisation du câble.

Evitement temporel

Le recensement des espèces halieutiques présentes dans la zone du tracé du câble et la prise en compte des périodes de reproduction et/ou de ponte de ces différentes espèces, sur une base bibliographique et/ou par la mise en place de campagnes dédiées, peut permettre de minimiser l'impact sur les populations halieutiques en adaptant le phasage de la période de travaux.

Les périodes importantes pour le maintien des populations (i.e. nidification, reproduction, mise bas, migration) doivent être évitées (Hammar et al., 2014). Cela concerne de nombreuses espèces parmi les poissons, les crustacés, les mammifères marins, les tortues marines et les oiseaux marins.

11.1.2. Recommandations spécifiques

Pour prédire les niveaux sonores associés à la phase travaux des projets, une attention particulière doit être portée au choix du modèle de propagation du son selon la validité des hypothèses. L'incorporation d'un grand nombre de paramètres et l'utilisation de données de terrain pour la validation des résultats ainsi que l'optimisation des paramètres permet d'améliorer les modèles de paysage acoustique (Farcas et al., 2016; Kavet et al., 2016).

11.2.Recommandations pour réduire les impacts

La réduction des impacts intervient quand l'évitement est impossible pour des raisons techniques (CGDD, 2018).

11.2.1. Etat des lieux

Mesures de réduction géographique

Dans les zones géographiques susceptibles d'accueillir plusieurs aménagements EMR, le schéma de disposition des câbles doit être cohérent et doit privilégier la réduction du nombre de câble. Idéalement, plusieurs parcs éoliens offshore proches devraient par exemple être raccordés par un minimum de câbles de haute capacité, empruntant la même route (OSPAR, 2008). Dans la mesure du possible, les câbles devraient être placés dans le sens des courants de marée et parallèles aux strates rocheuses afin de réduire au maximum les mouvements latéraux et les dommages de l'armature sur le fond marin (Foubister & Penwarden, 2005).

Mesures de réduction techniques

Certains types de charrues ou techniques d'ensouillage permettent de réduire la perturbation du fond (Zostères) (Ecoplan, 2003, dans Carter, 2009) et de favoriser la recolonisation en remblayant immédiatement la tranchée dans laquelle se trouve le câble (Vize et al., 2008). Lorsqu'il n'est pas possible d'éviter les espèces et habitats vulnérables cités plus haut, il est important de prioriser la pose plutôt que l'ensouillage, la première option étant nettement moins destructrice. La question se pose en particulier pour les herbiers de phanérogames qui couvrent dans certaines régions des surfaces importantes et qui ne peuvent pas être totalement contournés (Bacci et al., 2013).

L'ensouillage du câble permet de réduire significativement le niveau de CEM et de température émis à l'interface eau-sédiment, et donc les impacts potentiels sur les espèces sensibles, ces effets diminuant rapidement avec la distance au câble. L'étendue de la zone d'influence des champs électromagnétiques émis par les câbles en phase d'exploitation est modélisable relativement facilement (voir partie 8.1), et la profondeur d'ensouillage – qui permet de tenir les organismes à distance – peut donc être définie en conséquence. D'après les modèles d'émission de CM, ensouiller un câble à 2 m permet de diminuer de 75% l'intensité du CM reçues par les espèces présentes à l'interface eau-sédiment (par rapport à l'intensité maximum présente à la surface du câble. La diminution n'est que de 40% pour un ensouillage à 1 m (Tricas & Gill, 2011).

Généralement, la profondeur d'ensouillage doit être au minimum d'1 m, quelle que soit la méthode utilisée (Nedwell & Howell, 2004 ; DONG Energy et al., 2006 ; Vize et al., 2008), mais elle peut évidemment varier en fonction du contexte écologique rencontré (notamment la nature du substrat). Dans les sédiments non consolidés par exemple (donc susceptibles d'être remaniés lors des mauvaises conditions de mer), l'ensouillage du câble implique un creusement à une profondeur plus importante (de 1 à 3 m) en utilisant la technique du *jet-plow* (Polagye et al., 2011). Pour raccorder le parc éolien de Thorntonbank (Belgique), le câble a été ensouillé sur pratiquement toute sa longueur à une profondeur de 2 m (excepté aux niveaux de couches d'argile où la profondeur d'ensouillage était de 1 m uniquement). La partie belge de la mer du

Nord présente en effet un contexte hydrodynamique particulier avec des déplacements importants de dunes de sable (Degraer et al., 2010).

Le choix des caractéristiques techniques des câbles peuvent également contribuer à réduire les impacts potentiels liés aux champs électromagnétiques. Le courant alternatif tri-phasé et les systèmes de transmission HVDC bi-polaire permettent de réduire l'émission de champ magnétique (OSPAR, 2008). L'utilisation de câbles torsadés ou l'installation de câbles individuels (CA) à proximité immédiate les uns des autres peut réduire l'aire d'influence des champs magnétiques émis. Ceci peut également être obtenu en disposant deux câbles (CC) de polarité opposée côte à côte (Öhman et al., 2007). L'utilisation de câbles en CC monopolaires est à éviter en raison du risque toxique lié aux électrodes marines, des CEM plus intenses et de la vitesse de corrosion accrue (Sutton et al., 2017).

La conductivité et la perméabilité de la gaine et de l'armature du câble peuvent être conçues de manière à réduire l'émission de CEM et l'élévation de température (Merck & Wasserthal, 2009; Nedwell & Howell, 2004).

Mesures de réduction temporelles

L'une des mesures principales pour limiter le dérangement des espèces consiste à réduire au maximum la durée des opérations à la mer durant la phase travaux (installation, démantèlement, maintenance).

Comme pour les mesures d'évitement, des mesures de réduction temporelles doivent être adoptées lors du phasage des opérations de maintenance. Celles-ci doivent être planifiées en dehors des périodes de reproduction des espèces pour limiter l'impact sur les populations présentes.

Mesures de réduction par restriction d'usages

Vis-à-vis des activités de pêche, l'enjeu principal est le risque de croche, notamment lorsque le câble ne peut pas être ensouillé. La diversité des engins de pêche sur l'ensemble du littoral français suppose que l'opérateur désirant implanter un câble sous-marin fasse au préalable un état des lieux aussi complet que possible des différentes techniques de pêche mises en œuvre dans le secteur, afin d'évaluer le niveau de risques encouru par l'installation, et donc les mesures les plus appropriées pour en assurer au mieux la protection. En fonction des risques, des secteurs peuvent être totalement interdits à tout type d'usage, ou réglementés. Ces mesures de restrictions ont pour but de limiter les risques pour les câbles ainsi que pour les pêcheurs. Elles peuvent cependant induire un impact indirect du point de vue économique (perte de zone de pêche), qui peut ou non, être compensé en cas de possibilité de report des activités ou par un potentiel effet « réserve ». Une analyse au cas par cas spécifique à chaque site d'implantation est ainsi nécessaire.

11.2.2. Recommandations spécifiques

Une autorité environnementale allemande (*Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer*) a émis une recommandation concernant l'élévation de température liée au fonctionnement des câbles sous-marins : la règle des « 2 K » (Worzyk, 2009). Celle-ci stipule que l'augmentation de température au-dessus d'un câble ensouillé ne doit pas excéder 2 K (soit 2°C) à une profondeur de 30 cm sous l'interface eau-sédiment, par rapport au fond avoisinant (non perturbé). Une autre autorité environnementale allemande (*Bundesamt für Naturschutz*) recommande elle la même limite de 2 K à 20 cm de profondeur. L'autorité maritime allemande (BSH),

en charge des permis pour l'installation des câbles sous-marins dans la ZEE, définit également la limite à 2 K d'augmentation à 20 cm sous le fond marin. La profondeur d'ensouillage peut éventuellement être augmentée pour respecter cette recommandation.

Ensouiller les câbles plutôt que les déposer sur le fond peut parfois engendrer une plus grande perturbation de l'environnement au cours de l'installation si les espèces sont principalement sensibles au remaniement sédimentaire et/ou à l'augmentation de la turbidité. Cela impliquera de trouver le bon compromis.

11.3. Mesures de compensation

L'article R. 122-5 du code de l'environnement précise que l'étude d'impact doit permettre :

- «[d'] éviter les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine et réduire les effets n'ayant pu être évités ;
- [de] compenser, lorsque cela est possible, les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine qui n'ont pu être ni évités ni suffisamment réduits. »

Selon le contexte du projet, différentes mesures de compensation peuvent être envisagées.

Compensation technique

Dans le cadre du projet FAB, plusieurs mesures de compensation écologique concernent des espèces ingénieurs formant les herbiers sous-marins. Sur le site pilote hydrolien de Paimpol-Bréhat, le câble de raccordement ne pouvait éviter complètement des herbiers de *Zostera noltei* et *Z. marina* au niveau de l'atterrissage. Une technique de transplantation des plants situés sur la route du câble vers une zone adjacente favorable à l'herbier a donc été testée (Barillier et al., 2013). Le suivi des parcelles transplantées a été assuré pendant 6 ans. Le résultat est que la recolonisation par *Z. noltei* est satisfaisante alors que celle de *Z. marina* est plus difficile. Des projets similaires sont en cours sur des herbiers de posidonies à Majorques et Ibiza¹³.

En Angleterre, le projet KIS-ORCA (www.kis-orca.eu) propose de regrouper l'ensemble des informations sur les câbles sous-marins et les infrastructures d'énergie marine renouvelable entourant le Royaume Uni. Des cartes répertoriant la localisation des infrastructures sont disponibles au téléchargement. Ce genre d'approche est prometteur pour une meilleure cohabitation entre les différentes activités maritimes. En outre, la mise en place et l'aide au financement de programmes scientifiques peuvent être envisagées afin d'améliorer les connaissances.

Compensation financière

Enfin, quand la compensation écologique n'est pas pertinente, une compensation financière peut être envisagée. C'est par exemple le cas des conflits d'usage en lien avec les activités de pêche ou de transport maritime. Au Canada et aux Etats-Unis,

¹³ <https://www.ree.es/en/press-office/press-release/2018/04/red-electrica-and-imedea-begin-posidonia-oceanica-planting-works>

des programmes spécifiques ont été mis en place entre des entreprises impliquées dans la pose de câbles et des associations de pêcheurs (Coffen-Smout & Herbert, 2000). L'objectif de ces mesures n'est pas de réduire l'impact environnemental d'un projet donné mais bien d'en améliorer l'acceptabilité sociale (Reilly et al., 2016).

12. Suivi environnemental

Les suivis environnementaux servent deux objectifs distincts. Dans le cadre réglementaire des projets industriels, ils contribuent à (i) valider l'étude d'impact en s'assurant que les impacts réels sont conformes aux prévisions initiales et/ou en signalant et en analysant ceux qui n'ont pas pu être anticipés, et à (ii) vérifier la pertinence et l'efficacité des mesures d'évitement et de compensation mises en place. Dans une approche scientifique plus générale, ils permettent d'améliorer (iii) les connaissances sur les interactions entre les câbles électriques sous-marins et l'écosystème côtier, et à long terme (iv) la conception des aménagements ultérieurs et l'évaluation de leurs impacts (Moura et al., 2010). Le paragraphe se conclut sur la nécessité d'assurer l'accessibilité de ces données au plus grand nombre.

12.1. Suivis réglementaires

Le suivi environnemental réglementaire est une étape clé dans l'accompagnement et l'acceptabilité des projets d'aménagement en milieu marin de grande envergure, tels que l'installation des câbles électriques sous-marins. Les considérations suivantes sont en grande partie reprises du rapport de 2011.

Avant tout, il est important de souligner qu'une caractérisation correcte de l'état initial (avant l'installation) constitue un prérequis indispensable au bon déroulement du suivi environnemental. Cela implique de décrire convenablement la variabilité naturelle spatiale et temporelle des paramètres à suivre.

Il est nécessaire d'élaborer un programme de suivi qui couvre toutes les phases du projet (travaux, exploitation). Ce suivi doit concerner aussi bien les effets de l'aménagement (*i.e.* le degré de perturbation des paramètres environnementaux concernés) que les impacts sur les composantes de l'écosystème concernées (*i.e.* les récepteurs).

Plusieurs autres aspects essentiels doivent être considérés lors de l'élaboration du programme de suivi :

- L'accent doit être mis sur les impacts a priori les plus significatifs et/ou pour lesquels il existe des incertitudes scientifiques (**Tableau 4**). Cette considération doit guider les choix des paramètres du milieu et des compartiments de l'écosystème à surveiller.
- Le protocole de suivi (nombre et localisation des stations ; calendrier et fréquence d'échantillonnage) doit s'appuyer sur les guides méthodologiques existants, et sur les protocoles découlant de ces mêmes guides et validés par la communauté scientifique.
- Retenir un (éventuellement plusieurs) site de référence qui ne soit pas impacté (directement ou indirectement) par l'aménagement. Seul le suivi en parallèle de ce site de référence permettra d'établir si les éventuels impacts observés sont effectivement dus à l'aménagement ou s'ils résultent de causes extérieures.

Le suivi doit également permettre de caractériser les impacts cumulés. Par exemple, si plusieurs câbles sont installés sur la même zone d'implantation, il s'agit de comparer les impacts réels au regard de ce qui était attendu pour un câble unique. Dans la mesure du possible, les cumuls d'impacts issus de différentes pressions anthropiques doivent être déterminés (*e.g.* analyse cartographique par

superposition de couches d'information afférentes ; analyse bibliographique pour identifier les modes de cumul de différentes pressions – synergie, antagonisme...).

Plus concrètement, différents types de suivis peuvent être entrepris suite à la pose de câbles électriques sous-marins (Droit & Delort, 2010)

- Un premier suivi peut intervenir peu de temps (3 mois) après la pose. Il permet de vérifier la profondeur d'ensouillage du câble ou les moyens de fixation, et d'estimer les impacts de la phase d'installation du câble sur les différents récepteurs (habitat, composition faunistique du peuplement benthique).
- Un suivi de l'évolution des fonds marins est souhaitable au maximum un an après la pose pour connaître les conséquences à court terme de l'aménagement en phase d'exploitation. Ensuite, le suivi peut être poursuivi annuellement ou tous les 5 à 10 ans selon les résultats du premier suivi annuel (MEEM, 2017). La fréquence du suivi peut être plus resserrée dans le temps pour mesurer l'impact sur des habitats ou des espèces remarquables (herbiers de phanérogames ; banc de maërl) et sensibles qui n'auraient pas pu être épargnés.
- En cas d'hydrodynamisme particulièrement fort, pouvant entraîner des déplacements assez importants des vagues de sable, une vérification régulière de l'ensouillage du câble est recommandée (Degraer et al., 2010).

Un suivi de la granulométrie sur des stations judicieusement positionnées le long de la route du câble peut apporter des informations précieuses pour évaluer les changements à long terme (plusieurs années) du régime de transport sédimentaire et pour identifier les principales voies de transfert de sédiment dues à l'aménagement (Rees et al., 2006).

Au-delà des aspects environnementaux, le suivi peut aussi concerner les usages de la zone d'installation des câbles. En fonction du contexte sociétal, il peut être intéressant d'analyser de façon fine les trajectoires des navires de pêche qui travaillent généralement dans les zones voisines. Ce suivi peut être assuré grâce au système VMS (*Vessel Monitoring System*) qui équipe les navires de pêche de plus de 12 mètres de longueur aujourd'hui (mais avec une résolution temporelle de l'ordre de l'heure). Les navires de taille inférieure à 12 m ne sont pas géolocalisés.

12.2. Apports scientifiques réglementés

Les suivis environnementaux doivent permettre d'améliorer les connaissances scientifiques associées à l'impact environnemental des câbles. La mise en place et l'aide au financement de programmes scientifiques dédiés peuvent être envisagées afin d'améliorer ces connaissances. Des sujets de recherche spécifiques sont identifiés.

En France, il existe à ce jour très peu d'études sur la colonisation des câbles par les communautés benthiques. La mise en place de protocoles rigoureux permettrait d'augmenter les connaissances sur cette thématique et apporter des éléments de réponse sur l'effet « récif » que peuvent induire les câbles sous-marins sur le long terme. De même, un suivi des communautés halieutiques serait bénéfique à la fois à la recherche et aux industriels qui pourraient alors apporter des preuves d'un potentiel effet « réserve ».

Le suivi environnemental peut aussi contribuer à améliorer le niveau de connaissances sur les impacts du bruit pendant la phase de construction (un état initial de l'environnement sonore du site doit être réalisé avant travaux), des CEM et de l'élévation de température (pendant la phase d'exploitation) au voisinage des câbles sous-marins (EIHA, 2008, dans Merck & Wasserthal, 2009).

Une attention particulière doit être accordée au suivi *in situ* de l'intensité, de la fréquence et de la longueur d'onde des CEM générés par les câbles en fonctionnement (EMEC, 2008; Gill et al., 2009; Moura et al., 2010). De même, des mesures de températures *in situ* au voisinage du câble doivent être entreprises pour vérifier que les variations de ce paramètre sont conformes aux anticipations et pour analyser les changements potentiels de la communauté benthique au voisinage du câble (Merck & Wasserthal, 2009).

Enfin, pour ce qui concerne le benthos et les poissons fréquentant la zone, un suivi par transects vidéo et photos peut être effectué sur le trajet du câble et son environnement immédiat en parallèle des suivis envisagés par les méthodes classiques de prélèvements, à la benne et au chalut respectivement.

12.3. Accessibilité des données

La mise en commun des données de suivi des différents projets de câbles électriques sous-marins permettrait de réduire les incertitudes actuelles quant aux impacts potentiels des émissions acoustiques en phase travaux, et des émissions thermique et électromagnétique en phase d'exploitation. Plus largement, la mise en commun des données de suivis existantes pour l'ensemble des activités humaines susceptibles d'interférer avec les projets de câbles électriques sous-marins permettrait d'évaluer plus rigoureusement les impacts cumulés et d'envisager des études d'impact à l'échelle écosystémique.

A terme et pour toutes les études environnementales, l'accessibilité des données et des résultats provenant des suivis est essentielle pour favoriser l'amélioration des connaissances relatives aux impacts de l'aménagement des territoires maritimes. Cette étape demande une implication forte des services de l'Etat en charge de la gestion des données environnementales et de l'information issue des suivis ; la méthodologie d'évaluation des impacts cumulés reste par ailleurs à définir, ce qui dépasse le cadre des études d'impact demandées par l'administration pour l'acceptation des projets industriels.

En Angleterre, le projet KIS-ORCA (www.kis-orca.eu) propose de regrouper l'ensemble des informations sur les câbles sous-marins et les infrastructures d'énergie marine renouvelable entourant le Royaume Uni. Des cartes répertoriant la localisation des infrastructures sont disponibles au téléchargement. Ce genre d'approche est prometteur pour une meilleure cohabitation entre les différentes activités maritimes, via la planification spatiale.

13. Conclusions

La **Figure 15** illustre les principaux impacts potentiels pouvant être causés par les câbles électriques sous-marins.

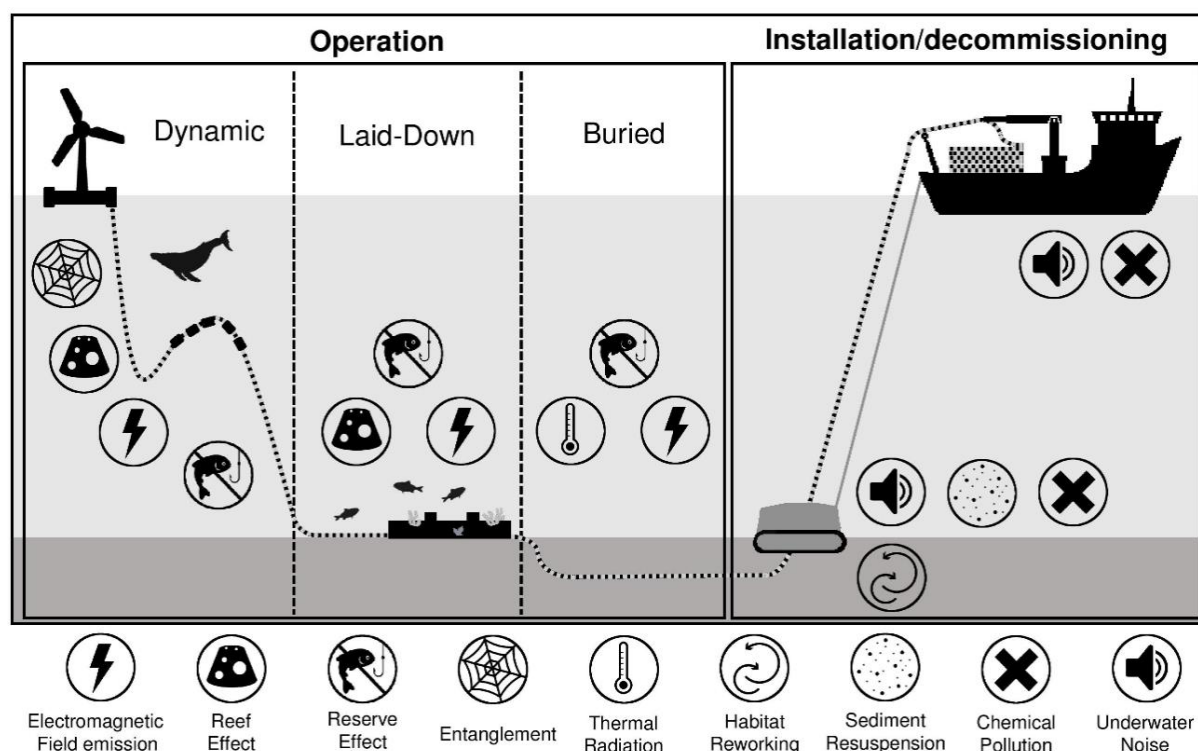


Figure 15. Diagramme des effets engendrés par les différents types d'immersion de câbles sous-marins (dynamique, posé ou ensouillé) pendant les phases de travaux (pose/démantèlement) et d'exploitation (Taormina et al., 2018).

Les impacts écologiques des câbles électriques sous-marins renvoient d'une part à des questions environnementales classiques inhérentes à toute structure artificielle installée sur les fonds marins (modification du substrat) pour lesquelles il existe un recul scientifique généralement important, et d'autre part à des questions plus inédites, liées au passage du courant électrique dans les câbles (champ électromagnétique ; échauffement), qui ont fait l'objet de beaucoup moins d'attention jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle. L'augmentation du nombre de projet de câbles électriques sous-marins, notamment lié au développement des EMR, et le fait que de plus en plus de pressions anthropiques soient susceptibles de se conjuguer à un endroit donné ou sur un récepteur biologique donné, font qu'il devient indispensable d'évaluer le plus rigoureusement possible les divers impacts potentiels des câbles sur les écosystèmes marins.

Le **Tableau 4** propose quant-à-lui une hiérarchisation des impacts potentiels associés aux effets induits par les câbles électriques sous-marins. Parmi les interactions analysées entre les *effets* et les compartiments biologiques pris en compte (*i.e.* benthos, poissons), et dans le périmètre sélectionné pour cette étude (*i.e.* uniquement les câbles dont RTE a la charge), les *impacts* sont négligeables à faibles pour une majeure partie d'entre elles, quelle que soit la technique de pose.

Tableau 4. Bilan et hiérarchisation des impacts potentiels associés aux différents effets induits par les câbles électriques sous-marins. Ces estimations se basent sur les résultats des travaux de la littérature scientifique et sur du « dire d'expert » lorsque les connaissances sont insuffisantes.

			RECEPTEURS DE L'ECOSYSTEME IMPACTES									Ensemble de l'écosystème concerné	
			Benthos			Poissons			Poissons migrateurs + élasmobranches				
			TECHNIQUE DE POSE										
PARAMETRES AFFECTES	PHASE CONCERNEE		E	P	D	E	P	D	E	P	D		
	Substrat:	Remaniement	Tr.	1	1	1	1	1	NA	1	1	NA	2
		Structures artificielles	Expl.	NA	1	2	NA	1	2	NA	1	1	1
	Turbidité		Tr.	1	1	NA	1	1	NA	1	1	NA	1
	Hydrodynamique		Expl.	NA	1	NA	NA	1	NA	NA	1	NA	1
	Température		Expl.	2	1	1	2	NA	NA	NA	NA	NA	2
	Chimie / Contaminant		Tr.	1	1	NA	1	1	NA	1	1	NA	1
			Expl.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Acoustique		Tr.	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
	Champs électro-magnétiques		Expl.	1	2	NA	1	2	2	2	2	3	2
	Restrictions d'usage		Expl.	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2
Effets cumulés			Tr., Expl.	?	?	?	?	?	?	?	?	?	

Ce tableau synthétise de manière qualitative l'information récoltée sur l'impact environnemental des câbles électriques sous-marins. Il ne saurait en aucun cas être considéré comme exhaustif et la consultation des chapitres correspondants est indispensable en vue d'une utilisation dans le cadre d'une étude spécifique.

Signification des codes et abréviations:

	pas d'interaction	Inconnu	Négligeable	Faible	Moyen	Fort
Degré d'impact:	NA	?				
Degré d'incertitude:			1	2	3	

Phase concernée: Tr. = Travaux; Expl. = Exploitation

Technique de pose: E = Ensouillé; P = Posé; D = Dynamique

Cette conclusion générale s'explique principalement par le caractère limité des perturbations générées par un câble, que ce soit dans le temps (la phase de travaux d'installation est généralement courte) ou dans l'espace (emprises du chantier et du câble lui-même limitées). Cependant, on ne doit pas perdre de vue que l'intensité d'un impact dépend de l'espèce considérée, comme du stade de son cycle de vie.

Concernant l'impact du remaniement du substrat sur le benthos (en phase travaux), celui-ci est jugé faible du fait qu'une majorité d'habitats et d'espèces benthiques récupère relativement facilement (fonds meubles peuplés d'espèces d'invertébrés résilientes, à cycle de vie court). L'évitement des zones fonctionnelles est recommandé pour les espèces halieutiques, et le niveau d'impact est considéré comme négligeable en dehors de ces espaces. Une analyse au cas-par-cas reste cependant indispensable : en effet, certaines catégories d'habitats et d'espèces, particulièrement vulnérables et/ou peu résilients (e.g. espèces ingénieurs), pourraient subir un impact plus fort s'il n'est pas possible de les éviter lors du choix de la route du câble.

Les autres interactions pour lesquelles l'impact est jugé moyen sont i) l'effet « récif », du fait qu'il se produit sur le long terme, et dans le sens où la composition de la communauté benthique peut changer radicalement par rapport à l'état de référence avec de possibles répercussions sur la chaîne trophique (mais sans que cela soit forcément négatif pour l'écosystème) ; ii) la modification du champ électromagnétique vis-à-vis d'espèces migratrices sensibles et d'élasmobranches, notamment lorsque le câble n'est pas ensouillé ; iii) les conséquences des restrictions d'usages sur la route du câble, qui pourraient potentiellement conduire à une amélioration de l'écosystème par effet de jachère.

L'évaluation de ces trois types d'impacts potentiels reste incertaine car la compréhension des mécanismes écologiques sous-jacents demeure limitée. Elle appelle donc à un effort de recherche scientifique supplémentaire, ciblé sur les câbles électriques sous-marins et basé sur des suivis maintenus sur des durées suffisantes. On notera malgré tout que des travaux scientifiques récents, entrepris depuis la synthèse bibliographique réalisée en 2011, ont permis d'abaisser le niveau d'incertitude pour tous les compartiments biologiques analysés. En particulier, l'évaluation des impacts induits par les CEM d'origine anthropique apparaît comme un domaine de recherche particulièrement actif.

L'analyse des nombreux documents consultés (dont une majorité d'articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture) a permis d'établir une synthèse hiérarchisée des niveaux d'impacts associés à l'installation et à l'exploitation d'un câble électrique sous-marins. Le tableau récapitulatif qui en découle doit servir de guide à l'évaluation des projets à venir, et doit nécessairement être adapté au contexte écologique local.

Une limite forte à l'évaluation de ces impacts réside dans le fait qu'ils sont le plus souvent évalués à l'échelle individuelle (en condition de laboratoire) alors que l'appréciation des impacts n'a réellement de sens qu'à l'échelle populationnelle (l'unité biologique assurant le maintien de l'espèce via des fonctions essentielles telles que la reproduction). Enfin, la problématique de l'évaluation des impacts cumulés abordée dans ce rapport, même si elle n'est pas spécifique aux câbles électriques sous-marins, mérite clairement d'être approfondie. Une approche collaborative et multidisciplinaire est essentielle afin de progresser dans ce domaine.

14. Glossaire

Ecosystème : Système formé par un espace défini (biotope) et par l'ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent.

Effet : décrit la conséquence objective de l'interaction d'un projet d'aménagement sur l'environnement.

Enjeux écologiques : éléments de l'écosystème, ou de son fonctionnement, dont on doit rétablir ou maintenir le bon état.

Espèce benthique : espèce vivant sur le fond (bulot, tourteau...).

Espèce pélagique : espèce vivant en pleine eau (sardine, maquereau...).

Paramètre environnemental : caractéristique physico-chimique du milieu marin (nature du fond, température, turbidité, bruit...).

Frayère : lieu de reproduction et/ou lieu où les poissons déposent leurs œufs.

Habitat : Espace de vie, partie de l'environnement définie par un ensemble de paramètres environnementaux, et dans laquelle vit un individu, une population, une espèce ou un groupe d'espèces.

Halieutique : Qui concerne la pêche. Il s'agit de la science de l'exploitation des ressources vivantes aquatiques intégrant les aspects de gestion, d'exploitation et de restauration.

Impact : décrit les conséquences positives ou négatives de l'effet d'un paramètre environnemental sur un récepteur de l'écosystème, selon une échelle de sensibilité.

Impacts cumulés : impacts dus (i) à un même effet cumulé dans l'espace et/ou dans le temps ou (ii) à des effets divers agissant conjointement sur un même « récepteur ». La nature et l'amplitude de ces impacts cumulés sont très difficilement prévisibles car ils ne sont pas simplement la somme des impacts agissant de manière isolée dans l'espace et/ou le temps.

Nourricerie : Site de grossissement des espèces, permettant le passage de l'état larvaire à adulte. Lieu riche en nourriture permettant la croissance d'une espèce donnée.

OSPAR : la convention OSPAR (pour Oslo-Paris), ou convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, a pour objectif de prévenir et de supprimer les pollutions et de protéger le milieu marin dans l'Atlantique au large de l'Europe.

Poïkilotherme : Se dit d'un organisme vivant dont la physiologie et le comportement sont affectés par les variations quotidiennes et saisonnières de la température.

Population : groupe d'individus appartenant à une même espèce, occupant tout ou partie d'un même espace géographique et susceptibles de se reproduire entre eux.

Ragage : Détérioration due au frottement d'un corps quelconque (en particulier d'un câble) sur un autre corps.

Récepteur de l'écosystème : compartiment de l'écosystème (habitat, poissons, benthos...) ou processus écologique associé à cet écosystème (réseau trophique, recrutement...).

Zone euphotique : zone aquatique comprise entre la surface et la profondeur maximale d'un lac ou d'un océan, exposée à une lumière suffisante pour que la photosynthèse se produise.

15. Références

- Aguilar de Soto, N. (2016). Peer-Reviewed Studies on the Effects of Anthropogenic Noise on Marine Invertebrates: From Scallop Larvae to Giant Squid. In *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, A.N. Popper, A. Hawkins, eds. (Springer New York), pp. 17–26.
- Amara, I., Miled, W., Slama, R.B., Ladhari, N. (2018). Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment. A review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 57, 115–130.
- Andersen, J., Stock, A., Heinänen, S., Mannerla, M., Vinther, M. (2013). Human uses, pressures and impacts in the eastern North Sea. *Aarhus Univ. DCE-Dan. Cent. Environ. Energy* 136.
- Andrulewicz, E., Napierska, D., Otremba, Z. (2003). The environmental effects of the installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: a case study of the Polish Marine Area of the Baltic Sea. *J. Sea Res.* 49, 337–345.
- Ardelean, M., Minnebo, P. (2015). HVDC submarine power cables in the world. *Eur. Comm. JRC Tech. Report–2015. EUR 27527 EN*; doi: 10.2790/95735.
- Asch, R.G., Checkley Jr., D.M. (2013). Dynamic height: A key variable for identifying the spawning habitat of small pelagic fishes. *Deep-Sea Res. I* 71, 79–91.
- Atkins, J.P., Burdon, D., Elliott, M., Gregory, A.J. (2011). Management of the marine environment: Integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 215–226.
- Avrilla, J.L. (1980). Bilan des connaissances sur la biologie et la pêche du hareng (*Clupea Harengus* L.) dans le golfe de Gascogne. *Rapport IFREMER*, 94 pp.
- Bacci, T., Rende, S.F., Nonnis, O., Maggi, C., Izzi, A., Gabellini, M., Massara, F., Di Tullio, L. (2013). Effects of laying power cables on a *Posidonia oceanica* (L.) Delile prairie: the study case of Fiume Santo (NW Sardinia, Italy). *J. Coast. Res.* 868–873.
- Bald, J., del Campo, A., Franco, J., Galparsoro, I., González, M., Liria, P., Muxika, I., Rubio, A., Solaun, O., Uriarte, A., et al. (2010). Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters. *Rev. Investig. Mar.* 17, 62–138.
- Bald, J., Hernandez, C., Uriarte, A., Castillo, J.A., Ruiz, P., Ortega, N. (2015). Acoustic characterization of submarine cable installation in the Biscay marine energy platform (BIMEP). *Bilbao Marine Energy Week*, 20-24 April 2015.
- Ball, R.E., Oliver, M.K., Gill, A.B. (2016). Early life sensory ability—ventilatory responses of thornback ray embryos (*Raja clavata*) to predator-type electric fields. *Dev. Neurobiol.* 76, 721–729.
- Barillier, A., Dubreuil, J., Hily, C. (2013). EDF Paimpol-Bréhat tidal power plant project: first results of experimental restoration of *Zostera* seagrass. *SHF, Marine Renewable Energy*, 9-10 octobre 2013, Brest.
- Batty, R.S., Leakey, R.J., Treasurer, J. (2006). Progress report on Algal-mediated turbidity and larval performance in marine fish: End of 2nd Year (Ardtoe: SAMSardtoe).
- Bochert, R., Zettler, M.L. (2004). Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 25, 498–502.

- Boehlert, G.W., Gill, A.B. (2010). Environmental and Ecological Effects of Ocean Renewable Energy Development: A Current Synthesis. *Oceanography* 23, 68–81.
- Bonar, P.A.J., Bryden, I.G., Borthwick, A.G.L. (2015). Social and ecological impacts of marine energy development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47, 486–495.
- Borja, Á., Galparsoro, I., Solaun, O., Muxika, I., Tello, E.M., Uriarte, A., Valencia, V. (2006). The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 66, 84–96.
- Cada, G.F., Bevelhimer, M.S., Riemer, K.P., Turner, J.W. (2011). Effects on Freshwater Organisms of Magnetic Fields Associated with Hydrokinetic Turbines (Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory), 38 pp.
- Cao, S., Wang, J., Chen, H., Chen, D. (2011). Progress of marine biofouling and antifouling technologies. *Chin. Sci. Bull.* 56, 598–612.
- Carlier, A., Delpech, J.-P. (2011). Impacts des câbles sous-marins sur les écosystèmes côtiers. Cas particuliers des câbles électriques de raccordement des parcs éoliens offshore (compartiments benthiques et halieutiques) (Ifremer). 59 pp.
- Carr, E.R., Wingard, P.M., Yorty, S.C., Thompson, M.C., Jensen, N.K., Roberson, J. (2007). Applying DPSIR to sustainable development. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 14, 543–555.
- Carroll, A.G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B. (2016). A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish and invertebrates. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 9–24.
- Carter, L., Burnett, D., Drew, S., Marle, G., Hagadorn, L., Bartlett-McNeil, D., Irvine, N. (2009). Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World, UNEP-WCMC Biodiversity Series No. 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC. 64 pp.
- CGDD. (2018). Évaluation environnementale. Guide d'aide à la définition des mesures ERC. 132 pp.
- Codarin, A., Wysocki, L.E., Ladich, F., Picciulin, M. (2009). Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1880–1887.
- Coffen-Smout, S., Herbert, G.J. (2000). Submarine cables: a challenge for ocean management. *Mar. Policy* 24, 441–448.
- Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewski, G., Staines, G., Gill, A., Hutchison, I., O'Hagan, A.M., Simas, T., Bald, J., Sparling C., Wood, J., and Masden, E. (2016). Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. 199 pp.
- Cormier, R., Elliott, M., Rice, J. (2019). Putting on a bow-tie to sort out who does what and why in the complex arena of marine policy and management. *Sci. Total Environ.* 648, 293–305.
- Costa, D.P. (2012). A Bioenergetics Approach to Developing a Population Consequences of Acoustic Disturbance Model. In *The Effects of Noise on Aquatic Life*, A.N. Popper, A. Hawkins, eds. (New York: Springer New York), pp. 423–426.
- CREOCEAN (2012). Projet “NEMO” de câble sous-marin d'énergie entre la Belgique et le Royaume-Uni, traversant la zone contigüe française (Mer du Nord). Analyse des effets du projet sur l'environnement (Ifs: Consortium NATIONAL GRID - ELIA / Coordinateur de projet : PMSS).

- Cutts, C.J., Batty, R.S. (2005). Progress report on 'Algal-mediated turbidity and larval performance in marine fish': Primary milestone 1 (Ardtoe: SAMSardtoe). 20 pp.
- Dailianis, T., Smith, C.J., Papadopoulou, N., Gerovasileiou, V., Sevastou, K., Bekkby, T., Bilan, M., Billett, D., Boström, C., Carreiro-Silva, M., et al. (2018). Human activities and resultant pressures on key European marine habitats: An analysis of mapped resources. *Mar. Policy* 98, 1–10.
- De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B., Degraer, S. (2015). Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia* 756, 37–50.
- Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. (2010). Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Early Environmental Impact Assessment and Spatio-Temporal Variability. Report by Ghent University, Institute for Agricultural and Fisheries Research (ILVO), Management Unit of the North Sea Mathematical Models (MUMM), Research Institute for Nature and Forest (INBO), and Royal Belgian Institute of Natural Sciences (RBINS). 184 pp.
- Delage, N., Le Pape, O. (2016). Inventaire des zones fonctionnelles pour les ressources halieutiques dans les eaux sous souveraineté française. Première partie : définitions, critères d'importance et méthode pour déterminer des zones d'importance à protéger en priorité (Rennes: Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer). 30 pp.
- Desprez, M., Pearce, B., Bot, S.L. (2010). The biological impact of overflowing sands around a marine aggregate extraction site: Dieppe (eastern English Channel). *ICES J. Mar. Sci. J. Cons.* 67, 270–277.
- DONG Energy, Vattenfal, Danish Energy Authority, and Danish Forest and Nature Agency (2006). Danish Offshore Wind Key Environmental Issues. 142 pp.
- Dooling, R.J., Leek, M.R., Popper, A.N. (2015). Effects of noise on fishes: What we can learn from humans and birds. *Integr. Zool.* 10, 29–37.
- Droit, J., Delort, E. (2010). Canalisations et câbles sous-marins. Etat des connaissances. Préconisations relatives à la pose, au suivi, et à la dépose de ces ouvrages sur le Domaine Public Maritime Français (Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales). 179 pp.
- Dufournaud, N. (2018). Apport de la vidéo sous-marine pour l'étude de la colonisation par la mégafaune benthique des structures artificielles associées aux projets d'énergies marines renouvelables. Rapport de Master 1. Université de Bretagne Occidentale. 34 pp.
- Dunham, A., Pegg, J.R., Carolsfeld, W., Davies, S., Murfitt, I., Boutillier, J. (2015). Effects of submarine power transmission cables on a glass sponge reef and associated megafaunal community. *Mar. Environ. Res.* 107, 50–60.
- Emeana, C.J., Hughes, T.J., Dix, J.K., Gernon, T.M., Henstock, T.J., Thompson, C.E.L., Pilgrim, J.A. (2016). The thermal regime around buried submarine high-voltage cables. *Geophys. J. Int.* 206, 1051–1064.
- EMEC (2008). Environmental Impact Assessment (EIA). Guidance for developers at the European Marine Energy Centre. 21 pp.
- Farcas, A., Thompson, P.M., Merchant, N.D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.* 57, 114–122.
- Fiksen, Ø., Aksnes, D.L., Flyum, M.H., Giske, J. (2002). The influence of turbidity on growth and survival of fish larvae: a numerical analysis. *Hydrobiologia* 484, 49–59.

- Fissel, D.B., Jiang, J. (2011). Three-dimensional numerical modeling of sediment transport for coastal engineering projects in British Columbia, Canada. In OCEANS'11 MTS/IEEE KONA, pp. 1–9.
- Foden, J., Rogers, S.I., Jones, A.P. (2011). Human pressures on UK seabed habitats: a cumulative impact assessment. Mar. Ecol. Prog. Ser. 428, 33–47.
- Formicki, K., Bonisławska, M., Jasiński, M. (1997). Spatial orientation of trout (*Salmo trutta* L.) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walb.) embryos in natural and artificial magnetic fields. Acta Ichthyol. Piscat. 27, 29–40.
- Formicki, K., Sadowski, M., Tański, A., Korzelecka-Orkisz, A., Winnicki, A. (2004). Behaviour of trout (*Salmo trutta* L.) larvae and fry in a constant magnetic field. J. Appl. Ichthyol. 20, 290–294.
- Foubister, L., Penwarden, G. (2005). EMEC tidal test facility Fall of Warness Eday, Orkney: environmental statement. AURORA Environ. Ltd REP143-01-02 20071115. 159 pp.
- Fricke, M.B., Rolfes, R. (2015). Towards a complete physically based forecast model for underwater noise related to impact pile driving. J. Acoust. Soc. Am. 137, 1564–1575.
- Fulford, R.S., Peterson, M.S., Wu, W., Grammer, P.O. (2014). An ecological model of the habitat mosaic in estuarine nursery areas: Part II—Projecting effects of sea level rise on fish production. Ecol. Model. 273, 96–108.
- Gérard, A., Thouard, E., Véron, G., Denis, J., Thébaud, O. (2008). Les récifs artificiels - Etat des connaissances et recommandations. 22 pp.
- Gill, A., Gloyne-Phillips, I., Neal, K., Kimber, J. (2005). Electromagnetic fields. Review. The potential effects of electromagnetic fields generated by sub-sea power cables associated with offshore wind farm developments on electrically and magnetically sensitive marine organisms-a review. Rep. No COWRIE 1. 128 pp.
- Gill, A., Huang, Y., Gloyne-Philips, I., Metcalfe, J., Quayle, V., Spencer, J., Wearmouth, V. (2009). COWRIE 2.0 Electromagnetic Fields (EMF) Phase 2: EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub-sea electricity cables of the type used by the offshore renewable energy industry. Comm. COWRIE Ltd Proj. Ref. COWRIE-EMF-1-06 68. 128 pp.
- Gimpel, A., Stelzenmüller, V., Cormier, R., Floeter, J., Temming, A. (2013). A spatially explicit risk approach to support marine spatial planning in the German EEZ. Mar. Environ. Res. 86, 56–69.
- Goodsir, F., Bloomfield, H.J., Judd, A.D., Kral, F., Robinson, L.A., Knights, A.M. (2015). A spatially resolved pressure-based approach to evaluate combined effects of human activities and management in marine ecosystems. ICES J. Mar. Sci. J. Cons. 72, 2245–2256.
- Greater Gabbard Offshore Winds Limited (2005). Greater Gabbard Offshore Wind Farm. Environmental Statement. 663 pp.
- Guardiola, F.A., Cuesta, A., Meseguer, J., Esteban, M.A. (2012). Risks of Using Antifouling Biocides in Aquaculture. Int. J. Mol. Sci. 13, 1541–1560.
- Halpern, B.S., Fujita, R. (2013). Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis. Ecosphere 4(10), art 131.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., Fox, H.E., et al. (2008). A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. Science 319, 948–952.
- Hammar, L., Wikström, A., Molander, S. (2014). Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod. Renew. Energy 66, 414–424.

- Handeland, S.O., Imsland, A.K., Björnsson, B.T., Stefansson, S.O., Porter, M. (2013). Physiology during smoltification in Atlantic salmon: effect of melatonin implants. *Fish Physiol Biochem* 39, 1079–1088.
- Hanlon, R.T., Messenger, J.B. (2017). *Cephalopod behaviour* (Cambridge, United Kingdom ; New York: Cambridge University Press).
- Hays, G.C. (2013). Animal Navigation: Salmon Track Magnetic Variation. *Curr. Biol.* 23, R144–R145.
- Helvik, J.V., Drivenes, Ø., Harboe, T., Seo, H.-C. (2001). Topography of different photoreceptor cell types in the larval retina of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*). *J. Exp. Biol.* 204, 2553–2559.
- Hoff, G.R. (2010). Identification of skate nursery habitat in the eastern Bering Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 403, 243–254.
- Holon, F., Mouquet, N., Boissery, P., Bouchoucha, M., Delaruelle, G., Tribot, A.-S., Deter, J. (2015). Fine-Scale Cartography of Human Impacts along French Mediterranean Coasts: A Relevant Map for the Management of Marine Ecosystems. *PLOS ONE* 10, e0135473.
- Hooper, T., Austen, M. (2014). The co-location of offshore windfarms and decapod fisheries in the UK: Constraints and opportunities. *Mar. Policy* 43, 295–300.
- Hutchison, Z.L., Sigray, H.H., Gill, A.B., King, J., Gibson, C. (2018). Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables (Sterling (VA): U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management). OCS Study BOEM 2018-003. 251 pp.
- James, E., Smith, K., Gallien, D.R., Khan, A. (2017). Observing Cable Laying and Particle Settlement During the Construction of the Block Island Wind Farm. Final Report to the U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs (BOEM). 147 pp.
- JASCO Research Ltd. (2006). Vancouver Island transmission reinforcement project: atmospheric and underwater acoustics assessment. Report prepared for British Columbia Transmission Corporation. 49 pp.
- Jensen, C., Mampaey, B., Antic, J., Chevalier, P., Tricoli, S., Georg, B., van Stekelenburg, F., Sorin Pispiris, C., Lopez Menchero Cordoba, M.D., MacPhail, A. (2009). Working Group B1.21 - Third-Party Damage to Underground and Submarine Cables (Paris, France: CIFRE). 117 pp.
- Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B., Schmidt, H. (2011). *Computational ocean acoustics* (Springer Science and Business Media).
- Jørgensen, L.L., Jensen, S.-K., Holte, B., Bakkeplass, K. (2011). Fauna analyses of a possible electrical cable corridor in the Hardanger fjord (Havforskningsinstituttet, Bergen (Norway)). 26 pp.
- Judd, A.D., Backhaus, T., Goodsir, F. (2015). An effective set of principles for practical implementation of marine cumulative effects assessment. *Environ. Sci. Policy* 54, 254–262.
- Kalmijn, A.J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science* 218, 916–918.
- Karlsson, J., Eklund, B. (2004). New biocide-free anti-fouling paints are toxic. *Mar. Pollut. Bull.* 49, 456–464.
- Katranitsas, A., Castritsi-Catharios, J., Persoone, G. (2003). The effects of a copper-based antifouling paint on mortality and enzymatic activity of a non-target marine organism. *Mar. Pollut. Bull.* 46 (11), 1491-1494.

- Kavet, R., Wyman, M.T., Klimley, A.P., Vergara, X. (2016). Assessment of Potential Impact of Electromagnetic Fields from Undersea Cable on Migratory Fish Behavior (Electric Power Research Institute (EPRI)). 73 pp.
- Kempster, R.M., Hart, N.S., Collin, S.P. (2013). Survival of the Stillest: Predator Avoidance in Shark Embryos. *PLoS One* 8, 1–6.
- Kilfoyle, A.K., Jermain, R.F., Dhanak, M.R., Huston, J.P., Spieler, R.E. (2018). Effects of EMF emissions from undersea electric cables on coral reef fish. *Bioelectromagnetics* 39, 35–52.
- Kimber, J.A., Sims, D.W., Bellamy, P.H., Gill, A.B. (2011). The ability of a benthic elasmobranch to discriminate between biological and artificial electric fields. *Mar. Biol.* 158, 1–8.
- Kimber, J.A., Sims, D.W., Bellamy, P.H., Gill, A.B. (2014). Elasmobranch cognitive ability: using electroreceptive foraging behaviour to demonstrate learning, habituation and memory in a benthic shark. *Anim. Cogn.* 17, 55–65.
- Knights, A.M., Koss, R.S., Robinson, L.A. (2013). Identifying common pressure pathways from a complex network of human activities to support ecosystem-based management. *Ecol. Appl.* 23, 755–765.
- Kogan, I., Paull, C.K., Kuhn, L.A., Burton, E.J., Von Thun, S., Gary Greene, H., Barry, J.P. (2006). ATOC/Pioneer Seamount cable after 8 years on the seafloor: Observations, environmental impact. *Cont. Shelf Res.* 26, 771–787.
- Kostecki, C., Le Pape, O. (2011). Analyse de l'effet de différentes pressions de nature anthropique sur les populations de soles dans les eaux sous juridiction française de la sous-région marine Golfe de Gascogne. Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST n°4 (Rennes). 13 pp.
- Kraus, C., Carter, L. (2018). Seabed recovery following protective burial of subsea cables - Observations from the continental margin. *Ocean Eng.* 157, 251–261.
- La Rivière, M., Aish, A., Gauthier, O., Grall, J., Guérin, L., Janson, A.-L., Labrune, C., Thibaut, T., Thiébaud, E. (2016). Assessing benthic habitats' sensitivity to human pressures: a methodological framework. Summary Report. 41 pp.
- Langhamer, O. (2012). Artificial Reef Effect in relation to Offshore Renewable Energy Conversion: State of the Art. *Sci. World J.* 2012, 1–8.
- Langhamer, O., Wilhelmsson, D., Engström, J. (2009). Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys – a pilot study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82, 426–432.
- Laugier, F. (2015). Histoires de vie et connectivité entre les habitats écologiques essentiels de poissons des mers côtières tempérées : le cas des lançons (*Ammodytidae*) et du bar européen (*Dicentrarchus labrax*, Linnaeus, 1758) dans le Golfe Normand Breton, une approche par les marqueurs environnementaux. Thèse de doctorat du Muséum National d'Histoire Naturelle. 211 pp.
- Lee, W., Yang, K.-L. (2014). Using medaka embryos as a model system to study biological effects of the electromagnetic fields on development and behavior. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 108, 187–194.
- Lee, C.G., Farrell, A.P., Lotto, A., MacNutt, M.J., Hinch, S.G., Healey, M.C. (2003). The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks. *J. Exp. Biol.* 206, 3239–3251.
- Lelièvre, S., Vaz, S., Martin, C.S., Loots, C. (2014). Delineating recurrent fish spawning habitats in the North Sea. *J. Sea Res.* 91, 1–14.

- Lerchl, A., Zachmann, A., Ather Ali, M., Reiter, R.J. (1998). The effects of pulsing magnetic fields on pineal melatonin synthesis in a teleost fish (brook trout, *Salvelinus fontinalis*). *Neurosci. Lett.* 256, 171–173.
- Lindeboom, H.J., Kouwenhoven, H.J., Bergman, M.J.N., Bouma, S., Brasseur, S., Daan, R., Fijn, R.C., Haan, D. de, Dirksen, S., Hal, R. van, et al. (2011). Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environ. Res. Lett.* 6, 1–13.
- Lippert, T., von Estorff, O. (2014). On a Hybrid Model for the Prediction of Pile Driving Noise from Offshore Wind Farms. *Acta Acust. United Acust.* 100, 244–253.
- Lossent, J., Lejart, M., Folegot, T., Clorennec, D., Di Iorio, L., Gervaise, C. (2018). Underwater operational noise level emitted by a tidal current turbine and its potential impact on marine fauna. *Mar. Pollut. Bull.* 131, 323–334.
- Love, M.S., Nishimoto, M.M., Clark, S., McCrea, M., Bull, A.S. (2017a). The Organisms Living Around Energized Submarine Power Cables, Pipe, and Natural Sea Floor in the Inshore Waters of Southern California. *Bull. South. Calif. Acad. Sci.* 116, 61–87.
- Love, M.S., Nishimoto, M.M., Clark, S., McCrea, M., Bull, A.S. (2017b). Assessing potential impacts of energized submarine power cables on crab harvests. *Cont. Shelf Res.* 151, 23–29.
- Mat, A.M., Dunster, G.P., Sbragaglia, V., Aguzzi, J., de la Iglesia, H.O. (2017). Influence of temperature on daily locomotor activity in the crab *Uca pugilator*. *PLoS ONE* 12.
- MEEM (2017). Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer. Edition 2017 (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer). 189 pp.
- Meißner, K., Sordyl, H. (2006). Literature Review of Offshore Wind Farms with Regard to Benthic Communities and Habitats. In *Ecological Research on Offshore Wind Farms: International Exchange of Experiences. PART B: Literature Review of the Ecological Impacts of Offshore Wind Farms*, C. Zucco, W. Wende, T. Merck, I. Köchling, J. Köppel, eds. pp. 1–46.
- Meißner, K., Schabelon, H., Bellebaum, J., Sordyl, H. (2006). Impacts of submarine cables on the marine environment - A literature review (Institute of Applied Ecology Ltd). 88 pp.
- Merchant, N.D., Pirota, E., Barton, T.R., Thompson, P.M. (2014). Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Mar. Pollut. Bull.* 78, 85–95.
- Merck, T., Wasserthal, R. (2009). Assessment of the environmental impacts of cables. *Biodivers. Ser. OSPAR Comm.* 18 pp.
- Mesnildrey, L., Gascuel, D., Lesueur, M., Le Pape, O. (2010). Analyse des effets des réserves de pêche. Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST n°2. 105 pp.
- Michel, S., Toison, V. (2017). Analyse des enjeux de la faune marine pour la planification et l'évaluation des projets de parcs éoliens en mer. (Artigues-près-Bordeaux: LPO), pp. 94–104.
- Moore, P.G. (1978). Inorganic particulate suspensions in the sea and their effects on marine animals. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 15, 225–363.
- Moura, A., Simas, T., Batty, R., Wilson, B., Thompson, D., Lodergan, M., Norris, J., Finn, M., Véron, G., Paillard, M., et al. (2010). Scientific guidelines on Environmental Assessment (No. Deliverable D6.2.2). Equitable Testing and

- Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact. 24 pp.
- Mueller-Blenkle, C., McGregor, P.K., Gill, A.B., Andersson, M.H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D., Thomsen, F. (2010). Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish. 46 pp.
- Müller, C., Usbeck, R., Miesner, F. (2016). Temperatures in shallow marine sediments: Influence of thermal properties, seasonal forcing, and man-made heat sources. *Appl. Therm. Eng.* 108, 20–29.
- Nedwell, J., Howell, D. (2004). A review of offshore windfarm related underwater noise sources (No. Tech. Rep. 544R0308). Prep. by. Subacoustech Ltd. for: COWRIE, Hampshire, UK. 68 pp.
- Nedwell, J., Mason, T., Barham, R., Cheesman, S. (2012a). Assessing the environmental impact of underwater noise during offshore windfarm construction and operation. In *Proceedings of Acoustics*, pp. 1–5.
- Nedwell, J., Brooker, A., Barham, R. (2012b). Assessment of underwater noise during the installation of export power cables at the Beatrice Offshore Wind Farm. Subacoustech Environmental. 15 pp.
- Neo, Y.Y., Seitz, J., Kastelein, R.A., Winter, H.V., ten Cate, C., Slabbekoorn, H. (2014). Temporal structure of sound affects behavioural recovery from noise impact in European seabass. *Biol. Conserv.* 178, 65–73.
- Nordmann, G.C., Hochstoeger, T., Keays, D.A. (2017). Magnetoreception—A sense without a receptor. *PLOS Biol.* 15, e2003234.
- OSPAR (2008). Background Document on potential problems associated with power cables other than those for oil and gas activities. *Biodivers. Ser.* 370, 50.
- Osthoff, D., Heins, E., Grabe, J. (2017). Impact on submarine cables due to ship anchor - soil interaction. *Geotechnik* 40, 265–270.
- Patry, Y., Carlier, A., Guyonnet, B., Chauvaud, S., Saffroy, D. (2018). Benthic colonisation of subsea cables, either live or without current, in a shallow coastal French ecosystem. *EIMR Conference*, 24-26 April 2018, Orkney, Scotland, UK.
- Piccinetti, C.C., De Leo, A., Cosoli, G., Scalise, L., Randazzo, B., Cerri, G., Olivotto, I. (2018). Measurement of the 100 MHz EMF radiation in vivo effects on zebrafish *D. rerio* embryonic development: A multidisciplinary study. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 154, 268–279.
- Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Farina, A., Ferrero, E.A. (2010). *In situ* behavioural responses to boat noise exposure of *Gobius cruentatus* (Gmelin, 1789; fam. Gobiidae) and *Chromis chromis* (Linnaeus, 1758; fam. Pomacentridae) living in a Marine Protected Area. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 386, 125–132.
- Platteeuw, M., Bakker, J., Bosch, I. van den, Erkman, A., Graafland, M., Lubbe, S., Warnas, M. (2017). A Framework for Assessing Ecological and Cumulative Effects (FAECE) of Offshore Wind Farms on Birds, Bats and Marine Mammals in the Southern North Sea. In *Wind Energy and Wildlife Interactions*, (Springer, Cham), pp. 219–237.
- Polagye, B., Van Cleve, B., Copping, A., Kirkendall, K. (2011). Environmental Effects of Tidal Energy Development: Proceedings of a Scientific Workshop March 22–25, 2010. NOAA Tech. Memo. NMFS-FSPO. 170 pp.
- Popper, A.N., Hawkins, A.D., Fay, R.R., Mann, D.A., Bartol, S., Carlson, T.J., Coombs, S., Ellison, W.T., Gentry, R.L., Halvorsen, M.B., et al. (2014). ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A

- Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI (Springer International Publishing).
- Porter, M.J.R., Randall, C.F., Bromage, N.R., Thorpe, J.E. (1998). The role of melatonin and the pineal gland on development and smoltification of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Aquaculture* 168, 139–155.
- Pörtner, H.O., Berdal, B., Blust, R., Brix, O., Colosimo, A., De Wachter, B., Giuliani, A., Johansen, T., Fischer, T., Knust, R., et al. (2001). Climate induced temperature effects on growth performance, fecundity and recruitment in marine fish: developing a hypothesis for cause and effect relationships in Atlantic cod (*Gadus morhua*) and common eelpout (*Zoarces viviparus*). *Cont. Shelf Res.* 21, 1975–1997.
- Putman, N.F., Lohmann, K.J., Putman, E.M., Quinn, T.P., Klimley, A.P., Noakes, D.L.G. (2013). Evidence for Geomagnetic Imprinting as a Homing Mechanism in Pacific Salmon. *Curr. Biol.* 23, 312–316.
- Putman, N.F., Meinke, A.M., Noakes, D.L.G. (2014). Rearing in a distorted magnetic field disrupts the “map sense” of juvenile steelhead trout. *Biol. Lett.* 10, 1–5.
- Raoux, A. (2017). Approche écosystémique des Energies Marines Renouvelables: étude des effets sur le réseau trophique de la construction du parc éolien au large de Courseulles-sur-mer et du cumul d'impacts. Thèse de doctorat de l'université de Caen. 250 pp.
- Rees, J., Larcombe, P., Vivian, C., Judd, A. (2006). Scroby Sands Offshore Wind Farm—Coastal Processes Monitoring. Final Rep. Dep. Trade Ind. Proj. Code AE0262 Cefas Lowestoft. 51 pp.
- Reilly, K., O'Hagan, A.M., Dalton, G. (2016). Developing benefit schemes and financial compensation measures for fishermen impacted by marine renewable energy projects. *Energy Policy* 97, 161–170.
- Reiter, R.J. (1995). Reported biological consequences related to the suppression of melatonin by electric and magnetic field exposure. *Integr. Physiol. Behav. Sci.* 30, 314–330.
- Rességuier, S., Bendzovski, R., Strom, P.J., Wathne, H., Vigsnes, M., Holme, J. (2009). Assessment of Trawl Board and Anchor Penetration in Different Soils for Use in Selection of a Burial Depth to Protect Submarine Cables or Pipelines. (Hawaii, USA: ASME), pp. 151–161.
- Roach, M., Cohen, M., Forster, R., Revill, A.S., Johnson, M. (2018). The effects of temporary exclusion of activity due to wind farm construction on a lobster (*Homarus gammarus*) fishery suggests a potential management approach. *ICES J. Mar. Sci.*, 1-11.
- Rochette, S. (2011). Effet des perturbations anthropiques sur la survie des juvéniles de poissons marins dans les nourriceries et conséquences sur le renouvellement des populations. Application au stock de sole commune (*Solea solea*) en Manche Est. Thèse de doctorat de l'Agrocampus Ouest. 153 pp.
- RTE (2014). Raccordement électrique du parc éolien en mer de Fécamp (Département de Seine Maritime: Réseau de transport d'électricité).
- RTE (2016). FAB. Interconnexion électrique sous-marine et souterraine entre la France et la Grande-Bretagne via Aurigny. Etude d'impact valant document d'incidence au titre de la loi sur l'eau. Fascicule maritime. 338 pp.
- Schmiedchen, K., Petri, A.-K., Driessen, S., Bailey, W.H. (2018). Systematic review of biological effects of exposure to static electric fields. Part II: Invertebrates and plants. *Environ. Res.* 160, 60–76.

- Schultz, I.R., Woodruff, D.L., Marshall, K.E., Pratt, W.J., Roesijadi, G. (2010). Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates. Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms – Fiscal Year 2010 Progress Report (Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory). 25 pp.
- Sherwood, J., Chidgey, S., Crockett, P., Gwyther, D., Ho, P., Stewart, S., Strong, D., Whitely, B., Williams, A. (2016). Installation and operational effects of a HVDC submarine cable in a continental shelf setting: Bass Strait, Australia. *J. Ocean Eng. Sci.* 1, 337–353.
- Skauli, K.S., Reitan, J.B., Walther, B.T. (2000). Hatching in zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to a 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics* 21, 407–410.
- Smale, D.A., Wernberg, T. (2012). Short-term *in situ* warming influences early development of sessile assemblages. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 453, 129–136.
- Soletchnik, P. (1982). La daurade grise *Spondyllosoma cantharus*. Reproduction et éléments de dynamique. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. 132 pp.
- Smeets, E., Weterings, R. (1999). Environmental indicators: Typology and overview (European Environmental Agency). 19 pp.
- Spiga, I., Aldred, N., Caldwell, G.S. (2017). Anthropogenic noise compromises the anti-predator behaviour of the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (L.). *Mar. Pollut. Bull.* 122, 297–305.
- Stankevičiūtė, M., Jakubowska, M., Pažusienė, J., Makaras, T., Otremba, Z., Urban-Malinga, B., Fey, D.P., Greszkiewicz, M., Sauliūtė, G., Baršienė, J., et al. (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*). *Aquat. Toxicol.* 208, 109–117.
- Stelzenmüller, V., Coll, M., Mazaris, A.D., Giakoumi, S., Katsanevakis, S., Portman, M.E., Degen, R., Mackelworth, P., Gimpel, A., Albano, P.G., et al. (2018). A risk-based approach to cumulative effect assessments for marine management. *Sci. Total Environ.* 612, 1132–1140.
- Sutton, S.J., Lewin, P.L., Swingler, S.G. (2017b). Review of global HVDC subsea cable projects and the application of sea electrodes. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 87, 121–135.
- Svarstad, H., Petersen, L.K., Rothman, D., Siepel, H., Wätzold, F. (2008). Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy* 25, 116–125.
- Szostek, C.L., Davies, A.J., Hinz, H. (2013). Effects of elevated levels of suspended particulate matter and burial on juvenile king scallops *Pecten maximus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 474, 155–165.
- 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. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 96, 380–391.
- Thanner, S.E., McIntosh, T.L., Blair, S.M. (2006). Development of benthic and fish assemblages on artificial reef materials compared to adjacent natural reef assemblages in Miami-Dade County, Florida. *Bull. Mar. Sci.* 78, 57–70.
- Tomanova, K., Vacha, M. (2016). The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *J. Exp. Biol.* 219, 1717–1724.
- Tricas, T.C., Gill, A.B. (2011). Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species: Final Report (Pacific OCS Region,

- Camarillo, CA.: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement). 426 pp.
- Tricas, T.C., New, J.G. (1997). Sensitivity and response dynamics of elasmobranch electrosensory primary afferent neurons to near threshold fields. *J. Comp. Physiol. A* 182, 89–101.
- Van der Wal, J.T., Tamis, J.E. (2014). Comparing methods to approach cumulative effects in the North-East Atlantic: CUMULEO case study (IMARES). 55 pp.
- Vize, S., Adnitt, C., Staniland, R., 2008. Review of cabling techniques and environmental effects applicable to the offshore wind farm industry (BERR Technical report). Department for Business Enterprise and Regulatory Reform. 159 pp.
- Wale, M.A., Simpson, S.D., Radford, A.N. (2013). Noise negatively affects foraging and antipredator behaviour in shore crabs. *Anim. Behav.* 86, 111–118.
- Wilber, D.H., Clarke, D.G. (2001). Biological Effects of Suspended Sediments: A Review of Suspended Sediment Impacts on Fish and Shellfish with Relation to Dredging Activities in Estuaries. *North Am. J. Fish. Manag.* 21, 855–875.
- Wilding, T.A. (2014). Effects of man-made structures on sedimentary oxygenation: Extent, seasonality and implications for offshore renewables. *Mar. Environ. Res.* 97, 39–47.
- Willsted, E., Gill, A.B., Birchenough, S.N.R., Jude, S. (2017). Assessing the cumulative environmental effects of marine renewable energy developments: Establishing common ground. *Sci. Total Environ.* 577, 19–32.
- WindEurope (2019). Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics 2018. 38 pp.
- Wood, C.M., McDonald, D.G. (1997). *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish* (Cambridge University Press).
- Wood, M.P., Carter, L. (2008). Whale entanglements with submarine telecommunication cables. *IEEE J. Ocean. Eng.* 33, 445–450.
- Woodruff, D., Cullinan, V., Copping, A., Marshall, K. (2013). Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates. Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms – Fiscal Year 2012 Progress Report (Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory). 59 pp.
- Woodruff, D.L., Schultz, I.R., Marshall, K.E., Ward, J.A., Cullinan, V. (2012). Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates. Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms – Fiscal Year 2011 Progress Report (Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory). 67 pp.
- Worden, M.K., Clark, C.M., Conaway, M., Qadri, S.A. (2006). Temperature dependence of cardiac performance in the lobster *Homarus americanus*. *J. Exp. Biol.* 209, 1024–1034.
- Worzyk, T. (2009). *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects* (Springer Science and Business Media).
- Ybert, S., Desroy, N., Menet-Nedelec, F., Simplet, L., Schlaich, I., Vogel, C. (2016). Avis de l'Ifremer sur le dossier d'autorisation au titre des articles R. 214-1 et suivants du code de l'environnement du projet d'interconnexion électrique entre la France et la Grande-Bretagne via l'île d'Aurigny (FAB) (Saint-Lô: Préfecture de la Manche/DAECD/BCPA - Préfecture de la Manche, Direction de l'Action Economique et de la Coordination Départementale, Bureau de la Coordination des Politiques publiques et des Actions interministérielles)

Annexe 1

Tableau 5. Exemples de valeurs de CEM mesurées *in situ* et estimées par modélisation.

Projet	Type de pose	Type de câble	Champ magnétique ou électrique mesuré	Champ magnétique ou électrique estimé
FAB	Jointif en mer ensouillé		Mesures à 1 m au-dessus du fond. 20 μ T au-dessus de la liaison. 3 μ T à 5 m de l'axe de la liaison. 2 μ T à 10 m.	
BOEM-URI (Cross Sound Cable)	Ensouillé à une profondeur théorique de 2 m. Principe d'un câble principal accompagné d'un câble de retour moins épais et d'un câble fibre optique.	Câble bipolaire HVDC 330 MW, 40 m de long.	Déviations positives de champ magnétique CC moyenne 3,8 μ T (max 14,3 μ T) de 0 à 5m. Déviations positives de champ magnétique CA 0,15 μ T (max 0,51) de 0 à 10 m. Champ électrique CA moyen de 0,72 mV/m (max 0,97 mV/m) de 0 à 100 m.	Champs CA non inclus dans la modélisation car non anticipés. Déviations positives de champ magnétique CC max de 14 μ T. Bonne corrélation entre mesures et estimations.
BOEM-URI (Neptune Cable)	Ensouillé à une profondeur de 1,2 à 2,8 m. Principe d'un câble principal accompagné d'un câble de retour moins épais et d'un câble fibre optique.	Câble HVDC 660 MW, 105 km.	Déviations positives de champ magnétique CC moyen 6,8 μ T (max 20,7 μ T). Déviations positives de champ magnétique CA moyen 0,04 μ T (max 0,09 μ T). Champ électrique CA moyen 0,42 mV/m (max 0,65 mV/m).	
BOEM-URI (sea2shore Cable)	Câble triphasé avec les 3 conducteurs enroulés hélicoïdalement.	Câble CA 30 MW, 32 km.	Déviations positives de champ magnétique CA 0,005-3,1 μ T. Champ électrique CA 0,02-0,25 mV/m.	
TBC (Trans Bay Cable)	Câble recouvert d'une gaine conductrice qui atténue le champ électrique que produirait le câble sans la gaine.	Câble CC 400 MW, 85 km	Anomalie maximale de champ magnétique de 650 nT	Anomalie maximale de champ magnétique de 650 nT. Bonne corrélation entre mesures et estimations.

Annexe 2

En annexe de (Tricas et al., 2011), on trouve des tables reprenant les valeurs moyennes de champ magnétique CC et CA et de champ électrique pour différentes distance au câble, moyenne faite sur plusieurs projets :

Table of average AC magnetic fields computed for various projects at distances along and above seabed.

Magnetic Field (microTesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	7.85E+0	3.47E-1	1.27E-1	6.52E-2	3.94E-2	2.62E-2	1.87E-2	1.40E-2	1.09E-2	8.69E-3	7.10E-3
±2	2.42E+0	3.30E-1	1.25E-1	6.44E-2	3.91E-2	2.61E-2	1.87E-2	1.40E-2	1.09E-2	8.67E-3	7.09E-3
±4	1.47E+0	2.85E-1	1.17E-1	6.21E-2	3.82E-2	2.57E-2	1.84E-2	1.39E-2	1.08E-2	8.63E-3	7.06E-3
±6	7.70E-1	2.31E-1	1.06E-1	5.86E-2	3.68E-2	2.51E-2	1.81E-2	1.37E-2	1.07E-2	8.55E-3	7.00E-3
±8	3.80E-1	1.80E-1	9.28E-2	5.43E-2	3.50E-2	2.42E-2	1.76E-2	1.34E-2	1.05E-2	8.45E-3	6.93E-3
±10	2.23E-1	1.38E-1	8.00E-2	4.95E-2	3.29E-2	2.32E-2	1.71E-2	1.31E-2	1.03E-2	8.31E-3	6.84E-3
±12	1.47E-1	1.06E-1	6.82E-2	4.47E-2	3.07E-2	2.20E-2	1.65E-2	1.27E-2	1.01E-2	8.16E-3	6.74E-3
±14	1.05E-1	8.29E-2	5.79E-2	4.00E-2	2.84E-2	2.08E-2	1.58E-2	1.23E-2	9.80E-3	7.98E-3	6.62E-3
±16	7.90E-2	6.61E-2	4.93E-2	3.57E-2	2.61E-2	1.96E-2	1.50E-2	1.18E-2	9.51E-3	7.79E-3	6.48E-3
±18	6.16E-2	5.36E-2	4.21E-2	3.18E-2	2.39E-2	1.83E-2	1.43E-2	1.14E-2	9.20E-3	7.58E-3	6.34E-3
±20	4.95E-2	4.43E-2	3.61E-2	2.83E-2	2.19E-2	1.71E-2	1.35E-2	1.09E-2	8.88E-3	7.36E-3	6.18E-3
±22	4.06E-2	3.71E-2	3.12E-2	2.52E-2	2.00E-2	1.59E-2	1.28E-2	1.04E-2	8.55E-3	7.13E-3	6.02E-3
±24	3.39E-2	3.15E-2	2.72E-2	2.25E-2	1.83E-2	1.48E-2	1.20E-2	9.89E-3	8.21E-3	6.90E-3	5.85E-3
±26	2.88E-2	2.70E-2	2.38E-2	2.01E-2	1.67E-2	1.37E-2	1.13E-2	9.41E-3	7.88E-3	6.66E-3	5.68E-3
±28	2.48E-2	2.34E-2	2.10E-2	1.81E-2	1.53E-2	1.28E-2	1.07E-2	8.94E-3	7.54E-3	6.42E-3	5.50E-3
±30	2.15E-2	2.05E-2	1.86E-2	1.63E-2	1.40E-2	1.18E-2	1.00E-2	8.48E-3	7.22E-3	6.18E-3	5.33E-3
±32	1.89E-2	1.81E-2	1.66E-2	1.47E-2	1.28E-2	1.10E-2	9.40E-3	8.04E-3	6.89E-3	5.94E-3	5.15E-3
±34	1.67E-2	1.61E-2	1.49E-2	1.34E-2	1.18E-2	1.02E-2	8.83E-3	7.62E-3	6.58E-3	5.71E-3	4.97E-3
±36	1.49E-2	1.44E-2	1.34E-2	1.22E-2	1.08E-2	9.52E-3	8.30E-3	7.22E-3	6.28E-3	5.48E-3	4.80E-3
±38	1.33E-2	1.29E-2	1.22E-2	1.11E-2	1.00E-2	8.87E-3	7.80E-3	6.84E-3	5.99E-3	5.26E-3	4.63E-3
±40	1.20E-2	1.17E-2	1.11E-2	1.02E-2	9.25E-3	8.27E-3	7.33E-3	6.47E-3	5.71E-3	5.04E-3	4.46E-3
±42	1.09E-2	1.06E-2	1.01E-2	9.39E-3	8.57E-3	7.72E-3	6.90E-3	6.13E-3	5.44E-3	4.83E-3	4.29E-3
±44	9.91E-3	9.70E-3	9.26E-3	8.66E-3	7.95E-3	7.22E-3	6.50E-3	5.81E-3	5.19E-3	4.63E-3	4.13E-3
±46	9.06E-3	8.88E-3	8.51E-3	8.00E-3	7.40E-3	6.76E-3	6.12E-3	5.51E-3	4.95E-3	4.44E-3	3.98E-3
±48	8.32E-3	8.17E-3	7.85E-3	7.42E-3	6.90E-3	6.34E-3	5.77E-3	5.23E-3	4.72E-3	4.25E-3	3.83E-3
±50	7.66E-3	7.53E-3	7.27E-3	6.89E-3	6.44E-3	5.95E-3	5.45E-3	4.96E-3	4.50E-3	4.07E-3	3.68E-3
±52	7.08E-3	6.97E-3	6.74E-3	6.42E-3	6.03E-3	5.59E-3	5.15E-3	4.71E-3	4.29E-3	3.90E-3	3.55E-3
±54	6.56E-3	6.47E-3	6.27E-3	5.99E-3	5.65E-3	5.27E-3	4.87E-3	4.48E-3	4.10E-3	3.74E-3	3.41E-3
±56	6.10E-3	6.02E-3	5.85E-3	5.60E-3	5.30E-3	4.96E-3	4.61E-3	4.26E-3	3.91E-3	3.59E-3	3.28E-3
±58	5.68E-3	5.61E-3	5.47E-3	5.25E-3	4.99E-3	4.69E-3	4.37E-3	4.05E-3	3.74E-3	3.44E-3	3.16E-3
±60	5.31E-3	5.25E-3	5.12E-3	4.93E-3	4.70E-3	4.43E-3	4.15E-3	3.86E-3	3.57E-3	3.30E-3	3.04E-3

Maximum induced Root Mean Square (RMS) electric field averaged over various projects with AC undersea cables for species located directly above and parallel to the cable^a assuming 5 knot current or swimming speed.

Species	Major, Minor Axis of Ellipse Enclosing Species		Induced Electric Field (µV/m)
	Species	Height Above Seabed	
Smalltooth sawfish	540 cm, 90 cm	0.5 m	612.4
Juvenile sandbar shark	50 cm, 20 cm	0.5 m	120.6
Generic small shark	150 cm, 60 cm	0 m	765.5
		0.5 m	361.7
		1.0 m	209.1
		2.0 m	103.1
		5.0 m	33.9
		10.0 m	12.4

^aOther orientations will result in lower values of induced electric fields.

Table of average DC magnetic fields computed for various projects at distances along and above seabed.

Magnetic Field (microTesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	78.27	2.73	0.83	0.40	0.23	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±2	19.55	2.47	0.81	0.39	0.23	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±4	5.98	1.92	0.74	0.37	0.22	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±6	2.78	1.40	0.65	0.35	0.21	0.14	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
±8	1.59	1.02	0.55	0.32	0.20	0.14	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
±10	1.02	0.75	0.46	0.29	0.19	0.13	0.10	0.07	0.06	0.05	0.04
±12	0.71	0.57	0.39	0.26	0.18	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04
±14	0.53	0.44	0.32	0.23	0.16	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.04
±16	0.40	0.35	0.27	0.20	0.15	0.11	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
±18	0.32	0.29	0.23	0.18	0.13	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04
±20	0.26	0.24	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
±22	0.21	0.20	0.17	0.14	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
±24	0.18	0.17	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
±26	0.15	0.15	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
±28	0.13	0.13	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
±30	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
±32	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
±34	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
±36	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
±38	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
±40	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
±42	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
±44	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
±46	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
±48	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
±50	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
±52	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
±54	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
±56	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
±58	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
±60	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
±62	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Average induced electric field computed for various projects with DC undersea cables at distances along and above seabed for a sea current of 5 knots flowing parallel to the cables.

Induced Electric Field (V/m)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	1.94E-04	1.75E-05	8.80E-06	5.19E-06	3.35E-06	2.31E-06	1.68E-06	1.27E-06	9.96E-07	7.99E-07	6.55E-07
±2	6.04E-05	1.70E-05	8.73E-06	5.15E-06	3.33E-06	2.30E-06	1.68E-06	1.27E-06	9.94E-07	7.98E-07	6.54E-07
±4	3.15E-05	1.62E-05	8.52E-06	5.05E-06	3.28E-06	2.27E-06	1.66E-06	1.26E-06	9.88E-07	7.94E-07	6.51E-07
±6	2.94E-05	1.56E-05	8.18E-06	4.88E-06	3.19E-06	2.23E-06	1.63E-06	1.24E-06	9.78E-07	7.87E-07	6.47E-07
±8	4.14E-05	1.50E-05	7.72E-06	4.65E-06	3.08E-06	2.17E-06	1.60E-06	1.22E-06	9.64E-07	7.78E-07	6.41E-07
±10	7.85E-05	1.39E-05	7.13E-06	4.38E-06	2.94E-06	2.09E-06	1.55E-06	1.20E-06	9.47E-07	7.67E-07	6.33E-07
±12	3.26E-05	1.19E-05	6.43E-06	4.06E-06	2.78E-06	2.00E-06	1.50E-06	1.17E-06	9.27E-07	7.54E-07	6.24E-07
±14	1.66E-05	9.56E-06	5.67E-06	3.72E-06	2.60E-06	1.91E-06	1.45E-06	1.13E-06	9.04E-07	7.38E-07	6.13E-07
±16	1.06E-05	7.54E-06	4.93E-06	3.38E-06	2.43E-06	1.81E-06	1.39E-06	1.09E-06	8.79E-07	7.21E-07	6.01E-07
±18	7.48E-06	5.98E-06	4.25E-06	3.05E-06	2.25E-06	1.70E-06	1.32E-06	1.05E-06	8.52E-07	7.03E-07	5.88E-07
±20	5.64E-06	4.81E-06	3.66E-06	2.73E-06	2.07E-06	1.60E-06	1.26E-06	1.01E-06	8.24E-07	6.83E-07	5.74E-07
±22	4.44E-06	3.94E-06	3.16E-06	2.45E-06	1.90E-06	1.49E-06	1.19E-06	9.66E-07	7.95E-07	6.63E-07	5.60E-07
±24	3.60E-06	3.29E-06	2.73E-06	2.19E-06	1.74E-06	1.39E-06	1.13E-06	9.23E-07	7.65E-07	6.42E-07	5.45E-07
±26	2.99E-06	2.78E-06	2.38E-06	1.96E-06	1.60E-06	1.30E-06	1.06E-06	8.80E-07	7.35E-07	6.20E-07	5.29E-07
±28	2.53E-06	2.38E-06	2.09E-06	1.76E-06	1.46E-06	1.21E-06	1.00E-06	8.37E-07	7.05E-07	5.99E-07	5.13E-07
±30	2.17E-06	2.06E-06	1.84E-06	1.59E-06	1.34E-06	1.12E-06	9.43E-07	7.95E-07	6.75E-07	5.77E-07	4.97E-07
±32	1.88E-06	1.80E-06	1.63E-06	1.43E-06	1.23E-06	1.04E-06	8.87E-07	7.55E-07	6.45E-07	5.55E-07	4.81E-07
±34	1.65E-06	1.59E-06	1.46E-06	1.30E-06	1.13E-06	9.72E-07	8.34E-07	7.16E-07	6.17E-07	5.34E-07	4.64E-07
±36	1.46E-06	1.41E-06	1.31E-06	1.18E-06	1.04E-06	9.04E-07	7.84E-07	6.79E-07	5.89E-07	5.13E-07	4.48E-07
±38	1.30E-06	1.26E-06	1.18E-06	1.07E-06	9.57E-07	8.42E-07	7.37E-07	6.43E-07	5.62E-07	4.92E-07	4.33E-07
±40	1.16E-06	1.13E-06	1.07E-06	9.81E-07	8.83E-07	7.85E-07	6.93E-07	6.10E-07	5.36E-07	4.72E-07	4.17E-07
±42	1.05E-06	1.03E-06	9.73E-07	9.00E-07	8.17E-07	7.33E-07	6.52E-07	5.78E-07	5.11E-07	4.53E-07	4.02E-07
±44	9.52E-07	9.33E-07	8.89E-07	8.28E-07	7.58E-07	6.85E-07	6.14E-07	5.47E-07	4.87E-07	4.34E-07	3.87E-07
±46	8.68E-07	8.52E-07	8.15E-07	7.64E-07	7.04E-07	6.41E-07	5.78E-07	5.19E-07	4.65E-07	4.16E-07	3.73E-07
±48	7.94E-07	7.81E-07	7.50E-07	7.07E-07	6.55E-07	6.00E-07	5.45E-07	4.92E-07	4.43E-07	3.99E-07	3.59E-07
±50	7.30E-07	7.18E-07	6.93E-07	6.56E-07	6.11E-07	5.63E-07	5.14E-07	4.67E-07	4.23E-07	3.82E-07	3.45E-07
±52	6.73E-07	6.63E-07	6.41E-07	6.10E-07	5.71E-07	5.29E-07	4.86E-07	4.44E-07	4.03E-07	3.66E-07	3.32E-07
±54	6.22E-07	6.14E-07	5.96E-07	5.68E-07	5.35E-07	4.98E-07	4.59E-07	4.21E-07	3.85E-07	3.51E-07	3.19E-07
±56	5.78E-07	5.71E-07	5.54E-07	5.31E-07	5.01E-07	4.69E-07	4.35E-07	4.01E-07	3.68E-07	3.36E-07	3.07E-07
±58	5.37E-07	5.31E-07	5.17E-07	4.97E-07	4.71E-07	4.42E-07	4.12E-07	3.81E-07	3.51E-07	3.22E-07	2.96E-07
±60	5.01E-07	4.96E-07	4.84E-07	4.66E-07	4.43E-07	4.18E-07	3.90E-07	3.63E-07	3.35E-07	3.09E-07	2.85E-07