



HEOS marine

Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les tech- nologies hydroliennes en mer :

GHYDRO



**FRANCE
ENERGIES
MARINES**

DCNS



Ifremer

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation de France Energies Marines est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : France Energies Marines, Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer, 2013.

© 2013 France Energies Marines

Sommaire

Rédacteurs	6
Contributeurs	6
Acronymes	7
Introduction.....	8
1. Energie hydrolienne	13
1.1. Contexte	13
1.2. Principe de fonctionnement d'un parc hydrolien	14
1.3. Les technologies hydroliennes.....	15
1.4. Les raccordements électriques	19
1.5. Conclusions : besoins spécifiques pour l'évaluation des incidences	25
1.6. Recommandations	25
2. Cadre juridique	26
2.1. Procédures réglementaires auxquelles est soumis un projet hydrolien.....	26
2.2. L'évaluation environnementale	28
2.3. Spécificités et difficultés de l'évaluation environnementale d'un projet hydrolien marin	30
2.4. Recommandations	30
3. Prise en compte des usages	31
3.1. Les différents usages potentiels, affectés ou non	31
3.2. Caractériser les usages et évaluer les impacts	31
3.3. Les activités de pêche (professionnelle et récréative)	32
 Environnement physique	 34
4. Fonds marins	37
4.1. Description de l'état initial	37
4.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	43
4.3. Identification des impacts cumulés	50

4.4.	Description du programme de suivi environnemental	51
4.5.	Mesures d'atténuation des impacts	53
4.6.	Lacunes et programme de recherche	54
5.	Océanographie	55
5.1.	Description de l'état initial	55
5.2.	Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	62
5.3.	Identification des impacts cumulés	66
5.4.	Description du programme de suivi environnemental	66
5.5.	Mesures d'atténuation des impacts	67
5.6.	Lacunes et programmes de recherche	67
6.	Bruit sous-marin	69
	Généralités sur le bruit sous-marin	69
6.1.	Description de l'état initial	72
6.2.	Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	81
6.3.	Identification des impacts cumulés	85
6.4.	Description du programme de suivi environnemental	85
6.5.	Mesure d'évitement et de réduction des impacts	87
6.6.	Lacunes et programmes de recherche	87
	Les impacts potentiels du champ électromagnétique (CEM) des câbles électriques	89
	Environnement biologique	91
7.	Benthos	94
7.1.	Description de l'état initial	94
7.2.	Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	104
7.3.	Identification des impacts cumulés	108
7.4.	Description du programme de suivi environnemental	109
7.5.	Mesures d'atténuation des impacts	112
7.6.	Lacunes et programmes de recherche	113

8. Halieutique	115
8.1. Description de l'état initial	115
8.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	119
8.3. Identification des impacts cumulés	128
8.4. Description du programme de suivi environnemental	129
8.5. Mesures d'atténuation des impacts	130
8.6. Lacunes et programmes de recherche	131
9. Mammifères marins	133
9.1. Description de l'état initial	134
9.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	137
9.3. Identification des impacts cumulés	143
9.4. Description du programme de suivi environnemental	143
9.5. Mesures d'atténuation des impacts	149
9.6. Lacunes et programmes de recherche	149
10. Avifaune	151
10.1. Description de l'état initial	151
10.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels	154
10.3. Identification des impacts cumulés	156
10.4. Description du programme de suivi environnemental	157
10.5. Mesures d'atténuation des impacts	160
10.6. Lacunes et programmes de recherche	160
Conclusion	162
Liste des figures et photos	175
Liste des tableaux	178

Rédacteurs

L'élaboration et la rédaction de ce guide sont issues d'un projet collaboratif réalisé par France Energies Marines, DCNS, EDF et Ifremer, et ont été assurées par un consortium d'experts en technologies hydroliennes et en environnement marin issus de diverses entités industrielles, de recherche et associatives.

Coordination : Morgane Lejart, Marc Boeuf (France Energies Marines)

Energie hydrolienne : Agnès Barillier, Jean-Marie Loaec (EDF CIH), Cyril Giry (Energie de la Lune)

Cadre juridique et prise en compte des usages : Agnès Barillier (EDF CIH), Jean-Paul Delpech (Ifremer ; usages pêche)

Fonds Marins : Jehanne Prevot (DCNS)

Océanographie : Cedric Auvray (DCNS)

Bruits sous-marins : Thomas Folegot (Quiet Oceans)

Benthos : Antoine Carlier (Ifremer)

Ressource Halieutique : Jean-Paul Delpech (Ifremer)

Mammifères marins : Ludivine Martinez (Observatoire Pelagis)

Avifaune Marine : Bernard Cadiou (Bretagne Vivante)

Contributeurs

Sandrine Alizier (AAMP)

Jean-Christophe Allo (SABELLA SAS)

Claude Augris (Ifremer)

Julien Bonnel (ENSTA Bretagne)

Antonin Caillet (Alstom)

Gérard Debout (Groupe ornithologique normand)

Diane de Galbert (EDF-DJ)

Coline Delafosse (DCNS)

Yann Hervé De Roeck (France Energies Marines)

Julien Dubreuil (IN VIVO environnement)

Yann Février (Groupe d'études ornithologiques des Côtes d'Armor)

Matthieu Fortin (Bretagne Vivante)

Cédric Gervaise (INP Grenoble)

Jean-Yves Jalaber (Bretagne Vivante)

Jérôme Jourdain (CNPMMEM)

Robin Jugé (EDF-DPIH)

Youen Kervella (Open Ocean)

Pascal Lazure (Ifremer)

Solenne Le Guennec (CDPMEM 29)

Samuel Lemièrre (GDF FE)

Sylvain Michel (AAMP)

Philippe Monbet (France Energies Marines)

Marianne Piqueret (Préfecture maritime Atlantique)

Vincent Plassard (Alstom)

Jehane Prudhomme (CRPMEM Bretagne)

Pascal Provost (Ligue pour la Protection des Oiseaux)

Morgane Remaud (AAMP)

Laure Robigo (CDPMEM 22)

Agnès Sabourin (GDF FE)

Laure Simplet (Ifremer)

Aurore Sterckeman (AAMP)

Laurent Terme (EDF-CIH)

Gérard Thouzeau (LEMAR, IUEM)

Acronymes

ACCOBAMS :	Agreement on the conservation of cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area
ADCP:	Acoustic doppler current profiler
ADEME:	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADV:	Acoustic doppler velocimeter
AMI:	Appel à manifestation d'intérêt
ASCOBANS :	Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic and North Seas
CE:	Code de l'environnement
CEM :	Champ électromagnétique
CETMEF :	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CITES :	Convention on international trade in endangered species of fauna and flora
CMS :	Convention on migratory species
CTD:	Conductivity temperature depth
DCSMM :	Directive cadre stratégie pour le milieu marin
DDTM:	Direction départementale des territoires et de la mer
DIRM:	Direction interrégionales de la mer
DML:	Délégation à la mer et au littoral
DREAL:	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
IGN :	Institut national de l'information géographique et forestière
MEDDE :	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
M.E.S:	Matières en suspension
OSPAR :	Oslo Paris convention
PACOMM :	Programme d'acquisition de connaissances sur les oiseaux et mammifères marins
PTS :	Permanent threshold shift
Radar HF:	High frequency
SENEOH:	Site expérimental estuarien national pour l'essai et l'optimisation hydrolienne
SEL:	Sound exposure level
SHOM :	Service hydrographique et océanographique de la marine
SMF:	Sondeur multifaisceau
SPL:	Sound pressure level
TTS:	Temporary threshold shift
UICN :	Union internationale pour la conservation de la nature
ZNIEFF :	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

Introduction

0.1. Contexte

Le développement des énergies marines renouvelables¹ en France est en pleine expansion depuis que l'Union Européenne a adopté, en décembre 2008, un plan d'action dit « paquet énergie climat ». Ce plan d'action a pour objectif d'atteindre d'ici 2020² :

- la réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre de l'Union Européenne par rapport aux niveaux de 1990
- la part d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique à 20 %,
- un accroissement de l'efficacité énergétique de 20 %.

Dans le cadre de cet objectif, et de la directive 2009/28/CE, la France s'est fixée d'atteindre 23 % d'énergies renouvelables dans son mix énergétique.

L'exploitation des énergies marines renouvelables en France pourrait représenter à l'échéance 2020 3 % de cet objectif³.

Dans ce contexte, après l'éolien offshore posé, les technologies hydroliennes seront les prochaines à arriver à maturité et les projets de sites d'essais et pilotes sont en plein développement. En effet la France détient, après le Royaume-Uni, le second potentiel en ressources de courant en Europe. Les principaux gisements nationaux identifiés sont implantés sur des zones très localisées des côtes nord-ouest du pays : Raz Blanchard, Raz de Barfleur, Paimpol-Bréhat, le Fromveur ou le Raz de Sein.

¹ Le terme d'énergies marines renouvelables est utilisé en France pour désigner toutes les formes d'exploitation des ressources renouvelables issues du milieu marin : vent, courants, vagues, marées, température, salinité, biomasse (<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energies-marines>).

² http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tacling_climate_change/index_fr.htm

³ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Livre_bleu.pdf

Trois Appels à Manifestations d'Intérêt (AMI) gérés par l'ADEME dans le cadre des investissements d'avenir concernent ces technologies.

Le champ du premier AMI concernait des démonstrateurs testés en mer, deux projets d'hydroliennes avaient été retenus en 2009.

Le second AMI, clôturé le 31 octobre 2013, couvre les briques technologiques dédiées notamment à la filière de l'hydrolien marin comme des dispositifs permettant de faciliter le raccordement ou l'injection de la production sur les réseaux électriques. Les projets visés doivent faire la démonstration en mer, prioritairement et quand cela est applicable, sur des sites d'essais gérés par France Energies Marines (ADEME, 2013).

Le troisième AMI concernant des projets de fermes pilote hydroliennes est ouvert depuis le 1^{er} octobre 2013 et se clôturera le 24 avril 2014. Les fermes devront comprendre entre 3 et 10 machines de productible brut minimum de 2 500 MWh/an / machine.

Deux sites spécifiques, sur lesquels sont prévues 7 zones, ont été identifiés au Raz Blanchard et au Fromveur (Fig. 1 et 2).

0.2. Sites hydroliens de France Energies Marines

Les sites d'essais France Energies Marines sont mis à disposition des développeurs de technologies sur l'ensemble du processus jusqu'à la qualification des technologies.

- Le site d'essais SEENEOH (Fig.1):

Le Site Expérimental Estuarien National pour l'Essai et l'Optimisation d'Hydroliennes (SEENEOH) est situé en plein cœur de Bordeaux dans la partie fluviale de l'estuaire de la Gironde. La proximité de ce site permet de réduire significativement les contraintes financières liées au déploiement de machines en milieu naturel. Les trois emplacements disponibles permettront d'accueillir des technologies flottantes, posées ou à portance variable et de tester des hydroliennes à pleine échelle (marché fluvial et estuarien) et à échelle intermédiaire (marché océanique).

- Le site d'observation et d'expérimentation de Paimpol-Bréhat (Fig.1):

Le site de Paimpol-Bréhat est relativement représentatif d'une zone hydrolienne en matière d'hydrodynamique, de nature du fond, etc., tout en offrant des conditions plus bénignes que d'autres sites hydroliens, facilitant ainsi les opérations en mer. Il sera pour France Energies Marines le lieu privilégié d'observation de l'environnement physique et biologique et de validation de sous-systèmes qui seront développés dans le cadre de projets de R&D.

0.3. Sites pilote hydroliens

- Raz Blanchard : Le gisement hydrolien regroupant le raz Blanchard et le raz de Barfleur, sur les côtes normandes, est le premier au niveau national, avec un potentiel de plus de 50% du gisement français estimé entre 2 et 2,5 GW (DIRM Manche Est - Mer du Nord 2013). La

zone retenue pour l'AMI fait une superficie de 7.3 km².

- Fromveur : Le gisement hydrolien du passage du Fromveur, entre l'archipel de Molène et l'île d'Ouessant, est le second gisement hydrolien français, avec 300 à 500 MW estimés (Boyé *et al.*, 2013). Concernant la région Bretagne, ce site a été retenu comme zone propice au développement de ferme pilote. Une zone de 4 km² a été définie en concertation avec les acteurs de la zone (pêcheurs, PNMI, industriels, services de l'état (DREAL, DIRM, pDML), Préfectures, conseil régional) au sein de la Conférence régionale de la mer et du littoral.

- Paimpol-Bréhat : EDF réalise un site expérimental hydrolien au large de Paimpol-Bréhat (Côtes d'Armor), qui sera composé de 4 hydroliennes de 500 KW chacune, utilisant la technologie de la société Open Hydro (DCNS).



Figure 1
Carte des principaux sites R&D, site d'essais et sites pilotes français pour les technologies hydroliennes

Dans son rapport, la mission d'étude sur les énergies renouvelables (Boyé *et al.*, 2013) a proposé un calendrier, désigné comme volontariste, dont le volet hydrolien est présenté dans le tableau 1.

Essais et démonstrateurs	Fermes pilotes, développement	Fermes pilotes, déploiement	Fermes ou installations industrielles 100-300 MW	Fermes ou installations industrielles > 300 MW
2011-2013	2011-2013 Appel d'offres en 2013	2014-2016 voire 2014-2015	2017-2018, voire déploiement à partir de 2016	2020

Tableau 1 Calendrier de développement des projets hydroliens français (Boyé *et al.*, 2013)

0.4. Objectifs du guide

L'objectif principal de ce guide est de favoriser l'insertion environnementale d'un nouveau type d'aménagement en mer pour lequel il n'existe que très peu de retours d'expérience sur les incidences écologiques potentielles.

Du fait du manque de retours d'expérience français (quelques-uns à l'international) et de la méconnaissance, encore à ce jour, des milieux marins ciblés par les technologies hydroliennes, le contexte structurel dans lequel seront développés les suivis environnementaux des projets hydroliens est encore à l'état d'ébauche. Aussi bien pour la connaissance du milieu (physique et biologique), que pour les aspects réglementaires et technologiques (machines, installation, maintenance...), l'évaluation des impacts environnementaux des projets hydroliens n'en est qu'à ses prémices. Le présent guide propose des recommandations et des méthodes permettant une première prise en compte de ces différents aspects.

Le projet GHYDRO vise donc à élaborer un guide méthodologique fournissant des clés d'analyse des principaux impacts environnementaux potentiels liés aux différentes technologies hydroliennes en mer. Il formule des recommandations sur le choix d'implantation, la description de l'état initial et le suivi écologique des projets hydroliens.

Le guide méthodologique constitue à ce jour une synthèse de recommandations se rapportant aux divers paramètres physiques et compartiments biologiques de l'écosystème potentiellement impactés. Le guide ne constitue en aucun cas un document réglementaire sur les études d'impacts des projets hydroliens.

0.5. Périmètres de l'étude

Périmètre spatial :

Le domaine maritime de l'estran jusqu'au large. Seuls les impacts sur l'environnement marin seront traités. Les impacts du câble à terre (au-dessus de la limite des pleines mers), par exemple, ne seront pas présentés dans ce guide. Les technologies fluviales seront présentées mais leurs impacts ne seront pas traités dans ce guide.

Périmètre thématique :

Le guide concerne principalement :

- les aspects environnementaux (c'est-à-dire les impacts potentiels sur les écosystèmes marins concernés par ce type d'aménagements). Les impacts potentiels sur les usages et plus spécifiquement sur les activités de pêche professionnelle sont brièvement abordés.

- les différents paramètres et compartiments de l'écosystème : physiques (substrat, hydrodynamique, qualité de l'eau, acoustique...) et biologiques (benthos, poissons, oiseaux, mammifères ;...).

Périmètre technique :

- Des sites d'essais aux parcs industriels⁴,
- Les différentes phases du projet (installation, exploitation, démantèlement),
- Les technologies hydroliennes en cours de développement (surtout en Europe) susceptibles d'être installées en France,
- Les différentes composantes de l'aménagement des projets hydroliens (fondations, turbines, convertisseurs, câbles).

0.6. Destinataires du guide

Ce guide répond à une demande forte de la part des développeurs de projets hydroliens et des bureaux d'études associés, mais également des services de l'Etat (et opérateurs de l'Etat comme l'Agence des aires marines protégées) et des collectivités territoriales qui auront à instruire ces dossiers.

Ce document pourra également constituer une aide et un cadre de lecture utile pour les acteurs de la concertation qui accompagneront la mise en place des futurs projets hydroliens.

0.7. Plan du Guide

Le guide est structuré par compartiment de l'écosystème (Tab. 2). Les compartiments physiques et biologiques des écosystèmes marins ont été traités séparément afin de proposer des méthodologies adaptées à chacun d'entre eux en ce qui concerne la réalisation de l'état initial, la caractérisation des impacts potentiels et les suivis environnementaux.

Afin de simplifier la lecture du guide, le tableau 2 ci-après permet de se repérer dans le document en utilisant deux entrées possibles : les pressions⁵ ou les compartiments de l'écosystème et usages.

Dans un premier temps, le guide présente le contexte législatif des projets hydroliens, les principales technologies hydroliennes et la prise en compte des usages.

Dans un second temps, le guide détaille pour chaque paramètre ou compartiment de l'écosystème :

- les méthodes de définition de l'état initial : périmètre spatial de l'étude, description du contexte écologique, identification d'indicateurs pertinents et méthodologie d'acquisition d'information,
- les méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels,
- les méthodes d'identification des impacts cumulés,
- la description d'un programme de suivi environnemental type,
- des suggestions de mesures d'atténuation des impacts (suppression / réduction / compensation / remédiation),
- les lacunes et programmes de recherche à développer.

⁴ On distingue ainsi les sites d'essais (tests de prototypes), des parcs pilotes (quelques machines) ou des parcs pré-industriels (≈10 machines) à industriels (quelques dizaines à une centaine de machines).

⁵ Pression : correspond à la traduction des sources de pression dans le milieu se matérialisant éventuellement par un changement d'état, dans l'espace ou dans le temps, des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du milieu. Arrêté du 17 décembre 2012 relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines (<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000026864150&dateTexte=&categorieLien=id>).

Pressions								
	Présence de structures au fond	Présence de structures dans la colonne d'eau	Fonctionnement des hydroliennes					
			Diminution de l'énergie	Contamination chimique	Augmentation de la turbidité	Perturbations acoustiques	Perturbations électromagnétiques	Perturbations thermiques
Topographie	§ 4.2							
Nature des fonds	§ 4.2							
Dynamique sédimentaire	§ 5.2.1	§ 5.2.1, 5.1.1						
Courant		§ 5.1.1						
Houle		§ 5.1.1						
Environnement sonore		§ 6.2.2				§ 6.2		
Benthos	§ 7.2.1, 7.2.2	§ 7.2.2	§ 7.2.2	§ 7.2.2	§ 7.1.2.4		§ 7.2.2	§ 7.2.2
Compartiment pélagique	§ 8.2.1, 8.2.2	§ 8.2.1, 8.2.2	§ 8.2.2	§ 8.2.2	§ 8.2.1	§ 8.2.1, 8.2.2	§ 8.2.2	
Mammifères marins	§ 9.2.3.2	§ 9.2.2, 9.2.3.3		§ 9.2.3.1, 9.2.5.2	§ 9.2.3.1	§ 9.2.4	§ 9.2.5.1	
Avifaune marine		§ 10.2		§ 10.2		§ 10.2		
Usages	§ 3	§ 3						

Tableau 2 Tableau de navigation dans le guide méthodologique sur les impacts environnementaux des technologies hydroliennes.

Les effets environnementaux (ou pressions) correspondent aux modifications d'une large gamme de paramètres environnementaux générées par la présence et le fonctionnement d'un projet hydrolien. Ces effets interagissent avec les composantes de l'environnement marin (physiques et biologiques). Chaque interaction possible peut éventuellement donner lieu à un impact environnemental, pouvant atteindre un niveau de nuisance ou de bénéfice écologique significatif (Polagye *et al.*, 2011).

On doit alors s'intéresser aux effets liés à :

- La présence des machines :
 - * les effets statiques
 - * les effets dynamiques ;
- Les effets chimiques ;
- Les effets acoustiques ;
- Les effets électromagnétiques ;
- Le prélèvement d'énergie ;
- Les effets cumulés (chacun de ces effets peut être démultiplié par l'échelle de déploiement des projets hydroliens, la présence d'autres projets EMR et d'autres usages impactant le milieu marin).

1. Energie hydrolienne

1.1. Contexte

L'énergie des courants de marée est l'énergie cinétique contenue dans les courants associés au déplacement des masses d'eau qui accompagne le phénomène de marée. Une hydrolienne est donc un dispositif qui convertit cette énergie des courants de marée en énergie électrique.

Les courants marins sont en théorie exploitables partout dans le monde mais les courants de marée constituent pour l'instant le domaine préférentiel de ce type de technologie car ils présentent, par rapport aux courants généraux (comme le Gulf Stream) des caractéristiques particulièrement favorables :

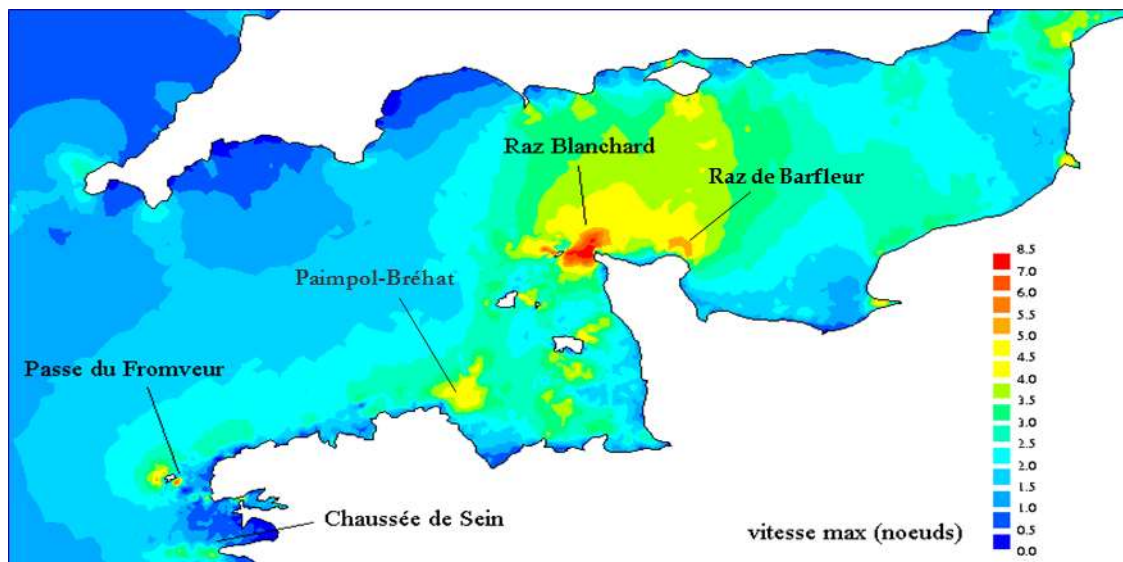
- Intensité importante : dans certaines zones, les courants de marée peuvent atteindre ou dépasser 10 nœuds⁶, soit 5 mètres par seconde (m/s), alors que les courants généraux dépassent rarement 2 nœuds ;
- Proximité de la côte : les veines de courant intense apparaissent dans des zones de faibles profondeurs situées à proximité du

littoral, ou au niveau de resserrments topographiques (caps, détroits, ...), ce qui en facilite l'exploitation ;

- Stabilité des directions d'écoulement : avec l'alternance entre les courants de marée montante (flot) et descendante (jusant), les directions d'écoulement sont généralement bidirectionnelles, ce qui simplifie le dispositif de captage ;

- Prédicibilité : les courants de marée sont parfaitement prévisibles puisqu'ils ne dépendent que de la position relative des astres générateurs (Lune et Soleil) et de la topographie locale.

Après le Royaume-Uni, la France présente le deuxième gisement hydrolien en Europe, avec un potentiel théorique exploitable estimé à environ 2 à 3 GW (source EDF). La ressource hydrolienne dans les eaux territoriales françaises se concentre au large de la pointe de la Bretagne, entre Ouessant et le continent, et autour du Cotentin, dans le Raz Blanchard et le Raz de Barfleur (Fig. 2). D'autres zones comme l'Estuaire de la Gironde et Paimpol-Bréhat ont été identifiées comme présentant une ressource hydrolienne certaine.



⁶ 1 nœud = 0.51 m/s

1.2. Principe de fonctionnement d'un parc hydrolien

Le courant des marées fait tourner la turbine des hydroliennes, dont il existe plusieurs principes de fonctionnement (voir §1.3.). Cette rotation entraîne un alternateur qui produit un courant électrique variable. Selon les technologies et la configuration du parc hydrolien (*a priori* constitué de turbines similaires), différentes configurations de conversion de l'électricité peuvent être envisagées (à terre ou en mer) afin d'obtenir une électricité compatible avec le réseau électrique (U, fixe).

Dans le cas de fermes pilotes et industrielles, et selon l'éloignement à la côte, les hydroliennes peuvent être raccordées à une boîte de jonction

sous-marine (ou à un poste de conversion si besoin) via un câble sous-marin appelé ombilical (Fig. 3).

Même si les configurations de raccordement varient selon les technologies, les câbles ombilicaux ne sont généralement pas stabilisés et sont spécifiquement conçus pour absorber les différents mouvements liés à la houle et aux courants marins. La boîte de jonction sous-marine est quant à elle posée ou fixée directement sur les fonds marins ou sur une structure porteuse.

L'énergie produite par les hydroliennes est ensuite évacuée jusqu'à la côte au moyen d'un ou plusieurs câbles d'export raccordés au réseau public d'électricité par l'intermédiaire d'un poste de livraison.

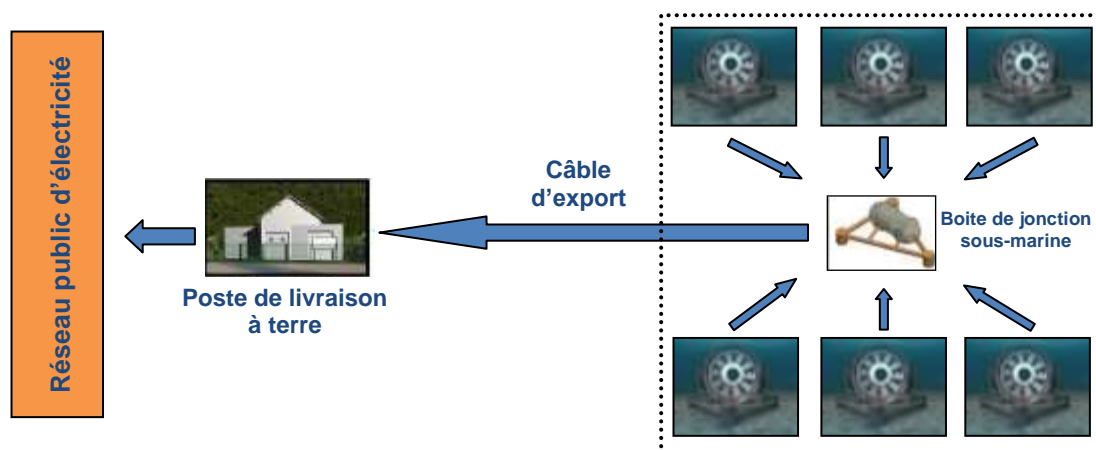


Figure 3 Schéma de principe d'un parc hydrolien et du dispositif de raccordement (source EDF – Exemple d'Openhydro)

1.3. Les technologies hydroliennes

1.3.1. Notions générales

Une hydrolienne est un dispositif subaquatique qui utilise l'énergie cinétique des courants marins pour la convertir en énergie électrique. La turbine de l'hydrolienne permet de transformer l'énergie cinétique en énergie mécanique grâce aux pales. Un alternateur transforme ensuite cette énergie mécanique en énergie électrique. Ces technologies développées spécialement pour le domaine marin sont tout aussi exploitables en domaine fluvial et estuarien à condition d'avoir un espace d'implantation adéquat. Les hydroliennes se distinguent des turbines hydrauliques classiques (Pelton, Francis, Kaplan,...) qui utilisent comme source d'énergie l'énergie potentielle correspondant à la différence de niveau entre deux réservoirs.

Une hydrolienne est constituée de plusieurs éléments :

- **Une turbine** : elle recueille l'énergie cinétique du courant et la convertit en énergie mécanique. Malgré la grande diversité de technologies d'hydroliennes, on peut distinguer deux grands types de turbines (Fig. 4):

- Systèmes à flux axial ou transverse : le principe de ce dispositif peut être assimilé à celui d'une éolienne sous-marine puisque les pales d'un rotor convertissent le courant linéaire en rotation, puis en électricité par le biais d'un générateur. On distingue les turbines à flux horizontal et celles à flux transverse.

Ces deux types de dispositifs peuvent être associés à un carénage particulier permettant l'accélération du fluide (« effet Venturi ») ; on parle alors de système à flux canalisé.

- Les systèmes à hydrofoils : ce type de dispositif est constitué de « pagaies » sous-marines (appelées aussi « ailes battantes ») actionnant un système hydraulique. Les pagaies oscillent sous l'effet des courants, comprimant ainsi un fluide hydraulique. La pression est alors convertie en électricité.

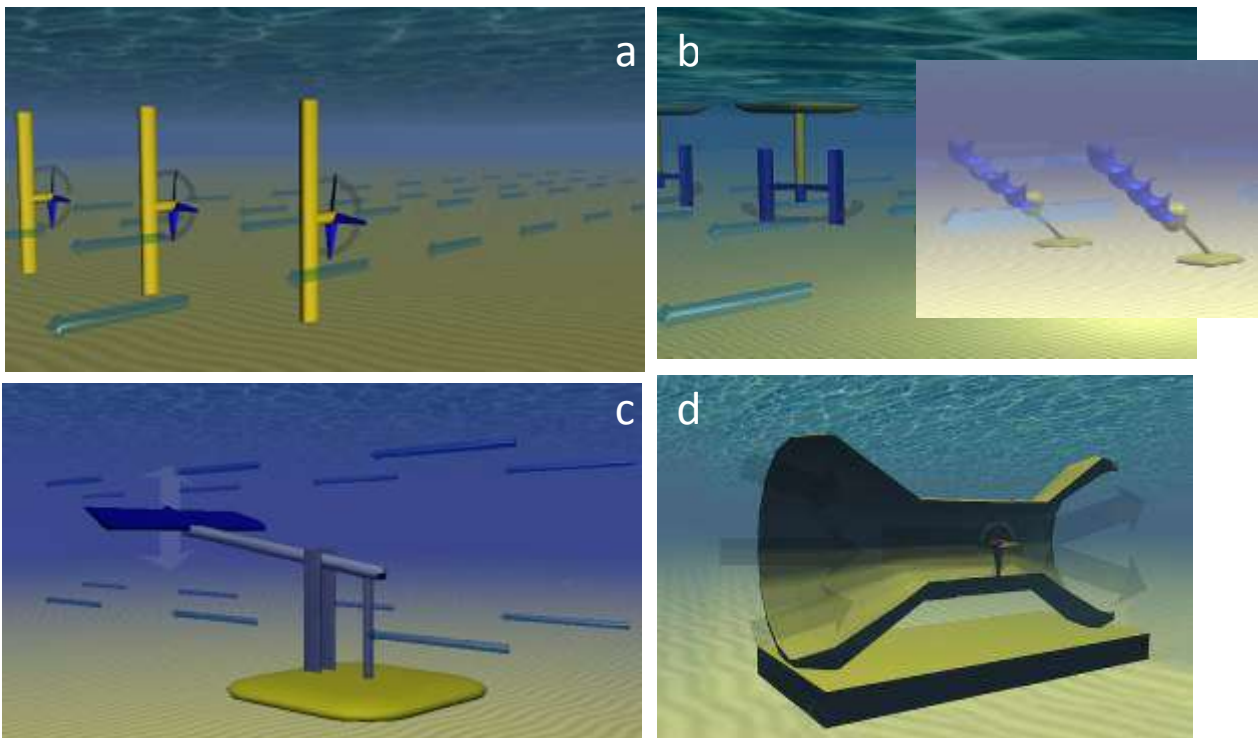


Figure 4 Différents types de turbines : à flux axial (a), à flux transverse (b), à ailes battantes (c) et à flux canalisé (d) (source : www.aquaret.com)

- **Une structure porteuse** pour maintenir la turbine sous l'eau dont les fondations peuvent prendre plusieurs formes (Fig. 5) :
 - structure reposant directement sur le fond (fondation gravitaire)
 - pylône enfoncé dans le sol (fondation

- mono ou multi pieux, surmontée ou non de jackets)
 - système flottant entre deux eaux ou en surface, fixé au fond par des ancrages conventionnels (si présence de sédiments meubles) ou gravitaires.

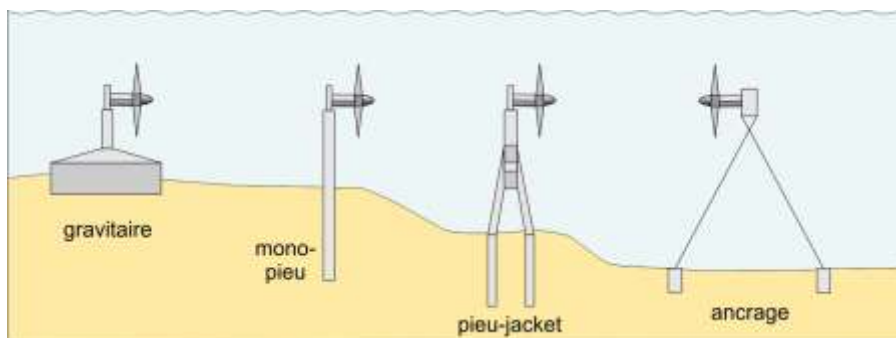


Figure 5 Différents types de fondation

- **Une transmission mécanique** (pouvant comprendre un multiplicateur) et un **générateur d'électricité** (Fig. 6).

- **Des éléments auxiliaires** (éventuellement) permettant le fonctionnement optimal de l'hydrolienne : contrôle-commande, frein, systèmes électroniques,...

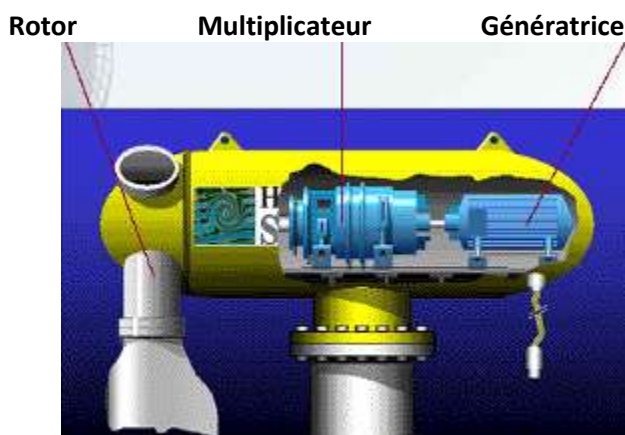


Figure 6 Exemple d'éléments constitutifs d'une turbine hydrolienne

1.3.2. Les différents concepts d'hydroliennes

A l'instar des autres types d'énergies marines, le développement de technologies hydroliennes connaît une accélération rapide depuis quelques années. Près d'une centaine de concepts d'hydroliennes sont actuellement en phase de développement dans le monde. De

par les dimensions variables de leur turbine, ces concepts d'hydroliennes visent à la fois le domaine marin mais aussi le domaine estuarien et fluvial. Pour des raisons de clarté, seules les technologies européennes adaptées au milieu marin et présentant un degré de maturité avancé sont présentées dans ce paragraphe (Tab. 3 et 4).


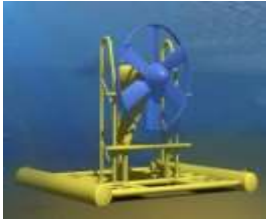



FONDATION GRAVITAIRE					
Constructeur	Andritz	Sabella	Voith Siemens	Openhydro	Atlantis Resources
Nom de la technologie	Hammerfest Strom	D03, D10 et D15	HyTide		AK 1000
Illustration (sources = sites internet des développeurs ou énergiesdelamer.blogspot.fr)					
Puissance (MW)	1	0,2 à 2 MW	1	0,5 à 2	1
Diamètre ext. (m)	23	3 à 15	16	6 à 16	18
Hauteur (m)	30	5,5 (D03) à 16 (D10)	30	21 (pour la ϕ 16m)	22,5
Fondation	Tripode gravitaire avec ballasts	Plateforme gravitaire	Plateforme gravitaire (ou mono pieu)	Tripode gravitaire	Tripode gravitaire avec ballasts
Poids total (tonnes)	300	290 (D10)	200	850 (ϕ 16)	1 300
Vitesse de rotation (tr/min)	10	10 à 15		3 à 7	
Principes de maintenance	Pose et relevage de la nacelle indépendamment du tripode	Pose et relevage de la turbine indépendamment de la plateforme	Pose et relevage de la turbine indépendamment de la plateforme	Relevage de l'ensemble turbine + tripode	Pose et relevage de la nacelle indépendamment du tripode
Retour d'expérience	Prototypage de 0,3 MW testé en Norvège (2003 à 2009) Prototypage de 1 MW testé à l'EMEC (2011/2012)	Prototypage D03 testé dans l'estuaire de Bénodet (2008/2009) Projet démonstrateur dans le Fromveur	Prototypage de 0,1 MW testé en Corée (2007) Prototypage de 2 MW testé à l'EMEC (depuis 2011) Projet de parc pilote dans le Raz Blanchard (2015)	Prototypage OT6 testée à l'EMEC (2008) Prototypage OT10 testé en Baie de Fundy (2009) Prototypage OT16 (0,5 MW) testé à Bréhat (2011) Projet de parc pilote dans le Raz Blanchard (2015)	Prototypage HS 1000 de 0,5 MW testé à l'EMEC (2010)

Tableau 3 Exemples de différentes technologies hydroliennes (source EDF)

	FONDATION GRAVITAIRE		FONDATION MONO- ET MULTI-PIEUX			STRUCTURES FLOTTANTES	
Constructeur	Lunar Energy / Rotech	Flumill	Alstom	Marine Current Turbines / Siemens	Verdant Power	Ponte di Archimede	Scotrenewables Tidal Power Limited
Nom de la technologie	(projet à l'arrêt)		TGL	SeaGen		Kobold turbine	SR250
Illustration							
Puissance (MW)	1	2	1	1,2	1,2	0,03 à 0,05	0,25
Diamètre ext. (m)	15	≈8	18 à 20	2 x 16	16	5	8
Hauteur (m)	20	≈45	23	21	21	5	Longueur : 33 m
Fondation	Tripode gravitaire	gravitaire	Tripode fixé par pieux	Quadripode fixé par 4 micropieux	Mono-pieu	Plateforme flottante	Structure flottante ancrée
Poids total (tonnes)	2 500	160 - 200	150				100
Vitesse de rotation (tr/min)				14			
Principes de maintenance	Pose et relevage de la turbine indépendamment du tripode	Possibilité de remonter la turbine à la surface	Remontée de la nacelle à la surface par flottaison	Mât-palan permettant de hisser les turbines hors de l'eau			Possibilité de remonter les turbines à la surface
Retour d'expérience	Prototype de 1 MW testé en Corée (2009) Projet de 300 MW en Corée (2015/2016)	Prototype testé à l'EMEC entre sept 2011 et janvier 2012	Prototype de 0,5 MW testé à l'EMEC (2010) test d'un prototype de 1 MW à l'EMEC en cours (2013) Projet de ferme pré-commerciale de 4-10 MW (2014/2016)	Prototype Seaflow de 0,3 MW testé au large de Bristol (2003 / 2009) Prototype SeaGen testé en Irlande du Nord (depuis 2008)	Prototype testé à New York (2002-2006) : Installation de 6 turbines raccordées au réseau (2008-2012)	Projet pilote Enermar en Sicile (depuis 2004) Test d'un prototype de 0,07 MW en Chine (depuis 2006)	Prototype testé à l'EMEC (2011/2012) Projet de développement d'un prototype de 2 MW

Tableau 4 Exemples de différentes technologies hydroliennes (source EDF) - Suite

1.3.3. Synthèse vis-à-vis des impacts potentiels des technologies hydroliennes

La technologie hydrolienne est encore en phase de développement, ce qui conduit à des types variés de turbines ou de modes d'installation. Les différents concepts vont avoir des impacts potentiels sur l'environnement très variés : entre une hydrolienne flottante et une hydrolienne à fondation mono ou multi-pieux, les impacts principaux ne concerneront pas les mêmes compartiments de l'environnement.

Avant leur développement à un stade industriel, ces concepts pourront être testés dans des sites d'essais puis des sites pilotes, avec l'objectif d'en vérifier la pertinence (faisabilité, adéquation au site, efficacité énergétique...) et l'impact environnemental. Il est probable qu'il en découlera des adaptations de ces concepts actuels, voire même qu'il en émergera des « types » adaptés à telle ou telle configuration de sites (dépendant de la profondeur, de l'éloignement à la côte, de la nature des fonds, de l'intensité des courants, des enjeux environnementaux locaux...).

Au final, les impacts sur l'environnement du projet, en plus de dépendre des caractéristiques du milieu, seront fonction non seulement du type de turbines, mais également de la taille du parc et des raccordements électriques.

1.4. Les raccordements électriques

1.4.1. Contexte

Le guide traite des incidences environnementales et socio-économiques d'un parc de production en lui-même mais il est également important d'intégrer le dispositif de transport d'énergie jusqu'au point d'atterrage car, même s'il n'est pas spécifique à la technologie hydrolienne employée, le raccordement électrique peut être

dimensionnant en terme d'impacts potentiels.

Les capacités de production d'un parc hydrolien peuvent être très différentes selon qu'il présente une vocation expérimentale, pré-commerciale ou industrielle. Les puissances mises en jeu ainsi que la localisation des installations de production influencent les stratégies de raccordement au réseau électrique.

D'après une étude de la société Réseau de Transport d'Electricité (RTE)⁷, les fermes expérimentales ou pré-commerciales d'une puissance installée comprise entre 17 et 100 MW peuvent être raccordées au réseau public de transport⁸ via un poste de livraison situé à terre⁹. Ce schéma d'implantation est présenté dans la figure 3. Certains postes peuvent être sous-marins.

Pour les parcs industriels de plus grande puissance (supérieure à 100 MW), il paraît peu envisageable de raccorder individuellement les fermes sur un poste terrestre compte tenu du nombre important de câbles de moyenne tension qu'il faudrait réaliser et du nombre de points d'atterrage associé. L'aménagement de plateformes de transformation en mer, similaires à celles utilisées pour les parcs éoliens en mer, doit être envisagé (Fig. 7). Cette solution évite de multiplier les raccordements entre les fermes et la terre, mais présente un impact visuel certain dans le cas de solutions émergées. En l'état actuel des technologies, des câbles sous-marins de 225kV seraient installés par RTE entre les plateformes et le poste de livraison à terre. Des travaux de R&D sont en cours pour développer des stations sous-marines pour de grandes puissances.

⁷ Accueil de la production hydrolienne, Étude prospective de RTE, janvier 2013

⁸ Au réseau public de distribution pour les fermes de puissance inférieure à 17 MW.

⁹ Ce poste de livraison peut contenir un transformateur, des organes de protection et de coupure, et une interface contrôle-commande et de communication.



Figure 7 Exemples de plateformes de transformation du courant électrique en mer

1.4.2. Le câble d'export

Actuellement, les problématiques de raccordement concernent des parcs d'hydroliennes de faible à moyenne puissance, dont l'objet principal est de permettre aux développeurs de technologies de tester et valider les performances de démonstrateurs en conditions réelles. Les parcs hydroliens sont alors directement raccordés par un câble d'export à un poste de livraison situé à terre. Son diamètre total est généralement inférieur à 20 cm. Sa pose est réalisée de manière classique par un navire câblé. Etant, au moins en partie, situé dans des zones de forts courants, le câble peut nécessiter des moyens de stabilisation dans les secteurs à fonds rocheux où il ne peut être ensouillé, même s'il dispose déjà d'une gaine protectrice lestée. Les impacts environnementaux sont alors potentiellement différents en fonction des moyens utilisés, qui dépendront eux-mêmes du contexte environnemental et des possibilités locales (ressources et matériels disponibles).

1.4.2.1. Ancrage ou lestage des câbles sur substrat dur

❖ Ancrages :

Deux types d'ancrage peuvent être envisagés. L'ancrage scellé est réalisé à l'aide de tiges filetées en inox qui sont vissées dans un trou préalablement foré. Le scellement est assuré chimiquement par injection d'une résine epoxy. L'ancrage mécanique consiste à visser une vis de type goujon dans un trou préalablement foré et nettoyé.

Dans les deux cas, les forages sont effectués en roto percussion par des plongeurs au moyen d'une foreuse hydraulique. Le câble sous-marin est ensuite fixé au système d'ancrage à l'aide d'un collier d'ancrage (Fig. 8).

Potentiellement, les incidences environnementales vont concerner principalement l'environnement sonore et les risques de pollution locale.

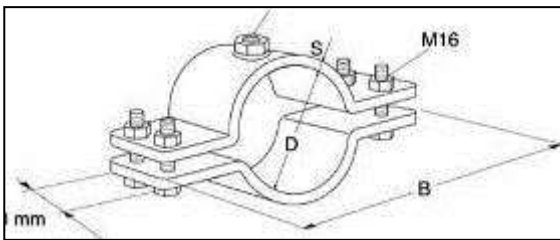


Figure 8 Foreuse hydraulique - Exemple de collier d'ancrage

❖ Matelas en béton :

Les matelas en béton (pré-assemblés) consistent en un maillage de blocs de béton connectés entre eux avec une corde en polypropylène. Ils sont en général disposés de manière discontinue le long du câble. Les dimensions standards d'un matelas de béton sont 6 m de long par 3 m de large. Leur installation est effectuée depuis une barge munie d'une grue et d'un palonnier (Fig. 9). L'impact négatif généré lors de la pose sur les habitats benthiques pourrait être compensé par l'habitat nouveau offert par ce type de structure.



Figure 9 Matelas en béton (source : BERR 2008)

❖ Coquilles :

Les coquilles métalliques sur mesure peuvent également être installées autour du câble, au moment de sa pose, de manière à le protéger de l'abrasion en augmentant aussi son lestage et sa stabilité (Fig. 10).

Ce dispositif ne génère a priori pas d'impact significatif supplémentaire par rapport au câble lui-même.



Figure 10 Mise en place des coquilles (source : EDF)

❖ Enrochement (Rock Dumping) :

Cette technique consiste à recouvrir le câble sous-marin d'une hauteur plus ou moins importante de blocs de pierres (Fig. 11) à l'aide d'une barge équipée d'une grue munie d'un grappin (pour des faibles volumes) ou par clapage ou injection « dirigée » (pour les gros volumes). L'impact environnemental est alors lié à la mise en œuvre de la technique (dégradation temporaire de la qualité de l'eau, augmentation des niveaux sonores...) et à l'emprise au sol plus importante. Les enrochements constituent à terme des nouveaux habitats pour les biocénoses.

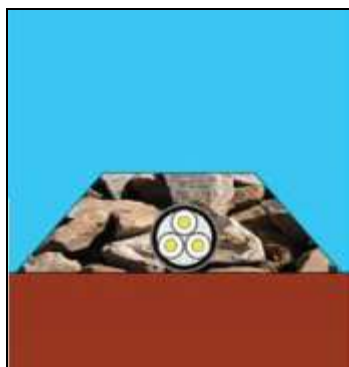


Figure 11 Exemple de rock dumping (source : RTE)

❖ Blocs ou cavaliers de béton :

La pose de structures en béton de type blocs ou cavaliers est généralement utilisée pour lester et fixer et assurer ainsi une tenue sur le fond de canalisations (Fig. 12).

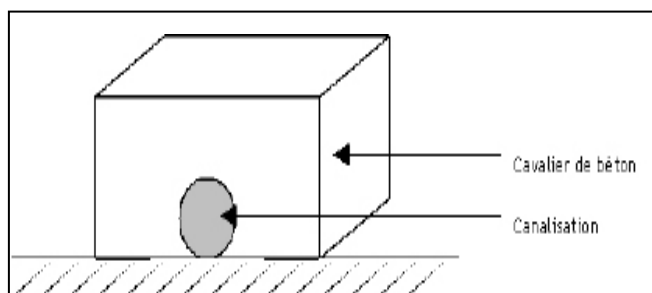


Figure 12 Cavalier en béton (Source : CETMEF)

Cette technique peut néanmoins être mise en œuvre afin de stabiliser ponctuellement un câble sous-marin sur un certain nombre de points de l'ouvrage identifiés comme particulièrement critiques. Les structures en béton sont alors dépo-

sées au-dessus du câble à l'aide d'une grue et de plongeurs qui guident la pose sous l'eau.

Les impacts environnementaux vont concerner, comme pour les matelas en béton, les emprises au sol (biocénoses benthiques – voir paragraphe 7.2).

1.4.2.2. Ensouillage dans des substrats meubles

L'ensouillage consiste à creuser un sillon dans le sol marin pour y poser le câble (Fig. 13).

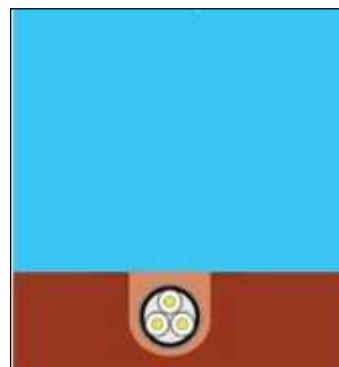


Figure 13 Exemple d'ensouillage d'un câble (source : RTE)

Dans un sol sableux ou composé de sédiments fins, la technique utilisée est celle du « jetting » qui permet d'écarter les matériaux sableux ou vaseux à l'aide d'un jet d'eau ou d'air sous haute pression et d'ouvrir à l'avancement une tranchée dans laquelle est déposé le câble (Fig. 14). Pour des matériaux plus grossiers ou des terrains plus difficiles, la charrue sera préférentiellement utilisée ; le principe d'ensouillage et de pose est identique à celui du « jetting » (Fig. 15). Ces techniques permettent la pose et l'ensouillage à l'avancement et nécessitent l'utilisation du navire câblé. Selon la nature des sols, elles permettent d'enfouir le câble à une profondeur de 2 à 3 m maximum.

En plus du remaniement des matériaux causé par l'ensouillage et son rebouchage, ces opérations génèrent une remise en suspension de matériaux, dont la sédimentation est le plus souvent localisée à une zone de 10 à 20 m autour de l'axe de pose (Knudsen *et al.*, 2006 in Wilhelmson *et al.*, 2010).



Figure 14 Technique du « jetting » (source : RTE)



Figure 15 Charrue d'ensouillage



Figure 16 BRH



Figure 17 Trancheuse (source : RTE)

Pour les substrats durs, l'utilisation d'un brise roche hydraulique (BRH) ou d'une trancheuse peut être envisagée pour ouvrir la tranchée et y déposer le câble avant de le recouvrir de déblais (Fig. 16 et 17). Dans ce cas, l'environnement sonore est aussi significativement affecté pendant les opérations.

1.4.3. Atterrage

La zone d'atterrage est le point où le câble sous-marin est relié au réseau terrestre. Le plus souvent, les zones propices sont rares, et constituent le facteur dimensionnant de la stratégie de raccordement du potentiel hydrolien.

Le choix du mode opératoire pour la pose de la partie terminale de la liaison sous-marine dépend des caractéristiques physiques du trait de côte, du statut de protection réglementaire et de la sensibilité écologique des milieux et des usages.

❖ Atterrage par tranchée

L'opération de pose et d'ensouillage du câble au niveau de la plage peut s'effectuer par des moyens mécaniques terrestres (Fig. 18). La tranchée est généralement réalisée par une pelle mécanique à godet étroit. La profondeur d'ensouillage doit être adaptée pour éviter tout risque de mise à nu lors des fortes tempêtes. A l'issue des travaux, une remise en état physique du site à l'identique est réalisée. Les travaux génèrent alors des incidences « classiques » de chantier de terrassement (bruit, gêne de la faune et des usages, ...).



Figure 18 Travaux de pose au niveau de la plage (source : EDF)

❖ **Atterrissage par forage dirigé**
 Sur certains sites littoraux sensibles ou en présence d'un cordon dunaire, la réalisation d'un forage dirigé permet de réduire les impacts en passant directement sous l'estran ou les milieux dunaires sans créer de tranchée (Fig. 19).

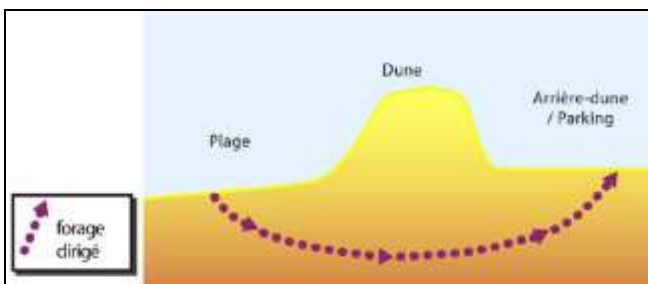


Figure 19 Schéma de principe d'un forage dirigé

La liaison entre la partie sous-marine et terrestre du câble se fait à l'intérieur d'un ouvrage souterrain maçonné appelé boîte de jonction (Fig. 20). Celle-ci est généralement implantée en arrière de la plage.



Figure 20 Boîte de jonction (source : RTE)

1.4.4. Poste de livraison

Un poste de livraison a pour fonction d'assurer l'interface entre le parc de production situé en mer et le réseau public d'électricité. Ce poste est nécessaire pour mettre à disposition un moyen de coupure facile d'accès et héberger les protections du réseau de distribution. Il contient aussi les compteurs d'énergie et assure le relais des informations de télésurveillance du parc hydrolien.

Le raccordement au réseau électrique peut s'effectuer sur un poste de livraison existant ou nécessiter la construction d'un nouveau bâtiment. Compte tenu de la sensibilité du littoral et de la réglementation en matière d'urbanisme, l'intégration paysagère et architecturale du bâtiment doit être soignée.

Il est important de noter que les impacts potentiels spécifiquement liés au poste de livraison à terre ne sont pas traités dans ce guide.

1.4.5. Synthèse vis-à-vis des impacts potentiels du raccordement électrique

La mise en œuvre et l'exploitation des câbles de raccordement électrique peuvent impacter les différentes composantes de l'environnement, et sont donc à considérer au même titre que le parc hydrolien en lui-même dans l'évaluation des incidences environnementales du projet. Les composantes de l'environnement potentiellement concernées (et « l'intensité » des impacts potentiels) ne sont pas toutes les mêmes selon la phase d'installation / démantèlement et la phase d'exploitation ; elles varient également en fonction des techniques de stabilisation éventuellement employées.

Chaque cas est donc particulier. On peut toutefois indiquer que les principaux compartiments potentiellement impactés par les câbles de raccordement sont, lors des opérations d'installations, les usages (navigation, ..), le bruit, la qualité de l'eau, le compartiment benthique ; et plutôt les biocénoses benthiques en phase d'exploitation (en lien avec la modification d'habitat et de courantologie locale et/ou les éventuels effets sur la température ou les champs électromagnétiques).

1.5. Conclusions : besoins spécifiques pour l'évaluation des incidences

L'évaluation des incidences environnementales d'un parc hydrolien en mer devra donc se baser sur les « interférences » entre les différentes composantes de ce parc et les différentes composantes environnementales, y compris fonctionnelles, dans lesquelles il s'insère.

Les indications techniques nécessaires à fournir dans l'étude d'impact sont récapitulées dans le tableau 5 (hors démantèlement, car il est difficile d'indiquer les modalités précises qui seront mises en œuvre ; on se limitera à présenter de manière sommaire, les principes qui sont envisagés pour démanteler le parc).

1.6. Recommandations

Pour la conception du projet, il est recommandé :

- d'intégrer les mesures de la séquence Eviter – Réduire – Compenser (MEDDE, 2012), très en amont et tout au long du projet.

- De tenir compte à chaque étape du projet des sensibilités environnementales et des activités des usagers de la mer. Pour ce faire, une concertation régulière au fil de l'avancement du projet est nécessaire.

Pour la rédaction de la partie « description du projet » de l'étude d'impact, il est recommandé de faire appel le plus possible à des illustrations, schémas, cartes, photographies, pour aider à sa compréhension.

	<i>Installation</i>	<i>Exploitation</i>
Parc	Planning général (étapes administratives, techniques, travaux), coût du projet	Localisation (carte), coordonnées géographiques, surface, profondeurs, nombre et disposition des machines, puissance unitaire et totale, balisage (navigation), maintenance (fréquence, durée, moyens nautiques).
Turbines	Moyens (type de navire, durée et période d'installation), moyens de stabilisation	Type de machine, dimensions, type de fondation / structure, fonctionnement (axe et vitesses de rotation, durée de fonctionnement), vitesses en bout de pales, produits spécifiques (antifouling, lubrifiants, protection anti-corrosion...), bruit émis (intensités, fréquences)
Convertisseurs électriques sous-marins	Moyens (type de navire, durée et période d'installation), moyens de stabilisation	Dimensions, système de refroidissement, produits spécifiques
Plateforme de transformation	Moyens (type de navire, durée et période d'installation)	Localisation (coordonnées géographiques), dimension (sous l'eau / hors d'eau), moyens d'accès.
Ombilicaux	Moyens (type de navire, durée et période d'installation)	Nombre, longueur, type de connexion, boîte de jonction sous-marine
Câble d'export	Moyens (type de navire, durée et période d'installation), type de protection et de stabilisation (ensouillage et/ou posé) (caractéristiques techniques, quantités) ; modalités des travaux au point d'atterrage.	Couloir d'atterrage (coordonnées géographiques, longueur, largeur), distance à la côte, cartes, caractéristiques du courant transporté (puissance, fréquence, tension, ...), champ électromagnétique attendu
Poste de livraison	Planning de réalisation	Localisation, superficie, plans, bruit émis

Tableau 5 Indications techniques à fournir dans l'étude d'impact environnementale d'un projet de parc hydrolien (hors démantèlement)

2. Cadre juridique

2.1. Procédures réglementaires auxquelles est soumis un projet hydrolien

Selon le projet, la réalisation d'un parc hydrolien en mer est soumise à différentes procédures réglementaires résumées dans le tableau 6 ; certaines de ces procédures nécessitent une étude d'impact (et une enquête publique¹⁰) au titre du code de l'environnement.

Préalablement à leur établissement, les installations de production d'électricité utilisant l'énergie hydrolienne sont soumises à une autorisation d'exploiter au titre de la loi sur l'énergie (article L311-1 du code de l'énergie).

Cadre réglementaire s'appliquant aux parcs hydroliens en mer
Déclaration ou autorisation d'exploiter une installation de production d'électricité
Autorisation d'occupation ou concession d'utilisation du domaine public maritime <i>Etude d'impact et enquête publique</i>
Autorisation au titre de la loi sur l'eau <i>Etude d'incidences (ou étude d'impact valant étude d'incidences) et enquête publique</i>
Déclaration préalable ou autorisation au titre du code de l'urbanisme (pour les parties à terre) <i>Eventuellement procédure Loi Littoral (enquête publique, si passage en Espace Remarquable ou dans la bande des 100m)</i>

Tableau 6 Cadre réglementaire s'appliquant aux parcs hydroliens en mer – des procédures complémentaires peuvent s'avérer nécessaires en fonction des sites (Natura 2000, dérogation pour atteintes à des espèces protégées, etc).

¹⁰ Un débat public peut s'avérer obligatoire en fonction du montant d'investissement du projet.

Le maître d'ouvrage doit également obtenir une autorisation d'occupation temporaire ou une concession d'utilisation du domaine public maritime (articles L-2122-1 et L. 2124-3 du code général de la propriété des personnes publiques – CG3P)¹¹. Ces autorisations se présentent sous la forme d'un arrêté préfectoral et confèrent un titre d'occupation du domaine public maritime au pétitionnaire pour la durée des travaux et l'exploitation ultérieure des ouvrages.

Dans le cadre d'une concession d'utilisation du domaine public maritime (dont la durée ne peut excéder 30 ans), une convention, négociée entre les services instructeurs et le maître d'ouvrage et annexée à l'arrêté préfectoral, indique notamment l'objet de la concession et les prescriptions techniques que doit respecter le maître d'ouvrage, y compris concernant la remise en état du site en fin d'exploitation. Elle fixe les modalités d'utilisation des dépendances domaniales concédées et établit le montant de la redevance domaniale versée à l'État.

Dès lors que les travaux ont une incidence directe sur le milieu marin et sont d'un montant supérieur à 1,9 millions d'euros, le maître d'ouvrage doit obtenir une autorisation au titre de la loi sur l'eau (articles L 214-1 et suivants du code de l'environnement), délivrée par arrêté préfectoral. Les travaux d'implantation d'un parc hydrolien en mer relèvent plus particulièrement de la rubrique 4.1.2.0 de la nomenclature annexée à l'article R.214-1 du code de l'environnement qui vise les « travaux d'aménagement portuaires et autres ouvrages réalisés en contact avec le milieu marin et ayant une incidence directe sur ce milieu ». L'arrêté préfectoral d'autorisation fixe des prescriptions spécifiques relatives aux conditions de réalisation, d'aménagement et d'exploitation du projet. Par ailleurs, à l'issue de la période de travaux et d'exploitation et en application des dis

positions de l'article L 214-3-1 du code de l'environnement, l'exploitant ou à défaut le propriétaire, doit remettre le site dans un état tel qu'aucune atteinte ne puisse être portée à l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau.

Le code de l'urbanisme (art. L421-5 et R 421-8-1) dispense de toute autorisation d'urbanisme certaines installations en raison « de leur nature et de leur implantation en mer, sur le domaine public maritime immergé au-delà de la laisse de la basse mer ». Le parc hydrolien et le câble d'export en mer en sont de fait exonérés.

A terre, la pose d'un câble souterrain est dispensée des formalités d'urbanisme en application de l'article R421-4 du code de l'urbanisme. A contrario, la réalisation d'un poste électrique à terre ne rentre pas dans ce champ d'application et doit faire l'objet d'une déclaration préalable ou d'une demande de permis de construire en fonction de la surface de plancher et d'emprise au sol. Ces exigences peuvent être renforcées si le poste est localisé dans des zones protégées (site inscrit ou classé, parcs ou réserves, ...).

La procédure d'instruction de ces différentes demandes d'autorisation comprend :

- Une consultation administrative des Services de l'Etat (DDTM, DREAL, Préfectures maritimes...), des collectivités territoriales concernées par le projet et, lorsqu'elle est requise, des organismes gestionnaires des Aires Marines Protégées.
- Une enquête publique à réaliser au titre du code de l'environnement (loi sur l'eau), de l'occupation du domaine public maritime si le régime de concession est choisi, et éventuellement au titre de la loi littoral (par exemple, une telle enquête est obligatoire en cas de passage du câble dans la bande des 100 mètres ou dans un espace remarquable) qui peut être conjointe aux différentes procédures réglementaires si les demandes d'autorisation sont déposées de manière concomitante.

¹¹ Une concession n'est accordée que pour des utilisations du DPM « à l'usage du public, à un service public ou à une opération d'intérêt général » (art. R 2124-2 du CGPPP), alors que les AOT peuvent être demandées / accordées à tout maître d'ouvrage.

2.2. L'évaluation environnementale

En application du code de l'environnement et du code général de la propriété des personnes publiques, les demandes de concession d'utilisation du domaine public maritime et d'autorisation au titre de la loi sur l'eau doivent s'accompagner d'une étude d'impact (Fig. 21) et, le cas échéant, d'une évaluation des incidences Natura 2000.

Les projets hydroliens sont directement concernés par la rubrique 27 (production d'énergie en mer - étude d'impact obligatoire) et potentiellement par les rubriques 10 (récupération d'emprise du domaine public maritime - étude d'impact obligatoire ou au cas par cas selon la surface concernée) et 11 (travaux sur le littoral - étude d'impact au cas par cas) du tableau annexé à l'article R 122-2 du code de l'environnement.

2.2.1. Cadrage préalable

Préalablement à la rédaction de son étude d'impact, le maître d'ouvrage peut solliciter un cadrage préalable auprès de l'Autorité compétente pour prendre la décision d'autorisation du projet, qui consulte alors l'Autorité Environnementale.

Ce cadrage (défini au L122-1-2 et R122-4 du code de l'environnement) a pour objectif d'informer le maître d'ouvrage sur :

- le degré de précision des informations à fournir dans l'étude d'impact
- les zonages, schémas, inventaires relatifs à la zone susceptible d'être affectée
- les autres projets connus avec lesquels les effets cumulés doivent être étudiés
- la nécessité éventuelle d'étudier les effets notables du projet sur l'environnement d'un autre Etat (Convention d'Espoo)

- les organismes susceptibles de donner au maître d'ouvrage des informations utiles à la réalisation de l'étude d'impact.

Ce cadrage peut également préciser le périmètre approprié pour l'étude de chacun des impacts du projet.

Le maître d'ouvrage peut également solliciter l'Autorité compétente pour organiser une réunion de concertation avec les parties prenantes locales intéressées, là encore en amont de la rédaction de l'étude d'impact.

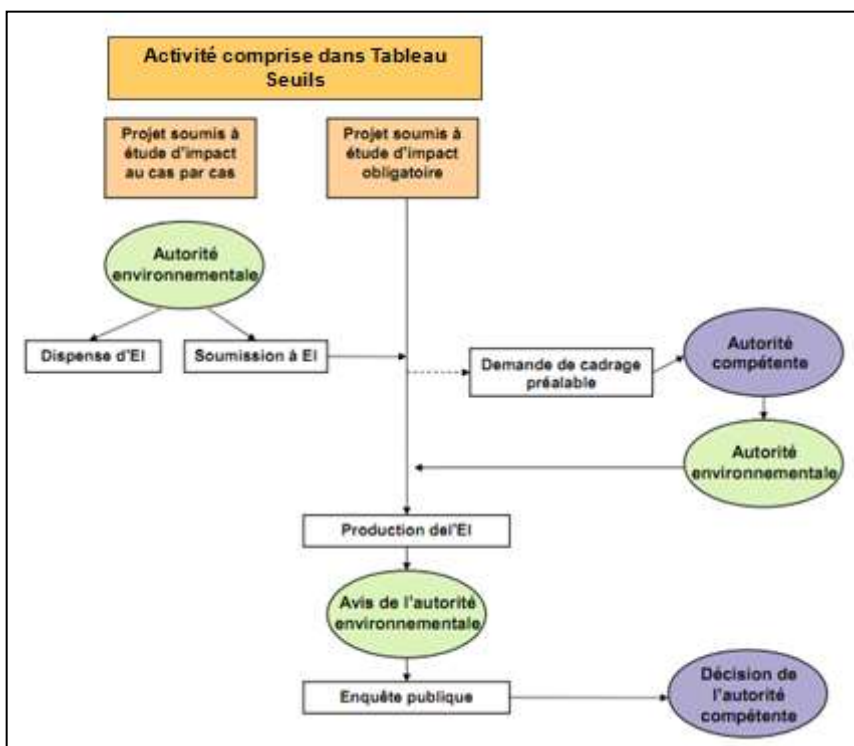


Figure 21 Logigramme relatif au déroulement de la procédure d'évaluation environnementale

L'ensemble de cette démarche ne préjuge en aucun cas de la décision qui sera prise à l'issue de la procédure d'instruction administrative. En outre, l'avis ainsi rendu n'engage pas non plus l'administration sur le contenu de l'étude d'impact.

Dans sa demande de cadrage préalable, il est nécessaire que le maître d'ouvrage fournisse un minimum d'éléments concernant les principales caractéristiques du projet et de la zone qu'il est susceptible d'affecter (principaux enjeux environnementaux, principaux impacts), ainsi que le cas échéant, les interactions éventuelles avec d'autres projets, travaux ou aménagements dont il est maître d'ouvrage.

A noter que le code de l'environnement ne prévoit pas de délais pour le rendu de cet avis.

2.2.2. Principe et contenu de l'étude d'impact

Le contenu de l'étude d'impact doit être **proportionné à la sensibilité environnementale** de la zone susceptible d'être affectée par le projet, à **l'importance et la nature des travaux, ouvrages et aménagements** projetés et à **leurs incidences prévisibles** sur l'environnement ou la santé humaine.

Ce contenu est défini à l'art. R122-5 du code de l'environnement (CE): il comprend, entre autres et de manière classique :

- la description du projet dans ses différentes composantes (turbines, câbles, convertisseurs/transformateurs ; ouvrages en mer et à terre), et dans ses différentes phases (installation, exploitation et maintenance, démantèlement) ;
- la description de l'état initial de la zone du projet susceptible d'être affectée ;
- l'analyse des conséquences du projet sur les composantes de l'environnement et de la santé humaine dans sa zone d'influence (en tenant compte des principes de proportionnalité) ;
- la présentation des mesures envisagées pour éviter et réduire les effets négatifs notables, et compenser, lorsque cela est possible les effets négatifs résiduels notables, qui n'ont pu être évités ni suffisamment réduits ;

- l'analyse de la comptabilité du projet avec les différents documents de gestion et d'orientation dans le domaine de la protection des milieux aquatiques (SDAGE, Plan d'action pour le milieu marin prévu par l'article L. 219-9 du code de l'environnement ,...), des milieux naturels (réseau Natura 2000, etc.), des paysages (Sites classés, espaces remarquables du Littoral), et avec le Schéma de Mise en Valeur de la Mer (quand il en existe un).... Ces plans et programmes sont définis au R122-17 du Code de l'Environnement.

La réforme de décembre 2011, issue des lois Grenelle sur l'Environnement, a introduit de nouvelles thématiques à analyser (comme les **effets cumulés**) et a renforcé la prise en compte de la **doctrine ERC** (Eviter – Réduire – Compenser). Les nouveaux points clés supplémentaires de cette évaluation environnementale concernent ainsi :

- l'analyse des **effets cumulés** du projet avec d'autres projets connus (cf art. R122-4-6° du CE) : ces projets sont ceux pour lesquels l'avis de l'autorité environnementale a été rendu public ou, pour les projets soumis à la loi sur l'eau ne nécessitant pas d'étude d'impact, qui ont fait l'objet d'un document d'incidences et d'une enquête publique.

- la présentation « d'une esquisse des **principales solutions de substitution** examinées par le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage et les raisons pour lesquelles, eu égard aux effets sur l'environnement ou la santé humaine, le projet présenté a été retenu » (Eviter – Réduire) ;

- la présentation des principales modalités de **suivi des mesures ERC** et de leurs effets, une estimation des dépenses relatives à ces mesures, ainsi qu'un exposé des effets attendus de ces mesures.

L'étude d'impact peut remplacer le document d'incidences exigé au titre de la loi sur l'eau (Loi n°2006-1772 du 30/12/2006), si elle contient les informations exigées à ce titre. De la même manière, elle peut valoir étude d'incidences Natura 2000, si elle contient les éléments exigés par cette réglementation.

2.2.3. Avis de l'Autorité Environnementale

A noter enfin que l'étude d'impact du projet est soumise à l'avis de l'autorité environnementale (art. L122-1 III du code de l'environnement). Cette autorité est différente selon la nature du projet considéré. En l'espèce, pour des projets relevant d'arrêtés préfectoraux, il s'agit du Préfet de Région. Cet avis, pièce indispensable de la procédure, joint au dossier d'enquête publique s'il est disponible, doit être rendu dans un délai de deux mois à compter de la saisine de l'Autorité Environnementale par l'autorité compétente pour autoriser le projet.

2.3. Spécificités et difficultés de l'évaluation environnementale d'un projet hydrolien marin

Les projets hydroliens marins ont comme particularité d'être, plus que d'autres encore, contraints géographiquement par la ressource disponible (le courant de marée), ce qui favorise plutôt la comparaison des évaluations d'impact et la capitulation des retours d'expériences. En effet, les espaces géographiques potentiels dans lesquels ils s'inscrivent sont bien déterminés et leurs composantes marines ont globalement des caractéristiques communes (par ex : fonds durs, fort hydrodynamisme avec biocénoses spécifiques, niveaux sonores élevés, usages réduits, etc.).

Du fait de ces caractéristiques, il s'agit également de milieux assez peu connus en termes de biodiversité, de bruit, et plus généralement de fonctionnalités écologiques. Les acquisitions de données dans ces milieux y sont en effet assez difficiles (conditions marines, courantologie), et ils ont encore été peu étudiés.

Une autre difficulté importante de l'évaluation environnementale de l'hydrolien marin réside dans le fait que les technologies sont en cours de développement, et qu'on ne dispose pas encore de véritable retour d'expérience *in situ* de leurs

impacts. A ce jour, l'évaluation ne peut se faire principalement qu'à partir d'une analyse des « **interférences fonctionnelles potentielles** » entre les différentes composantes du parc hydrolien et les composantes du milieu marin. La mise en œuvre de parcs démonstrateurs et de sites d'essais constitue des étapes importantes pour mieux comprendre ces interactions, et améliorer l'évaluation environnementale des parcs industriels futurs.

En corollaire de ces difficultés, il n'y a encore pas ou peu de mesures compensatoires identifiées à ce jour relatives à la compensation d'effets notables résiduels sur les fonctionnalités écologiques ou sur les biocénoses marines (du moins dans les milieux à haute énergie).

2.4. Recommandations

Pour tout type de projet hydrolien en mer de type industriel, les principales recommandations sont :

- D'effectuer des enquêtes et études du milieu et des usages très en amont du projet, typiquement plusieurs années avant la date de mise en service projetée. Ces études et les démarches de concertation locales servent à la fois à la conception du projet, à l'identification des variantes techniques possibles, à l'évaluation progressive des incidences potentielles du projet sur l'environnement, ...
- D'appliquer la séquence Eviter-Réduire à toutes les étapes de la conception du projet. Cette démarche réduit ou contraint progressivement le « champ des possibles », mais permet le meilleur compromis technico-économique et environnemental, et facilite l'acceptabilité sociale.
- D'intégrer les retours d'expérience des sites d'essais.

3. Prise en compte des usages

3.1. Les différents usages potentiels, affectés ou non

Les usages de la mer sont nombreux et s'exercent dans les trois dimensions, occupant la surface, la colonne d'eau ou les fonds marins. Tous ces usages peuvent potentiellement être impactés, de manière plus ou moins importante, aux différentes étapes d'un projet hydrolien.

Il s'agit donc pour le maître d'ouvrage d'établir le plus en amont possible, un état des lieux de ces usages sur le site du projet et dans son environnement proche, potentiellement concerné par les travaux.

Ces usages peuvent être :

- La navigation commerciale (de personnes ou de marchandises) ;
- La pêche professionnelle, y compris la pêche à pied (pour la zone d'atterrage) ;
- Les cultures marines (conchyliculture, algoculture...) et élevage marins (fermes aquacoles...);
- De type récréatifs : la pêche de loisirs (pêcheurs plaisanciers, pêcheurs à pied...), baignade, nautisme, plongée sous-marine, randonnée, observations de la nature, etc.
- Le clapage de sédiments.

D'autres usages relatifs à l'extraction de ressources minières comme les granulats marins, par exemple, sont a priori peu concernés par d'éventuels projets hydroliens, les sites favorables à l'un n'étant généralement pas favorables à l'autre. Toutefois, la présence d'un site hydrolien interdit à la navigation peut entraîner un contournement pour la navigation, induisant un surcoût d'exploitation pour les extracteurs.

3.2. Caractériser les usages et évaluer les impacts

Il est essentiel de caractériser correctement les différents usages maritimes, à la fois du point de vue spatial (périmètres concernés) et temporel

(variabilité des usages selon la saison), mais également du point de vue de leur importance dans l'économie locale ou régionale, ou vis-à-vis du bien-être et du cadre de vie des riverains.

Cette caractérisation doit être la plus quantifiée possible (notamment pour les usages ayant des retombées économiques locales), que ce soit via les ressources exploitées, le nombre d'emplois directs ou induits, ou les chiffres d'affaires directs ou indirects générés. Les sources d'informations possibles sont les administrations en charge du Domaine Public Maritime (DDTM, Préfecture maritime, Préfecture de Département), l'Agence des Aires Marines Protégées et les organismes gestionnaires d'AMP (comme les Parcs Naturels Marins qui réalisent des « cartes des vocations » localisant les zones les plus propices à chaque usage), les chambres de commerce et d'industrie, les ports, les comités des pêches maritimes et des élevages marins, les organisations professionnelles, les offices de tourisme, les communes, les statistiques INSEE ou autres, ...

Pour ce qui concerne les usages récréatifs, il est souvent difficile de quantifier l'importance de l'usage proprement dit, en l'absence de structures commerciales les encadrant. Dans ce cas, il est alors utile de procéder par enquêtes auprès des administrations (DDTM), des associations (plaisanciers, environnement, sport ou culture) et des communes concernées.

Cette cartographie des usages permet d'identifier, voire de hiérarchiser, les interférences potentielles temporaires ou permanentes avec le projet. Ces interférences peuvent conduire :

- soit à une gêne de l'usage (avec ou sans changement des modalités de l'usage) ; cette gêne peut être temporaire ou permanente et elle est généralement localisée à l'emprise du parc ou des câbles.
- soit à la suppression de l'usage pendant la durée des travaux et/ou d'exploitation du parc.
- dans certains cas, la gêne ou la suppression totale d'un usage, peuvent conduire à un report d'activité sur une autre zone ; ce peut être le cas de la navigation maritime et de la pêche (tirant d'eau insuffisant pour traverser le parc), et des activités pratiquées sur le littoral (atterrage du câble).

Cette cartographie permet également d'identifier les pistes possibles pour éviter ou réduire les impacts les plus significatifs. Sous réserve de faisabilité technico-économique pour le porteur de projet et de compatibilité avec les sensibilités environnementales, ces pistes peuvent concerner :

- Le choix du site d'implantation et de la répartition des turbines (de même que le choix de leur technologie) ;
- le choix des périodes d'intervention en mer (au large et à la côte) pour les travaux d'installation du parc et du câble, ou de maintenance ;
- le choix du tracé des câbles (dans une certaine mesure seulement). ; à noter qu'un cadre de collaboration est en cours de rédaction entre RTE et les Comités des Pêches professionnelles pour fixer les grands principes et moyens de concertation sur les tracés des câbles.

3.3. Les activités de pêche (professionnelle et récréative)

Les données relatives aux volumes et valeurs des produits débarqués, ainsi que l'effort de pêche associé peuvent être estimées au travers des déclarations des professionnels de la pêche, via l'administration en charge des affaires maritimes (monographies des pêches éditées par les DDTM et DML), DPMA, Agence des AMP, les criées et les structures professionnelles de commercialisation des produits. Les synthèses produites par le Système d'Information Halieutique de l'Ifremer peuvent également apporter des informations.

Toutefois, certaines lacunes ont été identifiées concernant les interactions entre les pêcheries et les autres usagers (SGWTE, 2012) pouvant conduire à des sous-évaluations des activités et des conséquences induites par un site hydrolien :

- le report d'effort de pêche ;
- la connaissance spatiale de l'activité des petits navires en zone côtière ¹²;
- le manque d'informations sur les autres usages (en l'absence de planification spatiale).

¹² Sources potentielles : structures professionnelles (via leurs observatoires des pêches quand ils existent)

Pendant la phase de construction : les effets sur la pêche sont dus aux restrictions de navigation et à l'éloignement temporaire des poissons dus au chantier (bruit... ; voir chapitre 8).

Pendant la phase d'exploitation, deux hypothèses sont à envisager selon que le site sera interdit ou non à toute forme de navigation.

1 : Cas d'interdiction (toute forme d'activité est alors impossible) :

➤ activité déjà existante comme la pêche professionnelle (tous types de métiers confondus) : par la perte d'une ou de plusieurs zones de pêche, il peut y avoir cessation d'activité (cas de navire entièrement dépendant à une zone) ou plus vraisemblablement report de l'effort de pêche sur les zones adjacentes et donc risque de renforcement des conflits d'espace et d'usage entre métiers et flottilles lorsqu'ils existent déjà.

➤ En revanche cette suppression d'activité(s) humaine(s) pré-existante(s) accompagnée d'une nouvelle activité (EMR) est susceptible d'induire une modification des équilibres biologiques locaux.

2 : Cas de restriction d'accès à certains types d'activités :

Bien que les zones propices aux hydroliennes ne soient généralement pas favorables à certaines activités de pêche (présence de fonds durs et de forts courants), en raison de la présence de structures artificielles dans la colonne d'eau et sur les fonds, le site pourra être rendu inaccessible à certains métiers de pêche, notamment les arts trainants. En revanche les arts dormants pourraient éventuellement s'y exercer (notamment en fonction de la disposition des turbines au sein du parc). En l'absence de restrictions officielles d'accès sur le site et/ou sur le tracé du câble, il est possible que les pêcheurs, craignant un risque potentiel de croche ou d'avarie, décident eux-mêmes de ne plus fréquenter le site. Il y aurait alors évitement de fait.

Aux USA, un « gentlemen agreement » a été signé entre un opérateur de câbles de télécommunication sous-marin et les représentants des pêcheurs afin de donner priorité à la sauvegarde du

câble en cas de croche, par abandon du train de pêche à la mer, avec mesure financière compensatoire pour le pêcheur.

A noter par ailleurs que du fait de leurs caractéristiques (hydrodynamisme, distribution spatiale et configuration des structures immergées), les sites hydroliens sont susceptibles d'interagir plus fortement qu'un site éolien avec les modalités d'exercice de la pêche.

Pendant la phase de démantèlement, les effets sont identiques à ceux de la phase de construction (Bald *et al.*, 2010).

3.4. Recommandations

En conclusion, il est fortement recommandé aux développeurs de projets d'identifier très en

amont, et au même titre que les sensibilités écologiques, l'ensemble des usages susceptibles d'être impactés par le projet. La planification spatiale, mise en œuvre par l'Agence des AMP dans le cadre de la DCSMM, est alors utile. Les développeurs doivent travailler avec les représentants des usages en place à l'identification et à l'intégration des mesures d'évitement et de réduction des impacts, dès que possible et tout au long du développement. Par exemple les données accessibles relatives à l'activité de pêche pourront être optimisées avec le concours des structures professionnelles.

Environnement physique

La caractérisation de l'environnement physique de manière précise est nécessaire et capitale, afin d'évaluer les interactions potentielles entre la ou les structure(s) et le milieu marin.

Le présent chapitre « Environnement physique » ne traite que des paramètres à prendre en compte du point de vue des impacts environnementaux, et non du dimensionnement, ce dernier étant intrinsèquement fonction de chaque technologie et n'étant pas l'objet de ce guide.

Les données physiques indispensables à prendre en compte pour estimer les impacts potentiels du projet hydrolien sur son environnement sont :

- **la morphologie des fonds** : l'analyse de la bathymétrie permet d'apprécier les reliefs sur lesquels les structures seront implantées et d'orienter le design vers un type de fondations. Les suivis bathymétriques permettent de mesurer l'impact des structures sur la morphologie des fonds (affouillement, engraissement).
- **la nature du substrat** : définir précisément la nature des fonds qui va accueillir les fondations, permet d'estimer une modification éventuelle du substrat (et donc des biocénoses aquatiques liées), mais également les phénomènes d'affouillement ou d'engraissement aux abords des structures.
- **la dynamique sédimentaire** : estimer la capacité qu'ont les sédiments à se déplacer sur la zone d'étude permet d'adapter le design des fondations au site, afin de limiter les interactions entre les structures et leur milieu, mais également de limiter ces impacts potentiels sur des biocénoses.

- **les courants** : une étude détaillée des courants a pour objectif de contribuer à l'estimation de la vitesse du transit des sédiments. L'étude des courants sert également à évaluer les enjeux vis-à-vis des espèces benthiques et pélagiques. Le productible et les effets de turbulence ne sont pas traités ici.

- **la houle** : les modèles de houle contribuent eux aussi à estimer le transit sédimentaire, donc leurs impacts potentiels sur d'éventuelles espèces vivantes. La houle sert en premier lieu à dimensionner la structure mais cet aspect n'est pas traité ici.

- **le bruit sous-marin** : caractériser l'environnement sonore durant les différentes étapes d'un projet de ferme d'hydrolienne a pour but d'évaluer les impacts que peuvent avoir les modifications de cet état sonore sur les écosystèmes.

- **l'électromagnétisme** : mesurer ou estimer l'environnement électromagnétique initial permet ensuite de déterminer correctement les modifications de champ électromagnétique engendrées par le fonctionnement de l'hydrolienne et d'évaluer leurs impacts potentiels sur la faune marine.

Chacun des paramètres physiques énoncés peut être influencé par la présence d'une structure pérenne en mer, génératrice de bruits. La figure 22 synthétise les interactions entre les différents paramètres du milieu physique traités dans ce guide et les chapitres dans lesquels chaque paramètre sera traité.

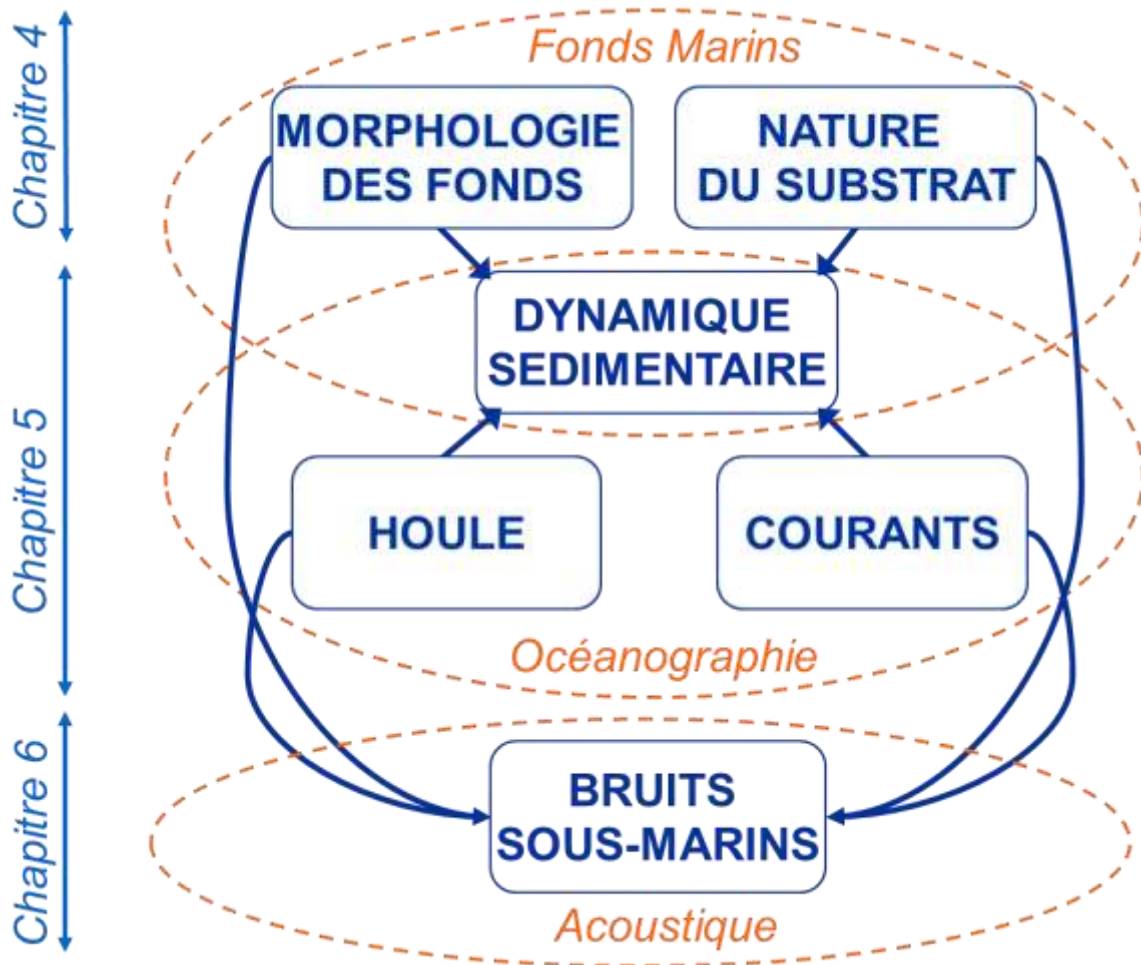


Figure 22 Paramètres du milieu physique étudiés (bleu marine), leurs interactions (flèches bleues) et leurs domaines d'études (orange)

4. Fonds marins

4.1. Description de l'état initial

Différents paramètres sont à mesurer afin de caractériser les fonds qui vont accueillir une ferme d'hydroliennes :

- **la bathymétrie** : les cartes bathymétriques permettent de définir la profondeur d'eau en chaque point d'un secteur d'étude, mais également d'apprécier la morphologie des fonds sur l'ensemble de cette zone.

- **la nature des fonds** : déterminée à partir de levés géophysiques corrélés avec des prélèvements sédimentaires superficiels, elle permet de caractériser la couverture sédimentaire sur le secteur d'étude. L'interprétation des cartes de nature des fonds permet également de fournir des indices sur la mobilité des sédiments.

- **l'épaisseur des sédiments meubles** : dans le cas où des sédiments meubles recouvrent la zone de prospection, différentes méthodes géophysiques permettent de définir l'épaisseur de cette couche de sédiments le long de profils parallèles et transverses.

Les autres paramètres qui permettent de caractériser le substrat géologique en profondeur (paramètres géotechniques notamment, méthodes géophysiques adaptées aux milieux sédimentaires grossiers ou rocheux) peuvent être cruciaux pour dimensionner les fondations. Ils ne font cependant pas partie des objectifs du présent document.

4.1.1. Définition de la zone d'étude

Lors du développement d'un projet hydrolien, l'étape initiale du développement d'un projet passe par la définition d'un secteur d'intérêt – de l'échelle d'une zone régionale de forts courants par exemple - sur lequel une première étude est réalisée.

Les contraintes réglementaires, environnementales, d'usages et une étude bibliographique générale des paramètres physiques et biologiques permettent de définir une zone restreinte qui bénéficiera d'une étude détaillée.

C'est sur ce secteur restreint, qui fait l'objet de la demande de concession, que les impacts environnementaux potentiels seront prioritairement étudiés.

La nature et la morphologie des fonds doivent être définies précisément sur l'ensemble du secteur d'étude, mais également sur un large corridor (minimum 500m) reliant la zone d'implantation et d'atterrage, pour permettre la pose du câble de raccordement.

Dans le cas où des perturbations des conditions hydrodynamiques seraient attendues au-delà de la zone de demande de concession, il semble pertinent de prévoir un levé sur la zone d'influence théorique de ces perturbations.

Ainsi, la zone d'étude comprend :

- la zone d'implantation des machines,
- la zone d'implantation du câble,
- la zone d'atterrage

Si nécessaire, la zone d'influence potentielle, en dehors de la zone de concession.

4.1.2. Objectifs de l'étude

Note : les données bathymétriques acquises dans le cas de projets d'implantation d'hydroliennes n'ont pas pour seul but d'estimer les impacts environnementaux. Ces données sont capitales pour réaliser le design des fondations, l'implantation des machines, le tracé des câbles sous-marins, le paramétrage des modèles océanographiques (chapitre 5)... Les recommandations à suivre sur la qualité et la précision des résultats sont donc spécifiées pour l'ensemble des besoins d'un projet de développement de parc d'hydroliennes.

L'objectif des levés morpho-bathymétrique et morpho-sédimentaire est de caractériser précisément les fonds qui vont accueillir la ferme hydrolienne. Ces levés permettent :

- de fournir un état de référence dans le cadre du suivi de sites,
- de fournir les données d'entrée qui servent à estimer des impacts sur les fonds mais également sur le vivant, pour proposer des mesures préventives dans la mesure du possible,

- de contrôler les impacts avérés lors de la durée de vie du projet, pour éventuellement ajuster les mesures prévues ou proposer des mesures nouvelles pour limiter ou compenser ces impacts.

Les objectifs des levés d'états initiaux et des différents levés de suivis nécessitent des niveaux de précisions et de résolutions spécifiques, détaillés dans les chapitres 4.1.4. et 4.4.2.

4.1.3. Méthodologies possibles d'acquisition d'information : bibliographie

- **Morphologie des fonds :**

La principale source bibliographique sur laquelle s'appuyer pour obtenir une connaissance générale sur la bathymétrie du littoral français provient du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) (Fig. 23). Ces minutes de sondes, acquises à des résolutions variables, ont pour principal objectif de fournir les informations nécessaires à la navigation maritime. Elles fournissent donc une base de données précieuse pour sélectionner la zone d'étude et préparer le levé de bathymétrie spécifique.

Le SHOM, en partenariat avec l'IGN, est par ailleurs en train de réaliser un modèle numérique altimétrique à l'interface terre-mer sur la frange

littorale. Ce programme, appelé Litto 3D, est en cours de publication sur les côtes de métropole et d'outre-mer.

Depuis début 2013, le catalogue interactif des données du SHOM est accessible sur le site : <http://data.shom.fr/>

D'autres sources bibliographiques de données bathymétriques existent, notamment auprès de l'Ifremer. Certains secteurs ponctuels du littoral français ont été levés au sondeur multifaisceau et ont parfois pu bénéficier d'une étude très détaillée, sur laquelle il semble essentiel de s'appuyer. Ces différentes publications sont accessibles par l'intermédiaire :

- du serveur de données géoréférencées marines Sextant (www.ifremer.fr/sextant)
- du Service des éditions Ifremer, Quae (www.quae.com, rubrique Cartes & Atlas)
- du site internet du département Géosciences Marines de l'Ifremer (http://www.ifremer.fr/drogm/cartographie/produits/atlas_bathymetrique)

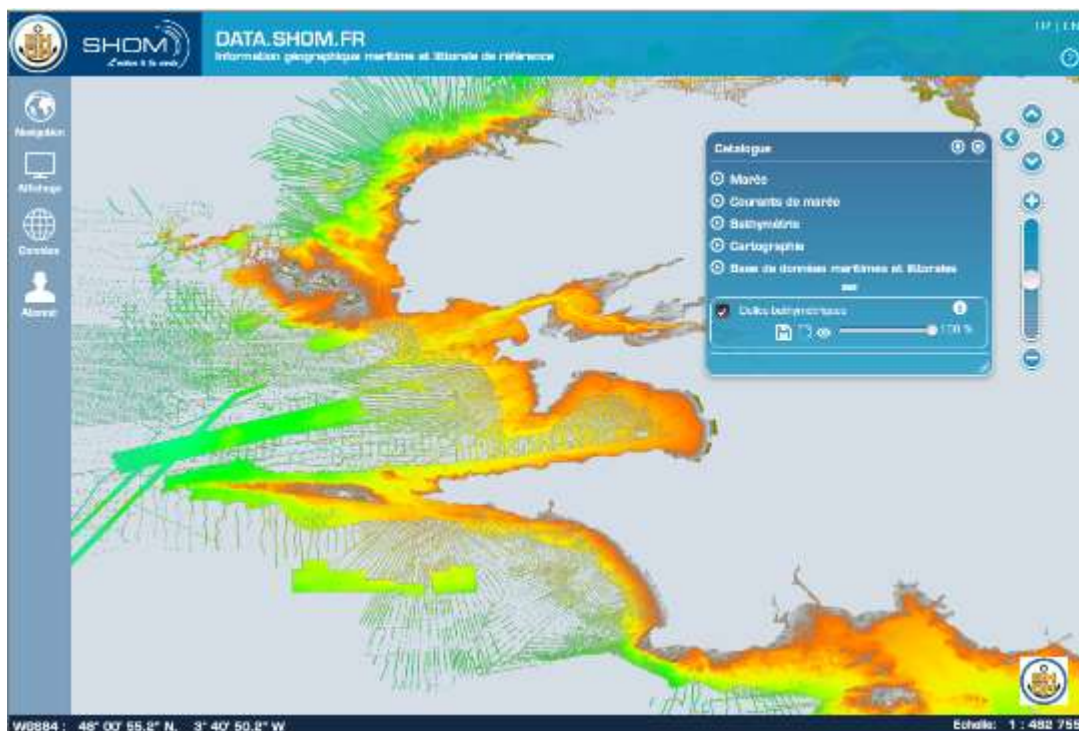
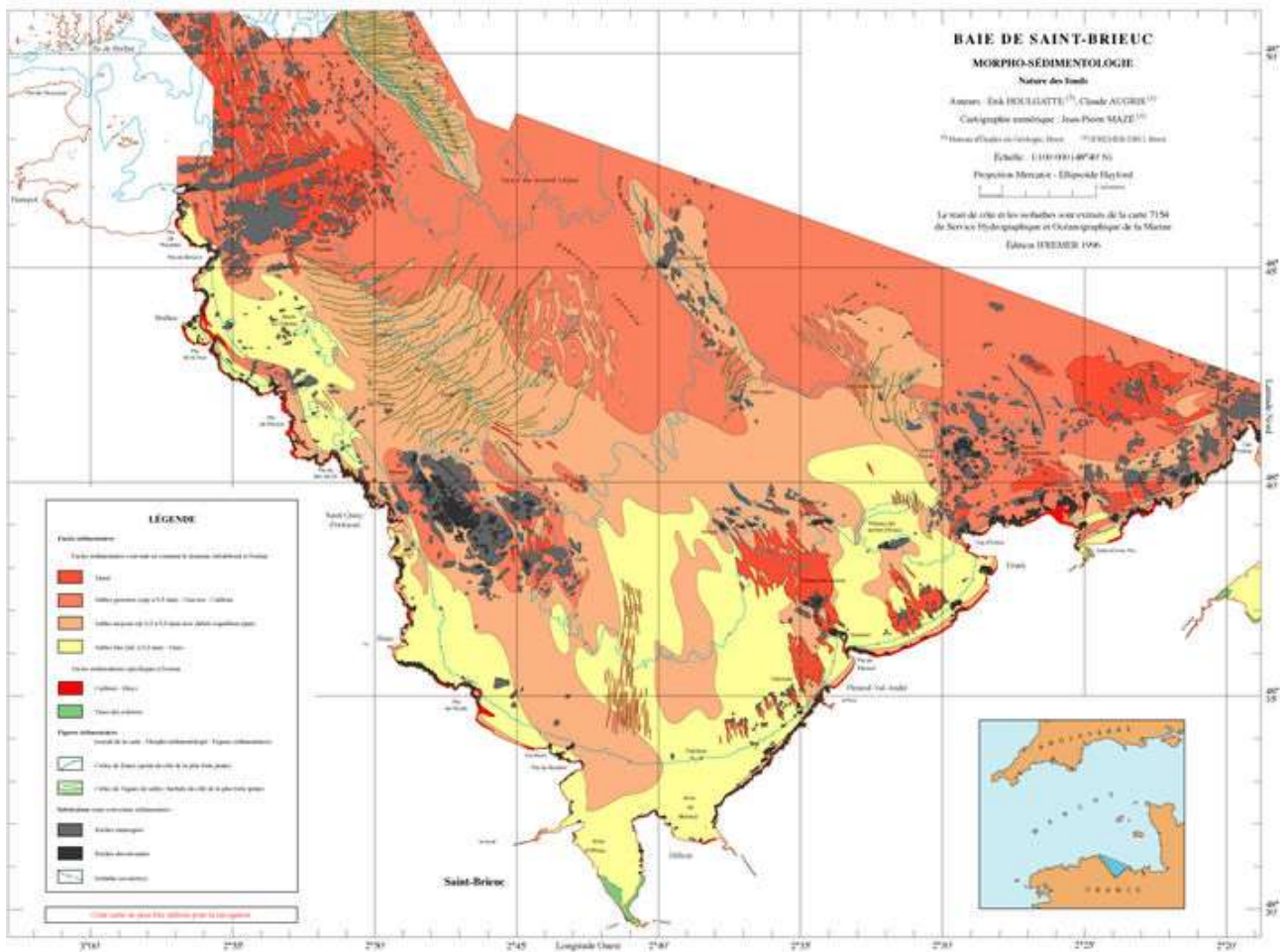


Figure 23 Extrait des dalles bathymétriques du SHOM, sur le secteur de la pointe Bretonne



- **Nature des fonds :**

Les cartes G du SHOM sont la source bibliographique la plus exhaustive sur l'ensemble des côtes françaises : elles fournissent une première indication sur les natures de fonds, et sont réalisées à partir de sources bibliographiques différentes, aux résolutions très variables. Les informations issues de ces cartes doivent donc être prises avec précaution, mais fournissent néanmoins une première indication très intéressante sur les natures de fonds rencontrées sur un secteur d'étude. Le catalogue des données est accessible sur le site : <http://data.shom.fr/>

L'Ifremer réalise également de nombreuses cartes thématiques, ciblées sur des secteurs côtiers précis en France (www.quae.com, rubrique Cartes & Atlas). Ces jeux de données très détaillés sont des sources d'informations très précises, mais qui couvrent encore peu de secteurs en France (Fig. 24).

Figure 24 Carte de Nature des fonds de la baie de Saint-Brieuc de l'Ifremer (Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc, Augris et al., 1996)

L'Ifremer a également réalisé une synthèse bibliographique des données côtières disponibles pertinentes pour l'exploitation de granulats marins, à la demande du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). La visualisation de ces données est accessible sur le site : www.ifremer.fr/sextant/fr/web/granulats-marins.

Le portail géomatique de l'Agence des Aires Marines Protégées est une base en accès libre qui inclut notamment les résultats du programme CARTHEM, sous forme de données, cartes et rapports. Ce programme a permis d'inventorier les habitats marins patrimoniaux sur 40% de la superficie des eaux territoriales de Métropole, couvrant la plupart des sites Natura 2000.

<http://cartographie.aires-marines.fr>

D'autres sources bibliographiques peuvent également fournir des informations intéressantes, comme les cartographies d'habitats benthiques basées notamment sur des natures de fond (type classification EUNIS). Le réseau français REBENT s'inscrit dans cette démarche et fournit des informations intéressantes sur des secteurs côtiers localisés (www.rebent.org).

4.1.4. Méthodologies possibles d'acquisition d'information : les levés géophysiques

- **Les outils d'acquisition bathymétriques :**

L'acquisition de données de bathymétrie est réalisée à partir d'un navire océanographique ou d'opportunité. Ce dernier doit comporter :

- **un système de positionnement précis**

Le système de positionnement de surface doit permettre au navire de se positionner en x, y et z. Il est préconisé d'utiliser des GPS différentiels ou cinématiques (RTK), dont la spécificité est d'appliquer une correction au récepteur GPS classique, grâce à un relais de réception à terre. La mise en place de ce dispositif permet un positionnement avec une incertitude de l'ordre de quelques centimètres (CETMEF, 2008). La précision en z (altitude) apportée par l'utilisation du GPS RTK permet de s'affranchir des mouvements de la marée. Même si dans ces conditions le déploiement d'un marégraphe semble superflu, ce dernier peut néanmoins apporter une correction à un modèle de marée prédite, dans le cas de perturbations de la réception du GPS RTK.

- **une centrale d'attitude**

L'objectif de la centrale d'attitude est de corriger les mouvements du bateau (cap, tangage, roulis, pilonnement). Cet outil est un maillon incontournable de toute chaîne bathymétrique multifaisceau, il est capital pour garantir la précision et la qualité des données. Cependant, au-delà de certaines conditions de mer (entre 1 et 1,5 m de houle le plus souvent), la centrale d'attitude n'arrive plus à compenser les mouvements du bateau. L'acquisition des données doit alors être stoppée.

- **un sondeur bathymétrique multifaisceau**

Le sondeur multifaisceau permet l'acquisition de données bathymétriques sur une large fauchée (environ 6-7 fois la hauteur d'eau) perpendiculaire à l'axe du navire. L'acquisition simultanée de nombreux faisceaux sur un large couloir, permet de réaliser une insonification complète d'un secteur, avec une très grande résolution (Fig. 25-a).

Le nombre de faisceaux du sondeur, son ouverture angulaire, la vitesse d'acquisition et la profondeur d'eau sont les principaux paramètres qui permettent d'influencer la résolution du levé bathymétrique (de quelques dizaines de centimètres dans les petits fonds, à plusieurs dizaines de mètres dans les grands fonds océaniques). Le choix de la résolution du levé dépend en premier lieu des exigences liées aux dimensions des fondations, un levé au pas de 1m semble cependant adapté pour estimer les principaux impacts sur la morphologie.

Le fonctionnement précis d'un sondeur multifaisceau est détaillé sur le site de l'Ifremer (<http://flotte.ifremer.fr/Presentation-de-la-flotte/Equipements/Equipements-acoustiques/Sondeurs-multifaisceaux>). Il est néanmoins important de préciser que la profondeur d'eau est définie à partir du temps entre l'émission et la réception d'une onde acoustique s'étant réfléchi sur le fond. Il est donc capital de réaliser plusieurs fois par jour des mesures de célérité du son dans l'eau (fonction de la température de l'eau, de sa salinité), afin de garantir la mesure de hauteur d'eau. Une attention particulière sera portée sur les secteurs estuariens, où de fortes variations de température et salinités sont observées.

- **Les outils d'acquisition d'imagerie**

En parallèle de l'acquisition bathymétrique, un levé d'imagerie acoustique doit être réalisé ; deux systèmes différents peuvent être utilisés :

- **le sonar à balayage latéral**

Tracté derrière un navire grâce à un câble électro-porteur, ce système émetteur-récepteur utilise les propriétés de rétrodiffusion acoustique des fonds marins (réflectivité) pour reconstituer une image acoustique des fonds. Deux transducteurs placés de part et d'autre du poisson sonar

permettent d'acquérir la donnée sur une bande perpendiculaire au sens d'avancement du bateau, qui réalise alors une succession de profils parallèles et perpendiculaires. Ces images ainsi reconstituées - appelées sonogrammes - sont ensuite traitées, regroupées en mosaïques et interprétées en les corrélant avec des prélèvements sédimentaires (Fig. 25-b). La qualité et la résolution des levés sont déterminées par les fréquences d'émissions et la réduction de la portée.

(<http://www.rebent.org//medias/documents/www/contenu/documents/FT09-FO02-2003-01.pdf>)

Cet outil d'acquisition, relativement facile à mettre en œuvre, présente cependant des limitations spécifiques aux contextes d'hydroliennes. En effet, le système étant tracté derrière le bateau, son positionnement reste assez approximatif (plusieurs mètres), les levés dans des zones de forts courants rendent le positionnement de l'outil très imprécis. L'utilisation d'une balise de positionnement sur le poisson est donc rendue obligatoire pour limiter cette approximation (qui sera alors de l'ordre du mètre).

Le sonar à balayage latéral, par sa profondeur d'immersion (communément de l'ordre de 10 m), peut cependant se révéler très efficace pour cartographier des structures localisées, à haute résolution.

- la réflectivité du sondeur multifaisceau

L'utilisation de la réflectivité issue du sondeur multifaisceau est particulièrement adaptée à l'acquisition en milieu énergétique et permet une acquisition simultanée avec la bathymétrie (Fig. 25-a). En effet, le SMF étant fixé sur la coque du navire d'acquisition et la centrale d'attitude compensant les mouvements du bateau, la réflectivité issue du sondeur se révèle aussi précise en positionnement que la bathymétrie (de l'ordre de quelques centimètres).

L'utilisation de sondeurs multifaisceaux haute-résolution permet d'extraire la réflectivité issue des faisceaux bathymétriques du sondeur, donc l'imagerie acoustique finale aura la même résolution que la bathymétrie. Les profils parallèles acquis (et quelques profils perpendiculaires) se-

ront traités, puis regroupés en mosaïques pour être interprétés en les corrélant avec les prélèvements sédimentaires.

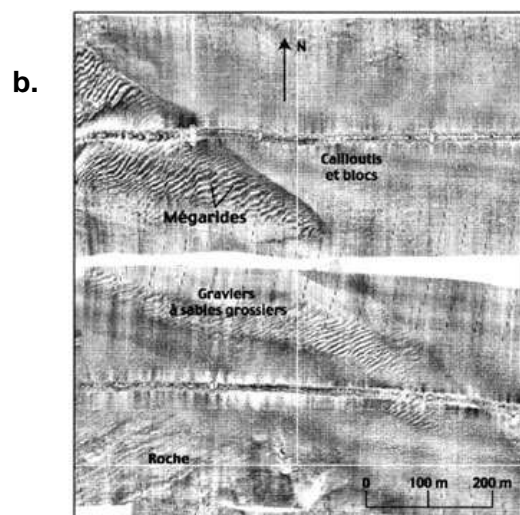
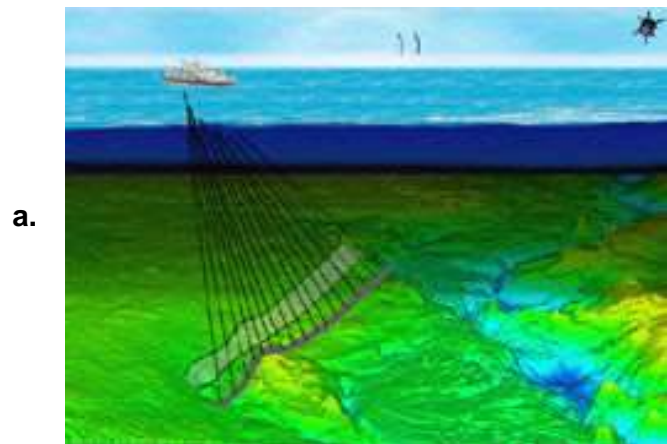


Figure 25 (a) Schéma de l'acquisition au sondeur multifaisceau, (b) extrait de sonogramme avec ses faciès et figures sédimentaires associés (source IFREMER)

- **Représentation des données**

Une représentation claire des données acquises est capitale pour mettre en avant la qualité du travail réalisé, mais aussi pour pouvoir ensuite présenter ou ré-exploiter les données (Fig. 26).

Les différentes cartes et données à produire sont :

- Une carte des travaux réalisés (positionnement des prélèvements sédimentaires, profils levés, points de vidéos éventuels...),
- Données de bathymétrie :
 - MNT (modèle numérique de terrain) au pas de 1 m ou mieux,
 - carte bathymétrique présentant les isolignes,
- Imagerie :
 - carte des mosaïques acoustiques (résolution similaire à la bathymétrie, ou meilleure si possible),

- carte morphosédimentaire (interprétation de la nature des fonds + figures sédimentaires),
- La description et l'analyse granulométrique des prélèvements sédimentaires.

Les cartes produites au format papier, doivent être présentées à une échelle adaptée (1/5000e ou 1/10000e selon la taille de la zone). La présence de structures particulières doit faire l'objet d'un extrait de carte à une échelle adaptée.

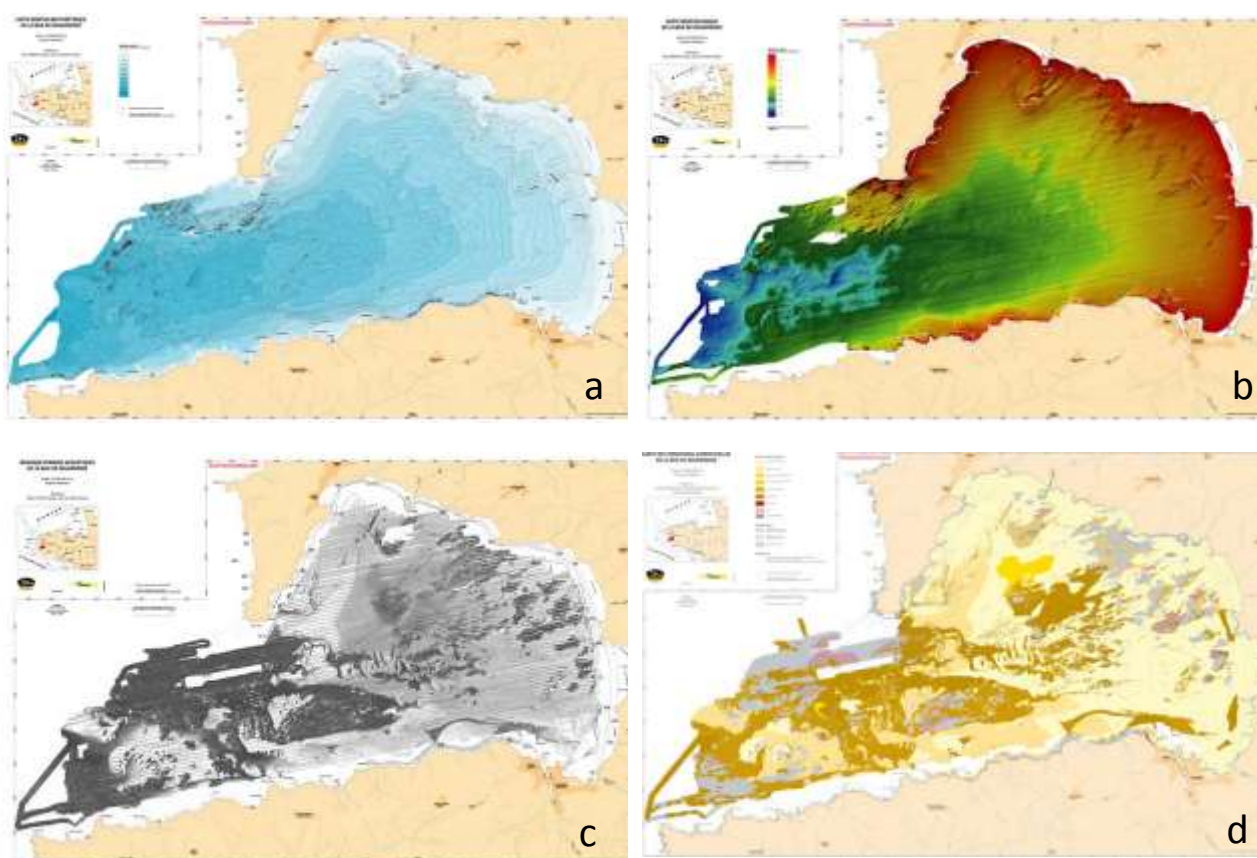


Figure 26 Cartes issues de l'Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez : (a) carte morpho-bathymétrique de la baie de Douarnenez, (b) carte morphologique de la baie de Douarnenez, (c) mosaïque d'images acoustiques de la baie de Douarnenez, (d) carte des formations superficielles de la baie de Douarnenez (Augris et al., 2005)

4.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

Les impacts sur les fonds sont directement liés aux choix techniques :

- du type de fondations,
- du type de pose de câbles,
- de la technique d'atterrage du câble sous-marin.

Les différents cas envisagés sont :

- pour les fondations de type :
 - o gravitaire (posée sur le fond), avec préparation ou non du sol,
 - o mono ou multi pieux (pylône(s) enfoncé dans le sol, jackets), mis en place par battage ou forage,
 - o ancrés (ancres conventionnelles, à succion) posées dans des fonds meubles (les ancrés gravitaires seront assimilés à des fondations gravitaires),
- pour les câbles sous-marins :
 - o posés au fond, protégés ou fixés si besoin,
 - o ensouillés, si les fonds le permettent,
 - o posés dans des tranchées, dans le cas de substrats rocheux,
- pour les techniques d'atterrage :
 - o posé, protégé ou fixé si besoin,
 - o ensouillé ou posé dans une tranchée,
 - o forage dirigé

Ces différentes options techniques sont détaillées dans le chapitre 1.3. A noter que la sous-station électrique, si elle est présente, peut être conçue avec une fondation différente des machines.

La suite de ce chapitre détaille les impacts pressentis, pour chaque choix technique évoqué ci-dessus. Les changements potentiels sont pris en

compte durant les trois phases de vie d'un projet :

- Phase de construction,
- Phase d'exploitation,
- Phase de démantèlement.

Dans ce guide, il semble nécessaire de faire des hypothèses sur différents impacts pressentis, ceci étant le moyen le plus pragmatique pour proposer des méthodes d'identification et d'analyse des changements. Il est évident que les choix techniques liés aux technologies, à l'échelle des projets et aux secteurs d'études induiront un travail d'expertise spécifique pour adapter ces recommandations aux contextes concrets des projets.

4.2.1. Changements potentiels en phase de construction

La phase de travaux de construction court depuis l'éventuelle préparation des sols, jusqu'à la mise en service de la ferme.

Fondation de type gravitaire :

En phase de construction, et dans le cas d'une pose de fondation gravitaire, 3 situations peuvent se présenter :

- la fondation est adaptée aux fonds marins, sans préparation du sol,
- une préparation des sols peut être nécessaire à travers l'ajout de matériaux (sédiments, enrochements),
- une préparation des sols peut être nécessaire par ablation de substrat (décaisser un substrat meuble, araser un substrat rocheux chaotique).

Le tableau 7 présente, pour chaque cas de figure, les impacts envisagés sur le compartiment étudié (ici, la morphologie et la nature des fonds) qui permettent de proposer une méthode pour identifier et analyser les changements possibles sur les fonds, d'une part en l'anticipant, et d'autre part par contrôle de son événement.

Hypothèse technique	Impact envisagé pendant la phase travaux	Type d'impact		Méthode d'identification du changement		
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle	
GRAVITAIRE	Sans préparation	Enfoncement de la fondation dans le sol	Définitif	Faible et localisée	Etudes géotechniques préalables	Contrôle visuel (ROV...)
	Avec préparation des sols	Remise en suspension des sédiments	Provisoire	Elevée et localisée	Estimation des volumes remis en suspension	-
		Changement de bathymétrie et de nature des fonds à l'aplomb des fondations	Définitif		Estimation des volumes déposés / à retirer	Contrôle des volumes après opération

Tableau 7 Changements potentiels en phase de construction pour une fondation gravitaire

Dans le cas du choix fondations gravitaires, les fonds marins présentent une forte sensibilité si une préparation des sols est nécessaire. L'importance de la préparation des travaux est donc capitale pour estimer les impacts sur le milieu physique. L'étude d'impact environnementale doit donc détailler le déroulement précis du phasage des travaux. La connaissance des impacts passe également par le déploiement d'outils spécifiques en phase de travaux, qui permettent de contrôler les impacts de la structure sur son milieu.

Fondation de type pieux :

Cette rubrique englobe différents types de fondations, qui pénètrent dans les fonds, tel que les monopiles, les structures en treillis (Jackets), les multipodes détaillés dans la partie 2.

Ces technologies peuvent être mises en place :

- soit par battage, dans fonds meubles ou des substrats rocheux tendres (type calcaires)
- soit par forage, dans le cas de substrats rocheux.

En prenant en compte les deux techniques d'installations, le tableau 8 propose une méthode pour anticiper et contrôler les changements éventuels sur les fonds.

Hypothèse technique	Impact envisagé pendant la phase travaux	Type d'impact		Méthode d'identification du changement		
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle	
PIEUX	Battage	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Faible et diffus	Estimation des volumes remis en suspension	-
	Forage					

Tableau 8 Changements potentiels en phase de construction pour une fondation de type pieux

Ancre :

Il existe de nombreux types d'ancrages, adaptés à des natures de fonds différentes :

- les ancres conventionnelles, qui peuvent avoir de nombreuses formes pour s'adapter à différents types de substrats meubles,
- les ancres à succion, ayant la forme de tubes obstrués et ensouillés dans des fonds cohésifs,
- les ancres gravitaires, déposées sur les fonds.

Les ancrs gravitaires ne sont pas prises en compte dans le tableau 9, car leur mise en place est similaire aux fondations gravitaires évoquées précédemment, de même que pour leurs interactions avec le milieu.

La mise en place d'une ancre conventionnelle est simple : l'ancre est déposée sur le fond puis mise en traction, ce qui lui permet de pénétrer de quelques mètres dans les sédiments, lui fournissant ainsi sa résistance.

La mise en place d'une ancre à succion a lieu en 2 temps : l'ancre est d'abord déposée sur les fonds et s'enfonce par son propre poids, ensuite, l'eau contenue dans la partie non enfoncée est pompée, afin d'atteindre l'enfoncement maximum.

Hypothèse technique		Impact envisagé	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
ANCRÉS	Conventionnelle	Souille provisoire lors de la mise en tension de l'ancre	Provisoire	Faible et localisée	-	Levé de contrôle
	Succion	Pas d'impact				

Tableau 9 Changements potentiels en phase de construction pour une structure ancrée

Câbles sous-marins :

Ce sont les conditions de sol et les usages du milieu qui définissent le type de pose pour le câble sous-marin, et les protections adaptées :

- sur du substrat rocheux, les câbles seront plutôt posés sur le fond et fixés ou protégés si nécessaire (*matelas, rock dumping, grout bags*), une tranchée pourra également être creusée pour y installer les câbles.
- sur fond meuble, l'ensouillage semble être le moyen le plus simple de protéger le câble.

Le tableau 10 présente les différents impacts envisagés sur la morphologie et la nature des fonds, pendant la pose des câbles sous-marins, ainsi que le moyen d'identifier ces impacts et leur degré d'intensité vis-à-vis des fonds marins.

Atterrage :

Les solutions techniques qui permettent de ramener le câble à terre sont :

- la pose, avec protection du câble,
- La mise en œuvre en tranchée ou l'ensouillage, sur le tronçon terrestre, l'estran et les petits fonds,
- Le forage dirigé, lorsque c'est techniquement possible, qui permet de passer intégralement le câble en sous-terrain, d'un point en mer à un espace disponible à terre.

Les impacts potentiels pour chacune des mises en œuvre permettent de définir la sensibilité du compartiment étudié (ici la nature des fonds) vis-à-vis des techniques d'atterrage (Tab. 11).

Hypothèse technique		Impact envisagé pendant la phase travaux	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité	Anticipation	Contrôle
CABLES	Posés	Ragage	Permanent	Modérée	Calculs de stabilité des câbles	Contrôle visuel
	Posés dans une tranchée	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Faible	Estimation des volumes remis en suspension Modélisation hydro-sédimentaire	-
		Modification de la morphologie	Définitif	Définitif mais localisé	-	Contrôle visuel
	Ensouillés	Remaniement des sédiments	Provisoire	Modérée	Estimation des volumes remaniés	Contrôle visuel
		Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Faible	-	-
		Création d'une souille	Provisoire		Etude sédimentologique pour estimer le comportement de la souille	-

Tableau 10 Changements potentiels en phase de construction liés à la pose de câbles

Hypothèse technique		Impact envisagé pendant la phase travaux	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité	Anticipation	Contrôle
ATTERRAGE	Posé	Pas d'impacts				
	Passage en tranchée ou ensouillé	Remaniement de sédiments	Provisoire	Modérée	Etude sédimentologique pour estimer le comportement de la souille	Contrôle visuel
		Création d'une souille	Provisoire			
	Forage dirigé	Pas d'impact				

Tableau 11 Changements potentiels en phase de construction liés à l'atterrage

4.2.2. Changements potentiels en phase d'exploitation

La phase d'exploitation d'une ferme d'hydrolienne est estimée à 20 ans. Les conditions hydrodynamiques particulières vont inévitablement engendrer des interactions entre les structures et les fonds. Les paragraphes et tableaux à suivre proposent, pour chaque orientation technique, différents impacts envisagés, les différentes méthodes pour diagnostiquer et ca-

ractériser ces impacts, et enfin, la sensibilité générale du compartiment étudié vis-à-vis des structures.

Fondations :

Pour chacune des fondations évoquées dans le chapitre 4.2.1., le tableau 12 présente les impacts envisagés, les moyens de les identifier et de manière générale, leur pression potentielle sur les fonds.

Hypothèse technique		Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
FONDACTIONS	Gravitaire	Modification de la nature et l'épaisseur des sédiments, à proximité des fondations et potentiellement dans la zone d'influence	forte	- Etude de la dynamique sédimentaire (figures sédimentaires, modélisation, pièges à sédiments...)	- Levés géophysiques réguliers (cf. 4.4 levés de suivi), - Photos, vidéos
	Pieux				
	Ancre	Engraisement / Affouillement à l'aplomb des fondations			

Tableau 12 Changements potentiels en phase d'exploitation liés aux fondations

La lecture du tableau 12 permet de mettre en évidence que quel que soit le type de fondations, un changement de substrat (nature, épaisseur) peut se produire. L'hydrodynamisme particulièrement important sur les sites étudiés entraîne des impacts potentiellement importants selon le contexte local, non seulement pour le milieu physique, mais dans ce cas précis sur la structure elle-même : en effet, les phénomènes d'affouillements ou de changement de substrats peuvent avoir une influence sur la tenue des fondations.

L'étude de ces phénomènes et des levés de contrôle réguliers sont donc capitaux pour prévenir tout risque sur les fondations (cf. chapitre 5).

Câbles sous-marins :

Le tableau 13 présente les impacts du câble envisagés sur les fonds marins pendant le temps de l'exploitation du parc, les méthodes d'identification et de contrôle de ces impacts. Un degré de pression potentielle est proposé dans le tableau 13.

Hypothèse technique		Type d'impact		Type d'impact	
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
CABLES	Posés	Gêne du transit sédimentaire → piégeage de sédiments	Faible à modérée	Adapter l'architecture de la ferme	Levés de suivis nécessaires (cf. 4.4)
	Posés dans une tranchée	Comblement de la souille par des sédiments de natures différentes	faible	-	Levés de suivis nécessaires (cf. 4.4)
	Ensouillés	Dynamique sédimentaire entraîne un déplacement du câble	modérée	Adapter l'architecture de la ferme Ensouiller suffisamment profond pour s'affranchir de la dynamique sédimentaire	Levés de suivis nécessaires (cf. 4.4)
Dynamique sédimentaire entraîne un désensouillage du câble					

Tableau 13 Changements potentiels en phase d'exploitation liés aux câbles

Les modifications de substrats envisagées liées à la présence des câbles sous-marins sont toutes causées par la dynamique sédimentaire. Une attention particulière devra être portée à l'étude de ce phénomène (cf. Chapitre 5).

On notera que le câble lui-même (ou ses structures de protections) constitue un changement de nature de substrat.

Atterrage :

Sur la zone d'atterrage, les impacts potentiels identifiés ont permis de définir la sensibilité du compartiment étudié (morphologie et nature des fonds) vis-à-vis des techniques d'atterrage. Le tableau 14 présente les impacts potentiels que peut induire le câble sur la zone d'atterrage.

Hypothèse technique		Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
ATTERRAGE	Posé	Gêne du transit sédimentaire → piégeage de sédiments	modérée	-	Levés de suivis nécessaires (cf. 4.4)
	Passage en tranchée	L'ensouillage permanent du câble peut être remise en cause par une variation de l'épaisseur de sédiments.	forte	Etude du trait de côte Tranchée suffisamment profonde pour s'affranchir de la dynamique sédimentaire	Levés de suivis (cf. 4.4)
	Forage dirigé	Pas d'impacts			

Tableau 14 Changements potentiels en phase d'exploitation liés à l'atterrage

4.2.3. Changements potentiels en phase de démantèlement

Note : Les hypothèses proposées dans ce chapitre ne constituent en aucun cas des recommandations techniques, elles sont le constat de ce qui est le plus souvent opéré dans d'autres secteurs. Si d'autres méthodes de démantèlement sont envisagées, le même exercice d'évaluation des impacts et des méthodes d'identifications devra être réalisé.

En phase de démantèlement, les impacts envisagés et leurs moyens d'identification sont présentés pour chaque partie de la ferme ayant des interactions avec les fonds.

A noter qu'il est délicat d'envisager des impacts précis, dans la mesure où le devenir des fondations et des câbles est inconnu. Plusieurs scénarios sont donc envisagés ci-dessous.

Fondations :

Les impacts attendus pour le démantèlement des fondations et la sensibilité liée aux travaux sont présentés dans le tableau 15.

Dans le cas de fondations gravitaires, il est admis que chacune des fondations sera totalement retirée. Si une préparation des sols avait eu lieu en phase d'installation, il sera considéré qu'aucun décaissement ou ajout de substrat n'aura lieu en phase de démantèlement.

Dans le cas de fondations de type pieux, l'hypothèse de démantèlement retenue est un découpage des pieux au plus près du fond, ou éventuellement plus profond, dans le cas de fonds sédimentaires meubles.

Les systèmes ancrés, quant à eux, seront retirés dans leur totalité.

Le devenir des matériaux récupérés devra être précisé (valorisation, recyclage...)

Hypothèse technique		Impact envisagé	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
FONDACTIONS	Gravitaire	Remise en suspension de sédiments Création d'une souille	Provisoire	Faible	Estimation des volumes remobilisés	Levé de contrôle (géophysique, Vidéo...)
	Pieux	Structures affleurantes sur les fonds	Définitif	Définitif	-	
	Ancres	Création d'une souille	Provisoire	Faible	-	
Remise en suspension de sédiments						

Tableau 15 Changements potentiels en phase de démantèlement liés aux fondations

Câbles sous-marins :

Des hypothèses de démantèlement ont été réalisées, afin de proposer des impacts des câbles sur les fonds, et le moyen de les identifier. Il est ici admis que les câbles posés seront retirés. Concernant les câbles installés dans les tranchées ou

ensouillés, deux cas seront étudiés (Tab. 16) :

- les câbles seront laissés au fond,
- les câbles seront retirés.

L'option choisie pour le démantèlement devra être justifiée comme la solution de moindre impact environnemental.

Hypothèse technique		Impact envisagé	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
CABLES	Posés	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Faible	Estimation des volumes remis en suspension	Levé de contrôle (géophysique, Vidéo...)
	Ensouillé/ dans tranchée → Ablation des câbles	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Modérée à forte	Estimation des volumes remis en suspension / remaniés	Levé de contrôle (géophysique, Vidéo...)
		Remaniement des sédiments				
	Ensouillé/ dans tranchée → Maintien au fond	Déplacement des câbles	Définitif	Modérée à forte	Se servir du retour d'expérience de l'exploitation pour estimer le mouvement et définir le plan de démantèlement	Levés de suivis après démantèlement (cf. 4.4)
Ensouillage définitif du câble remis en cause						

Tableau 16 Changements potentiels en phase de démantèlement liés aux câbles

Atterrage :

Pour chaque technique d'atterrage, des hypothèses de démantèlement ont été envisagées :

- câble posé sur l'estran : ablation du câble,
- passage du câble en tranchée : ablation du câble d'une part, et maintien dans le milieu d'autre part,

- Forage dirigé : maintien du câble en sous-terrain.

Les hypothèses formulées ont permis d'envisager des impacts potentiels sur les fonds, de fournir des clés pour identifier et analyser ces changements, et d'en déduire une pression potentielle sur le milieu (Tab. 17).

Hypothèse technique	Impact envisagé	Type d'impact		Méthode d'identification du changement		
		Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle	
ATTERRAGE	Posé	Remise en suspension des sédiments	Provisoire	Faible	Estimation des volumes remis en suspension	Levé de contrôle
	Passage en tranchée ou ensouillé → ablation	Remise en suspension des sédiments	Provisoire	Modérée à forte	Etude sédimentologique pour estimer le comportement de la souille	Contrôle visuel
		Remaniement de sédiments				
	Passage en tranchée ou ensouillé → maintien	Ensouillage définitif du câble remis en cause	Définitif	Modérée à forte	Suivi du comportement des câbles pendant la durée de l'exploitation	Levés de suivis après démantèlement (cf. 4.4)
	Forage dirigé	Aucun impact				

Tableau 17 Changements potentiels en phase de démantèlement liés à l'atterrage

4.3. Identification des impacts cumulés

Dans le cas de l'étude de la morphologie et de la nature des fonds marins, les impacts attendus sont liés à la présence des machines, fondations et câbles.

L'importance des impacts attendus est liée à l'échelle des projets : plus un projet comptera de machines, plus il sera impactant pour les fonds.

Les impacts envisagés sur les fonds marins peuvent avoir une incidence indirecte sur les espèces benthiques : en effet, les modifications de substrats, de morphologie et/ou une augmentation de la turbidité entraînent une modification des habitats benthiques (cf. partie 7).

4.4. Description du programme de suivi environnemental

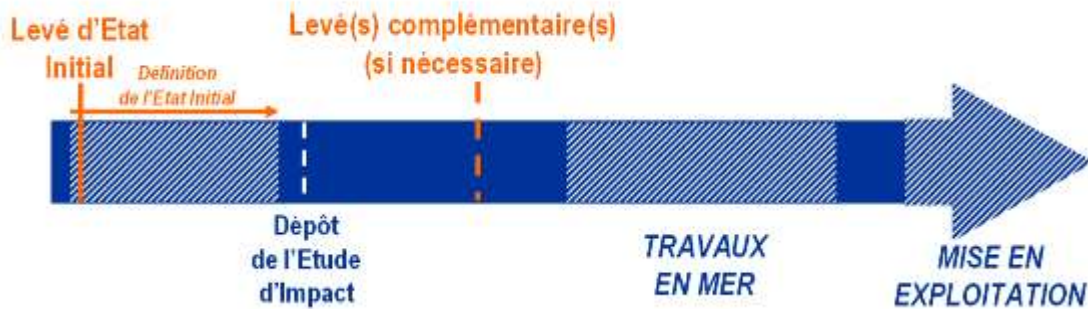
La bibliographie, les recommandations des services de l'Etat, et les impacts envisagés dans les tableaux du chapitre 4.2 et leurs méthodes d'identification et d'analyse permettent de dres-

ser un programme de suivi environnemental indicatif.

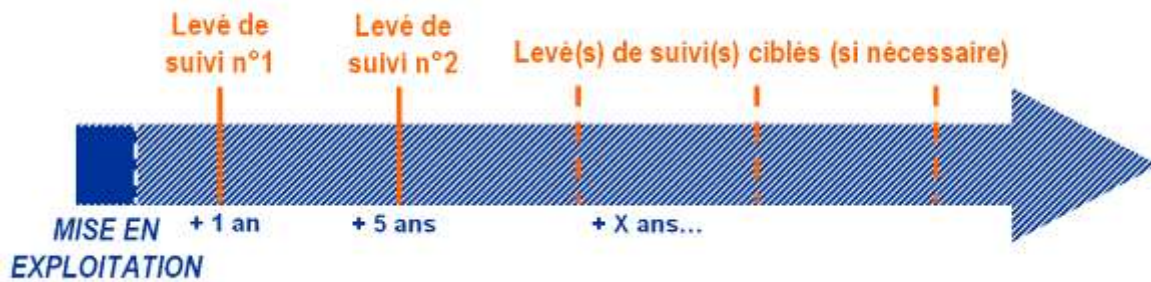
4.4.1. Le planning des suivis environnementaux

Le planning des suivis proposé est le suivant :

- de la phase d'avant-projet à la mise en exploitation de la ferme :



- en phase d'exploitation :



- en phase de démantèlement :

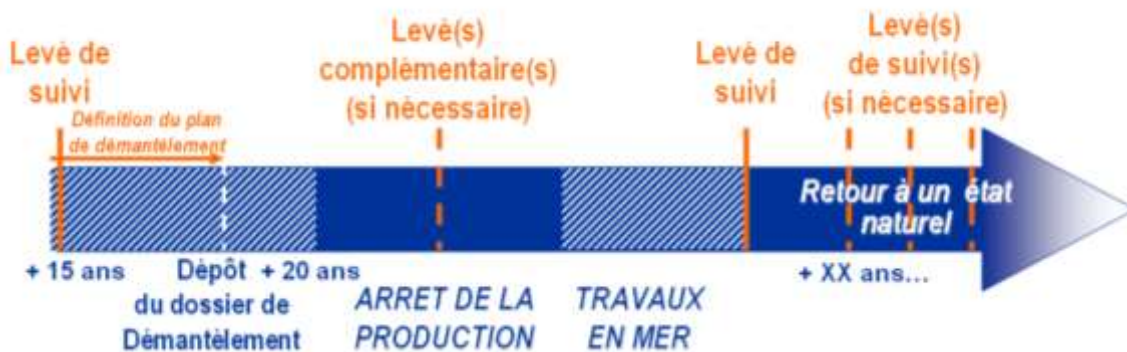


Figure 27 Schéma théorique de la stratégie de mise en place du suivi des fonds marins, sur la durée du projet hydrolien

Les phases de maintenance avec sortie de l'eau des machines ne nécessitent pas de levés spécifiques avant/après chaque entretien, concernant les impacts sur le milieu physique.

La figure 27 met en évidence 3 types de levés :

- le levé d'Etat Initial,
 - les levés complémentaires.
 - les levés de suivis,
- Les **levés de contrôle** évoqués dans les tableaux du chapitre 4.2 ne sont pas évoqués dans la figure 27, car ils correspondent à des études spécifiques et localisés, liés aux phases de travaux : leurs programmes sont de la responsabilité des opérateurs des travaux.

Le contenu du levé d'Etat Initial est détaillé dans le chapitre 4.1.

Les levés complémentaires évoqués relèvent d'obligations administratives, de la volonté de l'exploitant, ou de points précis où une sensibilité particulière/un impact sur le milieu physique a été mis en évidence. Le détail de ces levés dépend du phénomène à étudier et est spécifique à la problématique à traiter.

Il est important de noter que l'ensemble des levés doivent être réalisés à des saisons identiques au cours des années, ce qui permet de comparer les éventuelles variations de couvertures sédimentaires dans des conditions sensiblement identiques (on peut imaginer que les tempêtes d'hivers balayent d'éventuels engraisements de sédiments déposés pendant les saisons estivales).

4.4.2. Programme des levés de suivis

Ces levés sont réalisés sur l'ensemble du secteur d'étude et sur la zone de référence, avec des outils similaires à ceux ayant permis de réaliser l'Etat Initial.

Le programme à réaliser pour les levés de suivi classiques comprend :

- un levé bathymétrique multifaisceau sur l'ensemble de la zone, de même résolution que le levé d'état initial, qui permettra de réaliser :

- o une carte bathymétrique détaillée (cf. chapitre 4.1.4 – représentation des données),
- o une carte des différentiels bathymétriques,
 - un levé bathymétrique haute résolution à l'aplomb des fondations, si un impact est envisagé ;
 - un levé d'imagerie et des prélèvements sur l'ensemble de la zone, de même résolution que l'état initial, qui permettra de réaliser :
 - o une carte des faciès sédimentaires,
 - o une analyse des variations de faciès,
 - un levé d'imagerie haute résolution à l'aplomb des fondations, si un impact est envisagé ;
 - éventuellement, des contrôles vidéo (plongeurs, ROV) à l'aplomb des fondations ;
 - d'autres outils pertinents pour évaluer les impacts que peut avoir le projet sur le substrat pourront également être déployés (ex : levés de magnétométrie pour étudier le déplacement latéral d'un câble ensouillé).

Les programmes de suivis complets sont à réaliser dans les premières années après implantation de la ferme et juste après le démantèlement. Si après les premiers levés complets (au bout de 5 ans, par exemple), aucun n'impact sur le fond n'a été mis en évidence, la nécessité de continuer à réaliser des levés détaillés peut être reconsidérée.

Les levés de suivi ciblés peuvent permettre d'étudier un impact particulier et/ou localisé, observé pendant les premières années d'exploitation d'une ferme ou persévérant après démantèlement. Le programme et le calendrier de ces levés seront alors définis en fonction de la problématique à traiter, en s'appuyant sur les protocoles proposés ci-dessus et par exemple, en concertation avec un comité de suivi (réunissant des instances scientifiques et le porteur de projet).

Ces programmes de suivis complets, leurs résultats et analyses en termes d'impacts seront soumis aux services de l'Etat pour instruction. Ces études détaillées du milieu physique contribuent également à alimenter les études sur le milieu vivant.

4.5. Mesures d'atténuation des impacts

Comme évoqué dans le chapitre 1.6, il est nécessaire de prendre en compte des impacts potentiels liés aux choix techniques dès la conception du projet et d'appliquer les principes Eviter – Réduire – Compenser.

Ces mesures d'atténuation seront proposées après une définition précise de l'Etat initial environnemental du site, et de l'étude des impacts spécifiques à la technologie déployée sur le secteur.

Parmi les différentes mesures d'atténuation possibles, certaines peuvent entraîner des modifications du design ou de l'architecture d'un projet (par exemple, une modification du design des fondations pour limiter leur emprise au sol) : il est donc capital de prendre en compte l'environnement très en amont dans la conception du projet.

De manière générique, il est délicat de proposer des mesures précises pour éviter, réduire ou compenser des impacts. Cependant, quelques suggestions peuvent fournir des pistes de mesures envisageables (Fig. 28) :

- Augmenter la profondeur d'ensouillage (pour limiter les déplacements des câbles dus à la dynamique sédimentaires),
- rock dumping (empêcher le désensouillage ou ragage des câbles, préparer les fonds pour l'accueil des fondations),
- matelas béton (empêcher le désensouillage des câbles ou limiter leur ragage),
- algues plastiques ou vivantes (limiter l'affouillement à l'aplomb des fondations),
- colliers d'ancrages (fixent les câbles sur les fonds rocheux, afin de limiter leur déplacement et leur ragage),
- Grout bags (lestent et fixent les câbles au fond, afin de limiter leur déplacement et leur ragage),

Il est important de noter que ces mesures peuvent elles aussi générer un impact, qu'il convient donc de prendre en compte dans le projet.

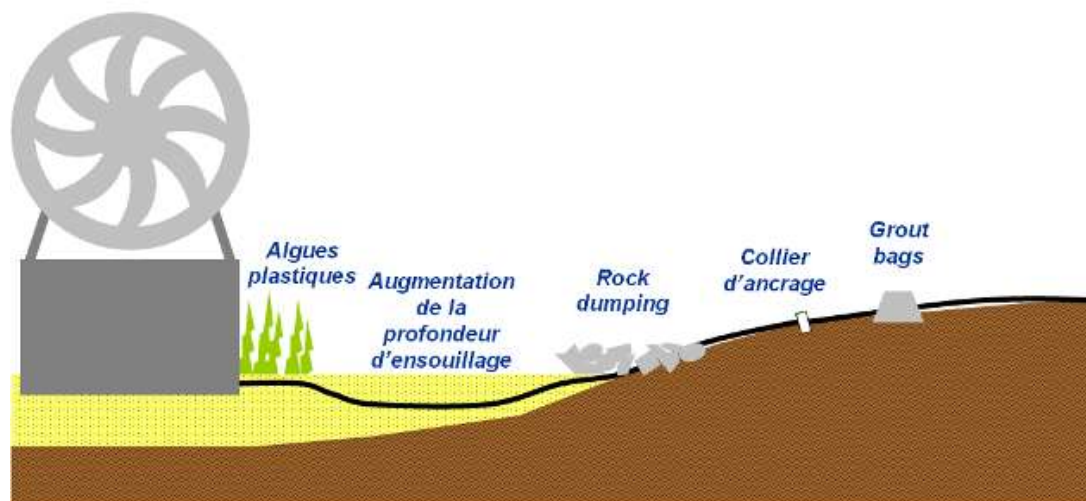


Figure 28 Schéma de différentes solutions techniques visant à atténuer les impacts du projet sur une éventuelle modification des fonds marins

4.6. Lacunes et programme de recherche

L'évolution permanente des sondeurs multifaisceaux permet aujourd'hui d'acquérir des données de meilleure qualité et résolution, notamment en mode imagerie. Ces outils devraient, pour ce type d'environnement, se substituer avantageusement aux sonars à balayage latéral (mise en œuvre facilitée et positionnement plus précis). Ces évolutions permettront ainsi d'identifier des impacts très localisés, ou de les diagnostiquer plus tôt, dès les premières modifications de substrat.

Les modifications de natures de fonds estimées en phase d'études des projets sont parfois liées à la dynamique sédimentaire (cf. partie 5). Les impacts de telles structures sur la dynamique sédimentaire et des dépôts de sédiments associés restent aujourd'hui peu connus à l'échelle de la cellule (ou sous-cellule) hydrosédimentaire.

Les coûts et les difficultés de déploiement que représentent les campagnes géotechniques en milieu énergétique posent des questions sur la capacité qu'auraient des méthodes géophysiques à caractériser les propriétés physiques et mécaniques du sous-sol. Des outils d'imagerie géophysique plus puissants permettraient en effet de mieux caractériser la structure et la nature du sous-sol et aideraient les porteurs de projets à mieux appréhender leurs zones d'études lors des phases de développement des fermes.

Actuellement deux approches, qui peuvent s'avérer complémentaires car elles imagent le sous-sol avec des paramètres différents des propriétés de propagation, sont en cours de développement : les méthodes acoustiques (i.e. Sismique) et les méthodes électrique et électromagnétique.

Références clés

IFREMER - Présentation des caractéristiques de fonctionnement des équipements acoustiques utilisés en géophysique marine. <http://flotte.ifremer.fr/Presentation-de-la-flotte/Equipements/Equipements-acoustiques>.

IHO Standards for Hydrographic Surveys - 5 th. Edition, February 2008. Special Publication No. 44 published by the International Hydrographic Bureau. (http://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf)

5. Océanographie

5.1. Description de l'état initial

5.1.1. Définition de la zone d'étude

La définition de la zone d'étude, est variable selon les situations. On peut retenir que les mesures océanographiques se feront plutôt à l'échelle de la concession (quelques km²), avec un ou plusieurs points de mesures en fonction des cas, alors que les modèles numériques et les statistiques standards météocéaniques se feront à une échelle régionale. La zone de suivi des impacts en exploitation est quant à elle à déterminer au cas par cas (vraisemblablement intermédiaire entre l'échelle de la concession et l'échelle régionale).

Note : *L'ensemble des phénomènes océanographiques et hydrosédimentaires sont étudiés pour plusieurs applications : l'évaluation des impacts environnementaux, mais surtout le dimensionnement des structures et le productible de ces machines.*

Les aspects liés à la conception du projet ne font pas l'objet du présent guide et ne seront donc qu'évoqués ponctuellement dans ce chapitre. Cependant, il convient bien entendu lors du déroulement du projet de s'interroger sur les mutualisations possibles (exemple : utiliser les mêmes modèles pour l'étude de l'impact du parc sur le courant pouvant influencer la dynamique sédimentaire, et pour l'étude des interactions houle-courant pouvant influencer le productible) et sur la définition d'une zone d'étude pertinente.

Les détails sur la prise en compte de la turbulence et des interactions houle-courant ne sont donc pas fournis ici, d'autant qu'ils font actuellement l'objet de programme de recherche (voir paragraphe 5.6). Ces points sont tout de même évoqués dans le texte lorsque nécessaire.

5.1.2. Description du contexte océanographique et hydrosédimentaire

Différents processus sont à étudier et mesurer afin de caractériser les conditions météocéa-

niques d'un site hydrolien. Outre leur prise en compte pour des critères techniques, l'analyse de ces phénomènes est déterminante pour évaluer le contexte hydrosédimentaire local et donc les possibles impacts sur les peuplements biologiques (voir chapitre concerné).

Les principaux forçages concernés seront :

- **La marée :** la marée influe bien entendu sur les niveaux d'eau et est un forçage pour les courants. Sur les côtes françaises, la marée suit un cycle de 12h25 (pleine mer / basse mer) superposé à un cycle de 14 jours (morte eau / vive eau).

- **Le vent :** le vent est un forçage pour les états de mer et les courants.

- **Les courants :** le courant permet bien entendu d'estimer la ressource disponible mais il s'agit également d'une contrainte de dimensionnement et de fatigue des machines. Sauf cas particuliers, les courants d'un site hydrolien seront dominés par le cycle de marée. Sur un site hydrolien, les courants seront généralement alternatifs (dans un sens puis dans l'autre, sur des demi-cycles de marée). Les courants de marée ne sont cependant pas les seuls processus à étudier sur un site hydrolien, qui peut être influencé par le vent, la houle, la turbulence, ou d'autres effets régionaux très spécifiques.

- **Les états de mer :** la houle et/ou la mer de vent (vagues créées à l'endroit même où souffle le vent) influencent le dimensionnement et la fatigue des machines, directement par effet des vagues ou indirectement par modification des courants. Par interaction avec les courants, elles peuvent influencer le productible.

Sur un site hydrolien, par définition très énergétique, ces différents forçages entraînent une forte dynamique sédimentaire, qui sera un processus déterminant dans le projet :

- **La dynamique sédimentaire :** les mouvements sédimentaires peuvent être importants notamment pour l'étude de l'ensablement du site après installation des machines (et donc modification de substrat éventuelle).

Un site rocheux n'est pas affranchi de mouvements sédimentaires, bien au contraire : un site hydrolien, très énergétique, ne permettra géné-

ralement pas le dépôt et la sédimentation, mais pourra être le lieu de transits importants, de sables, voire de galets ou de blocs, sur le fond (par charriage) ou dans la colonne d'eau (en suspension). L'implantation de machines peut bloquer une partie de ce transit, et, outre les dommages potentiels sur les hydroliennes, causer des impacts hydrosédimentaires importants si le problème n'est pas anticipé.

5.1.3. Caractérisation de la variabilité naturelle du site d'implantation

Les paramètres liés au courant et aux états de mer sont très fluctuants dans le temps et très variables spatialement. Les données de projet, même à l'issue d'expertises techniques et scientifiques, resteront donc entachées d'une variabilité naturelle et d'incertitudes de mesures ou d'études qu'il conviendra de limiter au maximum. Les statistiques standards utilisées pour les études préliminaires sont réalisées sur des séries reconstituées sur une vingtaine d'années afin d'avoir une meilleure représentativité de la variabilité temporelle des processus (approche usuelle).

Lors de l'étude détaillée d'un site, la variabilité spatio-temporelle du courant doit être étudiée plus précisément :

- le pas de temps de 5 à 10 minutes usuellement employé pour l'étude des courants de marée ne pourra être suffisant pour une étude détaillée du site : une approche de la turbulence sera nécessaire, avec un pas de temps encore mal défini (quelques dizaines de secondes) ;

- spatialement, le courant peut varier très significativement en quelques dizaines de mètres sur les sites les plus énergétiques, d'où la nécessité de réaliser des modélisations précises, associées à des mesures en plusieurs points sur le parc.

La variabilité spatiale de la houle est également importante, et une approche sur modèle associée à des mesures en plusieurs points est nécessaire également.

La variabilité du vent pourra être approchée par les statistiques standards.

5.1.4. Identification de paramètres et d'indicateurs pertinents

Lors d'une première approche, les études préliminaires permettent de sélectionner le(s) site(s) potentiellement intéressant(s) sur un secteur maritime donné, avant de lancer les études plus détaillées sur ce site. Ces premières investigations s'appuient sur des données bibliographiques (statistiques standards), principalement :

- Carte des champs de courants moyens sur la verticale pour différents coefficients (par exemple pour coefficients 20, 45, 70, 95, 120) avec un pas de temps de 1h pour chacune de ces marées (BM, PM-6h, PM-5h, ..., PM+6h),
- Statistiques de houle au large¹³ (corrélogrammes mensuels Hs/Tp et Hs/Direction. ainsi que houle de projet centennale),
- Statistiques de vent (rose des vents).

Une fois la sélection du site réalisée, l'objectif est de préciser les conditions de site, en réalisant des modèles numériques et des mesures, deux approches complémentaires qui sont détaillées ci-après : les modèles permettent d'avoir une approche de la variabilité spatiale des phénomènes (cartographie) alors que les mesures ont pour objectif principal d'obtenir des séries temporelles précises en un point donné.

Citons les données suivantes qui peuvent être mesurées / calculées à ce stade d'étude :

- Série temporelles de courant de la surface au fond (direction et intensité), avec pas de temps de 5 à 10 minutes (+ analyses spectrales), afin d'étudier la variabilité du courant sur le cycle de marée

- Idem avec pas de temps de quelques dizaines de secondes (en fonction de la faisabilité et du filtrage choisi, qui va dépendre de la qualité du signal en sortie d'ADCP¹⁴), afin d'étudier des processus de période plus courte, comme la turbulence

¹³ Hs = houle significative ; Tp = période de pic

¹⁴ ADCP = Acoustic Doppler Currentmeter Profiler (voir paragraphe 5.1.5 Erreur ! Source du renvoi introuvable. sur les mesures océanographiques)

La série temporelle de houle est intéressante pour corrélérer ou non les hauteurs significatives et les périodes avec les intensités turbulentes. **Attention cependant de ne pas utiliser cette série relativement ponctuelle (exemple : 3 mois de mesures) pour réaliser des statistiques. Une série de houle se doit d'être pluriannuelle pour avoir un sens statistique.**

Outre les paramètres évoqués précédemment, d'autres paramètres sont étudiés à des échelles plus précises (turbulence, interactions houle courant...), particulièrement pour l'étude de la ressource hydrolienne (production d'énergie) ou le dimensionnement des structures.

Ces phénomènes étant liés à un design de machine ou concernant la ressource, ils ne seront pas évoqués dans leur intégralité ici.

Concernant la turbulence, elle peut avoir un impact sur la ressource et d'autre part les machines peuvent avoir des effets sur la turbulence du milieu. Ces considérations sont prises en compte lors des « études de sillage » et l'étude de « l'effet de parc » où l'effet des machines sur le milieu physique est également évoqué.

La turbulence peut également avoir une influence sur la remise en suspension et le dépôt des sédiments fins lorsqu'il y en a (en fonction du site).

Ce sont actuellement en partie des sujets de recherche, notamment concernant la dynamique sédimentaire des sites rocheux à forts courants de marée.

5.1.5. Méthodologies possibles d'acquisition d'information

Par définition, un site hydrolien est très énergétique, avec pour conséquence des mesures sur site très délicates (fenêtres météo restreintes, tenue à la mer des mouillages de mesures, ...), et des modélisations numériques également spécifiques (interactions houle-courant).

Les grands types de méthodes sont repris ci-après, par ordre chronologique d'apparition dans le projet :

Bibliographie et données existantes

Les statistiques standards peuvent être réalisées à l'aide des bases existantes. De nombreuses sources existent (liste non exhaustive de certaines bases accessibles) :

- **Pour la marée et le courant**
 - Sites d'océanographie opérationnelle (<http://www.previmer.org>)
 - Estimation des niveaux de marée astronomique par le SHOM pour différents coefficients de marée, disponibles sur internet (et niveaux extrêmes : surcotes et décotes météorologiques)
 - Atlas des courants du SHOM : cartographie régionale des directions et courants de marée moyens sur la verticale toutes les heures pour les coefficients 45 et 95 (indicatif)
 - Logiciels de prédiction de marée et sites d'océanographie opérationnelle (PREVIMER ou équivalents)
- **Pour les états de mers**
 - Sites d'océanographie opérationnelle (<http://www.previmer.org>)
 - ECMWF (modèle numérique opérationnel) : état de mer total (houle + mer de vent), toutes les 6 heures, avec résolution de 1,5° x 1,5° en série pluriannuelle
 - WW3 (modèle numérique opérationnel) : état de mer total, toutes les 3 heures, avec résolution 0,5° x 0,5° en série pluriannuelle
 - Données satellites (par exemple site du CERSAT de l'IFREMER)
 - Bouées CANDHIS (en France) : mesures sur site du CETMEF
 - ANEMOC (modèle numérique avec réanalyse de données in situ passées) : état de mer total, sur 23 ans, sur les côtes de France (fourni par le CETMEF)
- **Pour le vent**
 - Sites d'océanographie opérationnelle (<http://www.previmer.org>) (Fig. 29)
 - Données Météo-France des « fiches climatologiques » : statistiques standards du vent sur des stations à terre (indicatif)
 - Achat de données Aladin ou Arome (modèle avec assimilation et jeu)
 - ECMWF : vent à 10 m, toutes les 6 heures, avec résolution de 1,5° x 1,5° en série pluriannuelle

- CFSR (NCEP) : vent à 10 m, toutes les heures, avec résolution 1/3° en série de 30 ans

- Autres modèles, globaux ou régionaux : WRF, GFS, NAM, ...

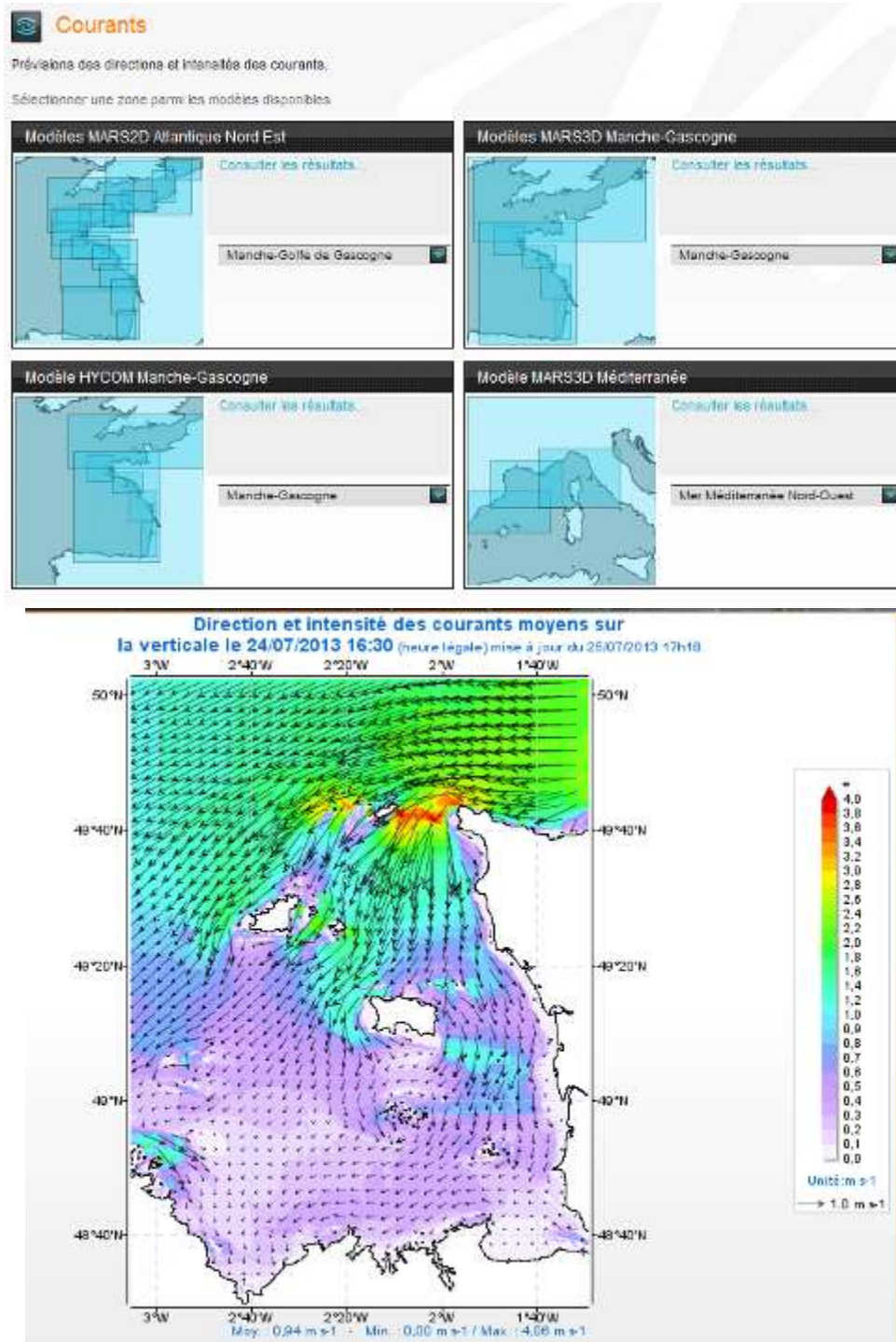


Figure 29 Modèles disponibles et exemple de sortie sur le site de PREVIMER, ici pour les champs de courants le 24/07/2013 à 16h30 sur MARS2D (source : <http://www.previmer.org>)

Mesures sur site

Les mesures de courant se font généralement à l'aide d'ADCP (Acoustic Doppler Currentmeter Profiler) posés sur le fond et suffisamment lestés (plusieurs centaines de kilos) pour supporter la courantologie du site. Ces appareils, équipés de 4 transducteurs, permettent de mesurer les courants dans la colonne d'eau au-dessus d'eux, en échantillonnant la colonne d'eau verticalement, et avec un pas de temps qu'il est possible de choisir (en général une valeur moyenne de courant toutes les 5 à 10mn, mais fréquence d'acquisition pouvant aller jusque 1 à 2 Hz (voire 4 Hz sur certains modèles) pour étudier la variabilité temporelle de façon précise) (Fig. 30).

Des ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) peuvent également être utilisés, pour des mesures ponctuelles (l'ADV mesure en 1 point et non sur la

colonne d'eau) de courant grâce à 3 transducteurs, avec une fréquence d'acquisition supérieure aux ADCP (mesures qui peuvent être utilisées en complément).

Les mesures de niveaux se font à l'aide des capteurs de pressions de l'ADCP.

Les mesures d'états de mer peuvent également être réalisées par un ADCP, ce qui présente l'avantage d'utiliser un seul appareil au même point de mesures. A intervalles réguliers, l'appareil mesurera les vitesses orbitales pour estimer la houle.

Note : Lors de mesures de courants et d'états de mer, il est intéressant de profiter de la pose d'appareils pour mesurer les températures et salinités.

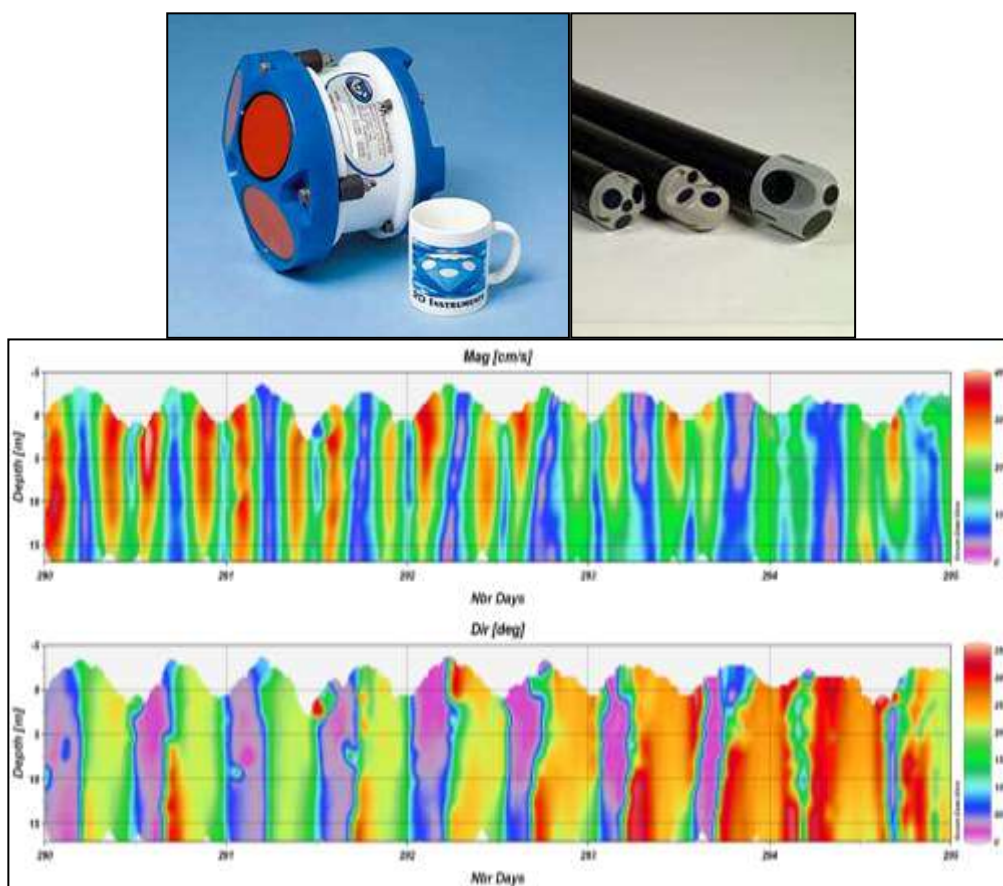


Figure 30 Exemples de profileurs de courant et de représentation de données (source : SHOM) – de gauche à droite : RDI Workosre 300 kHz ; NORTEK Aquapro 1 MHz ; série temporelle de courant sur 5 jours en intensité et en direction

Des mesures de granulométrie (s'il y a du sédiment ou du transit sédimentaire), **de turbidité et/ou de M.E.S.** (Matières En Suspension) peuvent également s'avérer nécessaires afin de comprendre les processus hydrosédimentaires régissant le site, mais ce point doit être traité au cas par cas et reste très délicat sur un site soumis à de forts courants (exemple : difficile de placer des chaînes de turbidimètres dans la colonne d'eau...). Ces mesures seraient à rapprocher des mesures réalisées au sonar latéral ou équivalent pour l'étude de la morphologie des fonds.

Note : La turbidité permet de qualifier l'opacité de l'eau de mer et s'exprime en NTU (Nephelometric Turbidity Unit), ou en NFU (Nephelometric Formazine Unit) ; alors que les M.E.S. permettent de qualifier la concentration de particules dans la colonne d'eau (en mg/L). Les unités NTU / NFU sont parfois difficiles à relier aux M.E.S., car elles dépendent de l'appareil et du milieu (nécessité d'une calibration).



Figure 31 Exemples de dispositifs de mesures de turbidité et de M.E.S. De gauche à droite : transmissiometre (source : NEOTEK) ; OBS (source : ZEBRA TECH Ltd.)

¹⁵ OBS = Optical Backscatter Sensor (encore appelé néphélomètre ou diffusiomètre)

¹⁶ LISST = Laser In Situ Scattering and Transmissivity

Modélisation numérique

Les phénomènes météocéaniques à étudier sont très complexes et très variables : les études et mesures ponctuelles ne peuvent donc suffire à les appréhender. C'est pourquoi des outils de modélisation ont été développés. L'objectif de ces modèles est d'une part d'obtenir une vision globale du secteur d'étude (carte des champs de courant par exemple), d'autre part de simuler des phénomènes de longue durée en un temps beaucoup plus court. Ils permettent également de tester différentes configurations d'aménagement afin d'estimer les impacts hydrosédimentaires pour différentes configurations du parc hydrolien. L'inconvénient est bien entendu la simplification obligatoire des processus à étudier, puisqu'un modèle ne pourra jamais retranscrire la complexité naturelle dans son intégralité. Notamment, il est bien évident que les modèles numériques ne peuvent simuler que des processus dont nous connaissons les lois physiques, ce qui n'est pas forcément le cas sur un site énergétique. Ces outils sont donc bien fortement complémentaires des mesures sur site.

Deux types de modèles existent : les modèles numériques (logiciels) et les modèles physiques (maquettes). A noter qu'on utilise également les modèles dits « hybrides », qui sont un regroupement des deux. Seuls les modèles numériques seront discutés ici, car principalement utilisés pour les études hydrosédimentaires des sites hydroliens. Le modèle physique peut toutefois être utilisé pour estimer les paramètres hydrodynamiques de la machine, notamment pour les effets de sillage.

Les modèles numériques utilisés pour l'étude d'un site hydrolien concerneront principalement la génération/propagation des états de mer et la courantologie. Des modèles hydrosédimentaires sont également mis en œuvre.

- **Modèles de génération / propagation des houles** : ces modèles utilisent la théorie non linéaire de la houle et prennent généralement en compte la réfraction mais également les effets de cambrure et la diffraction (houle du 3^{ème} ordre). A ce sujet, il est important de noter que :

- ces modèles permettent de représenter correctement la propagation de la houle sur des bathymétries accidentées et des hauts-fonds, comme cela peut être le cas d'un site hydrolien, avec fond rocheux et rugosité très importante (parfois métrique).

- un modèle numérique ne peut être utilisé que si l'on dispose d'une série temporelle de Hs/Tp/Direction au large, sur une longue période (20 ans). Ces séries temporelles sont toutefois généralement issues de base de données de plus large échelle (et basse résolution), elles-mêmes issues de reconstitutions de modèles numériques, qui servent à déterminer les conditions aux limites des modèles régionaux utilisés pour les projets. Des mesures spécifiquement réalisées sur site permettent également de vérifier/calibrer la matrice de propagation sur la période de mesures.

- **Modèles courantologiques** : ces modèles utilisent l'équation de Navier Stokes pour simuler la variation spatio-temporelle des courants. Des hypothèses simplificatrices sont souvent nécessaires, par exemple en ne simulant que les courants de marée, mais pas la turbulence ni les courants généraux. Depuis quelques années, les modèles 3D sont devenus très performants et de plus en plus utilisés. Dans un contexte hydrolien, où les profils verticaux et les interactions avec la houle seront importants, on préférera donc utiliser ce type de modèles (les modèles 2D travaillent sur des vitesses moyennées sur la verticale).

- On notera que la mise en œuvre de ces modèles nécessite de connaître avec précision la variation du niveau d'eau à chaque instant, ainsi que la bathymétrie, qui vont conditionner la courantologie de la zone.

- Dans le cas d'un site hydrolien, compte tenu des forts courants, et bien souvent des fortes houles, il conviendra d'étudier précisément les interactions houle-courant :

▪ **effet des courants sur la houle :** ces effets sont complexes et assez mal représentés la plupart du temps, du fait des multiples interactions possibles (réfraction du courant, modulation de fréquence, courant verticaux, cambrure, ...). La limitation de ces modèles est souvent la non prise en compte du « wave blocking » (déferlement de la vague du à un courant opposé), ce qui oblige parfois à des « artifices » numériques (travail d'expert en modélisation).

▪ **effet de la houle sur les courants** (dans une moindre mesure) : pour représenter les courants induits par la houle, le calcul est basé sur un modèle 3D.

• **Modèles hydrosédimentaires :** l'objectif ici est d'étudier les mouvements sédimentaires potentiels et l'évolution des fonds sous l'action des courants et de la houle, avant ou après l'installation d'une ferme hydrolienne par exemple.

Ce type de modélisation, outre une expertise pour l'utiliser à bon escient, nécessite notamment d'avoir des informations précises sur la couverture sédimentaire et le calibrage des dépôts/érosions à partir de mesures. On distinguera principalement les modélisations de sédiments cohésifs (type vase) et non cohésifs (type sable). L'objectif principal dans tous les cas est d'étudier l'impact potentiel des machines sur la dynamique sédimentaire et la morphologie des fonds.

A noter qu'on utilise également les modèles dits « hybrides », qui sont un regroupement des deux types de modélisations :

• modèle numérique de grande emprise fournissant des forçages (données d'entrée) pour un modèle réduit de plus petite emprise.

• modèle réduit champ proche fournissant des données d'entrée pour un modèle numérique plus englobant (par exemple pour l'étude de silage sur modèle réduit ; et intégration dans un modèle numérique pour calcul de l'effet de parc).

5.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

A l'instar des impacts potentiels sur les fonds marins, les impacts potentiels sur les conditions météocéaniques et hydrosédimentaires seront dépendants de la technique utilisée :

• les principaux effets seront dus à la présence d'un obstacle dans la colonne d'eau (l'hydrolienne) et à la présence d'un ouvrage sur le fond (socle et fondation de l'hydrolienne ou sous-station électrique), la géométrie de ces deux systèmes va donc influencer sur les processus physiques en aval du sens du courant. Les structures flottantes en surface ou subsurface lorsqu'il y en a sont également susceptibles d'avoir un impact local sur les vagues.

• les impacts potentiels hydrosédimentaires dépendent également du câble d'atterrage (dans sa partie maritime).

Seuls les impacts potentiels sur la houle, les courants et la dynamique sédimentaire sont traités ici. D'autres impacts potentiels pourraient bien entendu être étudiés au cas par cas. Les aspects liés directement aux conditions météocéaniques sont présentés ici.

La distinction sera faite ici principalement :

• Pour les hydroliennes et la sous-station électrique: entre les structures flottantes ou posées sur le fond.

• Pour le câble d'atterrage (dans sa partie maritime et terrestre) : sur la méthode de travaux (posé, ensouillé en tranchée, en forage dirigé).

5.2.1. Impacts potentiels en phase d'installation

En phase d'installation, aucun impact n'est attendu sur la houle ni sur les courants.

Les impacts hydrosédimentaires seront liés aux remises en suspension éventuelles de sédiments meubles lors de la mise en place des fondations et des câbles sous-marins (Tab. 18). Ce point est traité au chapitre précédent. Pour rappel, les pressions potentielles sur les fonds ont été estimées faibles pour les mises en place de fondations, sauf en cas de préparation préalable du sol (dragage par exemple) pour laquelle la perturbation a été jugée modérée.

- Ces impacts potentiels sont à étudier au cas par cas en fonction de la sensibilité de l'écosystème et des usages. Par exemple, la proximité d'une exploitation ostréicole ou d'un herbier incitera à réaliser des modélisations de panaches turbides de ces remises en suspension, afin d'étudier l'évolution des concentrations au gré des courants et l'impact potentiel sur les organismes en terme de M.E.S. (organismes filtreurs) ou de turbidité (besoin de lumière pour la photosynthèse). Ce chapitre ne traite cependant pas des aspects biologiques, qui sont repris ensuite, mais uniquement des aspects physiques.

- Dans ce cadre, des modélisations de l'évolution des concentrations en M.E.S. pourront donc être réalisées, sur la base des modèles météocéaniques développés pour l'étude de l'état initial. Différents scénarios peuvent ainsi être simulés, représentatifs des processus de la zone. Par exemple, différents scénarios avec courant de marée seul (coefficients 45, 70, 95), puis des cas

- avec vent ou houle, plus ou moins pénalisants. Différents scénarios d'aménagement peuvent également être modélisés, ou différentes options techniques pour les fondations et les câbles.

- Ces modélisations seront conditionnées par les hypothèses de travail fournies comme données d'entrée, à savoir la concentration initiale et les volumes remis en suspension. A noter que cette donnée n'est pas évidente à fiabiliser, et très dépendante de la méthode et des engins de travaux.

- Les résultats de ces modélisations pourront conduire à une restriction dans l'arrêté préfectoral de travaux : travail uniquement pour certains coefficients de marée ou certaines heures (cela risque de s'imposer de toute façon pour la manœuvrabilité des navires), respect de niveaux seuils de turbidité ou de M.E.S., à contrôler régulièrement pendant l'installation. Ceci sera surtout valable en cas de dragage sur un site présentant une couverture de sédiments meubles.

Hypothèse technique		Impact envisagé pendant la phase travaux	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
FONDATION	Sans préparation de sol	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Faible	Modélisation de panaches turbides <u>si nécessaire</u>	Mesures de turbidités
	Avec préparation de sol	Remise en suspension de sédiments	Provisoire	Modérée	Modélisation de panaches	Mesures de turbidités
CABLES	Posé	Pas d'impacts potentiels				
	Ensouillé	Remise en suspension de sédiments par réalisation de la tranchée	Provisoire	Modérée	Modélisation de panaches	Mesures de turbidités
	Forage dirigé	Pas d'impact potentiel				

Tableau 18 Synthèse des impacts potentiels en fonction du type de travaux

5.2.2. Impacts potentiels en phase d'exploitation

La présence d'obstacles (hydroliennes, sous-station, câble sous-marin) modifie les conditions hydrodynamiques locales, par :

- accroissement de l'énergie turbulente de l'écoulement, due à la génération de tourbillons ;
- accélération de l'écoulement à proximité de l'obstacle, par convergence des lignes de courant ;
- réflexion de la houle sur l'obstacle.

En phase d'exploitation, les impacts sur les conditions locales de houle et de courant peuvent donc être déterminants, car l'effet de « masque » et l'effet de « sillage » pourront impacter le productible de l'hydrolienne située en aval et avoir des répercussions sur la dynamique sédimentaire (Tab. 19). Ces processus se produisent à une échelle spatiale généralement limitée (quelques dizaines de mètres autour des fondations) mais peuvent avoir des conséquences importantes, techniques ou environnementales :

- Dans les zones sédimentaires : affouillements en pied de pile ou de fondation gravitaire (phénomène de « vortex en fer à cheval » bien connu en pied de piles de ponts par exemple, pour lesquels le courant peut s'accélérer localement de 30 à 40 %). Différents états de l'art permettent de conclure pour des piles par exemple que des fosses importantes peuvent se former, de 4 fois le diamètre du pieu en amont et 6 fois en aval (Bijker *et al.*, 1988, in Whitehouse, 1998).
- Dans les zones rocheuses : captage d'une partie du transit sédimentaire ? La modification éventuelle du substrat sur le parc hydrolien peut avoir une influence sur les processus hydrosédimentaires.

Dans tous les cas, ces processus doivent donc être étudiés le plus précisément possible, car ils peuvent influencer la faisabilité technico-économique du projet, mais également conduire à des changements de substrats, soit du fait des travaux (pose d'enrochements anti-affouillement sur fond sableux) soit par impact indirect des machines (captage de sable ou de galets en zone initialement rocheuse).

Afin d'étudier ces impacts, des modélisations physiques peuvent être réalisées (modèle réduit en cuve ou en canal par exemple, pour déterminer l'influence de l'hydrolienne sur le courant en aval), associées à des modélisations numériques (effet de parc, avec en donnée d'entrée les paramètres d'une hydrolienne et les courants ambiants naturels), et bien entendu des mesures sur prototype échelle 1 en milieu naturel, qui seront sans doute les plus instructives.

Ces effets doivent être étudiés en 3D et seront mesurés par des ADCP et/ou ADV bien placés et bien orientés, sur un prototype ou sur la ferme en exploitation. Des mesures de turbulence peuvent s'avérer nécessaires également, avec les incertitudes que cela comporte (voir ci-avant).

Nous supposons ici que les hydroliennes n'entravent pas « entièrement » la colonne d'eau, à savoir qu'elles occupent soit une partie entre le fond et la subsurface (hydrolienne posée sur le fond), soit une partie entre la surface et la subsurface (hydrolienne flottante ou fixe en surface). Si les hydroliennes affleurent parfois la surface pour certains coefficients (c'est-à-dire pas de tirant d'eau au-dessus de la machine), il est bien évident que d'autres processus très problématiques pourront apparaître et augmenter la sensibilité (déferlement au-dessus de l'hydrolienne, accélération des courants, etc.).

Hypothèse technique		Impact envisagé pendant la phase exploitation	Intensité de l'impact	Méthode d'identification du changement	
				Anticipation	Contrôle
HYDROLIENNE	Fixe au fond	Effet de sillage (courant)	modérée	Modélisation physique Modélisation numérique Prototype ?	Mesures ADCP et ADV
	Fixe en surface	Effet de sillage (courant) Effet de masquage (houle)	Modérée à forte	idem	idem
	Flottante	Effet de sillage (courant) Effet de masquage (houle)	Modérée à forte	idem	idem
FONDATION	Gravitaire	Impacts hydrosédimentaires	forte	idem	idem+ turbidité + suivi morpho-dynamique
	Sur pieux	Impacts hydrosédimentaires	forte	idem	idem+ turbidité + suivi morpho-dynamique
	Ancrée	Impacts hydrosédimentaires	faible	Modélisation numérique principalement	idem+ turbidité + suivi morpho-dynamique
CABLE	Posé	Impacts hydrosédimentaires	modérée	idem	idem+ turbidité + suivi morpho-dynamique
	Ensuillé	Pas d'impact attendu du câble lui-même, mais à surveiller en cas d'érosion (câble mis à nu ?) – non traité ici dans le cadre des impacts environnementaux			
	Forage dirigé	Pas d'impact potentiel			

Tableau 19 Synthèse des impacts potentiels en phase d'exploitation

5.2.3. Impacts potentiels en phase de démantèlement

Les impacts potentiels en démantèlement sont grossièrement les mêmes qu'en phase d'installation, à savoir principalement des

remises en suspension, plus ou moins importantes selon les méthodes de travaux et le type de fondations/câbles (Tab. 20).

Hypothèse technique		Impact envisagé pendant la phase démantèlement	Type d'impact		Méthode d'identification du changement	
			Durée	Intensité et étendue	Anticipation	Contrôle
FONDATION	Gravitaire	Remise en suspension de sédiment lors du relevage	Provisoire	faible	Modélisation de panaches turbides <u>si nécessaire</u> (selon la sensibilité du milieu)	Mesures de turbidités
	Sur pieux	dépend de la technique de travaux ? (a priori peu d'impact sédimentaire)	Provisoire	Faible ou nulle	Modélisation de panaches turbides <u>si nécessaire</u> (selon la sensibilité du milieu)	Mesures de turbidités
	Ancrée	Remise en suspension de sédiment lors du relevage	Provisoire	faible	Modélisation de panaches turbides <u>si nécessaire</u> (selon la sensibilité du milieu)	Mesures de turbidités
CABLE	Posé	Remise en suspension de sédiment lors du relevage	Provisoire	faible	Modélisation de panaches turbides <u>si nécessaire</u> (selon la sensibilité du milieu)	Mesures de turbidités
	Ensouillé	Remise en suspension de sédiment		modérée	Modélisation de panaches turbides	Mesures de turbidités
	Forage dirigé	Pas d'impact potentiel si le câble est laissé en place				

Tableau 20 Synthèse des impacts potentiels du démantèlement

5.3. Identification des impacts cumulés

Les impacts potentiels présentés ci-avant (effet de sillage, changement de substrat) resteraient locaux et sans enjeux majeurs (sauf cas particuliers) dans le cas d'une hydrolienne seule. Dans le cas d'un parc hydrolien comportant plusieurs dizaines de machines, les effets de parc influencent une zone plus large :

- Effet de sillage qui conditionne l'implantation des machines, et donc l'étendue du parc (occupation de l'espace)
- Impacts hydrosédimentaires sur la totalité du secteur (à étudier hors de la concession également),
- pouvant influencer les peuplements benthiques (changement de substrat) ou les processus hydro-sédimentaires.

5.4. Description du programme de suivi environnemental

Le programme de suivi qui peut être adopté pour un projet hydrolien est repris ci-dessous de façon succincte. Nous reprenons ici la terminologie définie dans le chapitre précédent sur les fonds marins.

Le levé d'état initial a été décrit précédemment. Les levés de contrôle et les levés de suivi seront ici confondus, puisqu'il est préconisé d'installer une plateforme d'océanographie opérationnelle qui fonctionnera tout au long de la vie du projet :

- Appareils de mesures (courant, houle, turbidité) sur différents points de contrôle sur le parc et en dehors du parc hydrolien ;
- Modélisation numérique en continu par assimilation de données en temps réel (houlographe, ADCP, CTD, radars HF, etc.).

Les suivis réalisés en océanographie opérationnelle pour les besoins de l'exploitation (estimation en temps réel des contraintes météocéaniques et de la ressource) pourront être utilisés également afin d'estimer les impacts environnementaux sur le courant et les états de mer. Les suivis environnementaux de ce point de vue seront donc réalisés quasiment en continu sur la durée de l'exploitation (aucune fréquence de levé n'est donc proposée ici).

Les mesures de turbidité ou de MES sont en outre un paramètre intégrateur des conditions océanographiques (courant, état de mer, turbulence) et peuvent servir au calage des modèles hydro-sédimentaires.

Le suivi des impacts hydrosédimentaires sera quant à lui réalisé sur la base des levés géophysiques décrits au chapitre précédent, mais peut se faire également en continu sur certains paramètres (turbidité, altimétrie du fond...) grâce à des appareils de mesures transmettant les données. Ce type de séries temporelles peut faciliter l'interprétation des différences entre les levés géophysiques successifs.

5.5. Mesures d'atténuation des impacts

La réduction des impacts sur le sillage des turbines et sur leur impact hydrosédimentaire relève de l'optimisation de leur géométrie, à étudier au cas par cas par les industriels. Cela dépend du site, des machines, et des prescriptions des autorités. D'autre part, le manque de retours d'expérience ne permet pas de dresser une liste exhaustive et comparative des solutions possibles. Enfin, ce point peut être confidentiel dès lors qu'il touche au calcul de productible.

De même, aucune mesure compensatoire « générique » n'est proposée ici pour compenser l'impact du parc sur les états de mer et la courantologie (à voir au cas par cas selon les enjeux et les impacts identifiés).

Les mesures de suppression, réduction et compensation sur ce type de projet, outre l'impact sur le productible, concerneront principalement les impacts hydrosédimentaires. Les deux grands types de mesures sont cités dans le guide méthodologique de la DGEC (2012) : choix d'une autre zone d'implantation, adaptation des techniques de travaux.

Citons également en complément l'adaptation du design et la mise en place de dispositifs anti-affouillement autour des pieux et des fondations gravitaires, qui ont eux-mêmes un impact sur le substrat et donc sur les habitats benthiques (voir chapitre 7).

5.6. Lacunes et programmes de recherche

L'effet de parc reste difficile à quantifier, compte tenu du degré de maturité des projets actuellement (prototypes et fermes pilotes). La spatialisation de l'information fait partie des attentes des industriels, c'est-à-dire la recherche de solutions pour quantifier précisément les conditions météocéaniques sur la totalité du parc, et sur toute la colonne d'eau. Cela nécessite d'optimiser l'utilisation conjointe des modèles numériques, des mesures *in situ* (ADCP) et de la télédétection pour spatialiser au mieux l'information.

Les effets de la turbulence et des interactions houle-courant sont également délicats à étudier. Notamment des travaux récents ont été menés afin de mesurer la turbulence à l'aide d'ADCP (Thomson *et al.*, 2010). Des groupes de travail sont en cours chez les industriels et les scientifiques pour continuer à fiabiliser la ressource hydrolienne (effet de la turbulence sur le productible) et estimer les impacts hydrodynamiques (sillage d'une machine).

L'étude de la dynamique sédimentaire en milieu énergétique fait également partie des préoccupations des industriels : quantification du transit de sédiments ou de galets sur un site rocheux ; prédiction du risque d'abrasion des machines par les matières en suspension ; prédiction et suivi

des affouillements ou des zones de dépôt ; quantification des MES remobilisées en phase travaux ; effet du parc sur les processus hydrosédimentaires à plus large échelle que le parc lui-même, etc.

D'une manière générale, **l'optimisation des mesures pour des sites à forte courantologie** est

une donnée de base pour les projets hydroliens. Certains systèmes sont déployés sur des filières qui doivent donc être dimensionnées au courant et à la houle. D'autres systèmes sont posés au fond mais doivent permettre les mesures dans toute la colonne d'eau (exemple type : l'ADCP).

Références clés

Ardhuin F., Roland A., Dumas F., Bennis A-C., Sentchev A., Forget P., Wolf J., Girard F., Osuna P., Benoît M., 2012. Numerical Wave Modelling in Conditions with Strong Currents: Dissipation, Refraction, and Relative Wind. *Journal of Physical Oceanography*, 42 : 2101-2120.

Michaud H., 2011. Impact des vagues sur les courants marins, modélisation multi-échelle de la plage au plateau continental, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Géosciences UMR 5243 CNRS/UM2, Laboratoire d'Aérodynamique UMR 5560 CNRS/Univ.Toulouse, SIBAGHE, 333 pp.

Thomson, J., Polagye, B., Richmond, M., Durgesh, V., 2010. Quantifying turbulence for tidal power applications. OCEANS 2010, 20-23 Sept. 2010, 1-8.

Whitehouse, R.J.S (1998). Scour at marine structures: A manual for practical applications. Thomas Telford, London, 198 p.

6. Bruit sous-marin

Il n'existe pas d'endroit sans bruit dans l'océan. Le bruit peut cependant être de nature bien différente selon les endroits, les saisons, les conditions climatiques, le jour, la nuit, etc. A ce titre, le bruit sous-marin constitue bien une composante physique à évaluer et dont les modifications peuvent potentiellement avoir des conséquences sur l'écosystème.

Généralités sur le bruit sous-marin

Le son dans l'eau est une combinaison d'ondes progressives, dans lequel les particules de l'eau sont alternativement comprimées et décomprimées. Le son peut être mesuré en tant que variation de pression au sein du milieu autour d'un point d'équilibre que constitue la pression hydrostatique¹⁷. Cette variation de pression, décrite comme la pression acoustique, agit dans tous les sens et avec des amplitudes d'ordinaire très petites par rapport à la pression hydrostatique. L'unité de pression du système international est le Pascal (Pa, newton par mètre carré). Une mesure complémentaire de son consiste en la composante de mouvement de particules, indiquant le déplacement (m), la vitesse (m/s) et l'accélération (m/s^2) des particules d'eau dans le milieu.

Les travaux de recherche, au cours des 30 dernières années, ont clairement démontré que les mammifères marins sont sensibles à la pression acoustique, mais aussi que de nombreux poissons et invertébrés répondent au mouvement des particules générés par l'onde acoustique, pouvant causer différents degrés de perturbation de la vie sous-marine (Sand et Karlsen, 2000 ; Ona *et al.*, 2007 ; Sand *et al.*, 2008 ; Anon, 2008 ; Sigray et Andersson, 2011).

Certains organismes marins sont sensibles à la pression ou au mouvement des particules ou aux deux. Seule une description selon une échelle logarithmique, l'échelle des décibels¹⁸ (abréviation dB) permet de décrire correctement d'une part, les mécanismes physiologiques liés à la réception des sons, et d'autre part, la très grande dynamique des amplitudes sonores sous-marines. Cette échelle est, par définition, une unité relative à un niveau de pression acoustique de référence. En acoustique sous-marine, ce niveau de référence est de $1\mu Pa$ (un millionième de Pascal). Aussi, un niveau en décibel n'a de sens que s'il est fait mention de sa référence.

Les niveaux de bruit sous-marins ne sont pas à comparer avec les niveaux de bruit aériens. En effet, le niveau de référence est de $1\mu Pa$ en acoustique sous-marine, contre $20\mu Pa$ dans l'air. De plus, avec une densité environ 1000 fois plus élevée que l'air, le milieu océanique est considéré comme un milieu de propagation incompressible contrairement à l'air. Ainsi, toute comparaison est infondée. A titre d'illustration, une échelle qualitative de niveaux de bruit sous-marins émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz est proposée (Fig. 32).

Les ondes acoustiques dans l'eau se propagent très rapidement (typiquement 1500m/s) et sur des distances qui peuvent être très importantes. La distribution du niveau de bruit dans la colonne d'eau et dans les sédiments est principalement fonction des sources en présence (naturelles, d'origine animale ou d'origine humaine), des conditions de bathymétrie, des conditions de température et de salinité, de la nature du fond, de l'état de mer. Les disparités de propagation sont donc souvent très importantes à l'échelle locale (à une position mais pour deux immersions différentes par exemple) ou à l'échelle d'un bassin océanique.

¹⁷ La pression hydrostatique est la pression exercée par un fluide à l'équilibre en raison de la force de gravité. C'est la pression qu'exerce l'eau sur la surface d'un corps immergé ; elle augmente d'environ une atmosphère par 10 mètres de profondeur.

¹⁸ Le décibel est une échelle de mesure logarithmique en acoustique. La définition du décibel est $P_{dB} = 20 \log_{10} (P/P_{ref})$, avec P_{ref} la pression acoustique de référence exprimée en μPa .

La pression peut être mesurée à l'aide d'un dispositif sensible à la pression tel qu'un hydrophone (un microphone sous-marin) qui restitue les fluctuations rapides de pression en fonction du temps. L'oscillation du signal acoustique définit sa fréquence, exprimée en Hertz (Hz). Lorsque la fréquence est basse (oscillations lentes) les sons sont graves, lorsque la fréquence est élevée, le son est aigu. Des techniques de traitement du signal existent pour analyser les signaux sonores en fonction de leur fréquence, pouvant donner lieu à des découpages en bandes de fréquences normalisées appelées octaves¹⁹ ou tiers d'octave. Pour quantifier l'amplitude de ces oscillations acoustiques, nous utilisons la valeur efficace de l'onde définie comme la racine carrée de la moyenne quadratique du signal sur un intervalle de temps. D'autres quantités peuvent être utilisées pour rendre compte de l'amplitude des ondes sonores (Sound Pressure Level, SPL) comme les niveaux maximum ou niveaux crête-à-crête, (Peak-to-Peak Level en anglais). Les amplitudes efficaces sont plutôt dédiées aux sons longs alors que les niveaux maximaux et peak-to-peak sont dédiés aux signaux courts (transitoires). Pour quantifier l'impact des ondes sonores sur la faune marine, ces quantités relatives à l'amplitude de l'onde peuvent être complétées par une évaluation de l'énergie acoustique reçue durant une période donnée, on évalue alors le niveau d'exposition sonore cumulée (Sound Exposure Level, SEL).

Le champ sonore perçu est fonction de la sensibilité de chaque espèce. Cette sensibilité dépend de la fréquence du bruit ou de leur fonction d'audition. A titre de comparaison, la sensibilité acoustique de l'espèce humaine couvre la gamme de fréquences de quelques dizaines de Hz (fréquence des sons perceptible les plus graves) à environ 20 kHz (fréquence des sons perceptibles les plus aigus). Cette gamme de sensibilité se réduit d'ailleurs avec l'âge.

¹⁹ Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'un vaut le double de la fréquence de l'autre. Un tiers d'octave est une fraction d'octave. La norme ANSI S1.11 (2004) définit les fréquences centrales et les caractéristiques des filtres servant à les distinguer.

La quantité physique définie pour traduire la sensibilité acoustique de chaque espèce est le Niveau d'Exposition Sonore (Sound Exposure Level en anglais). Elle est l'intégrale de l'énergie acoustique reçue sur la bande de fréquence de sensibilité biologique (bande de fréquence effectivement perçue par une espèce) pendant une durée donnée (Tab. 21). Si cette durée d'exposition sonore dépasse une seconde, on parle d'Exposition Sonore Cumulée qui a un sens en termes d'effet.

Les critères proposés récemment pour les animaux sous-marins ont été formulés par Hastings et Popper (2005) et Southall *et al.*, (2007) et sont d'une double nature, fournissant à la fois les limites de la pression acoustique de crête-à-crête et des niveaux d'exposition sonore spécifiques pour une espèce.

Enfin, la résultante du bruit ambiant que l'on peut mesurer par un hydrophone, en particulier s'il présente une composante anthropique²⁰, est souvent de nature stochastique²¹. Cela est lié au fait que l'occurrence des sources de bruit anthropique et, dans une bien moindre mesure, les conditions environnementales fines, sont difficilement prédictibles. En effet, il est particulièrement difficile de prévoir quand le prochain navire de pêche passera à un endroit donné. La notion de percentile permet de traduire et de quantifier cet aspect aléatoire. Un percentile²² correspond à la proportion du temps et de l'espace pour lequel le bruit dépasse ou est inférieur à un niveau donné.

²⁰ Relatif à l'activité humaine.

²¹ Un phénomène stochastique est un phénomène qui ne se prête qu'à une analyse statistique, par opposition à un phénomène déterministe.

²² Cette notion est très répandue, même dans la vie de tous les jours : les carnets de santé de chaque individu présentent des courbes de répartition du poids de la population infantile en fonction de l'âge en percentiles : on peut par exemple y voir, pour chaque âge, « le poids moyen du dernier percentile », c'est-à-dire le poids moyen des 10 % des enfants les plus lourds, ou encore, le poids moyen des 5 % des enfants les plus légers. Le 50^{ième} percentile représente quant à lui le poids médian, c'est-à-dire le poids de 50 % des enfants d'un même âge.

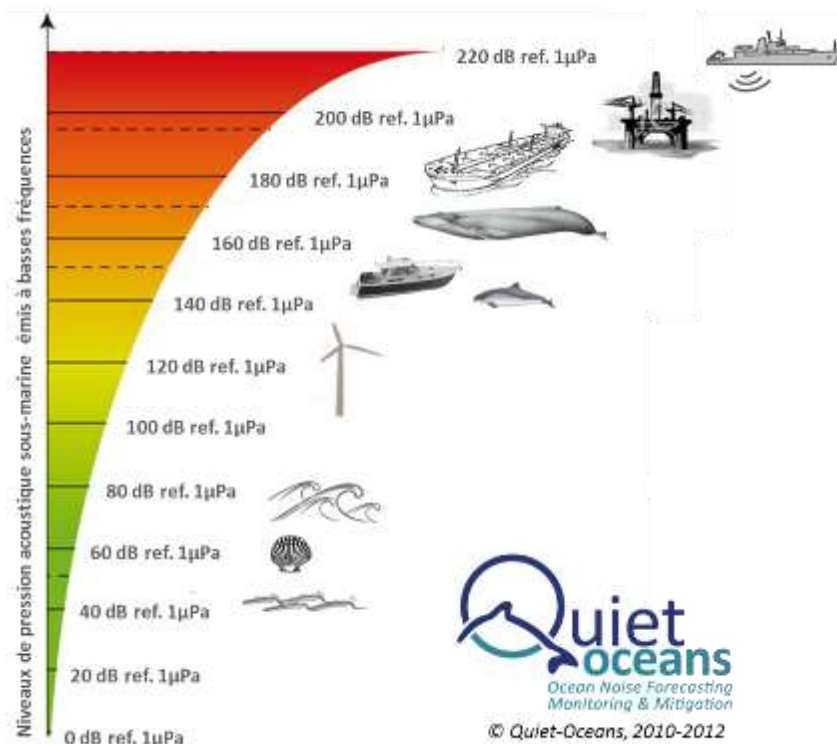


Figure 32 Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins moyens émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz. Source: Quiet-Oceans.

Dénomination	Définition	Unité
Pression acoustique émise	La pression acoustique émise est l'amplitude du signal qui serait généré à un mètre d'une source de bruit si celle-ci était ponctuelle. Cette pression peut être exprimée en valeur instantanée, valeur moyenne, valeur efficace ²³ , ou en valeur maximale.	dB réf. 1µPa @1m
Pression acoustique reçue	La pression acoustique reçue est l'amplitude du signal tel qu'il peut être mesuré par un hydrophone à une distance donnée de toute source sonore. Cette pression peut être exprimée en valeur instantanée, valeur efficace, ou en valeur maximale.	dB réf. 1µPa
Niveau d'exposition sonore	Le niveau d'exposition sonore est l'énergie acoustique reçue sur une bande de fréquence de sensibilité biologique (bande de fréquence effectivement perçue par une espèce) pendant une durée donnée.	dB réf. 1µPa ² s

Tableau 21 Définitions et unités de mesure

²³ La valeur efficace, ou RMS « pour Root Mean Square » en anglais correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période de temps fixée.

6.1. Description de l'état initial

6.1.1. Définition de la zone d'étude : notion d'empreinte sonore

La zone d'étude sonore doit englober la zone géographique pour laquelle le projet de développement hydrolien est susceptible de modifier les conditions sonores initiales. Cette notion est appelée « empreinte sonore ». L'empreinte sonore du projet est la zone pour laquelle le bruit statistique du projet est supérieur au bruit statistique existant. Le bruit se propageant dans le volume d'eau délimité entre la surface et le fond de l'océan, cette empreinte sonore est tridimensionnelle par nature. Aussi, la zone d'étude se caractérise à partir :

- ✓ des caractéristiques du bruit initial ;
- ✓ de la nature des bruits introduits par le projet hydrolien ;
- ✓ des caractéristiques de propagation des bruits introduits par le projet.

La géométrie de l'empreinte sonore peut donc être très variable selon le cycle de vie du projet, les choix techniques de construction, le design des machines, les conditions climatiques et océanographiques, les conditions de bathymétrie, la nature des fonds, et des niveaux de bruit déjà existants. Tous ces paramètres sont donc à considérer dans toute prédiction de l'empreinte sonore du projet et par suite, pour la définition de la zone d'étude.

6.1.2. Description et variabilité du chorus sonore sous-marin

Le bruit ambiant océanique est composé d'un grand nombre de bruits de nature et de caractéristiques différentes (Fig. 33). On peut classer les origines des bruits selon trois catégories (Tab. 22) :

- ✓ Bruits de nature physique: il s'agit des bruits liés au déferlement des vagues en surface, au déferlement des vagues sur la bande côtière, au transport sédimentaire, etc.
- ✓ Bruits d'origine biologique : il s'agit des bruits émis par les organismes vivants tels que, par exemple, les crevettes, les coquilles Saint-Jacques, les mammifères marins, etc.
- ✓ Bruits d'origine anthropique : il s'agit des bruits d'origine humaine, tels que le trafic maritime, la plaisance, les bruits de construction, les engins de pêche, les sonars sismiques, les sondeurs, etc.

Chacun des bruits présente des caractéristiques temporelles, fréquentielles et énergétiques différentes. Il peut donc exister des effets de masquage ou d'interférence entre les différents bruits qui composent le bruit ambiant mesuré. Dans le cas des sites hydroliens, il a été observé que le transport sédimentaire (Willis *et al.*, 2013) contribue de façon significative aux bruits environnementaux et peut générer un bruit spécifique par interaction physique avec les machines.

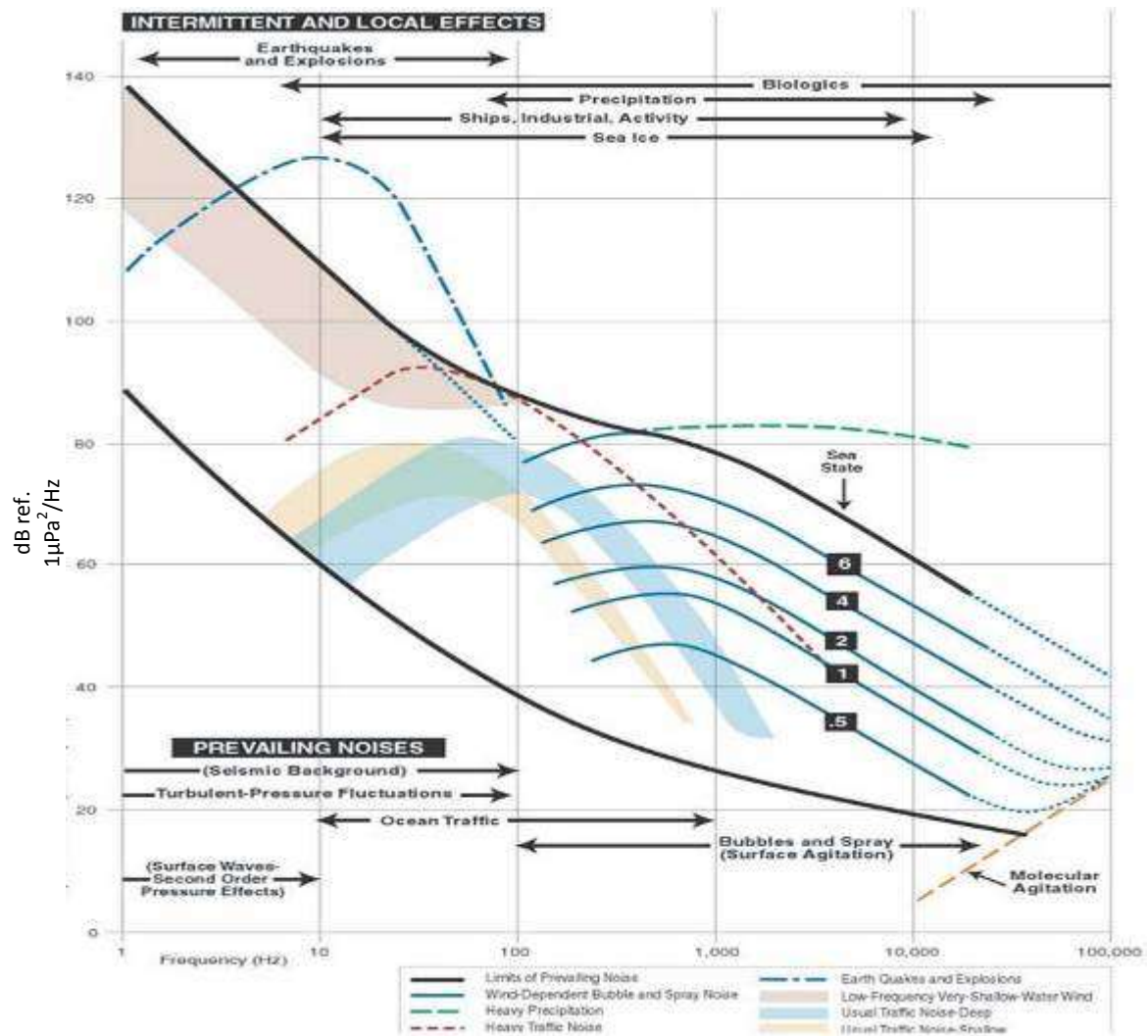


Figure 33 Evaluation du spectre acoustique en fonction de la fréquence et de la nature des bruits. Unité utilisée : dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}^{24}$. D'après Wenz, (1962)

²⁴ L'unité en dB ref. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ indique que le bruit est estimé sur une bande de 1 Hz.

Nature		Exemple	Localisation des sources de bruits	Gammes de fréquences les plus énergétiques	Type de bruit	Portée a priori (très dépendante des conditions environnementales)
Physique	Etat de mer (bruit de surface)	Agitation de la surface des océans	Zone avant-côte Zone large	100Hz - 10kHz	Continu	Echelle d'un bassin
	Transports des sédiments	Déplacement des sédiments	Zone de surf Zone à forts courants	Quelques dizaines de kHz	Transitoire	Quelques mètres
	Déferlement des vagues	Surf Mer agitée et au-delà	Zone de surf Zone côtière Zone large	10Hz – 1kHz	Transitoire	Quelques centaines de mètres
Biologique	Cétacés	Dauphin commun, Grand dauphin, Marsouin, etc.	Zone côtière Zone large	Quelques Hz à quelques centaines de kHz	Transitoire ou impulsionnel	Quelques centaines de kilomètres (mysticètes) à quelque centaines de mètres (ondotocètes)
	Macro-benthos	Coquillages bivalves et les plus grands des crustacés dont les crabes, homards, crevettes, etc.	Zone côtière	Quelques Hz à quelques dizaines de kHz	Impulsionnel	Quelques mètres
	Pinnipèdes	Phoque gris, Phoque veau-marin, etc.	Zone avant-côte Zone large	100Hz - 10kHz	Impulsionnel	Quelques centaines de mètres à quelques kilomètres
Anthropique	Trafic commercial	Cargo, ferry, etc.	Zone avant-côte Zone large	1Hz – 10kHz	Continu	Plusieurs dizaines de kilomètres
	Activités de pêche	Navire, chalut, etc.	Zone avant-côte Zone large	1Hz – 10kHz	Continu et impulsionnel	Plusieurs dizaines de kilomètres
	Activités de plaisance et de plongée	Zodiac, scooter des mers, etc.	Zone avant-côte Zone large	1Hz – 10kHz	Continu	Plusieurs dizaines de kilomètres
	Travaux maritimes	Battage de pieux, forage, dragage, etc.	Zone avant-côte Zone large	1Hz – 10kHz	Continu ou impulsionnel	Plusieurs dizaines de kilomètres

Tableau 22 Principales contributions au bruit ambiant dans un contexte de site hydrolien

6.1.3. Caractérisation de la variabilité sonore

La caractérisation du chorus sonore et de sa variabilité peut être obtenue par :

- ✓ la mesure passive pour les bruits d'origine physique et biologique ;
- ✓ la mesure et la modélisation numérique pour les bruits d'origine anthropique.

6.1.3.1. Caractérisation par la mesure passive avec monocapteurs

Une analyse statistique des événements acoustiques enregistrés par système d'acoustique passive (Fig. 34) consiste à extraire du signal sonore mesuré les sources individualisables puis à les caractériser. Les propriétés marquées des différents événements dans l'espace de représentation temps-fréquence permet, à l'aide d'outils spécialisés, d'identifier les événements sonores constitutifs du chorus. En effet, transcrire les données dans cet espace, en construisant par exemple le spectrogramme de données, permet :

- ✓ de filtrer le bruit et fournir un gain de traitement favorisant la détection des événements sonores naturels, biologiques ou anthropiques ;
- ✓ de présenter les données dans un espace mettant en valeur les propriétés intrinsèques des signaux favorisant leur classification.

Ce type de traitement permet de détecter et caractériser toutes les typologies de bruit : les bruits transitoires (durée limitée), les bruits à large bande, des bruits continus, des raies spectrales, etc. (Gervaise *et al.*, 2010 ; Gervaise, 2011 ; Gervaise *et al.*, 2012 ; Di Lorio *et al.*, 2010).

Les résultats attendus permettent de caractériser le chorus sonore à différentes échelles temporelles, et sont constitués :

- ✓ d'une quantification des événements classifiés par nature de bruit ;
- ✓ des séries temporelles des natures de bruit, leurs distributions statistiques, et leur contribution respective au chorus ; pour le bruit biologique, ces séries constituent un indicateur de l'usage écologique dans la zone de portée de l'hydrophone ;
- ✓ les valeurs des percentiles des différentes natures de bruit comme fonction de l'heure de la journée, moyenne mensuelle, saisonnière ou annuelle.

Les espèces marines ne sont sensibles qu'à une bande de fréquence limitée (bande de sensibilité des espèces). Or, les niveaux du bruit ambiant peuvent varier grandement en fonction de la fréquence. Aussi, il est important de caractériser la variabilité du chorus sonore en sous-bandes de fréquences, de façon standard en octaves ou tiers d'octaves. Cette caractérisation par bandes de fréquences permet d'appréhender les effets potentiels en fonctions des gammes de sensibilité des espèces potentiellement en présence.

Les résultats des mesures ne sont valides que pour une zone tridimensionnelle autour de l'hydrophone considéré. La zone de validité de la mesure est dépendante de la portée (ou distance de détection) de l'instrument et est estimable par la mise en place de modèles de propagation acoustique.

L'utilisation d'un système de mesure multicapteurs (réseau d'hydrophones synchronisés et/ou antenne) permettrait de caractériser finement la variabilité spatiale du chorus sonore. Elle ajoute cependant une contrainte opérationnelle forte (coût du système, déploiement difficile, etc.) et semble peu applicable dans le contexte d'une étude d'impact. Dans toute la suite de ce document, on suppose la mesure sonore réalisée sur un unique hydrophone (ou sur quelques hydrophones non synchronisés).



Figure 34 Exemples d'enregistreurs sous-marins autonomes d'acoustique passive Aural, DSG Ocean, SM2M et RTSYS.

6.1.3.2. Caractérisation par la mesure et la modélisation

La mesure acoustique est, par nature, locale et ponctuelle. Aussi, la mesure du bruit ambiant n'est valide que pour la position (latitude, longitude, profondeur) de l'hydrophone et à l'instant de la mesure.

Aussi, des méthodes d'extrapolation permettant de prendre en compte la physique des phénomènes acoustiques ouvrent la voie vers une caractérisation spatiale du bruit ambiant anthropique et des empreintes sonores des projets, en mode prédictif ou en mode monitoring. Les méthodes basées sur les modèles de propagation permettent, elles aussi, de caractériser le bruit de façon statistique, de façon tout à fait similaire et complémentaire aux traitements statistiques des mesures *in situ*. Cette cohérence d'approche, de traitement et de présentation permet de valoriser la mesure locale pour caler (ou calibrer) les modèles acoustiques.

Aussi, les cartes de bruit ambiant, qui se doivent de traduire la variabilité statistique du bruit au même titre que la mesure *in situ*, se présentent sous la forme de percentiles qui traduisent, à

chaque endroit de la zone d'étude, le niveau de bruit estimé le long de la colonne d'eau pour la proportion de temps définie par la valeur du percentile (Fig. 35). Seule l'assimilation des signaux acoustiques traités en tiers d'octaves dans des modèles de propagation acoustique issus de l'expertise militaire permet de présenter une vision globale du bruit statistique à l'échelle du projet.

6.1.4. Implémentation des mesures *in situ*

6.1.4.1. Problématique de la mesure acoustique dans un site hydrolien

La principale caractéristique des sites hydroliens est qu'ils sont sujets à de forts courants. Du point de vue de la mesure acoustique *in situ*, cela pose les problèmes suivants :

- ✓ Difficulté logistique des opérations en mer et de la sécurité du matériel déployé ;
- ✓ Difficulté du design des systèmes de maintien des capteurs pour les rendre résistants au courant et silencieux ;

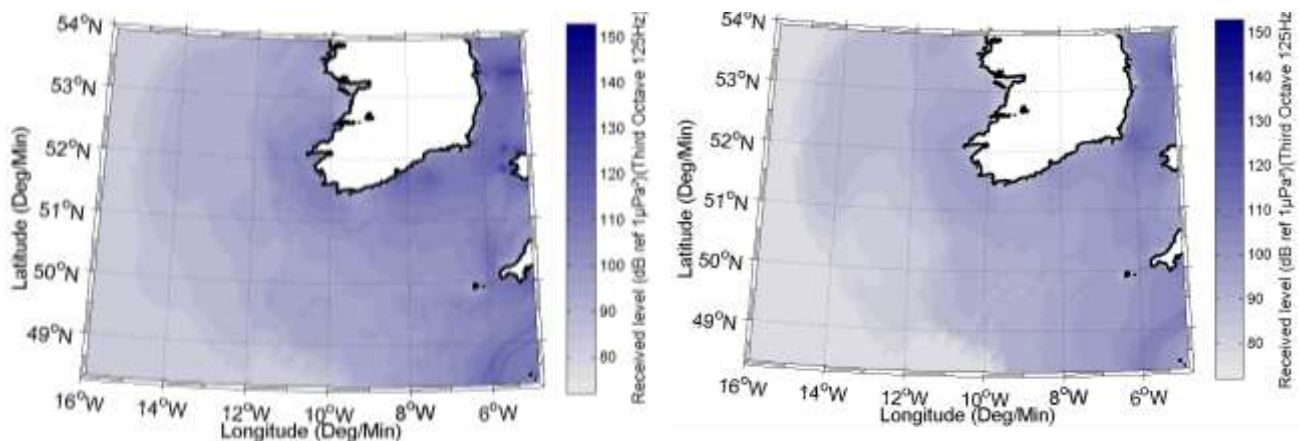


Figure 35 Exemple de carte statistique de bruit généré par le trafic maritime dans le tiers d'octave 125 Hz: (gauche) carte des niveaux de bruits pour le 10^{ème} percentile en été, p. ex. 10 % de chance d'observer un bruit supérieur aux niveaux donnés par le code couleur ; (droite) carte des niveaux de bruits médian en hiver, p. ex. 50 % de chance d'observer un bruit supérieur aux niveaux donnés par le code couleur. Source Quiet-Oceans, STRIVE Noise project funded by the Environmental Protection Agency, Ireland (Folegot et al. 2013)

✓ Pollution de la mesure passive : Lorsque la vitesse du courant est importante, l'hydrophone modifie sensiblement l'écoulement localement autour de l'hydrophone. L'écoulement est susceptible de devenir turbulent et de générer un bruit de faible intensité, mais suffisamment proche de l'hydrophone pour polluer la mesure (Martin, 2012 ; Willis *et al.*, 2013).

✓ Réduction de la performance de détection des bruits : les bruits naturels, biologiques et anthropiques sont détectables lorsqu'ils dominent suffisamment le bruit de fond (p. ex. la résultante des autres bruits à l'emplacement de l'hydrophone). La pollution du signal par le bruit lié à la présence du capteur et de son mouillage dans le courant est susceptible de masquer les bruits existants, naturels, biologiques ou anthropiques, objet de la mesure. La réduction de cette performance peut cependant être acceptable suivant la typologie du site et de sa fréquentation biologique.

Les solutions pour éviter ou réduire ces problèmes pratiques existent ou font l'objet de recherche. Par exemple, les applications de lutte sous-marine sont soumises aux mêmes difficultés, en particulier lors de l'utilisation de capteurs

tractés d'acoustique passive. Les techniques développées consistent à « gagner » les hydrophones dans des matériaux (relativement) transparents acoustiquement parlant. Plus le gainage est épais, plus l'isolation du bruit d'écoulement est efficace, au prix cependant d'une perte de performance de détection. Des solutions de gainage des câbles peuvent aussi permettre de réduire significativement les vibrations liées au courant. D'autres solutions sont possibles, par la mise en œuvre en particulier de mesures dérivantes qui ont pour objectif de minimiser la vitesse relative entre l'hydrophone et le milieu. Bien qu'essentiel, il n'existe pas de solution a priori. Les solutions se basent sur une réelle expertise qui ne peut être acquise qu'au travers l'expérimentation *in situ*.

6.1.4.2. Protocole spatio-temporel

L'objectif du protocole « bruit ambiant » est d'établir un état initial sonore du site d'implantation du parc hydrolien afin d'évaluer durant les phases successives du projet, l'empreinte acoustique du parc sur l'environnement sous-marin d'une part et de définir les différents impacts potentiels sur la faune sous-marine d'autre part (Fig. 36).

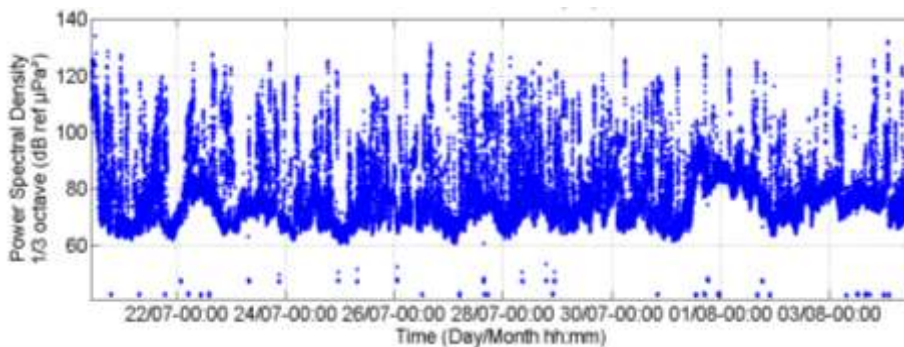


Figure 36: Mesure de bruit après traitement dans le tiers d'octave 125Hz, sur une période de 15 jours. On observe la superposition typique d'un bruit de fond naturel dépendant des conditions météorologiques avec des événements anthropiques forts. Source : Quiet-Oceans, Folegot et al. 2013.

Lors de la définition d'un protocole de levé terrain acoustique, il est tout d'abord fondamental de formaliser la finalité recherchée par chaque hydrophone. En effet, une finalité de caractérisation du bruit ambiant anthropique et naturel n'est pas soumise aux mêmes exigences qu'une mesure en vue de caractériser la fréquentation biologique du site. Par exemple, autant pour une mesure de bruit ambiant, le système ne doit pas introduire un bruit supplémentaire, autant pour un objectif de détection de vocalises, l'instrument peut introduire un bruit propre (bruit de turbulence par exemple) qui ne remettra pas en cause la mesure. En revanche, il est envisageable de tolérer une mesure en vue de la caractérisation du bruit ambiant par intermittence, à condition qu'elle couvre une diversité statistiquement représentative des conditions environnementales et de la fréquentation anthropique du site.

La définition des protocoles est donc largement dépendante de l'objectif visé, des conditions environnementales du site hydrolien, des activités humaines existantes, mais aussi des conditions logistiques et de sécurité du matériel et des équipements. Sa définition précise nécessite donc une analyse dédiée, qui repose sur :

- ✓ L'analyse des types de bruit existants ;
- ✓ L'analyse des types de bruits liés au projet ;
- ✓ Les conditions environnementales de

propagation du bruit ;

Un élément facilitateur de la définition du protocole de mesure *in situ* consiste à se donner une description cartographique a priori du bruit ambiant sur la zone. Une première estimation par modélisation de la structure du bruit et de sa variabilité offre des informations préliminaires qui permettent de sécuriser la campagne de mesure, et en particulier :

- ✓ De régler les gains des instruments acoustiques afin de caler les gammes de réception en amplitude de façon adaptée au bruit existant et à sa dynamique, et de garantir ainsi son exploitabilité ;
- ✓ De quantifier la dimension de la zone d'étude et de garantir un levé représentatif de toute la zone et de toute sa diversité ;
- ✓ De quantifier le nombre d'hydrophones nécessaire au levé de la zone d'étude en fonction de la variabilité spatiale du bruit.

6.1.4.3. Données acoustiques à collecter

Les positions des mesures de contrôle en acoustique passive seront déterminées par la cartographie prédictive des zones de dépassement des seuils établis pour les espèces et par les zones d'habitat d'espèces sédentaires.

Les difficultés de déploiement dans les sites hydroliens et l'objectif d'une caractérisation statistique représentative, nécessitent de faire appel à un mix de configurations, fixes/dérivantes, court terme/long terme, dont chaque élément doit répondre à un objectif identifié dans un contexte de mesure donné. Ce mix concerne, pour chaque instrument :

- ✓ Le mode de déploiement ;
- ✓ La durée de déploiement ;
- ✓ La durée effective de mesure exploitable ;
- ✓ Les gammes de mesure des instruments ;

La portée des hydrophones passifs, qu'il est essentiel d'estimer afin d'évaluer « l'effort »

d'observation, est très largement dépendante des caractéristiques électroniques d'acquisition, des conditions océanographiques, de la météorologie, des conditions de bathymétrie, des conditions locales de nature du fond, du bruit ambiant, et des espèces biologiques que l'on cherche à identifier. Une solution consiste à modéliser la portée des hydrophones en fonction de ces paramètres.

Les hydrophones doivent impérativement être calibrés avant et/ou après leur mise en œuvre.

6.1.4.4. Données non-acoustiques à collecter

Le caractère aléatoire du bruit combiné à la complexité de la propagation acoustique sous-marine nécessite de suivre un certain nombre de paramètres maritimes et marins en concomitance de la mesure. Ce suivi non-acoustique est aussi essentiel que la mesure acoustique elle-même car elle est le garant de sa bonne interprétation. Les mesures non-acoustiques doivent permettre de :

- ✓ Comprendre les événements acoustiques mesurés, qu'ils soient naturels ou anthropiques ;
- ✓ Caractériser les paramètres conditionnant la propagation acoustique ;

Parmi les mesures non-acoustiques essentielles à réaliser, on trouvera :

- ✓ La température et la salinité (ou la vitesse du son) ;
- ✓ Le vent et/ou la rugosité de surface ;
- ✓ La marée ;
- ✓ La pluviométrie ;
- ✓ La profondeur de chaque hydrophone ;
- ✓ La position de chaque hydrophone ;
- ✓ La position des différents types de navires situés à portée acoustique de chaque hydrophone.

6.1.5. Spatialisation de la mesure par modélisation

La spatialisation de la mesure par modélisation consiste à utiliser des prévisions issues de sorties de modèles de propagation acoustique pour extraire l'information de bruit ambiant à l'échelle de l'aire d'étude.

6.1.5.1. Modélisation acoustique

Il existe plusieurs approches possibles pour la modélisation du bruit ambiant à l'échelle d'un bassin océanique :

✓ La première approche consiste à réaliser N fois des modélisations en 2D ($N \times 2D$) : chaque modélisation 2D est réalisée dans un plan vertical contenant la source de bruit anthropique ; cette modélisation est reproduite autant de fois que nécessaire selon un nombre suffisant d'azimuts. L'inconvénient de cette approche réside dans le fait que chaque plan de propagation est indépendant des autres. En d'autres termes, l'énergie sonore se propage nécessairement dans ce même plan, ce qui peut être inexact dans des environnements à fortes ruptures bathymétriques.

✓ La seconde approche consiste à réaliser une modélisation 3D. Au prix d'un temps de calcul très important, cette approche permet de décrire les échanges d'énergie sonore dans toutes les directions et prend donc en compte les effets tridimensionnels de la bathymétrie et dans une moindre mesure des gradients de célérité dans la colonne d'eau.

6.1.5.2. Critères de sélection des codes de modélisation acoustique

La sélection du modèle de propagation (résolution de l'équation de Helmholtz) doit prendre en compte un certain nombre de critères de qualité et de performance :

✓ La maturité du code de propagation, c'est-à-dire l'utilisation d'un code largement validé dans un grand nombre de situations environnementales différentes, et principalement représentative de l'environnement du projet ;

✓ Le temps de calcul doit être compatible avec les exigences opérationnelles du projet et de ses délais ;

✓ La pertinence et la validité des hypothèses simplificatrices de l'équation de Helmholtz (hypothèse haute fréquence, hypothèse parabolique, etc.) vis-à-vis des conditions de propagation du site étudié.

6.1.5.3. Prédiction du bruit ambiant

La combinaison d'un ensemble de situations environnementales et de situations anthropiques représentatives du site d'étude au sein d'une modélisation de la propagation acoustique permet de disposer d'un ensemble représentatif de champs sonores tridimensionnels. Un traitement statistique de cet ensemble de champs sonores représentatifs de situations instantanées permet d'extraire les statistiques saisonnières du bruit ambiant et de leur sensibilité sous la forme de percentiles, et de décrire l'état sonore de la zone d'étude en termes de percentiles de niveau acoustique et de distribution spatiale.

6.1.5.4. Calibration de la prédiction par la mesure in-situ

La convergence entre la statistique mesurée et de la statistique prédite par la modélisation à l'endroit de la mesure permet de caler les cartographies obtenues. Plusieurs méthodes sont possibles, Quiet-Oceans proposant une méthode qui donne une caractérisation statistique en prenant en compte les incertitudes environnementales du site (Folegot et Clorennec, 2013).

6.1.6. Limites méthodologiques et lacunes de connaissances

6.1.6.1. Conditions de la modélisation

Les sources acoustiques sont idéalisées en sources ponctuelles ou série de sources ponctuelles en fonction du type d'activité considéré. Cela est une simplification vis-à-vis à des sources sonores qui sont dans la plupart des cas des sources étendues. Cela peut introduire un biais très localement à la position de la source de bruit.

La modélisation par équations paraboliques (Jensen *et al.*, 2000) repose sur une hypothèse « lentement variable » du milieu de propagation, ce qui est probablement souvent le cas dans les sites hydroliens. Cette méthode de modélisation est d'autant plus coûteuse en temps de calcul que la fréquence est élevée et l'environnement profond. Aussi, au-delà d'une certaine fréquence, le schéma numérique de simulation peut nécessiter

d'être modifié, la modélisation se fait alors sur d'autres hypothèses. Les conditions de continuité des résultats d'un modèle à l'autre doivent être évaluées soigneusement.

Enfin, pour des très petits fonds, (typiquement de l'ordre d'une dizaine de mètres de hauteur d'eau, l'influence des interfaces (surface et fond) est telle que la modélisation devient d'autant moins précise que les fréquences sont basses (fréquence de coupure) et que les interfaces sont difficiles à décrire.

6.1.6.2. Incertitudes des données physiques du milieu marin

Les profils de célérité du son dans l'eau, proportionnels à la température de l'eau, la salinité et la pression statique (ou profondeur) sont des profils moyens et ne prennent pas en compte les phénomènes haute résolution qui peuvent exister. Ces phénomènes influencent la propagation du son lorsque la longueur d'onde acoustique est plus petite que le phénomène, c'est-à-dire pour les hautes fréquences qui se trouvent être les plus dissipatives.

En l'absence de mesures *in situ*, les incertitudes sur les niveaux sonores absolus ne peuvent pas être levées. Cette incertitude diminue cependant lorsque la prédiction de l'empreinte sonore du projet est fournie en niveaux relatifs.

6.1.6.3. Incertitudes sur les propriétés géo-acoustiques des sédiments et de leur distribution spatiale

L'incertitude sur les propriétés géo-acoustiques des sédiments et de leur distribution spatiale ne peut être prise en compte que par une approche statistique qui permet de faire varier les paramètres dans une plage d'incertitude et de prendre ainsi en compte la sensibilité des résultats à ces incertitudes.

Dans un cadre opérationnel, pour lever les incertitudes, l'assimilation de mesures *in situ* (carottage, levé sismique, inversion géo-acoustique) permet d'ajuster les paramètres géo-acoustiques utilisés dans les modèles et de prendre en compte plus finement les effets du fond sur l'empreinte sonore du projet.

6.1.6.4. Incertitudes sur les gabarits sonores des activités existantes

Les activités existantes sont décrites par type d'activité par des gabarits sonores. Aussi, à titre d'exemple, les différences individuelles entre deux navires d'un même type d'activité (trafic commercial par exemple) ne sont pas prises en compte. Des expériences scientifiques (Folegot *et al.*, 2012) montrent cependant que dans les zones sujettes à de fortes pressions anthropiques, l'effet de cette incertitude est limité par le nombre important de sources de bruit contribuant au chorus sonore.

6.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

6.2.1. Caractérisation de l'empreinte sonore

L'empreinte sonore du projet est la zone d'émergence sonore statistique des bruits du projet par rapport au chorus sonore existant. Pour chaque famille homogène de conditions environnementales (par exemple saison océanographique) et pour chaque type de construction, le périmètre de l'empreinte sonore doit être établi à partir des données statistiques des champs acoustiques perturbés en comparaison des données statistiques des champs acoustiques du bruit ambiant existant avant le projet. Ces cartes sont établies après sommation sur les fréquences et intégration des différentes situations océanographiques représentatives du site (marée, rugosité de surface, etc.) (Fig. 37).

Afin de permettre le lien avec l'exposition sonore auprès des espèces potentiellement en présence dans l'empreinte sonore du projet, les empreintes sonores du projet peuvent en l'état actuel des connaissances scientifiques:

- ✓ être estimées pour une seconde d'activité ;
- ✓ intégrer la bande de sensibilité de chaque

espèce ;

- ✓ être exprimées en dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ au-dessus de la médiane saisonnière du bruit ambiant existant.

Leur conformité permettra par la suite l'évaluation des impacts vis-à-vis des mammifères marins en prenant en compte la durée cumulée de chaque opération

6.2.2. Caractérisation de l'empreinte sonore en fonction du cycle de vie du projet

Au bruit initial se rajoutent les bruits liés spécifiquement au projet de construction. Ces bruits, générés par les différentes techniques mises en œuvre, sont de nature impulsive ou continue. Le cumul des bruits initiaux et des bruits liés au projet forme un état sonore dit « perturbé ». Ils sont prédits par modélisation en phase de levée des risques et au préalable du démantèlement ; par la combinaison de mesures avec les modèles pendant les phases d'installation, d'exploitation, de maintenance et de démantèlement.

6.2.2.1. Spécificités de la phase d'installation

La phase d'installation du projet nécessite souvent la mise en œuvre de moyens et d'outils générateurs de bruits, parmi lesquels (Tab. 23) :

- ✓ Du forage vertical, générateurs de bruits continus ;
- ✓ Du forage dirigé, générateurs de bruits continus ;
- ✓ Du battage de pieu, générateurs de bruits impulsifs ;
- ✓ Du dragage, générateur de bruits continus ;
- ✓ Du tranchage, générateurs de bruits continus ;
- ✓ Du minage, générateurs de bruits impulsifs ;
- ✓ Des navires de surface, générateurs de bruits continus ;
- ✓ Etc.

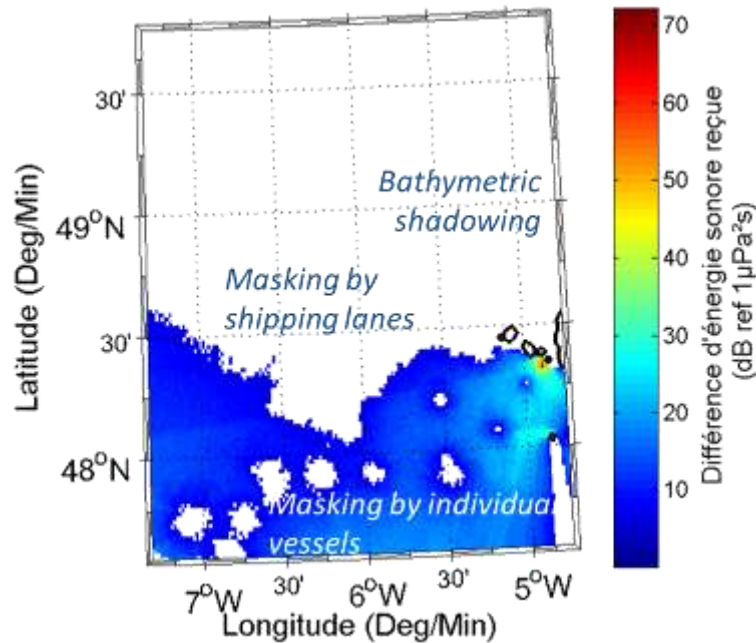


Figure 37 Exemple d'estimation de l'empreinte sonore (ou émergence statistique) d'un bruit anthropique de forte intensité au large de Molène (source Quiet-Oceans ; Folegot et Clorennec, 2013) : l'empreinte sonore est la zone colorée ; la zone en blanc correspond à des zones pour lesquelles le bruit du projet est dominé par le chorus de bruits existants, soit à cause d'un effet de bathymétrie (au Nord), soit par un masquage du bruit du trafic maritime global (à l'Ouest), soit par des navires individuels présents localement (au Sud).

Cette mise en œuvre est limitée dans le temps. Cela est d'autant plus vrai pour les projets hydroliens qui opèrent dans des zones à forts courants. Aussi, il est essentiel de formaliser les scénarios de travaux représentatifs de chaque atelier de construction, en y incluant a minima :

- ✓ La nature de chaque opération ;
- ✓ Les caractéristiques de chaque outil mis en œuvre ;
- ✓ La durée de chaque opération ;
- ✓ La répétitivité de chaque opération ;
- ✓ Le lieu de chaque opération ;
- ✓ Les conditions d'environnement permettant l'opération.

6.2.2.2. Spécificités de la phase d'exploitation/maintenance

Les bruits liés à l'exploitation du site sont continus mais intermittents au gré des reverses de

courant. Aussi, une caractérisation individuelle sur quelques cycles de marée, incluant les marées de vives eaux, est suffisante pour établir un gabarit de bruit généré comme fonction du courant (et donc de la vitesse de rotation).

La mise en place d'un modèle de propagation peut dans un deuxième temps évaluer la carte de l'empreinte sonore de la turbine individuelle d'une part, mais surtout de l'ensemble du parc. Des mesures ponctuelles en présence de l'ensemble des turbines du parc permettront de calibrer les cartes statistiques de l'empreinte sonore du parc.

6.2.2.3. Spécificités de la phase de démantèlement

La problématique de bruit lors de la phase de démantèlement est vraisemblablement de même nature que lors de la phase d'installation.

Nature		Moyens de caractérisation	Occurrence a priori
Anthropique	Construction des fondations	Mesure et modèle	Temporaire
	Ensouillage des câbles	Mesure et modèle	Temporaire
	Trafic maritime induit par la construction	Mesure et modèle	Temporaire
	Fonctionnement des hydroliennes	Mesure et modèle	Permanent
	Trafic maritime induit par la maintenance	Mesure et modèle	Semi-permanent à permanent
	Maintenance	Mesure et modèle	
	Démantèlement	Mesure et modèle	Temporaire

Tableau 23 Liste non-exhaustive des origines possibles des bruits liés aux projets hydroliens.

6.2.2.4. Caractérisation du bruit des turbines

Des techniques de caractérisation de bruits de systèmes mécaniques existent, soit par modélisation aux éléments finis, soit par modélisation en sous-systèmes liés. La modélisation en sous-systèmes liés permet de décrire les différents éléments constitutifs des hydroliennes et de décrire les mécanismes de transfert du bruit et des vibrations vers l'extérieur, par voie vibratoire, par voie acoustique ou par voie fluide.

La combinaison des fonctions de transfert des sous-systèmes constitutifs et des interfaces mécaniques entre les sous-systèmes permet une caractérisation a priori des bruits des turbines.

La caractérisation du bruit des turbines par mesure acoustique est plus délicate, en particulier due à la présence des courants. Les phénomènes de pollution de la mesure par des phénomènes de turbulence localisés autour de l'hydrophone peuvent limiter l'exploitabilité de la mesure.

6.2.2.5. Caractérisation du bruit des particules sur les hydroliennes

Le charriage des sédiments dans le site hydrolien peut interférer physiquement sur les hydroliennes. Le bruit du transport sédimentaire dans la zone avant l'installation du parc peut donc se trouver augmenté substantiellement.

6.2.2.6. Vibrations

Les bruits de travaux et les bruits des turbines génèrent vraisemblablement des vibrations qui se transmettent dans le fond marin et s'y propagent. Peu de connaissance existe à ce jour sur l'effet de ces vibrations sur la faune marine.

6.2.3. De l'empreinte sonore aux niveaux d'exposition

L'empreinte sonore du projet est transformée en niveau sonore perçu selon la sensibilité de chaque espèce en fonction de la fréquence ou de leur fonction d'audition (National Research Council, 2003). Cette transformation, proposée par Southall *et al.* (2007), revient à sélectionner uniquement les plages de fréquences qui sont réellement perçues par les animaux. Elles sont calculées en pondérant le spectre de l'onde sonore insonifiant le mammifère marin par la fonction de transfert de son oreille (« M-Weighting function ») puis en intégrant cette énergie acoustique sur la bande de fréquence écoutée (Fig. 38).

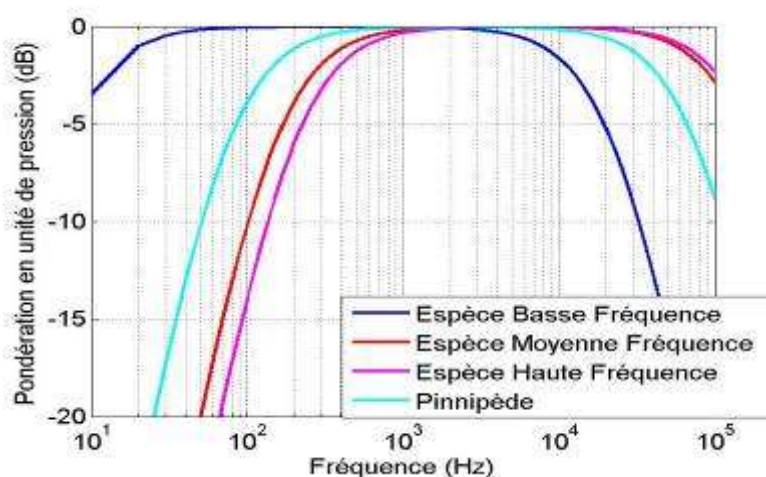


Figure 38 Fonctions de pondération en fonction de la fréquence, et par classe d'espèce de mammifère marin, ou fonction d'audiogramme, permettant d'estimer les niveaux sonores perçus par les espèces biologique à partir de la connaissance de l'empreinte sonore. Pour l'Homme la bande de fréquence utile est de 20Hz-20kHz.

6.2.4. Gestion des incertitudes et des lacunes de connaissance

A chaque caractéristique descriptive du projet ou descriptive de l'environnement de propagation doit être adjointe un intervalle d'incertitude et/ou un intervalle de variabilité et/ou barre d'erreur. Les valeurs de ces incertitudes dépendent du niveau de connaissance des conditions environnementales du site et du projet. L'impact de ces incertitudes sur la précision des résultats doit être évalué par modèle. Les incertitudes liées au projet sont principalement :

- ✓ Les niveaux de bruits des outils ;

- ✓ La nature du fond dans la zone d'étude ;
- ✓ L'océanographie dans la zone d'étude ;
- ✓ L'état de mer.

Une représentation en percentile permet de traduire ces incertitudes.

6.2.4.1. Incertitudes sur les gabarits sonores du projet

Concernant les techniques de construction, il existe à ce jour peu de données connues concernant les différences de bruit en fonction des caractéristiques détaillées des machines-outils et des conditions de site (nature du substrat par exemple). Cependant, la production de littérature scientifique sur ce sujet s'intensifie rapidement et des gabarits peuvent être dérivés de mesures réalisées lors de différents projets. La dispersion des valeurs de bruit émis reportée est relativement faible. En l'état actuel des connaissances, les incertitudes sur le type de machine-outil et les conditions de substrat, bien qu'existants, restent probablement marginaux.

L'émergence et la diversité des technologies liées aux technologies de turbines hydroliennes fait que les systèmes peuvent ne jamais avoir été déployés en grandeur nature. Peu de mesures de bruit ont encore été reportées pour caractériser précisément les signatures sonores. En attendant que la connaissance progresse, les signatures des hydroliennes peuvent toutefois être définies par dire d'expert.

Il est important de favoriser la caractérisation théorique ou expérimentale du bruit des turbines dès les phases de conception, en échelle réduite et en échelle réelle.

6.2.4.2. Incertitudes sur les effets de masquages des hydroliennes

Les hydroliennes individuelles disposées au sein du parc peuvent faire office d'écran vis-à-vis du bruit des hydroliennes situées aux alentours. Ce phénomène peut exister aux fréquences les plus élevées, et est probablement marginal à basses fréquences où des phénomènes de diffraction ont pour effet de réduire l'ombre des structures.

6.3. Identification des impacts cumulés

Par nature, l'étude du bruit est cumulative, dans le sens où la définition de l'empreinte sonore proposée permet d'appréhender le cumul des bruits existants (de différentes natures) avec les bruits du projet.

6.4. Description du programme de suivi environnemental

Durant la phase d'analyse de l'état initial, la caractérisation saisonnière statistique du bruit ambiant couvre des périodes statistiquement représentatives avec des campagnes saisonnières de mesures *in situ* (Tab. 24). Il s'agit d'obtenir une meilleure représentativité du bruit ambiant en fonction des différentes conditions météoro-océaniques.

Au cours de la phase de construction, des mesures *in situ* d'acoustique passive sont à réaliser en concomitance avec les phases de travaux effectifs. Lors de la phase d'exploitation, des mesures de contrôle en acoustique passive sont effectuées tous les trimestres et pour les années (N), (N+1), (N+5), (N+10) etc. et ce afin de prendre en compte les modifications potentielles de l'empreinte sonore du parc (modification de la signature acoustique du parc) après plusieurs années d'exploitation.

Pendant la phase de démantèlement des mesures en acoustique passive seront réalisées parallèlement avec les phases effectives de travaux.

	Etat initial		Suivi durant les phases opérationnelles du projet hydrolien			Suivi post-démantèlement
	Pré-requis	Evaluation	Construction	Exploitation	Démantèlement	
Objectifs		Caractérisation saisonnière du bruit ambiant	Caractérisation statistique des niveaux d'exposition sonore et des niveaux d'exposition cumulés pour chaque phase de construction	Caractérisation statistique saisonnière de l'émergence sonore du parc durant la phase d'exploitation pour un ensemble représentatif de conditions météorologiques	Caractérisation statistique des niveaux d'exposition sonore et des niveaux d'exposition sonores cumulés durant les opérations de démantèlement	Évaluer le retour à l'état de référence « E ₀ » par une caractérisation saisonnière statistique du bruit ambiant
Périmètre de l'étude	Aire d'étude éloignée définie en fonction de la prédiction de l'empreinte sonore du projet et des zones de dépassement statistique des seuils de dommages physiologiques et de modification potentielle du comportement de la faune présente.					
Durée	Durée statistiquement représentative des bruits du site		Toute la phase de construction	Toute la phase d'exploitation	Toute la phase de démantèlement	Un trimestre
Périodicité recommandée		Saisonnière	En concomitance avec les phases effectives de travaux	20 jours/trimestre pendant les années d'exploitation partielle et l'année d'exploitation complète du parc (N), puis 20 jours/trimestre des années (N+1), (N+5), (N+10) etc.	En concomitance avec les phases effectives de travaux	Saisonnière
Méthode	<p>Moyens : Modélisation physique, mesures d'acoustique passive. La gamme de fréquences de modélisation et des mesures passives s'étend de 30 Hz à 80 kHz.</p> <p>Méthode : Spatialisation des mesures <i>in situ</i> d'acoustique passive sur la gamme 30 Hz à 80 kHz par l'usage de modèles physiques de propagation acoustique.</p> <p>Etat initial : Les positions des mesures d'acoustique passive seront déterminées à partir d'une prédiction du bruit ambiant initial.</p> <p>Phase de construction : Les positions des mesures d'acoustiques passives sont déterminées à partir des cartes de zones de risques de dépassement des seuils physiologiques et des seuils prédits de modification du comportement. Durant les phases bruyantes des travaux de construction, des mesures d'acoustique passive de contrôle doivent être effectuées à des positions déterminées par la cartographie prédictive des zones de dépassement des seuils et en fonction des zones d'habitat des mammifères marins.</p> <p>Phase d'exploitation : Les positions de mesures d'acoustique passive sont déterminées à partir des cartes prédictives d'empreinte sonore en phase d'exploitation.</p>					
Données à collecter	Caractérisation saisonnière de l'empreinte acoustique du projet. Définition des zones de dépassement statistique des seuils de dommages physiologiques et de modification du comportement des espèces		Données d'acoustique passive et active et toutes les données du milieu physique et anthropique permettant de spatialiser les données acoustiques et d'analyser le chorus sonore mesuré par l'hydrophone.			
Présentation des résultats	Cartographie en tiers d'octave ou octaves entre 30 Hz et 80 kHz (à minima 90 ^{ème} , 50 ^{ème} , 10 ^{ème} et premier percentiles). Intervalles de sensibilité liés aux incertitudes du milieu physique et à leur variabilité devront être intégrés aux cartes sonores.					

Tableau 24 Boîte à outils du suivi acoustique

6.5. Mesure d'évitement et de réduction des impacts

Lorsque les enjeux et les risques identifiés le nécessitent, des mesures de gestion ou de réduction du bruit peuvent être mises en place. Ce chapitre liste et analyse dans un premier temps les différentes solutions afin de réduire, éviter et compenser les niveaux sonores et les risques vis-à-vis des mammifères marins. A ce jour, l'aspect de compensation, difficile à mettre en œuvre, ne sera pas traité dans ce chapitre. La gestion des risques s'inscrit dans la suite logique des résultats du chapitre 9 traitant des impacts vis-à-vis des mammifères marins susceptibles d'être présents

dans ou à proximité de la zone du projet. Dans une seconde étape, dans le cadre de ce projet, les techniques susceptibles d'être mises en œuvre afin de réduire les nuisances sonores sont listées. La réduction et l'évitement des risques peuvent se réaliser selon quatre leviers principaux (Fig. 39) :

- ✓ mettre en place des mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels ;
- ✓ mettre en place des mesures de réduction des niveaux sonores cumulés ;
- ✓ mettre en place des systèmes qui entravent la propagation du bruit dans l'océan ;
- ✓ mettre en place des mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque.



Figure 39: Axes de développement des solutions de réduction et d'évitement des risques sonores vis-à-vis des mammifères marins.

6.6. Lacunes et programmes de recherche

Les programmes de recherche relatifs au bruit sous-main spécifique au contexte de développement d'une filière hydroliennes devraient pouvoir adresser :

✓ La caractérisation des niveaux émis par les hydroliennes en fonction de leurs vitesses de rotation. On recherchera à établir des bases de données partagées qui

✓ fournissent des modèles de source de bruit à un mètre, soit ponctuelles, soit étendues, en fonction de la fréquence. Les protocoles de mesure et de traitement doivent pouvoir corriger la mesure acoustique des effets de propagation, en particulier des effets de guide d'onde inhérents à la mesure in situ.

✓ La caractérisation des niveaux émis par les nouvelles générations d'outils et techniques servant aux ancrages spécifiques des hydroliennes. On recherchera à établir des bases de

données partagées qui fournissent des modèles de source de bruit à un mètre, soit ponctuelles, soit étendues, en fonction de la fréquence. Les protocoles de mesure et de traitement doivent

pouvoir corriger la mesure acoustique des effets de propagation, en particulier des effets de guide d'onde inhérents à la mesure in situ.

Références clés

National Research Council. (2005). Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects. Washington DC: The National Academies Press.

Southall B., Bowles A., Ellison W., Finneran J., Gentry R., Greene C., Tyack P., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. Aquatic Mammals, 33: 411-521.

Les impacts potentiels du champ électromagnétique (CEM) des câbles électriques

Durant la phase d'exploitation des projets hydroliens, les câbles électriques sous-marins (câble d'atterrage, ombilicaux, convertisseur,...) peuvent générer des champs électromagnétiques (CEM) plus variables et plus intenses que ceux naturellement présents dans le milieu marin. De nombreuses espèces animales marines sont sensibles aux CEM et les utilisent pour s'orienter ou repérer d'autres individus (dans les relations de prédation et de reproduction). Les câbles en fonctionnement peuvent donc potentiellement perturber le comportement de certains organismes marins.

Brefs rappels théoriques sur les champs électromagnétiques:

La question de l'impact potentiel des CEM doit être envisagée différemment suivant que le courant circulant dans le câble est continu (CC) ou alternatif (CA ; 50 Hertz), les espèces sensibles percevant différemment les champs magnétiques statiques et les champs magnétiques alternatifs.

Le terme « champ électromagnétique » est général et inclut le champ électrique, mesuré en volts par mètre (V/m), et le champ magnétique, mesuré en micro-teslas (μT). Il importe donc de distinguer les champs électriques des champs magnétiques qui, dans les cas qui nous intéressent, sont indépendants les uns des autres.

Les champs magnétiques qui nous intéressent ici sont de très basses fréquences et ne sont pas comparables aux ondes électromagnétiques des équipements de communication utilisant les ondes radio ou radar (téléphones mobiles, antennes,...). Ils sont peu énergétiques et n'induisent pas d'effet ionisant. Leur intensité décroît rapidement en fonction de la distance au câble, indépendamment de la fréquence (dans le cas d'un dipôle (deux câbles en opposition de phase), les champs générés par chacun des deux câbles se compensent mutuellement et le champ diminue alors en $1/R^2$). A une distance donnée d'un câble en fonctionnement, le champ magné-

tique est d'autant plus intense que la tension est plus élevée.

Le champ électrique est confiné efficacement à l'intérieur du câble (isolation, écran métallique). Un second champ électrique est cependant généré au voisinage des câbles conduisant du courant alternatif. Dans ce cas, le courant alternatif crée un champ magnétique alternatif à l'extérieur du câble qui génère lui-même (selon les lois de Maxwell) un champ électrique alternatif induit, de très faible amplitude, à l'extérieur du câble (de l'ordre de quelques $\mu\text{V}/\text{m}$). Concernant les câbles conduisant un courant continu, l'effet d'induction dans la mer est nul. Néanmoins le champ magnétique peut créer un champ électrique induit à l'intérieur des animaux se déplaçant à proximité du câble.

Les caractéristiques des champs magnétiques anthropiques varient en fonction du type de câble (monopolaire ou bipolaire) et surtout, selon que le câble est ensouillé ou non (car cela détermine la distance minimale au câble). Le contexte environnemental des projets hydroliens (forts courants ; substrats durs dominants) fait que le câble d'atterrage est souvent posé sur le fond sur une portion significative de son parcours.

L'utilisation d'un courant alternatif (CA) est le scénario le plus probable dans le cas du raccordement d'installations (prototype ou parc industriel) relativement proches du rivage alors que le courant continu (CC) est privilégié pour le transport de l'électricité sur de longues distances, avec des tensions élevées.

La nature du courant (alternatif ou continu), la tension, l'intensité et la profondeur d'ensouillage du câble sont des paramètres importants à prendre en compte car ils conditionnent dans une large mesure les valeurs des champs magnétiques émis et potentiellement perçus par les organismes marins autour du câble.

Effets attendus:

L'intensité du champ géomagnétique terrestre est comprise, selon les régions du globe, entre 20 et 75 μT . Les données actuellement disponibles sur les champs magnétiques induits par les câbles électriques de raccordement concernent essentiellement l'éolien offshore. Les champs modélisés pour des câbles de parcs éoliens offshore en

fonctionnement (10 en courant alternatif et 9 en courant continu) montrent que les intensités sont très variables et comprises entre 1 et 160 μT à la

surface du sédiment à l'aplomb du câble (Fig. 40). L'intensité diminue très rapidement à quelques mètres de distance du câble.

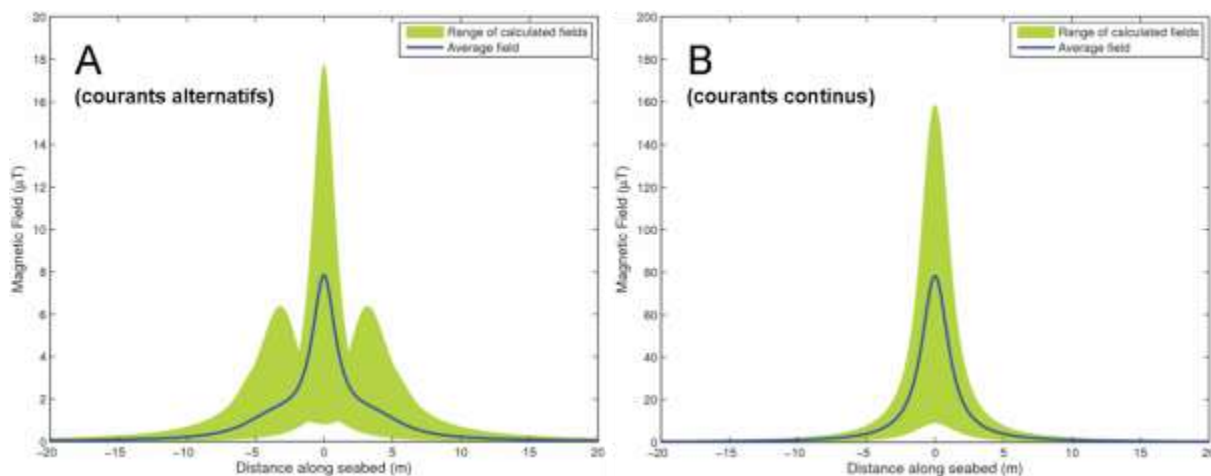


Figure 40 Modélisation de l'intensité du champ magnétique induit à l'interface eau-sédiment par différents câbles de raccordement (ensouillés et actuellement en fonctionnement) en fonction de l'éloignement par rapport au câble. Les gammes de valeurs et les moyennes calculées pour les courants alternatifs (A) et continus (B) sont respectivement basées sur 10 et 9 câbles (Normandeau Associates, Inc. et al., 2011).

Dans le cadre du raccordement des futurs parcs hydroliens français, les câbles utilisés seront vraisemblablement des câbles tripolaires en courant alternatif (50 Hz), avec une tension de 225 kV, ensouillés à 1.5 m de profondeur (sauf sur substrat dur) (RTE, 2013).

Des modélisations réalisées à partir de ces données d'entrée montrent que les valeurs d'exposition aux champs magnétiques sont inférieures à 11 μT à l'aplomb de la liaison (au niveau de l'interface sol-eau), et que la valeur de champ magnétique devient inférieure à 1 μT dès que l'on s'éloigne de 5 m de l'axe de la liaison.

Il est envisagé d'utiliser dans certains cas du courant continu en bipôles (deux câbles en parallèle), avec une tension de 320 kV et un ensouillage à 1.5 m de profondeur (sauf sur substrat dur). La valeur des champs magnétiques émis dépend alors de la distance entre les deux câbles du bipôle. A l'aplomb des liaisons, les valeurs maximales seraient de 20 μT pour des câbles jointifs et de 220 μT pour des câbles espacés de 10 à 100 m, le phénomène de compensation mutuelle des champs magnétiques n'étant plus observé.

D'un point de vue pratique, les câbles ne peuvent pas être enterrés assez profondément dans le sédiment pour réduire le champ magnétique et le champ électrique induit sous le seuil de détection des espèces les plus sensibles (Gill et al., 2009).

Toutefois, lorsqu'ils sont posés sur le fond, les câbles sont souvent en partie ou totalement recouverts de structures de protection (coquilles ; matelas de béton) qui augmentent la distance entre les câbles proprement dit et les organismes.

Certains travaux consacrés aux impacts potentiels des EMR en général, ou des câbles électriques sous-marins en particulier, mentionnent que les CEM associés aux différentes technologies EMR peuvent potentiellement attirer, repousser ou causer des dommages aux espèces aquatiques sensibles. Une revue de la littérature disponible sur les impacts des champs magnétiques générés par les câbles sur les organismes marins montre que les connaissances acquises sont contradictoires et insuffisantes pour en tirer des conclusions solides. Il est pour l'instant impossible de conclure quant à l'impact réel des câbles électriques sous-marins sur ces espèces, par manque de preuves scientifiques.

Environnement biologique

La présente partie « Environnement biologique » traite des impacts possibles (négatifs ou positifs) d'un projet hydrolien sur les principales composantes biologiques des écosystèmes marins.

Cette partie traite donc des impacts potentiels de ces pressions sur les 4 compartiments biologiques de l'écosystème décrits ci-dessous et dont les interactions sont illustrées dans la figure 41 :

- **Benthos** : Suivre les communautés benthiques permet d'observer les impacts potentiels d'une augmentation de la turbidité, de l'affouillement autour des objets posés sur le fond, de l'effet récif de ces derniers ou encore de polluants susceptibles d'être diffusés par les composantes de projets hydroliens

- **Ressources halieutiques** : Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les communautés de poissons et crustacés exploitées mais les impacts sur les communautés planctoniques y sont éga-

lement abordés. Les impacts potentiels des projets hydroliens sur les communautés pélagiques sont susceptibles d'être générés par l'ensemble du panel de perturbations listées ci-dessus.

- **Mammifères marins** : Aux perturbations sonores qui peuvent avoir des points communs avec les projets éoliens offshore se rajoute le risque de collision spécifique aux projets hydroliens. Ce chapitre traitera également des impacts sur les communautés de mammifères marins de l'ensemble du panel de perturbations listées ci-dessus.

- **Avifaune** : Les communautés d'oiseaux marins et côtiers pourraient être impactées par les projets hydroliens qui engendrent un risque de collision et de mortalité directe, mais également des effets indirects sur l'habitat de ces communautés.

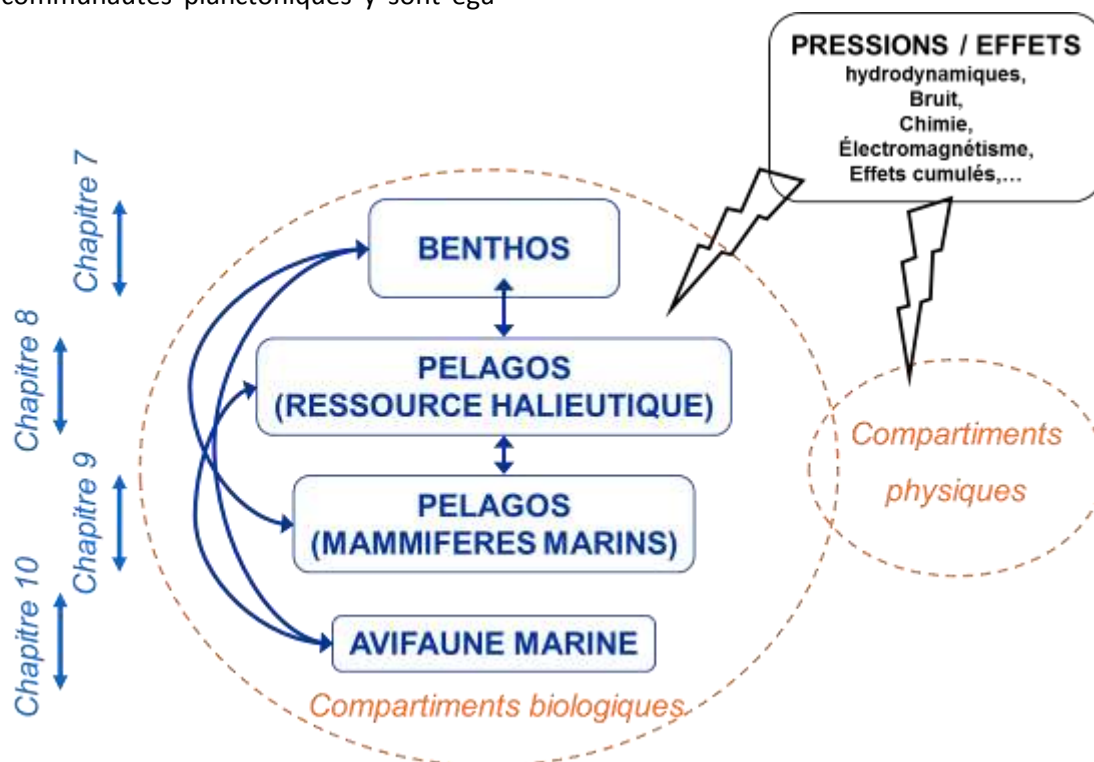


Figure 41 Compartiments biologiques étudiés et leurs interactions (bleu), sous l'influence des différentes pressions (en noir)

Le projet européen EQUIMAR (Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact, 2010) a analysé la conduite et la mise en œuvre d'une étude d'impact environnemental pour les projets d'exploitation des courants et des vagues, et a proposé la méthodologie suivante pour établir les hypothèses d'impact (en 3 étapes) pour le domaine biologique :

- Dresser une liste aussi exhaustive que possible des incidences potentielles de l'aménagement.

- Établir les scénarios d'impacts les plus probables (positifs ou négatifs, prévus ou recherchés) en terme de modification des milieux, de réaction des espèces présentes ou d'entrave aux activités pré-existantes. Ces scénarios seront déduits des spécificités de l'aménagement mais ils devront intégrer les caractéristiques de l'écosystème, des ressources et leurs modalités d'exploitation.

- Attribuer une valeur qualitative et/ou quantitative à chaque classe d'impact qui permettra d'établir une hiérarchie des effets en fonction de leur probabilité d'occurrence et/ou d'intensité.

D'autres auteurs (Polagye *et al.*, 2011) adoptent une démarche similaire et considèrent que l'analyse préliminaire est une étape essentielle de l'évaluation des impacts environnementaux, et vise à identifier, au début du développement du projet, les questions environnementales clés qui devront requérir le plus l'attention. Ces questions environnementales clés sont par exemple les récepteurs environnementaux qui seront significativement affectés par le projet, les domaines qui nécessiteront des études détaillées, les méthodologies à mettre en œuvre, les mesures de réduction possibles...

L'un des points de l'analyse préliminaire consiste à décrire précisément les structures qui seront mises en place et les activités qui leur seront associées.

7. Benthos

Le benthos rassemble les végétaux et les animaux vivant en étroite association avec le fond. Au sein de la faune benthique, on ne considère ici que les invertébrés, lesquels vivent à l'interface eau-substrat (épifaune, fixée ou vagile) ou dans les sédiments (endofaune).

Par comparaison avec les autres compartiments biologiques abordés dans ce guide, le benthos est principalement constitué d'organismes peu mobiles, qui intègrent les perturbations de leur milieu de vie, sans pouvoir s'y soustraire.

De même que pour les autres compartiments de l'écosystème marin côtier, les connaissances sur l'impact potentiel des technologies hydroliennes sur le benthos sont faibles (ICES, 2012; Simas *et al.*, 2010). En outre, les rares retours d'expérience sur cette problématique ne concernent que le déploiement de démonstrateurs, c'est à dire de dispositifs uniques raccordés ou non (Keenan *et al.*, 2011).

Sans préjuger de la nature et de l'intensité de ces impacts potentiels, le benthos est susceptible d'être modifié par l'augmentation de la turbidité et la redéposition des particules générés par l'installation et le démantèlement des machines et du câble d'atterrissage, l'affouillement autour des objets posés sur le fond, l'effet récif des structures immergées, les perturbations acoustiques ou électromagnétiques, ou encore un environnement chimique polluant généré par la phase d'installation, les matériaux utilisés et/ou la remise en suspension de sédiments pollués (Shumchenia *et al.*, 2012).

De façon générale, les projets hydroliens actuellement en cours de développement sont (ou seront) implantés sur des portions relativement méconnues du domaine côtier (en particulier celles de l'étage circalittoral), à cause des conditions extrêmes de ces sites à forts courants. Cela nécessite de porter un effort particulier sur la connaissance préalable de la structure et du fonctionnement naturel de l'écosystème accueillant les hydroliennes.

7.1. Description de l'état initial

La définition de l'état écologique initial du compartiment benthique est une étape primordiale pour pouvoir prétendre ensuite à une évaluation pertinente des impacts.

Il s'agit de décrire les types de communautés benthiques potentiellement impactées par la mise en place du projet hydrolien, du site d'installation des machines jusqu'au site d'atterrissage du câble sur l'estran, ainsi que celles d'une zone de référence (témoin). Il est également essentiel de rendre compte de la variabilité naturelle associée à ces communautés, c'est à dire d'expliquer comment elles changent dans l'espace (répartition des habitats benthiques) et dans le temps (fluctuations saisonnières). A cet égard, la zone de référence doit être suivie parallèlement à la zone du parc.

7.1.1. Définition de la zone potentiellement affectée et choix de la zone de référence

Du fait de la faible mobilité du benthos, la zone potentiellement impactée par un projet hydrolien est moins étendue que celles considérées pour les autres compartiments biologiques. Toutefois, elle ne limite pas à la zone couverte par les objets posés sur le fond (fondations des machines et des convertisseurs, câbles, ancrages temporaires,...) et doit tenir compte des modifications hydrodynamiques et morpho-sédimentaires qui peuvent intervenir autour de ces objets. Il est à noter que la présence d'espèces benthiques mobiles, voire migratrices (grands crustacés par exemple), peut justifier d'élargir ce périmètre de manière significative.

La surface potentiellement impactée autour des machines dépend de leurs caractéristiques techniques et de l'échelle de déploiement (nombre de machines par ferme). Un démonstrateur devrait influencer le compartiment benthique sur quelques dizaines de mètres au maximum, *a priori*. En revanche, en présence de nombreuses machines, les impacts cumulés peuvent être supérieurs à la somme des impacts qui seraient générés individuellement par chaque machine. Par exemple, on ne peut pas exclure l'hypothèse qu'une ferme industrielle modifie indirectement le benthos sur des zones éloignées en aval des courants, suite à des changements sédimentaires

importants (accumulations, changements de granulométrie).

Les écosystèmes benthiques potentiellement impactés par un projet hydrolien s'étalent de façon continue de la zone intertidale (zone de balancement des marées) à l'étage circalittoral (> 30 m de profondeur), en passant par l'étage infralittoral (du bas de la zone intertidale à la limite inférieure des algues photophiles), chaque étage étant caractérisé par un type de biocénose benthique particulier (Dauvin, 1997).

L'implantation du câble d'atterrage concerne

l'ensemble de ce continuum (de 0 à 30-40 m) alors que l'implantation du convertisseur et des machines concerne uniquement la zone la plus profonde (circalittoral ; de 30 à 50 m).

Il convient également de définir une zone de référence (Fig. 42), choisie de telle façon qu'elle ne soit pas impactée par le projet durant tout son cycle de vie, et qu'elle soit malgré tout représentative (en termes de structure et de fonctionnement du compartiment benthique) de la zone potentiellement impactée (Moura *et al.*, 2010 ; Sheehan *et al.*, 2013).

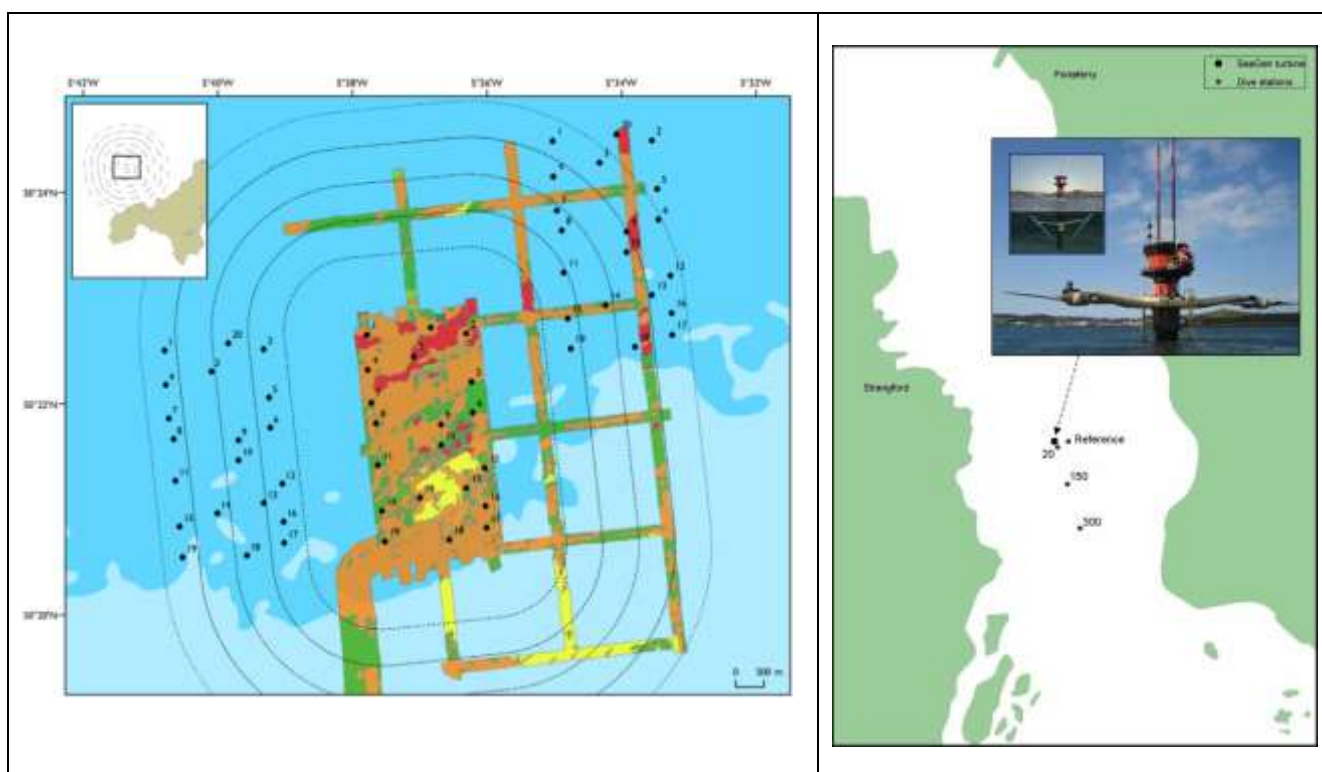


Figure 42 Carte d'un site d'essais houlomoteur montrant les stations de suivi dans la zone potentiellement impactée (au centre) et dans la zone de référence (constituée de 2 secteurs entourant la zone potentiellement impactée) (Sheehan *et al.*, 2010) (à g). Carte du site hydrolien démonstrateur SeaGen dans le détroit de Strangford, montrant les stations de suivi dans la zone potentiellement impactée (à 20, 150 et 300 m de l'hydrolienne) et dans la zone de référence (extérieure à l'effet de sillage des 2 turbines) (Keenan *et al.*, 2011) (à d)

7.1.2. Description du contexte écologique du site d'implantation (physico-chimie, biologie ; fonctions écologiques ;...)

Pour décrire de façon exhaustive le benthos du site hydrolien, il faut renseigner d'une part, la structure (composition faunistique) et la fonction

(rôle écologique) des communautés concernées, et d'autre part, les différents facteurs environnementaux qui conditionnent la présence de ces communautés à cet endroit (facteurs naturels et éventuellement autres pressions anthropiques).

Ces paramètres environnementaux peuvent être modifiés par le projet hydrolien dans des proportions supérieures aux fluctuations naturelles et devenir ainsi des sources de perturbations (impacts indirects).

Les méthodes disponibles pour décrire l'ensemble de ces paramètres sont détaillées au paragraphe 7.1.5.

7.1.2.3. Caractérisation des facteurs environnementaux clé

Compte-tenu des impacts potentiels envisagés pour le compartiment benthique, les facteurs environnementaux à prendre en compte sont :

- la profondeur ;
- la morphologie du fond et la nature du substrat (couverture sédimentaire) (cf. chapitre 4) ;
- l'amplitude des marées, la houle et la vitesse du courant au-dessus du fond (cf. chapitre 5) ;
- l'environnement chimique (niveau de pollution éventuel dans l'eau et les sédiments) ;
- la disponibilité en nourriture (sources pélagiques et benthiques) ;
- l'environnement sonore (cf. chapitre 6) ;
- l'environnement électromagnétique (cf. chapitre 7) ;
- la température ;
- les sources de perturbations naturelles et anthropiques (autres que le projet hydrolien lui-même) existant pour le benthos sur la zone (présence d'espèces benthiques invasives par exemple).

7.1.2.4. Caractérisation de la structure des habitats benthiques concernés par l'aménagement

L'évaluation des impacts potentiels sur le benthos doit prendre en compte les spécificités écologiques des écosystèmes marins concernés par les sites actuels d'installation des hydroliennes

(et ceux envisagés dans un futur proche). Les communautés à décrire dépendent étroitement des paramètres environnementaux évoqués plus haut. Lorsque l'on considère le projet hydrolien dans son ensemble (des machines installées sur les sites les plus profonds jusqu'à la zone d'atterrage du câble sur l'estran), une grande variété d'habitats benthiques (et de communautés associées) est concernée.

A ce jour, compte-tenu des difficultés d'accès au fond marin sur les sites hydroliens proprement dit (fort hydrodynamisme et grande profondeur), on dispose d'un panel de méthodes d'investigation relativement restreint.

Une autre particularité tient au fait que les dispositifs hydroliens sont pour l'instant préférentiellement implantés sur des substrats durs (roche mère affleurante, blocs rocheux) et/ou des fonds meubles très grossiers (galets, cailloutis), lesquels abritent des communautés benthiques particulières, essentiellement composées d'organismes fixés et encroûtants (Fig. 43). Cette épifaune tient donc une place prépondérante par rapport aux organismes vivant dans le sédiment (endofaune). Dans la plupart des cas, le suivi de la faune benthique sur le site d'implantation des machines doit donc se focaliser essentiellement sur l'épifaune fixée et vagile (et éventuellement sur les espèces mobiles de grandes tailles fréquentant la zone). Cependant, à l'avenir, des projets hydroliens pourront peut-être se situer sur des fonds de substrat meuble et dans des secteurs moins profonds.

Comme évoqué précédemment, le contexte est différent pour la zone d'installation du câble d'atterrage, ce dernier étant susceptible de traverser des habitats benthiques très divers (sur des substrats à la fois meubles et rocheux). Un suivi de la faune de substrat meuble pourra donc s'avérer essentiel dans certains cas.

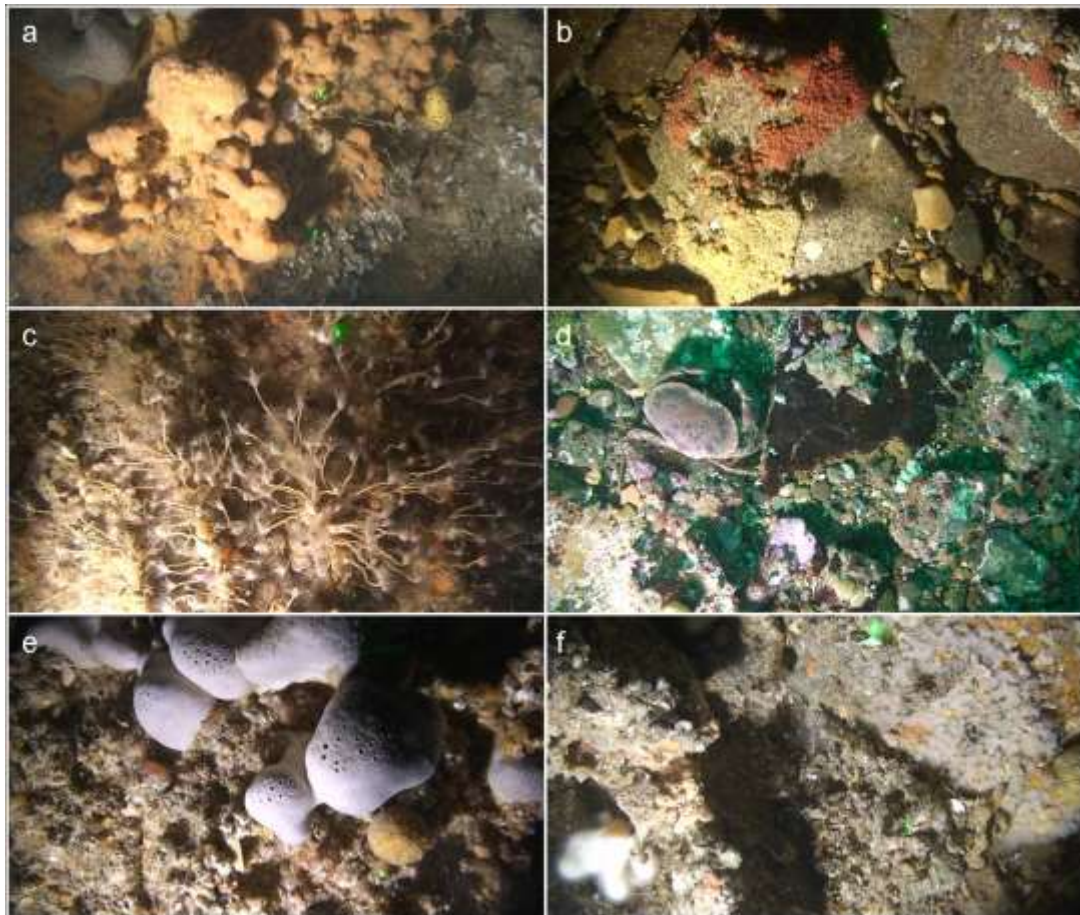


Figure 43 Aperçu de la diversité des peuplements benthiques de substrat dur observée sur le site hydrolien de Paimpol-Bréhat (© Ifremer, campagne BREBENT-01) (a : spongiaire proliférant non identifié ; b : ascidies sociales non déterminées ; c : Tubulariidae sp. ; d : Cancer pagurus ; e : Pachymatisma johnstonia ; f : *Corynactis viridis* (en haut à droite) et *Alcyonium digitatum* (en bas à gauche))

En termes de taille d'organisme, le suivi doit prendre en compte l'ensemble de la macrofaune et de la macroflore (taille > 1 mm).

Dans certains cas, en fonction des outils pouvant être mis en œuvre sur la zone, on devra se contenter de ne cibler que la mégafaune visible (épi-faune de taille > 1 cm). Cela concerne en particulier les secteurs les plus difficiles d'accès (grandes profondeurs et forts courants) où seule la vidéo survolant le fond peut être utilisée (sans possibilité d'effectuer des prises de vue détaillées). A l'inverse, dans d'autres cas, et en fonction des compétences en taxonomie disponibles, il pourra être intéressant de prendre en compte la meiofaune (50 µm < taille < 1 mm) qui est susceptible de répondre plus rapidement que la macrofaune à des perturbations ponctuelles du benthos (Albertelli *et al.*, 1999). Cette approche ne

concernera que des zones très localisées (impact de l'ensouillage d'un câble dans un habitat sensible par exemple) favorables à un échantillonnage quantitatif.

Pour ce qui concerne la flore benthique, les espèces à surveiller sont de nature et de sensibilités très différentes selon l'étagement considéré. Il est à noter que le groupe des producteurs primaires benthiques des secteurs les plus profonds fait l'objet d'un manque de connaissance. Il est important de rappeler ici que plusieurs espèces de la flore benthique jouent un rôle écologique essentiel en constituant des habitats remarquables (bancs de maërl ; herbiers de phanérogames ; champs de laminaires) et doivent faire l'objet d'une attention particulière.

La macroflore dressée (macroalgues) ne se rencontre que dans l'étage infralittoral et concerne donc principalement le suivi de la route du câble ; au-delà de cette limite, on rencontre une flore benthique encroûtante, plus difficile à décrire, caractéristique de l'étage circalittoral. En fonction de la turbidité naturelle des eaux du secteur d'implantation, la profondeur maximum de répartition des macroalgues peut varier.

*** Composition faunistique et floristique des communautés benthiques :**

Pour décrire les communautés animales et végétales présentes, il faut prendre en compte *a minima* les paramètres univariés suivants:

- La richesse spécifique :

Les taxons doivent être identifiés jusqu'au plus petit niveau taxonomique (idéalement jusqu'à l'espèce). En pratique, certains groupes zoologiques étant difficiles à déterminer (éponges, hydraires,...), certains outils de reconnaissance indirecte (vidéo) et l'impossibilité parfois d'effectuer des prélèvements biologiques, ne permettent pas d'atteindre le niveau de résolution taxonomique espéré. Il faut alors regrouper les espèces par niveaux taxonomiques d'ordre supérieur, voire selon des critères morphologiques (ex. éponges dressées / éponges encroûtantes).

- L'abondance et (ou) la densité:

Les organismes doivent être dénombrés de façon à déterminer leur densité le plus précisément possible. Une valeur par unité de surface (nombre d'individus par mètre carré) doit être déterminée lorsque les individus peuvent être dénombrés sans ambiguïté.

Dans certains cas (animaux coloniaux ou encroûtants ; méthodes d'estimation indirectes), il est nécessaire de réaliser des estimations semi-quantitatives, en ayant recours à des classes d'abondances, ou d'estimer des pourcentages de recouvrement du fond.

- La biomasse:

Ce paramètre implique de réaliser des prélèvements biologiques et des mesures précises en laboratoire. D'autre part, le manque de données sur les types d'écosystèmes concernés par

l'hydrolien permet difficilement d'utiliser des méthodes indirectes d'estimation de la biomasse (basées sur la taille des organismes par exemple). Cependant, elle devra être renseignée chaque fois que cela sera techniquement possible.

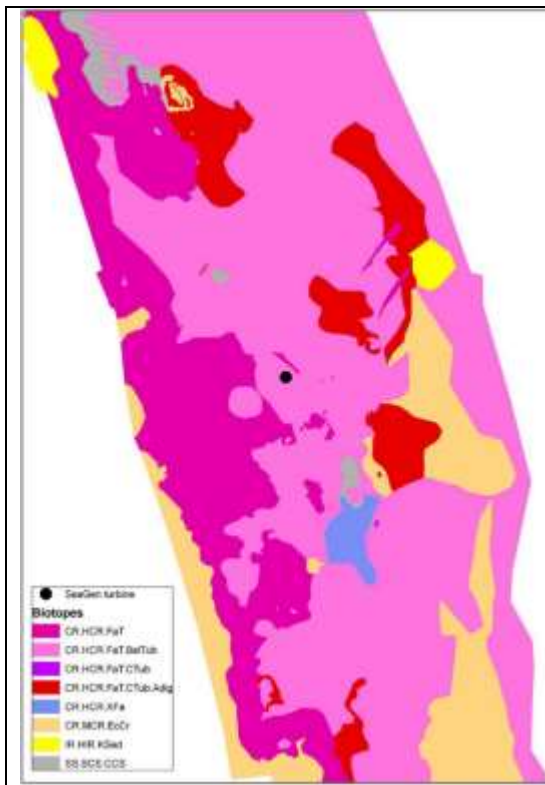
Il peut être utile d'approfondir la description des communautés à l'aide de paramètres multi-variés et de descripteurs fonctionnels:

- Indices de biodiversité (indices de Shannon ; indice de Simpson) ; indice d'équitabilité (indice de Piélou) ;

- Indices de qualité du milieu : indices basés sur les groupes écologiques. Toutefois, les indices de qualité traduisent généralement un degré de perturbation organique (enrichissement en matière organique du sédiment). Ils sont donc à manier avec précautions car ils ne sont pas forcément pertinents pour évaluer l'impact d'un projet hydrolien. En revanche, ils peuvent être pertinents pour évaluer si le site d'implantation est déjà perturbé par d'autres activités anthropiques (voir plus loin la question des impacts cumulés).

- représentativité des groupes trophiques (en termes de richesse fonctionnelle et/ou de biomasse), au sein des différents niveaux trophiques (en particulier au niveau des consommateurs primaires). En effet, là où des changements de la nature du substrat (modifications de la granulométrie) et/ou du mélange turbulent à l'interface eau/substrat peuvent intervenir, les stratégies alimentaires d'une communauté benthique peuvent évoluer.

Il est attendu une carte synthétique des principales unités biosédimentaires (Fig. 44) et des cartes de distribution quantitative des espèces benthiques dominantes ou d'intérêt écologique et/ou commercial pour la zone d'implantation des machines, du convertisseur et du câble, et sur la zone de référence. Cette carte doit respecter la typologie EUNIS (European Nature Information System). Concernant les substrats rocheux, il est également attendu une liste des espèces indicatrices des différentes communautés (ou faciès) rencontrées, en se basant par exemple sur les codes des inventaires mis en place localement (suivi des ZNIEFF-mer pour la Bretagne par exemple).



Définitions des unités biosédimentaires :

- CR.HCR.FaT: communauté animale à forts courants de marée ;
- CR.HCR.FaT.BalTub: communauté à Balanus crenatus et Tubularia indivisa sur roche circalittorale à très forts courants de marée ;
- CR.HCR.FaT.CTub: communauté à Tubularia indivisa sur roche circalittorale à forts courants de marée;
- CR.HCR.FaT.CTub.Adig: communauté à Alcyonium digitatum et Tubularia indivisa (en forte densité) et anémones sur roche circalittorale à forts courants de marée ;
- CR.HCR.XFa: communauté mixte à faune gazonnante ;
- CR.MCR.EcCr: communauté à échinodermes et faune encroûtante ;
- IR.HIR.KSed: communauté à macroalgues et laminaires perturbée par la remise en suspension ;
- SS.SCS.CCS: sédiment grossier circalittoral.

Figure 44 Cartographie des principales unités biosédimentaires obtenue sur le site du projet SeaGen par acoustique sonar, imagerie vidéo (bâti suspendu) et plongée, selon le système de classification des habitats marins de Grande Bretagne et d'Irlande (Keenan et al., 2011)

*** Niveau de sensibilité des habitats et espèces :**

Sur la base du recensement de la biodiversité benthique existante sur la zone géographique concernée par le projet hydrolien, il s'agit ensuite d'identifier les espèces les plus vulnérables aux perturbations engendrées par l'installation et l'exploitation des éléments du projet (machines, câbles, etc.).

La sensibilité d'un habitat ou d'une espèce dépend de son degré de tolérance intrinsèque vis-à-vis d'une perturbation et de son degré de résilience (le temps nécessaire pour retrouver un état écologique proche de l'état initial).

Un cadre d'analyse de la sensibilité des espèces est proposé par le réseau d'informations sur la biodiversité marine (MARlin) de Plymouth (<http://www.marlin.ac.uk/sensitivityrationale.php>).

Concernant le benthos, les perturbations à considérer ici sont principalement les interactions mécaniques avec le fond, la modification de

l'hydrodynamisme, l'augmentation de la turbidité, et secondairement, les modifications de l'acoustique et de l'électromagnétisme, et l'élévation de la température.

Les écosystèmes concernés par l'hydrolien sont par définition des environnements très énergétiques et donc soumis à un hydrodynamisme et à des phénomènes d'érosion importants.

Il est donc important de définir la gamme de variation des paramètres physiques (en particulier ceux liés à l'hydrodynamisme sur le fond) sur le site d'implantation. Par exemple, les communautés benthiques situées au niveau du Raz Blanchard peuvent être soumises à des conditions d'hydrodynamisme et d'abrasion très différentes de celles qui prévalent dans le secteur de Paimpol-Bréhat.

Si des espaces, des communautés benthiques ou des espèces benthiques à fort intérêt écologique

et/ou patrimonial se trouvent dans l'aire d'influence potentielle du projet hydrolien, l'accent doit être mis sur la description de leur biologie, de leur rôle écologique et de leur degré de vulnérabilité.

La loi n° 2006-436 du 14 avril 2006 relative aux parcs nationaux, aux parcs naturels marins et aux parcs naturels régionaux et l'arrêté du 3 juin 2011 portant identification des catégories d'aires marines protégées entrant dans le champ de compétence de l'Agence des aires marines protégées, liste les catégories d'aires marines protégées. Une attention particulière doit être portée sur les sites suivant :

- les zones d'inventaires (ZNIEFF, ZICO) ;
- les parcs nationaux (cœur de parc, aire d'adhésion, aire marine adjacente) ;
- les sites Natura 2000 en mer (ZPS, ZSC, SIC, pSIC) ;
- les parcs naturels marins ;
- les réserves naturelles ;
- les zones d'arrêté de protection de biotope ;
- les autres catégories d'aires marines protégées reconnues par l'arrêté du 3 juin 2011 portant identification des catégories d'aires marines protégées entrant dans le champ de compétence de l'Agence des aires marines protégées (statuts internationaux notamment).

7.1.2.5. Caractérisation de la fonction des habitats concernés

Comme évoqué plus haut, il est nécessaire de signaler la présence d'espèces jouant un rôle écologique clé sur l'aire d'influence supposée du projet hydrolien (y compris la route du câble d'atterrage):

- espèces « ingénieur » (récifs de coraux durs, coraux profonds ; bancs de maërl ; herbiers de zostères ; champ de laminaires ; ...)
- espèces ou groupe fonctionnel représentant un maillon trophique essentiel (exemple ?) ;
- espèces bioturbatrices (pour les substrats meubles).

7.1.3. Caractérisation de la variabilité naturelle du site d'implantation

La connaissance des fluctuations temporelles naturelles des communautés benthiques (changements saisonniers ou inter-annuels de la composition faunistique) est essentielle pour pouvoir déterminer si l'impact du projet hydrolien sur le benthos est significatif, c'est-à-dire s'il se situe au-delà de la gamme de variation naturelle.

Il faut donc déterminer une fréquence d'acquisition des données biologiques adéquate. La définition optimale de l'état initial veut que les suivis soient réalisés sur 3 années consécutives, à raison de 2 saisons par an (idéalement en fin d'hiver et en fin d'été). Une fréquence d'acquisition semestrielle a en effet été adoptée dans le cadre du suivi environnemental du site hydrolien démonstrateur SeaGen (Keenan *et al.*, 2011).

En pratique, dans le cadre d'une étude d'impact réglementaire, on pourra se limiter à 2 suivis saisonniers (fin d'hiver et fin d'été) réalisés sur une même année. Dans ce cas-là, la prise en compte d'un ou plusieurs site de référence dans l'évaluation des impacts sera particulièrement importante (cf. section 7.2).

Ces recommandations pourront éventuellement être reconsidérées au vu de l'amélioration des connaissances fondamentales sur les écosystèmes benthiques ciblés par l'hydrolien. En effet, l'étage circalittoral du large, où certains projets hydroliens sont susceptibles de s'implanter et où les fluctuations saisonnières sont moindres, pourront éventuellement faire l'objet d'une fréquence de suivi plus étalée dans le temps (1 suivi annuel).

7.1.4. Identification d'indicateurs pertinents

Etant donné le manque de recul sur la nature et l'intensité des changements écologiques que les technologies hydroliennes sont susceptibles d'engendrer sur le benthos, il est pour l'instant difficile de proposer des indicateurs pertinents et fiables permettant de mesurer et suivre efficacement le niveau de perturbation généré par un projet hydrolien. Cela constitue donc une problématique de recherche à approfondir dans les années qui viennent, en intégrant un maximum de retours d'expérience.

Dans un premier temps, il est nécessaire de réaliser une revue des indicateurs de perturbations

anthropiques (comparables à celles d'un projet hydrolien) adaptés aux écosystèmes côtiers à fort hydrodynamisme.

Parmi les critères permettant d'identifier des indicateurs pertinents, on peut citer par exemple:

- La morphologie de l'animal (représentativité des espèces dressées vs. espèces encroûtantes) ;
- La durée de vie des espèces (taux de renouvellement rapides vs. lents) ;
- La sensibilité aux perturbations mécaniques ;
- La sensibilité à une charge élevée en particules en suspension ou déposées à l'interface eau-sédiment si elle existe.

7.1.5. Méthodologies possibles d'acquisition d'information : bibliographie et acquisition de données

* Bibliographie :

La définition de l'état écologique initial de la zone d'implantation et de la zone de référence peut éventuellement être basée sur des données existantes acquises récemment (datant de moins de 5 ans) et suffisamment précises. Les projets hydroliens actuels concernant des zones côtières très peu étudiées, il faut le plus souvent réaliser une (ou plusieurs) campagnes d'acquisition de données pour compléter les informations issues de la bibliographie.

Diverses sources bibliographiques peuvent fournir des informations utiles sur la biodiversité benthique existante :

- les cartographies d'habitats benthiques. Le réseau français REBENT fournit des informations sur la distribution géographique des principaux types d'habitats, mais sur des secteurs côtiers localisés et peu profonds (www.rebent.org).
- le serveur de données Sextant (<http://www.ifremer.fr/sextant/fr/web/guest/accueil>), hébergé par l'Ifremer, met à disposition un catalogue de données géoréférencées sur diverses problématiques du domaine marin (biodiversité, gestion intégrée des zones côtières, pêche, exploration et exploitation des fonds marins).
- les rendus du programme CARTHAM (cartographie des habitats naturels des sites Natura 2000 en mer). Cet inventaire des habitats marins patrimoniaux de France métropolitaine a été entre-

pris à la demande du ministère du développement durable pour répondre aux engagements communautaires en matière de désignation des sites d'importance écologique devant intégrer le réseau européen Natura 2000, au titre de la directive « Habitat, faune, flore » de 1992. Lancé par l'Agence des Aires Marines Protégées en 2010, ce programme couvre plus de 40 % des eaux territoriales. La majeure partie des habitats marins patrimoniaux sera donc cartographiée, à l'issue de cet inventaire. Toutefois, les méthodologies employées par les divers bureaux d'études impliqués dans ce programme ne sont pas toujours homogènes et la résolution spatiale des données ne permettra pas forcément de définir l'état écologique initial d'une zone d'implantation d'hydrolienne (si elle est située en zone Natura 2000).

Les mesures de protection réglementaire du patrimoine naturel, déclinées aux différents échelons internationaux, nationaux ou régionaux (programmes d'action, traités, conventions, directives, etc.) sont autant de clés d'entrée pour évaluer la vulnérabilité des sites d'implantation hydroliens. Les espèces sensibles à prendre en considération sont notamment celles inscrites sur la Liste Rouge de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). L'application des directives européennes « Habitats » (réalisation de cartes d'habitats à haute résolution sur les sites Natura 2000, définition d'indicateurs, liste d'espèces en annexes), « Directive cadre sur l'Eau » (DCE ; prise en considération de la composition et de l'abondance de la macroflore et de la macrofaune benthiques pour l'évaluation de l'état écologique) et maintenant de la « Directive Cadre Stratégique pour le Milieu Marin (DCSMM ; extension de la DCE à la ZEE française) fournit une source d'information intéressante.

Plus localement, les mesures de gestion appliquées au domaine côtier d'une région ou d'un territoire sont également à prendre en compte. Pour la Bretagne par exemple, une liste d'espèces benthiques à fort intérêt écologique et patrimonial (faune et flore benthiques du littoral breton) a été élaborée par un groupe d'experts pour qualifier les zones d'intérêt floristique et faunistique en mer (ZNIEFF-mer) (Tab. 25).

Liste d'espèces (ou taxons)	Espèces déterminantes	Liste complémentaire
	Liste 1 : Espèces en danger ; Liste 2 : Espèces peu communes présentant des faciès particulièrement développés ; Liste 3 : Proposition du statut « Espèces protégées » ; Liste 4 : Espèces en marginalité écologique ; Liste 5 : Espèces autochtones rares ; Liste 6 : Espèces ingénieuses et/ou jouant un rôle d'indicateur d'importance, permettant un habitat diversifié	Liste A : Espèces en limite d'aire de répartition ; Liste B1 : Espèces à surveiller : en possible régression ; Liste B2 : Espèces à surveiller : en possible extension

Tableau 25 Définitions des 6 listes d'espèces benthiques déterminantes proposées pour la Bretagne et des listes complémentaires proposées pour les espèces insuffisamment connues ; classification validée par l'IJEM-UBO-Lebham, le MNHN-Station de Biologie Marine de Concarneau, l'UPMC-Paris VI & CNRS-Station Biologique de Roscoff, l'IJEM-UBO-Lemar et l'IFREMER (Derrien-Courtel, 2010)

Comme pour les autres compartiments biologiques, il est indispensable d'identifier l'ensemble des zones dont le compartiment benthique présente une richesse écologique particulière, une sensibilité environnementale forte, des enjeux de conservation importants.

*** Acquisition de données nouvelles :**

Les stations de suivi du benthos (points d'échantillonnage) doivent être réparties sur les différentes unités bio-morpho-sédimentaires définies à partir des données acoustiques (mosaïque d'images « sonar »), bathymétriques (carte de bathymétrie fine), sédimentaires (prélèvements qualitatifs pour valider l'interprétation sonar, quand c'est réalisable) et vidéo (acquisitions préliminaires mises en œuvre pour valider l'interprétation sonar).

Ces stations doivent permettre de recenser les espèces benthiques (macrofaune et macroflore ; épifaune et éventuellement endofaune) et doivent être représentatives de l'ensemble de la zone concernée par le projet.

Le nombre de stations de suivi et leur répartition spatiale dépendent du degré d'hétérogénéité de la nature des fonds observés. Ce nombre est d'autant plus réduit que les fonds sont homo-

gènes. Au vu des résultats de l'analyse biologique des prélèvements effectués sur ces stations, des stations complémentaires pourront éventuellement être ajoutées (par ex. sur les zones de transition entre deux unités biosédimentaires distinctes). Il existe des méthodes pour déterminer le nombre minimum d'échantillons représentatif de la composition d'un peuplement donné (nombre d'espèces échantillonnées en fonction de l'effort d'échantillonnage).

Lorsque des prélèvements sédimentaires, destinés à qualifier plus précisément la nature du sédiment, sont possibles (sur les zones de substrat meuble), ils doivent être couplés aux stations de suivi du benthos (c'est-à-dire effectués au même endroit).

Fonds durs :

Dans le cadre des projets hydroliens actuels, les fonds sont principalement (voire exclusivement) constitués de substrats durs (roche mère affleurante ; blocs rocheux) et/ou de fonds très grossiers (galets ; cailloutis), du moins dans la zone d'implantation des machines. Il faut alors faire appel aux techniques d'analyse des communautés benthiques de substrats rocheux qui font intervenir essentiellement de la vidéo et éven-

tuellement des opérations en plongée (lorsque la profondeur et l'hydrodynamisme le permettent).

Les acquisitions vidéo peuvent être réalisées de différentes manières.

Pour couvrir un large secteur (état initial par exemple), la vidéo tractée par un navire semble la plus adaptée (avec bâti-vidéo suspendu ou adapté sur un traineau benthique lorsque la morphologie du fond le permet (Seehan 2010)). La vidéo téléopérée (ROV) concerne le suivi de zones plus restreintes, qui ont préalablement été identifiées ; elle peut notamment être utilisée pour analyser le champ proche des machines durant la phase d'exploitation. La vidéo effectuée en plongée est fortement contrainte par la profondeur, les courants et l'éloignement à la côte. Elle est utile pour suivre précisément des stations particulières (suivi de la colonisation benthique). Enfin, la vidéo autonome est fixe sur le fond (déployée sur des observatoires de fond de mer) mais ne permet de couvrir que le champ proche des secteurs à surveiller. Elle est adaptée pour suivre le comportement d'espèces mobiles (crustacés) attirés ou repoussés par les structures et/ou les perturbations générées (bruit, champ électromagnétique). Cette dernière approche fait l'objet de recherches technologiques approfondies

Lorsque la profondeur et la courantologie sont compatibles avec l'intervention de plongeurs, des prélèvements quantitatifs d'organismes benthiques doivent être réalisés à l'aide de quadrats (0.25 à 1 m²) ou sur des transects (quelques dizaines de mètres de long).

Les analyses suivantes sont ensuite requises :

- Une détermination au plus petit niveau taxonomique possible (au niveau de l'espèce pour les individus les plus caractéristiques du site, y compris les espèces d'intérêt commercial ; au niveau du genre, voire de la famille pour certains groupes).
- Un comptage du nombre d'individus déterminés, quand cela est possible. A partir de données vidéo uniquement, l'analyse peut être plus restreinte (présence/absence ; comptages semi-quantitatifs ; % de recouvrement).
- Une comparaison avec les listes d'espèces sensibles éventuellement existantes pour

l'environnement géographique proche (liste régionale d'espèces patrimoniales).

Les résultats doivent être présentés sous la forme de tableaux indiquant, pour chacune des stations échantillonnées :

- le nom de la station,
- la position géographique,
- la sonde (c'est-à-dire la profondeur d'eau corrigée par rapport au zéro des cartes),
- le faciès sédimentaire (biotope),
- l'abondance des espèces (nombre d'individus par m² et écart-type; indice semi-quantitatif; présence/absence).

Comme précisé plus haut, ces résultats peuvent ensuite être représentés sous la forme de cartes de distribution (quantitative ou pas) des espèces dominantes et des espèces d'intérêt commercial, et d'une carte synthétique des principaux faciès (pour les substrats rocheux). On pourra s'appuyer sur la typologie d'habitats marins benthiques pour le circalittoral, établie dans le cadre du RE-BENT, qui propose différents niveaux permettant de s'adapter aux caractéristiques du site étudié, avec la possibilité de descendre au niveau le plus fin de la typologie EUNIS (Bajjouk *et al.*, 2011).

Fonds meubles :

Pour le suivi de la faune de substrat meuble, les prélèvements biologiques sont effectués à l'aide de bennes adaptées à chaque type de substrat (vase ; sable ; gravier), de dragues ou de carottiers. Les conditions d'utilisation des différents engins de prélèvement sont détaillées dans des fiches techniques disponibles sur le site du RE-BENT

(<http://www.rebent.org/documents/index.php>).

L'utilisation d'une benne Van Veen lestée (surface de prélèvement : 1/10 m²), d'une benne Smith-Mac Intyre (surface de prélèvement : 1/10 m²), d'une benne Day-Grab (surface de prélèvement : 1/10 m²) ou d'une benne Hamon (surface de prélèvement : 1/4 m², 1/8 m² ou 1/10 m²) permettent de réaliser des prélèvements quantitatifs. Il est à noter que la norme NF ISO 16665 définit les lignes directrices pour l'échantillonnage quantitatif et le traitement d'échantillons de la macrofaune marine des fonds meubles.

La benne de type Shipeck, réservée aux prélèvements à des fins d'analyses chimiques et granulométriques, est à déconseiller pour l'échantillonnage biologique. L'utilisation de dragues ne permet de réaliser que des prélèvements qualitatifs, ou au mieux semi-quantitatifs (ex. drague Rallier du Baty). Au niveau de l'atterrage du câble (sur l'estran), les prélèvements peuvent être réalisés à l'aide de carottiers à main (surface de prélèvement : 0.01 m²).

A chaque station, il est recommandé de réaliser :

- 3 à 5 réplicats en fonction de la connaissance préalable du milieu et du degré d'hétérogénéité du peuplement ; les réplicats sont essentiels pour rendre compte de la variabilité spatiale naturelle de la distribution des espèces en un point donné ;
- 1 réplicat supplémentaire pour l'analyse du sédiment (granulométrie).

Il est utile de photographier chaque prélèvement (étiqueté) pour faciliter la description du faciès échantillonné.

Tous les échantillons doivent être tamisés sur un tamis de maille 1 mm (maille ronde de préférence). Pour les sédiments les plus grossiers, un pré-tamissage peut être effectué avec une maille de 5 ou 2 mm. Chaque refus de tamis est fixé au formol (dilué à 5 %, et tamponné) ou directement conservé dans l'alcool (70°). Il doit faire ensuite l'objet d'une série d'analyses comprenant :

- Un tri biologique ;
- Une détermination au plus bas niveau taxonomique possible (cf. substrats durs) ;
- Un comptage du nombre d'individus déterminés.

7.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

Les changements écologiques potentiels intervenant au niveau du compartiment benthique dépendent étroitement des modifications de l'hydrodynamisme, de la dynamique sédimentaire et de la nature des fonds potentiellement induites par un projet hydrolien. Ils peuvent être

aussi liés à une augmentation de la turbidité, à une pollution de la masse d'eau, et/ou à des modifications de l'environnement acoustique ou électromagnétique.

Il est nécessaire de rappeler que l'amplitude et l'intensité des impacts potentiels dépendent des choix techniques et de l'échelle spatio-temporelle de déploiement du projet. Un travail d'expertise spécifique à chaque projet est donc nécessaire pour adapter les recommandations émises dans ce guide au contexte écologique particulier de chaque projet.

En théorie, le programme de suivi des impacts doit suivre une approche de type « BACI » (*Before-After-Control-Impact* ; Smith *et al.*, 1993). Cette méthode consiste à suivre en parallèle le site d'implantation du projet hydrolien et un (ou plusieurs) site(s) de référence (zone témoin non impactée par le projet), et ce, avant et après la phase de construction. L'approche BACI appréhende donc les changements écologiques à la fois dans le temps (état écologique initial et phase d'exploitation) et dans l'espace (site hydrolien et sites de référence). Ce programme optimal d'évaluation des impacts inclut donc dès le départ ce(s) site(s) de référence dans la stratégie de suivi.

7.2.1. En phase d'installation

* Destruction d'habitats benthiques :

La destruction directe des habitats benthiques est très localisée dans l'espace et la surface impactée dépend étroitement des différentes options d'installation des objets sur le fond (voir chapitre 4 ; paragraphe 4.2).

- Pour l'hydrolien posé ou fixé, l'aire détruite correspond théoriquement à la surface des embases (Fig. 45), soit 3 à 30 m² par machine (DGEC, 2012), plus celle des systèmes d'ancrages temporaires. Cependant, la préparation des sols avant implantation (opérations de nivellement des fonds parfois nécessaires) peut occasionner des destructions sur de plus grandes surfaces.

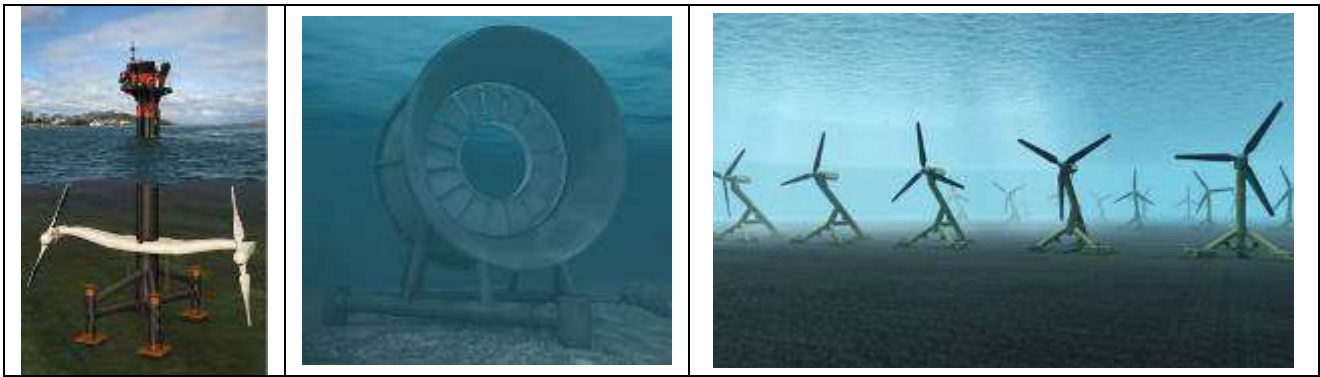


Figure 45 Emprises au sol de différents modèles de fondations d'hydroliennes (de gauche à droite : Sea-Gen ; OpenHydro ; Hammerfest Strom)

- Pour l'hydrolien flottant, la destruction des fonds est limitée aux ancrages, et éventuellement au raclage sur le fond de la base des chaînes reliant la structure flottante aux ancrages.

- Sur le tracé du câble, une destruction localisée des habitats benthiques et des espèces fixées ou peu mobiles se produit, au niveau de la tranchée (lorsque le câble est ensouillé) ou sous le câble (lorsqu'il est posé), à raison d'environ 2000 m² de surface détruite par kilomètre de câble (DGEC, 2012). La perte d'habitat, d'espèces inféodées à ces habitats (dont les espèces exploitées) concerne donc généralement une surface très limitée. Concernant le câble du site d'essais houlomoteur du SEM-REV par exemple, le passage de l'ensouilleuse a traversé le gisement classé de coquilles Saint-Jacques (*Capella*) sur une surface correspondant à 0,0036 km², soit 0,002 % de la surface de ce gisement. L'impact est plus significatif lorsqu'il touche des habitats benthiques sensibles et des espèces jouant un rôle écologique particulier (herbiers de phanérogame, bancs de maërl, champs de laminaires). Au niveau de l'atterrissage proprement dit et aux faibles profondeurs par exemple, les herbiers sont un sujet de préoccupation car les possibilités et le temps de recolonisation sont mal connus. Une étude expérimentale conduite sur les herbiers de zostères dans le cadre du projet hydrolien de Paimpol-Bréhat, montre un début de recolonisation spontanée dans les mois suivants les travaux d'installation, dès lors que la souille du câble a vu ses sédiments suffisamment consolidés (Barillier *et al.*, 2013).

*** Déplacement d'espèces benthiques mobiles :**

Les espèces d'invertébrés benthiques les plus mobiles (grands crustacés) sont susceptibles d'être déplacées lors de la phase d'installation, le caractère temporaire de cet impact restant toutefois à démontrer.

7.2.2. En phase d'exploitation

*** Changement de la nature du substrat :**

Les impacts potentiels sur cette composante de l'écosystème (le biotope) sont traités au chapitre 4. L'impact du fonctionnement des machines et/ou de la présence physique des fondations sur la nature du substrat (localisé autour des machines ou situé dans le champ éloigné) reste mal connu. Ce défaut de connaissances est d'autant plus grand que l'on s'intéresse à une échelle de déploiement industrielle importante (SGWTE, 2012 ; Polagye *et al.*, 2011).

Ce type d'impact ne concerne *a priori* pas les technologies hydroliennes au stade démonstrateur qui sont installées sur un substrat exclusivement ou essentiellement rocheux (roche affleurante ; blocs rocheux). Il peut en revanche concerner des dispositifs uniques implantés sur des substrats meubles (cailloutis, graviers) lorsque c'est techniquement réalisable, et les fermes hydroliennes de plusieurs machines (y compris celles installées sur substrat dur, mais à proximité de substrats meubles). Il est difficile de qualifier et de quantifier les impacts potentiels sur les sédiments très grossiers (blocs ; galets), donc pas (ou très peu) mobiles (SGWTE, 2012).

Une modification de la nature du substrat par le projet hydrolien (due à la présence physique des machines, du convertisseur et/ou du câble) peut s'accompagner d'un changement de la composition faunistique des communautés benthiques.

Sur les parties mobiles (pâles), la colonisation biologique des structures n'est pas recherchée, dans la mesure où le biofouling limite l'efficacité de la machine.

Sur et entre les objets installés sur le fond (embases/fondations des machines ; matériaux de protection du câble lorsqu'il est posé), l'effet « récif artificiel » prévaut et dépend de la nature des matériaux utilisés et de leur agencement sur le fond. Une épifaune se développe à la surface de ces objets immergés (Fig. 46), et on peut s'attendre à ce que la composition faunistique de

ces nouvelles communautés d'organismes se rapproche sur le long terme (10 ans) de celle des communautés de substrat dur naturelles environnantes, sans toutefois lui ressembler totalement (Thanner *et al.*, 2006). L'introduction de substrats durs artificiels peut aussi favoriser l'implantation d'espèces introduites (y compris des espèces invasives), voire favoriser leur expansion géographique en jouant le rôle de « tête de pont » (Sheehy and Vik, 2010). Cet effet « récif » a été mis en évidence sur les embases d'éoliennes en mer (Linley *et al.*, 2007). Cependant, la colonisation des structures en béton reste encore peu renseignée (DGEC, 2012), et il existe peu de retours d'expérience sur l'effet des structures métalliques (même pour ce qui concerne les plateformes en mer).

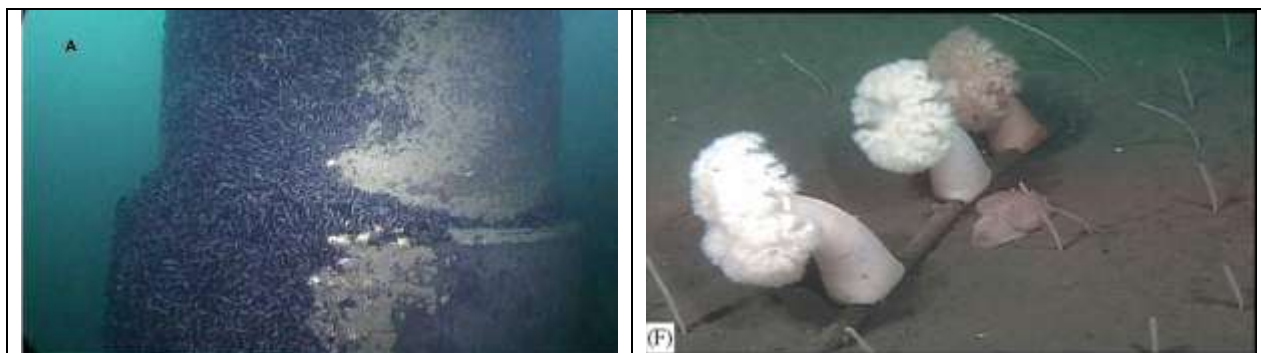


Figure 46 Colonisation de structures artificielles par des organismes benthiques de substrats durs (à gauche : embase de l'hydrolienne SeaGen ; à droite : câble d'observatoire marin (Kogan *et al.*, 2006))

Il peut également y avoir un effet « refuge » pour certaines espèces qui trouvent entre les structures artificielles des habitats favorables. Certaines formes de fondations ou certaines structures de protection des câbles posés peuvent accueillir des espèces benthiques potentiellement intéressantes du point de vue patrimonial ou commercial (grands crustacés) (Langhamer et Wilhelmsson, 2009).

* Changement de l'hydrodynamisme :

Concernant les changements faunistiques occasionnés par une modification de l'hydrodynamisme et/ou par des phénomènes d'extraction d'énergie cinétique autour des dispositifs installés, il existe en revanche un réel manque de connaissances. Cette question repré-

sente également un champ de connaissance à approfondir. Quelques retours d'expérience existent pour le benthos des fonds meubles autour des fondations d'éoliennes en mer ou de systèmes houlomoteurs (Langhamer, 2010) mais ils semblent difficilement transposables aux technologies hydroliennes.

Il sera nécessaire d'acquérir des données faunistiques selon un gradient de modifications hydrodynamiques liées au positionnement et au fonctionnement des hydroliennes (selon un transect orienté dans l'axe du sillage des machines par exemple), à une échelle spatiale qui sera fonction de l'échelle de déploiement des machines. La modélisation peut aider à identifier les secteurs à surveiller en priorité et ces derniers doivent être inclus dans la définition de l'état initial. Dans le

cas du projet SeaGen par exemple, les changements observés sur un tel transect étaient similaires à ceux de la zone de référence, donc difficilement imputables au changement hydrodynamique (Figure 42).

*** Modifications du champ électromagnétique :**

L'influence de l'électromagnétisme généré par les câbles en fonctionnement peut éventuellement engendrer un effet « barrière ». C'est une question générique, déjà abordée dans le cas des autres technologies EMR (Carlier et Delpech, 2011 ; OSPAR, 2008). Toutefois, certaines spécificités techniques et/ou environnementales propres aux technologies hydroliennes méritent d'être prises en compte pour mieux appréhender ce type d'impacts potentiels.

Parmi les espèces marines naturellement sensibles aux champs électriques et/ou magnétiques, les invertébrés benthiques sont a priori peu nombreux mais comptent en particulier certains grands crustacés. Les champs électriques générés par les câbles peuvent sembler infimes pour l'homme, mais sont souvent parfaitement perceptibles par les espèces naturellement électrosensibles. De façon générale, et du fait de la diminution rapide du CEM en fonction de la distance à la source, les espèces benthiques seront plus vulnérables à ces perturbations que les espèces pélagiques. En Angleterre, des mesures de champ électromagnétique réalisées à proximité des câbles de raccordement de deux parcs éoliens offshore en fonctionnement (Burbo Bank et North Hoyle) montrent que des espèces naturellement sensibles aux CEM pourraient détecter le champ artificiel du câble à 295 m de distance, ce qui représente un corridor de détection relativement large (Gill *et al.*, 2009).

Sur le plan expérimental, des travaux ont été menés sur le crabe *Rhithropanopeus harrisi*, le crustacé isopode *Saduria entomon* et la moule bleue *Mytilus edulis* en utilisant un champ magnétique statique de 3700 μ T. Les résultats n'ont révélé aucune différence (en termes de taux de survie) avec les groupes « témoin ». Sans parler d'impact réel, une sensibilité aux champs magnétiques artificiels semble avoir été démontrée pour les espèces marines suivantes : l'isopode *Idotea baltica* et les espèces de crustacés amphipodes *Talorchestia martensii* et *Talitrus saltator*.

Plus récemment, des expérimentations américaines ont porté sur plusieurs espèces d'invertébrés (crabe), soumis à des champs de faible intensité (0.1 à 3 mT). Les résultats préliminaires révèlent peu de différences significatives (en termes de croissance, survie, réponse physiologique ou comportementale) entre les groupes testés et les groupes témoin (Woodruff *et al.*, 2012).

En revanche, les travaux réalisés *in situ* sur les invertébrés sont pratiquement inexistant, l'essentiel des études portant sur des espèces de poissons, et en particulier l'anguille (voir chapitre 8).

*** Augmentation de la température :**

Les organismes benthiques sont sensibles aux variations (naturelles ou anthropiques) de température, même de faibles amplitudes (Hiscock *et al.*, 2004). En phase d'exploitation, le passage du courant électrique dans les convertisseurs et les câbles engendre une augmentation de la température autour de ces structures, pouvant éventuellement conduire à des impacts au niveau du benthos environnant. Ces impacts sont *a priori* très localisés dans l'espace dans la mesure où la chaleur produite par les câbles (et *a fortiori* par les convertisseurs) est vraisemblablement vite dissipée. Cependant, les retours d'expérience sont trop faibles (Merck et Wasserthal, 2009) pour que l'on puisse émettre des recommandations précises. Il existe un réel besoin d'expérimentation *in situ* et de suivis à petite échelle spatiale pour mieux caractériser les impacts possibles d'une augmentation de température sur le compartiment benthique.

*** effet « réserve » :**

Dans les cas où la zone d'implantation des machines et/ou la zone d'implantation du câble d'atterrissage sont fermées à toute autre activité humaine, un effet « réserve » peut se produire sur le long terme, dû à l'absence prolongée des impacts anthropiques pré-existants (pêche, extraction de granulats, plaisance, plongée sous-marine, etc.). Des études sont actuellement en cours sur les sites hydroliens et houlomoteurs écossais pour étudier la dynamique des populations de homards présentes sur les sites

d'implantation et les éventuels effets bénéfiques de ces sites (EMEC, 2012).

*** pollution chimique :**

Les risques accidentels de fuite et de diffusion de composés polluants (huile ; liquide de refroidissement ;...) ne peuvent pas être exclus totalement et concernent les 3 phases du projet (installation, exploitation/maintenance, et démantèlement).

Le risque chimique constitue toutefois un impact potentiel mineur pour le compartiment benthique compte tenu :

- de la nature des polluants potentiels : ceux-ci correspondent à des substances *a priori* peu toxiques (liquide de refroidissement des convertisseurs ; liquides des navires d'intervention) et ne sont pas susceptibles d'affecter spécifiquement le benthos (en se déposant sur le fond). La nature des substances potentiellement polluantes et leur caractère plus ou moins biodégradable restent toutefois à préciser.

- des quantités relativement faibles potentiellement libérées dans le milieu : les liquides de refroidissement des convertisseurs ou éventuellement contenus dans les câbles correspondent à de faibles volumes. Ces volumes restent toutefois à préciser.

Les risques de remaniement de sédiments pollués lors de la phase d'installation doivent également être considérés.

*** modifications du paysage sous-marin :**

Ce type d'impact ne concerne *a priori* pas les technologies hydroliennes immergées, installées par définition dans des zones à forts courants qui ne sont pas (ou très peu) recherchées par la communauté des plongeurs de loisir.

Il peut en revanche concerner la zone d'atterrage du câble, de façon temporaire (pendant les travaux d'installation), ou plus durable (si les habitats benthiques de l'estran sont modifiés).

7.2.3. En phase de démantèlement

Concernant la fin de vie de l'aménagement, une interrogation demeure quant à savoir si le fait de laisser des structures en place est moins impactant ou pas que le fait de les retirer. Dans les cas où la présence physique d'une fondation, d'un

câble posé sur le fond (et ses structures de protections) aura permis de créer un habitat nouveau sur lequel une communauté de substrat dur aura pu s'installer progressivement et durablement, le démantèlement pourra alors causer des perturbations sur la faune plus importantes que celles générées lors de la phase d'installation (Wilhelmsson *et al.*, 2010 ; Polagye *et al.*, 2011).

7.3. Identification des impacts cumulés

Les impacts cumulés sont importants à prendre en compte car l'impact global de plusieurs perturbations n'est pas simplement la somme des impacts de chaque perturbation considérée de manière indépendante (« 1 + 1 = 3 »). Cette question des impacts cumulés se pose de 2 manières :

- les impacts cumulés dus à la multiplication des machines dans l'espace et dans le temps (effet d'échelle) ;
- les impacts cumulés dus à la conjugaison des impacts du projet hydrolien avec les impacts d'autres pressions anthropiques sur la même zone et dans le même laps de temps.

Il est à noter que ces 2 catégories d'impacts cumulés ne sont d'ailleurs pas exclusives et peuvent générer des impacts cumulés de nature encore plus complexe. Par définition, ces impacts cumulés sont très difficiles à définir et donc à évaluer.

Concernant le compartiment benthique, les approches « à dire d'expert » révèlent que les impacts cumulés peuvent être très significatifs sur l'abondance et la distribution spatiale d'espèces sessiles, voire sur la composition faunistique des communautés situées dans la zone d'influence du projet hydrolien (Polagye *et al.*, 2011). Mais, encore une fois, ces impacts cumulés sont pour l'instant associés à une grande incertitude.

En considérant la première catégorie, on conçoit que les organismes benthiques peuvent être impactés fortement par une modification importante de la dynamique sédimentaire et/ou de l'hydrodynamisme due au fonctionnement de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de machines.

7.4. Description du programme de suivi environnemental

Le suivi environnemental a pour objectif de suivre, sur la durée de vie du projet hydrolien, l'évolution de la structure et du fonctionnement des communautés benthiques (c'est à dire leur biodiversité et leur fonction écologique) sur la zone potentiellement influencée par le projet et d'évaluer les changements au regard de l'état initial et du suivi de la zone de référence (Fig. 47, Tab. 26).

Du point de vue réglementaire, le programme de suivi fait partie de l'étude d'impact réglementaire, et est donc soumis aux services de l'Etat pour instruction.

Lorsque la phase d'installation intervient trop longtemps après la fin de l'évaluation de l'état initial (laps de temps supérieur à 3 ans entre le dépôt de l'étude d'impact réglementaire et les premiers travaux d'installation), il est alors nécessaire d'effectuer un dernier suivi d'état initial juste avant le début de la phase d'installation. Cela permet de s'assurer qu'aucun changement significatif n'est intervenu pendant ce laps de temps important.

Dans le cas de structures immergées et installées sur le fond, une opération de suivi de l'évolution des fonds marins est souhaitable rapidement après la fin de la phase d'installation, pour connaître les éventuels effets immédiats.

Ce premier suivi doit comporter 2 saisons (fin d'hiver et fin d'été) dont l'ordre dépend de la période à laquelle intervient la fin de l'installation.

Une stratégie d'évaluation optimale doit faire intervenir 2 autres suivis, 2 et 3 ans après la fin de l'installation (à raison de 2 saisons par an) pour comparer la variabilité inter-annuelle mesurée après l'installation avec celle mesurée pendant l'état initial. Cela permet de détecter d'éventuels impacts engendrés par des perturbations de faible intensité mais durables (modification de l'hydrodynamisme par exemple). Quoiqu'il en soit, un suivi est recommandé 5 ans après la fin des travaux pour évaluer l'impact de la phase d'exploitation.

Compte tenu du manque de recul scientifique sur la question des impacts de l'hydrolien sur les écosystèmes benthiques, la fréquence à laquelle les opérations de suivi ultérieures doivent intervenir est très difficile à déterminer à ce stade. En fonction des résultats obtenus durant les 5 premières années de fonctionnement du projet, les opérations de suivis peuvent éventuellement être prolongées à une fréquence inférieure à 5 ans.

Concernant la phase de démantèlement, il n'existe pas pour l'instant de recommandations spécifiques pour le suivi des impacts écologiques potentiels induits lors de cette phase. Bien que le démantèlement soit souvent considéré comme un processus inverse de l'installation occasionnant des perturbations similaires sur l'environnement, il est très difficile d'émettre des recommandations à ce stade. A noter qu'il n'existe de recommandations que pour le démantèlement des installations pétrolières et gazières offshore désaffectées (décision 98/3 de l'OSPAR).

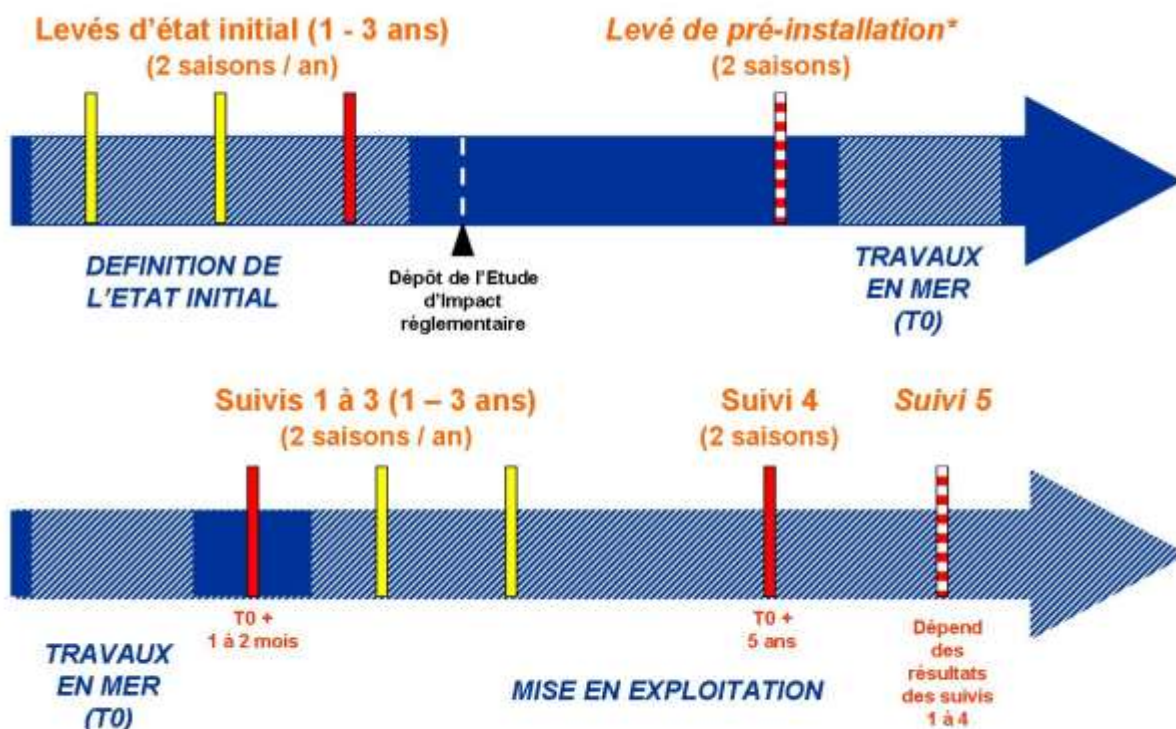


Figure 47 Schéma théorique de la stratégie de mise en place du suivi benthique sur la durée du projet hydrolien, de la définition de l'état initial à la fin de la période d'exploitation (la stratégie optimale d'évaluation des impacts comprend également les suivis représentés en jaune) * si les travaux d'installation interviennent plus de 3 ans après la fin de l'évaluation de l'état initial

	Définition de l'état initial	Suivi durant les phases opérationnelles du projet hydrolien			Suivi post-démantèlement
		Installation	Exploitation	Démantèlement	
Objectifs	Définir un état de référence du benthos. Identifier les habitats et espèces benthiques (animales, végétales) présents sur la zone, évaluer leur sensibilité, leur état écologique et leur variabilité spatio-temporelle	Evaluer les impacts des travaux d'installation des différentes composantes du projet (fondations des machines et convertisseurs ; ancrages ; câbles) sur le benthos	Evaluer l'impact de la présence et du fonctionnement des hydroliennes (effet récif éventuel ; changement des communautés benthiques environnantes) par une approche comparative de type BACI.	Evaluer les impacts des travaux de démantèlement sur le benthos	Évaluer les conditions de retour à un état écologique proche de l'état initial (ou de l'état écologique de la zone de référence)
Périmètre de l'étude	Aires d'étude potentiellement influencées par le projet (espèces benthiques fixées ; espèces benthiques mobiles) + zone de référence (hors influence du projet hydrolien)				
Durée	3 ans	Eventuellement juste avant (T0), et dans les 2 mois suivant la fin de l'installation (T0 + 2 mois) ; 2 saisons / an	Toute la phase d'exploitation (T0 + 2, 3 et 5 ans, avec 2 saisons / an ; puis fréquence de suivi à définir en fonction des résultats précédents)	A définir en fonction des technologies et du milieu	A définir en fonction des technologies et du milieu
Périodicité recommandée	2 saisons / an			A définir en fonction des résultats de l'état initial	

Méthodes		<p><i>Paramètres environnementaux :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - mesure des paramètres potentiellement modifiés et conditionnant la structure et le fonctionnement des communautés benthiques : courantologie ; température ; turbidité ; électromagnétisme ; acoustique. <p><i>Benthos / Fonds durs :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - suivis en plongée (si réalisable) : prélèvements quantitatifs de flore et d'épifaune (méga-faune et macrofaune) benthique avec quadrats ; imagerie photo et/ou vidéo sur quadrats et/ou transects. - suivis par imagerie vidéo : avec bâti suspendu, traineau benthique tracté, ROV. recenser les organismes épibenthiques (méga-faune ; éventuellement flore et macrofaune) sur des profils géoréférencés. <p><i>Benthos / Fonds meubles :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Prélèvements quantitatifs par bennes ou carottages, et/ou semi-quantitatifs par dragues. Le nombre de stations d'échantillonnage et leur répartition dépendra de l'hétérogénéité spatiale observée. Ces stations seront couplées aux points de prélèvements sédimentaires. <p>A chaque station, il est recommandé de réaliser au moins 3 répliquats (nombre à définir en fonction des spécificités locales et de la benne choisie) pour rendre compte de la distribution des espèces en un point donné et de leur dispersion.</p> <p>Selon la nature sédimentaire, les échantillons sont tamisés sur un tamis de maille de 1 mm (maille ronde de préférence) pour les sédiments fins ou envasés, et 2 mm pour les sédiments grossiers. Le refus est fixé (formol ; alcool) et fait l'objet d'analyses :</p> <ul style="list-style-type: none"> - tri biologique ; - identification au niveau taxonomique le plus bas possible (individus caractéristiques et espèces d'intérêt commercial) et comptage du nombre d'individus déterminés. <p>Pour définir l'état initial, une reconnaissance des fonds meubles par vidéo peut être envisagée pour compléter le suivi morpho-sédimentaire, et recenser la flore (en fonction de la profondeur) et la méga-faune épigée.</p>
Données à collecter		Liste des espèces présentes ; richesse spécifique ; abondance (ou indices semi-quantitatifs) ; biomasse (facultatif) ; liste des communautés ou faciès rencontrés
Présentation des résultats		<p>Les résultats sont présentés sous la forme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de tableaux indiquant pour chaque espèce (ou taxon), la position géographique de la station (ou profil), la sonde, la nature du fond (biotope), le nombre d'individus par m² (ou indice d'abondance). et l'écart-type pour chacune des stations échantillonnées, l'identification des espèces d'intérêt commercial ; les indices de qualité écologique du compartiment benthique (ex. indice M-AMBI) ; - de cartes à petite échelle de la distribution quantitative des espèces dominantes, patrimoniales ou d'intérêt commercial ; - d'une carte synthétique des principales unités biosédimentaires (communautés ; faciès) ; - d'une typologie des habitats observés selon les référentiels en vigueur (ex. : EUNIS).

Tableau 26 Résumé du programme de suivi du compartiment benthique

7.5. Mesures d'atténuation des impacts

Comme cela est précisé dans l'article R. 122-5 du code de l'environnement, des mesures d'atténuation doivent être présentées dans l'étude d'impact réglementaire pour pallier les impacts négatifs les plus notables du projet hydrolien.

Ces mesures d'atténuation ont pour objet de maintenir l'état écologique du compartiment benthique à un niveau proche de celui révélé par la définition de l'état initial et d'assurer ainsi un équilibre environnemental. Ces mesures doivent impérativement être considérées selon la logique du triptyque « éviter / réduire / compenser ». Chaque fois que cela est possible, les impacts négatifs doivent être évités (par exemple, en modifiant le tracé de la route du câble d'atterrage pour contourner un habitat benthique vulnérable). Lorsqu'un impact ne peut être évité, le porteur de projet doit faire en sorte que son intensité soit réduite au minimum (par exemple, en réduisant l'emprise spatiale des fondations sur le fond, ou en étalant dans le temps les travaux d'installation). Enfin, seulement après

avoir pris en compte les deux premières étapes, les impacts résiduels significatifs doivent être compensés (par exemple, en restaurant un habitat benthique endommagé).

D'autre part, les mesures d'atténuation doivent être proportionnées à l'intensité relative des impacts potentiels du projet et à leur probabilité d'occurrence. Toutefois, cela ne doit pas empêcher le porteur de projet d'appliquer le principe de précaution dès que cela se justifie.

7.5.1. Mesures d'évitement (ou mesures de suppression) :

Les mesures d'évitement peuvent comprendre la sélection de sites d'implantation alternatifs, la modification des méthodes d'installation, la modification du design des structures (ex. embase/fondations des machines).

La présence d'habitats ou d'espèces benthiques à fort intérêt écologique ou patrimonial (espèces protégées) et/ou particulièrement sensibles aux perturbations, (espèces « ingénieuses » à croissance lente) peut justifier le choix d'un site alternatif pour l'installation des machines ou la pose du câble (Fig. 48).

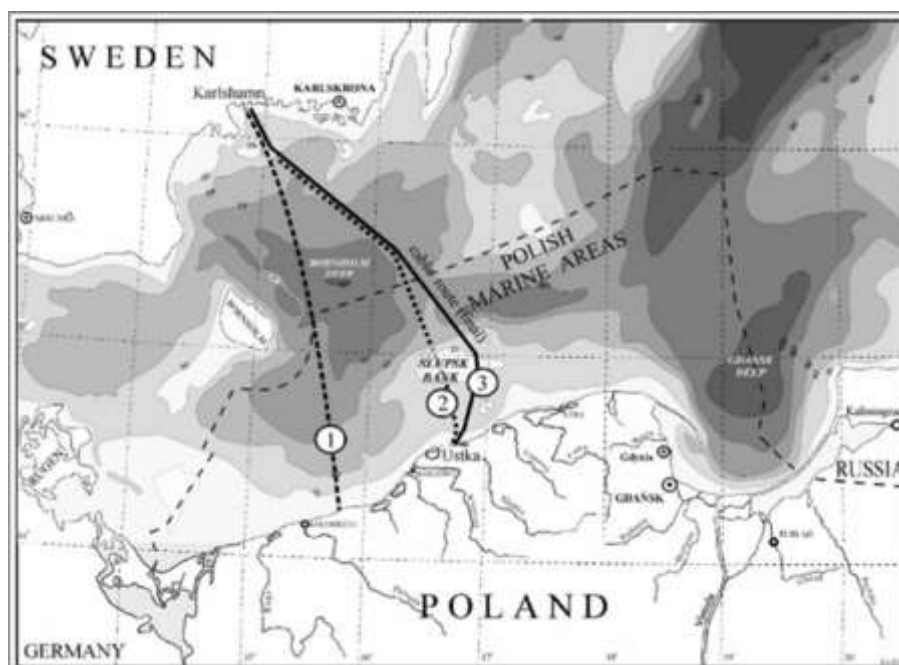


Figure 48 Modifications successives du tracé de la route du câble SwePol lors de la phase de planification dues à des conflits potentiels avec les usagers et à la présence d'une aire marine protégée (AMP) (Andrulewicz, 2003)

Une mesure d'évitement peut également concerner le choix de la période d'installation des éléments du projet pour épargner par exemple les périodes de migration de certaines espèces (ex. grands crustacés comme l'araignée de mer), ou les périodes de reproduction d'autres espèces.

7.5.2. Mesures de réduction :

Les mesures de réduction des impacts peuvent porter sur l'emprise spatiale sur le fond des fondations des machines, des convertisseurs ou des ancrages de façon à préserver l'intégrité des communautés benthiques présentes sur le site d'implantation. Celle-ci peut être significativement réduite par la conception d'embases posées sur un nombre limité de pieds. La conception de systèmes d'ancrage qui minimisent le phénomène de ragage des fonds par les chaînes doit être privilégiée.

Elles peuvent concerner la profondeur d'ensouillage du câble qui permet de diminuer les impacts potentiels du champ électromagnétique du câble sur des espèces benthiques sensibles (grands crustacés tels que les langoustes par exemple).

Concernant la modification de l'hydrodynamisme, il s'agit de limiter l'absorption d'énergie (diminution des courants) à celle strictement nécessaire pour la production d'électricité. Autrement dit, hormis les turbines, l'ensemble des éléments du projet hydrolien doivent être conçus de façon à minimiser la perturbation des courants, et ce, pour réduire l'impact possible sur les espèces benthiques sensibles à ce paramètre.

7.5.3. Mesures de compensations :

Ces mesures permettent de conserver un niveau convenable de biodiversité et de fonctionnalités au sein des écosystèmes benthiques impactés par le projet. Elles peuvent être de natures variées. Autant que possible, les mesures de compensation doivent porter précisément sur les espèces et/ou les fonctionnalités impactées et doivent être prioritairement mises en œuvre sur le site d'implantation ou à proximité immédiate. Par

exemple, un herbier de phanérogames détruit par l'installation du câble d'atterrage peut être replanté au même endroit (après installation) ou à proximité (sur un site judicieusement choisi, favorable à l'accueil d'un herbier).

Lorsque la compensation ne peut pas cibler le site du projet hydrolien lui-même, elle peut porter sur la préservation d'habitats benthiques voisins (similaires du point de vue écologique à ceux impactés par l'implantation des hydroliennes ou du câble). Elle peut également consister à favoriser une meilleure connaissance et une surveillance des écosystèmes benthiques concernés par le projet hydrolien.

7.6. Lacunes et programmes de recherche

Les connaissances fondamentales sur les écosystèmes benthiques côtiers restent parcellaires et insuffisantes pour anticiper les impacts potentiels de l'hydrolien sur ce compartiment. Cela est particulièrement vrai pour les écosystèmes de la zone circalittorale. Des recherches sont à mener pour identifier les espèces indicatrices des principales perturbations à attendre, et pour rendre les suivis environnementaux plus efficaces (plus ciblés).

L'impact des modifications de l'hydrodynamisme induites par l'exploitation des hydroliennes est mal connu, et constitue une problématique prioritaire pour les échelles de déploiement industrielles (fermes commerciales).

La caractérisation de l'effet « récif » des structures immergées, même si elle ne constitue pas un questionnement scientifique inédit, doit faire l'objet de suivis à long terme ciblant les différentes composantes des projets hydroliens (fondations ; câbles posés et leurs structures de protection). Il s'agit ici de mieux définir dans quelles mesures les communautés qui colonisent les substrats artificiels ressemblent aux communautés de substrats durs naturels (du point de vue de la biodiversité benthique et du rôle écologique).

L'impact du bruit généré par les projets hydrolien (et du bruit d'origine anthropique en général) sur les invertébrés benthiques reste très mal connu. Cette problématique fait actuellement l'objet de travaux collaboratifs (projet BENTHOS-COPE).

Les impacts de la modification du champ électromagnétique et de l'augmentation de température générés par le câble pendant la phase d'exploitation doivent être étudiés de manière approfondie, notamment par des approches de terrain (*in situ*).

Références clés

Keenan G., Sparling C., Williams H., Fortune F., 2011. SeaGen Environmental Monitoring Programme. Final Report. Royal Haskoning Enhancing Society.

Moura A., Simas T., Batty R., Wilson B., Thompson D., Lonergan M., Norris J., Finn M., Veron G, Paillard M. Abonnel C., 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 (EQUIMAR), 24pp.

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 No. NOAA Technical Memorandum NMFS F/SPO-116). U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.

Sheehan E.V., Gall S.C., Cousens S.L., Attrill M.J., 2013. Epibenthic assessment of a renewable tidal energy site. The Scientific World Journal, 2013 : 1-8.

8. Halieutique

Cette partie traite de l'ensemble des ressources halieutiques : poissons, crustacés et mollusques (céphalopodes, coquillages).

8.1. Description de l'état initial

8.1.1. Les méthodes

La connaissance de l'état initial via les données existantes (bibliographie) est un pré-requis, mais peut parfois se révéler inadéquat ou obsolète, et il est alors nécessaire d'obtenir de nouvelles données grâce à des opérations de terrain.

L'un des points à prendre en compte est la couverture temporelle de la variabilité naturelle puisque les conditions peuvent changer selon les saisons et d'une année à l'autre. La durée d'acquisition de ces données dépend de la sensibilité du site au projet et du compartiment étudié (identification d'espèces ou de zones fonctionnelles halieutiques d'importance comme les frayères et nourriceries), chaque site ayant ses caractéristiques propres. Les espèces à prendre en considération sont notamment celles inscrites sur la Liste Rouge de l'UICN (inventaire de l'état de conservation global des espèces, qui sont classées en neuf catégories) et celles des annexes de la Directive Habitats.

La caractérisation du site se fait au travers d'une description à large échelle de la distribution des poissons, crustacés et autres ressources halieutiques, de leur abondance et leur écologie dans et autour de la zone attendue d'influence de l'aménagement (Judd, 2012). Cette caractérisation comprend : i) l'identification des espèces importantes et/ou sensibles (dont les espèces migratrices) ainsi que de leurs habitats ; ii) la distribution et l'importance des pêcheries commerciales, y compris du point de vue temporel et spatial ; iii) les secteurs de frayère et nourricerie. L'une des sources d'information est la connaissance empirique locale des pêcheurs professionnels).

Il faut décrire les paramètres environnementaux qui pourront être affectés significativement par

des impacts positifs ou négatifs dus au projet ; ces paramètres relèvent des domaines physiques, chimiques, biologiques et socioéconomiques (Bald *et al.*, 2010).

L'objectif de cet inventaire environnemental est d'établir un « état zéro » qui sera comparé au programme de suivi et de surveillance afin de vérifier si les impacts réels correspondent à ceux prédits, et en conséquence d'être capable de réagir et de prendre les mesures correctives nécessaires pour le programme de suivi.

Il est important de souligner que le suivi de tous les paramètres environnementaux n'est pas toujours nécessaire ; on peut ne suivre que ceux qui seront en relation avec un impact possible de l'aménagement sachant que les poissons et ressources halieutiques (du point de vue socio-économique) sont considérés comme subissant un impact significatif (Solaun *et al.*, 2003, dans Bald, 2010).

Solaun *et al.* (2003) proposent ainsi une aide à l'identification des variables à prendre en compte :

- Des références historiques doivent être disponibles pour analyser leur évolution ;
- Elles doivent être comparables aux données collectées réglementairement ;
- Elles doivent conditionner la dynamique du système étudié ;
- Elles doivent être mesurables ;
- Leur signification doit être évidente ;
- Elles ne doivent pas faire doublon ;
- Elles doivent être compréhensibles par les non-spécialistes ;
- Elles doivent être faciles à utiliser et à reproduire.

En clair, les variables doivent être adéquates pour le cas étudié et permettre d'identifier les impacts et la plus forte variance susceptible d'apparaître au regard du temps disponible et du budget alloué pour la réalisation de l'étude.

Les méthodologies d'évaluation des communautés ichthyologiques relèvent de deux grands groupes : les méthodes par capture et les méthodes par observation (Tab. 27).

	Techniques	Typologie
Méthodes de captures	Pièges	Barrières, Casiers
	Chalutage/dragage/filets	Sennes (danoise, coulissante), Filets dérivants, Chalut semi-pélagique, Chalut de fond
	Hameçons et lignes	Palangres (de fond ou dérivante), Ligne à main
Méthodes d'observation	Observation visuelle sous-marine	Transects, Comptages saisonniers
	Hydroacoustique	Sondeur halieutique scientifique multi-fréquences
	Vidéo	Caméra vidéo avec ou sans plongeur

Tableau 27 Techniques d'échantillonnage des poissons utilisées dans les études en écologie (dans Bald et al., 2010, d'après Watson, 2008)

Une combinaison de techniques peut être utilisée : chalutages (fond et pélagique) et dragages afin de décrire les espèces présentes dans la colonne d'eau et sur le fond (y compris enfouies), méthodes acoustiques pour celles à populations réduites, observations visuelles pour celles qui échappent à ces techniques (Fig. 49). La ou les méthodes choisies dépendront des objectifs poursuivis (quelles espèces ou catégorie d'espèces sont recherchées [pélagiques, ben-

thiques...]) et des biais associés à chacune d'entre elles. Les avantages et inconvénients de chaque technique relèvent de: l'adaptation de l'engin au type de fond étudié, la sélectivité de l'engin (intra et interspécifique), des possibilités d'échappement, de la capacité à produire des indices d'abondance par unité de surface, de l'importance de la variance entre chaque prélèvement, des dommages occasionnés par la capture (Bald et al., 2010).

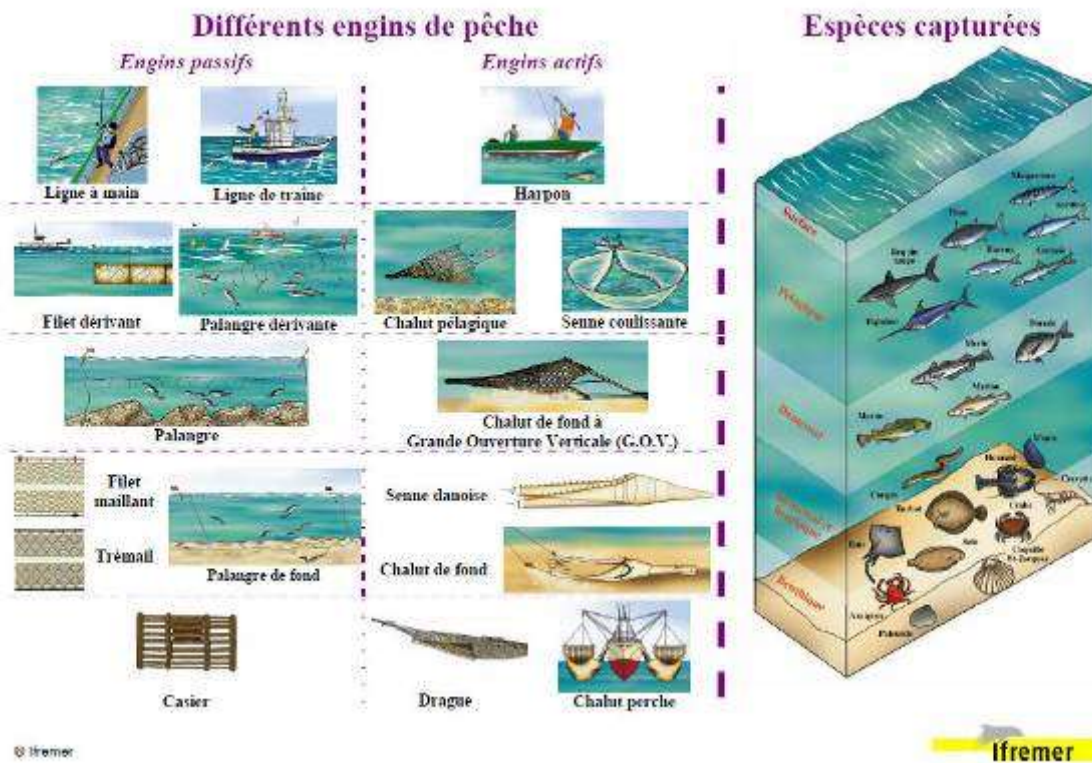


Figure 49 Techniques de pêche et espèces cibles (source Ifremer)

Les méthodes par observation sont intéressantes, mais les observations visuelles seront fortement contraintes par les courants et la turbidité du milieu.

Judd (2012) indique pour sa part que les études liées au compartiment halieutique pour caractériser le site doivent être considérées selon deux aspects : i) la biologie et l'écologie des principales espèces d'intérêt commercial et celles importantes du point de vue de la conservation ; ii) les pêcheries professionnelles et récréatives.

Dans le cas où des espèces d'intérêt commercial sont à prendre en compte, alors les engins et techniques utilisés par les pêcheurs professionnels locaux doivent être retenus pour les campagnes à la mer et, quand cela est possible, l'implication de ces derniers dans la mise au point du protocole et la collecte des données est fortement recommandée (Judd, 2012).

Judd (2012) propose ainsi une « *information box* » particulièrement intéressante pour analyser au préalable les données du problème :

1) Quelles sont les espèces de poissons et crustacés présentes sur le site et dans ses environs ?

- Lesquelles sont de grande importance pour les pêcheries professionnelles et récréatives (dont les élasmobranches –famille des requins et raies- car électrosensibles) ?

- Lesquelles ont une grande importance du point de vue de la conservation ?

- Lesquelles sont de grande importance en tant que proies pour les espèces d'intérêt commercial ou du point de vue de la conservation ?

- Y a-t-il d'autres espèces localement abondantes dans le secteur considéré ?

2) Pour les espèces d'intérêt commercial ou récréatif :

- Y a-t-il localement des secteurs importants de frayère ?

- Y a-t-il localement des secteurs importants de nourricerie ?

- Y a-t-il localement des secteurs importants de nourrissage ?

- Leurs voies de migration traversent-elles le secteur (le site est-il un secteur d'hivernage pour les crustacés ?) ?

- Y a-t-il localement des sites importants pour leurs proies ?

3) Pour les espèces importantes du point de vue de la conservation :

- Sont-elles présentes dans le secteur, et si oui quelle est leur abondance ?

- Ont-elles un habitat critique dans le secteur ou y sont-elles en transit ?

4) Si une espèce a un site de frayère dans le secteur :

- Quand vient-elle frayer ?

- La construction va-t-elle affecter l'habitat physique utilisé par les espèces qui déposent leurs œufs sur le fond ?

- De quelle manière les activités de construction vont influencer le comportement de frai et la nature physique des fonds du site de frayère ?

- Quelle est l'importance relative du secteur vis à vis de l'aire globale de frayère pour chaque espèce ?

5) Si une espèce a un site de nourricerie dans le secteur :

- Quelle est l'importance relative de l'habitat pour les espèces dans le secteur au sens large ?

- La construction va-t-elle réduire l'habitat disponible ou l'améliorer ?

6) Si l'aménagement est à proximité d'un estuaire :

- Quel est l'état des poissons diadromes (espèce de poisson migratrice qui effectue une partie de son cycle vital en fleuve-rivière et le reste en mer ou inversement) dans le secteur ?

- L'aménagement sera-t-il un frein à la migration des poissons diadromes dans le secteur, tout en prenant en considération le développement d'autres types d'aménagement estuarien et côtier ?

- Quelles sont les périodes de migration sur le site ?

- Le site est-il important pour la ponte des espèces estuariennes comme le flet qui pond en pleine mer ?

Il peut ne pas être approprié ou nécessaire d'étudier tous les impacts écologiques potentiels au même niveau de détail. L'effort peut être mis sur les éléments ou les ressources qui sont suffisamment importantes pour mériter une attention détaillée, et là où les impacts dus au projet sont connus pour avoir des effets majeurs (IEEM, 2010).

Judd (2012) propose un protocole d'échantillonnage qui décrit : i) la zone à prospecter (le site proprement dit et ses alentours immédiats) ; ii) le nombre de traits (5 minimum mais plus de préférence, en fonction de la dimension du site et afin de réduire la variance) ; iii) la saisonnalité (au printemps car période de ponte de nombreuses espèces de poissons, complété par des prélèvements en été et/ou en hiver afin de mieux cerner la saisonnalité des pêcheries) ; iv) tenir compte de la marée et échantillonner de jour et de nuit car cela peut influencer le comportement des espèces.

Il sera judicieux de choisir son protocole d'échantillonnage en fonction du comportement et de la présence des espèces ciblées par l'étude (exemple : de jour ou de nuit, en été ou en hiver). L'expérience en baie de Fundy (passage Minas) de suivi de la pose d'une hydrolienne OpenHydro par FORCE (Fundy Ocean Research Center for Energy, 2011) a consisté en la mise en œuvre d'une gestion adaptative avec des protocoles à caractère exploratoire et novateur, bien que dérivés de protocoles conventionnels.

Pour les poissons, l'utilisation d'écho-sondeurs et de chaluts pélagiques a permis de décrire le peuplement en place (présence, abondance, variations saisonnières), tandis que les mouvements de poissons ont pu être suivis grâce à l'utilisation de marques acoustiques (marques de type VEMCO et jeu d'une trentaine de récepteurs posés sur le fond ; cette technique est considérée comme pouvant être mise en œuvre pendant les phases pré-exploitation et exploitation de site hydrolien). En raison des forts courants, de la profondeur d'eau et de la turbidité, l'utilisation de vidéo et appareil photo a été difficile. Mais le tracking acoustique a permis d'observer le comportement de 3 espèces de poissons (bar, esturgeon américain et anguille) en conditions naturelles mais pas en fonctionnement de la turbine.

L'utilisation de filets dérivants a également prouvé son efficacité dans ces conditions de fort hydrodynamisme. Le suivi des captures de homards (technique de capture avec des casiers) a été réalisé avant et après l'installation de la turbine, avant et pendant la saison de pêche.

Dans le cas particulier des systèmes EMR type hydroliennes, qui sont par définition implantés dans des secteurs à très fort hydrodynamisme, il sera important de prendre en compte cette spécificité dans le choix des techniques à mettre en œuvre, qui devront être capables d'être opérées dans de telles conditions.

8.1.2. Définition de la zone potentiellement affectée et choix de la zone de référence

Pour réduire les impacts environnementaux, il est essentiel de comprendre comment les structures affectent le régime des courants à proximité immédiate (< 1 km), distant (1 à 10 km), ou à échelle régionale (> 10 km) (Shields, 2010).

La campagne à mener doit comprendre suffisamment de réplicats et la couverture géographique doit tenir compte de la nature mobile des populations de poissons (Judd, 2012).

Le site proprement dit comprendra l'aménagement hydrolien et le corridor des câbles reliant le site à la terre.

La zone d'influence de l'aménagement peut varier dans le temps, notamment entre phase d'installation et phase d'exploitation ; en effet les activités liées aux différentes phases vont changer. Leur localisation sera représentée sous forme de cartes. La zone d'influence devra être revue régulièrement et corrigée au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Si c'est approprié, elle sera identifiée à l'aide de modèles hydrodynamiques intégrant les facteurs de changement tels que le régime des courants, la température, la salinité et les sédiments. Ces modèles montreront l'extension possible des changements dans les différentes conditions et seront utiles pour estimer les impacts possibles sur les communautés en place. S'il n'y a pas d'information disponible afin de déterminer correctement la zone d'influence, il faudra le préciser (IEEM, 2010).

Lors de l'étape préliminaire d'analyse du projet, il peut être difficile d'identifier l'extension spatiale totale des changements induits par le projet, et il est alors conseillé de recourir au principe de précaution en s'assurant que les études comprendront tous les secteurs où les impacts sont susceptibles de se produire tout au long de la vie du projet (IEEM, 2010).

Notion de champ proche et de champ éloigné (Polagye *et al.*, 2011):

Le champ proche est le secteur dans lequel les perturbations issues des machines peuvent être facilement distinguées des autres perturbations naturelles ou anthropiques. Selon le paramètre environnemental considéré (hydrodynamisme, bruit, électromagnétisme...) la distance à prendre en compte par rapport à la turbine va varier. Elle passe ainsi de quelques mètres (pour un stimulus visuel sous-marin, à plusieurs dizaines de mètres (pour les perturbations hydrodynamiques du rotor ou du support de la structure), et jusqu'à plusieurs centaines de mètres (pour les stimuli acoustiques). Dans le domaine physique, ce champ proche comprend les éléments de l'environnement immédiat de la turbine pour lesquels les effets directs spécifiques de la turbine peuvent être détectés. Ces éléments sont les mouvements d'eau (hydrodynamisme, courants, pression, stratification), la qualité de l'eau (propriétés physiques, biologiques et chimiques, comme la turbidité, l'oxygène dissous, la chlorophylle, les nutriments...), les bruits et champs électromagnétiques, et les propriétés des sédiments. Cette combinaison d'éléments contribue aux caractéristiques biologiques du secteur et est donc un paramètre clé à observer. Le caractère significatif des effets de ces éléments sera propre à l'environnement considéré et à l'échelle du projet (un projet pilote étant considéré comme ayant probablement peu d'effets).

Le champ éloigné est le secteur dans lequel les perturbations issues des machines ne peuvent pas être facilement distinguées des autres perturbations naturelles ou anthropiques, contrairement au champ proche. Dans le domaine physique, ce champ est défini comme étant le secteur entourant les machines au-delà duquel le caractère spécifique du parc n'est plus directement discernable. Les éléments à considérer sont

la qualité de l'eau, la production primaire, le transport sédimentaire et la nature de la zone intertidale.

Mais il est souvent difficile de positionner une station de référence dans un secteur à fort courant. Des différences à petite échelle dans les habitats ou le régime des courants, peuvent faire que le point d'échantillonnage choisi ne correspondra pas à cette définition (Polagye *et al.*, 2011).

8.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

L'environnement physique (nature du substrat, courants, dynamique sédimentaire...) conditionne largement le compartiment biologique : la faune et la flore benthique associées, qui eux-mêmes constituent une part importante de la diète des prédateurs (dont les poissons) vivant dans la colonne d'eau (Sotta *et al.* 2012).

D'une façon générale, la superficie des habitats qui va être perturbée dépend du type de machine (technologie employée) et de leur type de fondation, ainsi que du nombre de machines qui vont être installées (prototype, essai, parc industriel).

Il est nécessaire de prendre en compte l'échelle des structures individuelles et celle du parc qui sera installé. En effet une structure unitaire aura un impact très différent de celui d'un parc, aussi est-il nécessaire de choisir un programme de recherches basé sur les impacts de ces structures en tenant compte de cette échelle. (OSPAR, 2006).

Les effets sur les ressources biologiques doivent inclure l'altération du comportement des animaux, les dommages et la mortalité des individus, et potentiellement de plus grands changements à long terme pour les populations et communautés animales (Gill, 2005 ; DOE, 2009).

Les impacts d'une installation hydrolienne, tels que le bruit ou les interférences avec les autres activités, peuvent être compris comme des pollutions au regard de la Directive Cadre Stratégie du Milieu Marin DCSMM (Bald *et al.*, 2010). En effet,

à l'article 3.8, la pollution est définie comme « l'introduction directe ou indirecte dans le milieu marin, par suite de l'activité humaine, de substances ou d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines d'origine anthropique, qui entraîne ou est susceptible d'entraîner des effets nuisibles pour les ressources vivantes et les écosystèmes marins, et notamment un appauvrissement de la biodiversité, des risques pour la santé humaine, des obstacles pour les activités maritimes, et notamment la pêche, le tourisme et les loisirs ainsi que les autres utilisations légitimes de la mer, une altération de la qualité des eaux du point de vue de leur utilisation, et une réduction de la valeur d'agrément du milieu marin, ou, globalement, une altération de l'utilisation durable des biens et des services marins ».

Rappelons le cadre de la DCSMM et la décision de la Commission européenne du 1er septembre 2010 relative aux critères et aux normes méthodologiques concernant le bon état écologique des eaux marines, au travers notamment des descripteurs 7 et 11 :

- Descripteur 7: une modification permanente des conditions hydrographiques ne nuit pas aux écosystèmes marins :

Les modifications permanentes des conditions hydrographiques provoquées par les activités humaines peuvent être, par exemple, des changements intervenant dans le régime des marées, dans le transport de sédiments ou d'eau douce ou dans l'action du courant ou des vagues qui modifient les caractéristiques physiques et chimiques présentées à l'annexe III, tableau 1, de la directive 2008/56/CE.

- Descripteur 11: l'introduction d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines, s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin :

Outre les sources sonores sous-marines, qui sont traitées dans la directive 2008/56/CE, d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie thermique, les champs électromagnétiques, le bruit et la lumière, peuvent avoir un impact sur les composants des écosystèmes marins.

En effet, l'objectif des études d'impact et des suivis écologiques est bien désormais d'évaluer si

les activités humaines existantes ou en projet sont compatibles avec le Bon Etat Ecologique des eaux marines tel que défini par la DCSMM.

8.2.1. En phase d'installation

L'installation d'hydroliennes peut causer des perturbations significatives sur l'environnement local. En dehors du fait que les structures (machines et câbles) resteront en place, la plupart des effets liés à l'installation sont considérés comme temporaires (de quelques semaines à quelques mois, avec quelques effets résiduels). Les facteurs de stress lors de cette phase comprennent le bruit, l'augmentation du trafic de navires, la perturbation des habitats associée à l'installation des ancres et des câbles (Polagye *et al.*, 2011).

Impacts liés au bruit (descripteur 11a de la DCSMM):

La diversité des systèmes auditifs chez les poissons est plus grande que chez les mammifères marins parce qu'il existe différents groupes d'espèces selon leurs caractéristiques anatomiques (Nedwell *et al.*, 2004 ; Thomsen *et al.*, 2006).

Certains poissons utilisent les sons pour localiser leurs lieux de nourrissage et on suppose que le bruit peut interférer avec cette capacité (Langhamer *et al.*, 2010). Plusieurs espèces utilisent le bruit pour communiquer et pour détecter leurs proies et leurs prédateurs. Bien que les poissons de la famille des gadidés (exemples : cabillaud, merlan, tacaud) répondent par la fuite aux coups de canons à air des appareils sismiques, leur comportement ultérieur et leur distribution ne sont pas affectés. Chez ces espèces, la communication par les sons est une composante essentielle du comportement en période de reproduction, et il est connu que le battage de pieux ou d'autre pollution sonore peut perturber ce comportement (Moura *et al.*, 2010).

Si les installations nécessitent des battages de pieux, l'utilisation d'explosifs ou de campagnes de sismique, il est probable que le niveau de bruit environnant excède les seuils pour la protection des poissons (à l'échelle des individus ou des populations) et des mammifères marins (MMS, 2007 ; Frid, 2012). En général la réaction des

poissons est d'éviter les zones de battage de pieux. Quoiqu'il en soit, les juvéniles et les espèces de petite taille auront probablement plus de difficultés à s'échapper que les grandes espèces et les pélagiques (Engas *et al.*, 1996).

Selon Gill (2005) des bruits supérieurs à 260 dB peuvent causer des dommages auditifs à certaines espèces dans un rayon de 100m.

Les études menées dans le cadre de COWRIE ont montré que des niveaux relativement bas de pression acoustique (gamme de 140-161 dB re 1 mu.p) entraînent un changement dans le mode de déplacement du cabillaud et de la sole. Après avoir entendu le son à plusieurs reprises, la réponse de ces deux espèces est moins vive que la première fois, indiquant que les poissons peuvent s'habituer au bruit. Des études complémentaires sur cette adaptation doivent être engagées pour gérer les effets du battage de pieux sur les poissons marins (Sotta *et al.*, 2012).

Il peut y avoir des dommages physiologiques soit temporaires soit permanents qui peuvent affecter la survie de l'animal. Par exemple les harengs sont sensibles à de soudaines augmentations de pression acoustique (lors du battage des pieux) qui peuvent entraîner des dommages à leur oreille interne et les rendre plus vulnérables aux prédateurs. Les clupéidés (ex hareng) ont un seuil de sensibilité très bas allant jusqu'aux ultrasons et leur comportement et distribution sont davantage affectés. Le hareng est connu pour émettre des sons en utilisant sa vessie natatoire pour relâcher des bulles d'air via son tube digestif, ce qui peut avoir un rôle dans la communication. Une exclusion temporaire de son aire de reproduction ou une perturbation de son comportement pendant la période de ponte peut avoir de sérieuses conséquences pour la population (Moura *et al.*, 2010).

Les effets du bruit sur les invertébrés marins demeurent mal connus (Moriyasu *et al.*, 2004). Les invertébrés représentent une grande diversité de groupes faunistiques (ex : mollusques, crustacés) et on ne peut donc pas généraliser les effets à l'ensemble de ces groupes. La possibilité de réaction est connue pour être très variable et peu d'informations sont disponibles quant aux effets potentiels à différents stades de leur vie (Sotta *et al.*, 2012).

Impacts liés à la perturbation des habitats (descripteur 6 de la DCSMM):

L'utilisation de l'habitat et les modalités de migration des espèces sensibles doivent être étudiées durant la période de construction des machines. Pour les espèces marines qui évitent le secteur en construction, cette phase entraîne inévitablement une perte d'habitat qui peut comprendre des secteurs de nourrissage, de ponte, de reproduction et de repos (dans le cas des espèces migratrices) (Sotta *et al.*, 2012).

Boehlert *et al.* (2008) notent que lors des phases d'installation et d'exploitation, les systèmes EMR peuvent causer des changements dans les structures physiques des écosystèmes benthiques et pélagiques, donc des habitats.

Impacts liés à la qualité de l'eau (descripteur 4 de la DCSMM):

L'impact sur la qualité de l'eau et les communautés benthiques durant la phase d'installation est considéré comme de courte durée et donc les ressources en nourriture pour les poissons ne seront pas significativement altérées (Gill, 2005). Les poissons fuient en général les secteurs dont les eaux sont très turbides. De fortes quantités de matières en suspension peuvent causer des dommages aux branchies chez les jeunes poissons.

8.2.2. En phase d'exploitation

Les turbines en rotation, le bruit sous-marin, les polluants chimiques et les champs électromagnétiques sont souvent cités comme facteurs de stress associés au fonctionnement des machines. D'autres facteurs de stress, même s'ils sont moins bien connus, sont ceux associés au prélèvement d'énergie et aux effets cumulés dus aux interactions entre divers paramètres environnementaux ou à la multiplication des machines. Par exemple, quand les machines ne sont pas en fonctionnement (i.e. les courants sont en-dessous de la puissance de mise en action des machines), les effets acoustiques, électromagnétiques, prélèvement d'énergie et effets dynamiques (rotation des hélices), et donc les facteurs de stress sont réduits. Selon le régime des courants et le design des machines, une turbine peut fonctionner presque en continu ou moins de la moitié du

temps. Il n'y a pas d'effet attendu en raison de la capture d'énergie à l'échelle de projet pilote/démonstrateur (Karsten *et al.*, 2008 ; Polagye *et al.*, 2009).

Les récepteurs halieutiques de l'environnement marin (poissons, crustacés, céphalopodes...) peuvent aussi varier dans le temps (par. ex. variation saisonnière, comportement migratoire) et peuvent être exposés à d'autres facteurs de stress d'origine anthropique. Aussi les interactions entre les paramètres environnementaux en phase opérationnelle et les récepteurs peuvent avoir une plus grande variabilité temporelle que celle des paramètres environnementaux eux-mêmes ou celle des récepteurs (Polagye *et al.*, 2011). Des considérations semblables peuvent s'appliquer à la variabilité spatiale des paramètres environnementaux (p. ex. les niveaux acoustiques reçus vont varier en fonction de la proximité des machines en fonctionnement), des récepteurs (p. ex. les espèces ne sont pas uniformément réparties dans un secteur géographique donné), et de leurs interactions.

Un fonctionnement normal d'un parc hydrolien implique des activités liées à la **maintenance**, ce qui suppose la remise en surface de la machine ou de ses composants. Plusieurs des paramètres environnementaux associés à la maintenance sont semblables à ceux rencontrés en phase d'installation (par. ex. l'augmentation du trafic de navires).

Il n'y a pas suffisamment de données pour statuer définitivement sur l'impact des hydroliennes en fonctionnement sur les poissons et leurs habitats (Frid, 2012). Les observations faites dans le cadre du projet hydrolien Roosevelt Island sur la East River à New-York (Anon, 2008) ont montré que le nombre de poissons dans et autour des turbines était généralement faible (une fourchette de 16 à 1400 individus observés par jour) et que les poissons étaient majoritairement de petite taille. Des vidéos sur le site ont montré qu'il n'y avait en général pas de poisson quand la vitesse du courant était supérieure à 0.8 m/s et que les turbines tournaient (Polagye *et al.*, 2011).

Le bruit (voir aussi les chapitres 8.2.1 et 6.3):

La solution au problème des impacts liés au bruit suppose de connaître la signature acoustique des structures (par exemple les niveaux de bruit dans toute la gamme de fréquence) aussi bien pour les structures unitaires que pour les parcs, la caractérisation du bruit ambiant au voisinage du parc, la sensibilité auditive des poissons (et mammifères marins) fréquentant le site, et leur réponse comportementale vis-à-vis du bruit d'origine anthropique (p. ex. l'évitement, l'attraction, le changement dans le comportement en banc ou migratoire) (Frid, 2012).

Il est probable que les poissons s'accommodent d'un bruit relativement continu comme observé dans beaucoup de ports et dans d'autres circonstances impliquant des activités humaines (trafic maritime, plongée) (Schwartz, 1985 ; Wahlberg et Westerberg, 2005 ; dans Sotta *et al.*, 2012). Mais l'étendue des impacts que le bruit peut avoir dépend des conditions météorologiques, de la composition du fond marin et de plusieurs autres variables liées aux spécificités du site (Folegot, 2010).

Les champs électromagnétiques (CEM) : voir aussi l'encart « CEM » et les chapitres 7.2.2 (effet barrière) et 7.5.2

Certains espèces marines sont électrosensibles et d'autres magnétosensibles. Par exemple certains poissons (en particulier les anguilles et les requins), utilisent le champ magnétique terrestre pour leur orientation, navigation et migration (Kirschvink *et al.*, 2001), tandis que les faibles champs électriques peuvent être utilisés par certains poissons (groupe des élasmobranches : raies et requins) également pour la localisation de leurs proies (interactions proies-prédateurs). Des impacts physiologiques sur la mortalité ou le succès de la reproduction peuvent être déterminants pour certains de ces organismes, tandis que des réponses comportementales, telles que la migration ou la formation de bancs, peuvent apparaître plus critiques pour d'autres. La durée (à court ou à long terme) et le type d'exposition (p. ex. courant alternatif ou continu, permanent ou temporaire) peuvent constituer un autre facteur de complexité (Polagye *et al.*, 2011). Les anguilles en cours de migration peuvent détecter les CEM émis par un câble triphasé de 130 kV non ensuil-

lé mais ça n'interrompt pas leur migration (Westerberg et Lagenfelt, 2008).

Mais il est préférable que les informations sur les habitats et voies migratoires des espèces sensibles soient prises en compte dans la planification spatiale et l'installation des câbles (Sotta *et al.*, 2012).

De nombreux travaux sur le sujet des CEM ont été menés dans le cadre du programme COWRIE et ont montré qu'il y avait une interaction entre les espèces électrosensibles et les CEM engendrés par les câbles des éoliennes offshore (Gill, 2005 et 2009). Cependant, il a été également montré que bien que les organismes puissent être affectés au niveau cellulaire ou comportemental, à ce stade il n'était pas possible de déterminer quel type de réponse on pouvait attendre et si c'était considéré comme positif ou négatif. Les réponses enregistrées ne sont donc pas prévisibles et semblent très propres à l'espèce et peut-être même à l'individu.

Résultats d'études in situ :

Plusieurs études *in situ* ont été menées dans le sud de la 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 (AC) submergé (intensité du CM produit : 5 μ T à 60 m de distance). Les résultats tendent à montrer que la trajectoire des poissons était déviée au niveau du câble, mais la faible résolution spatiale de la méthodologie employée n'a pas permis d'apporter des preuves solides. Au niveau d'un parc éolien offshore, la même technique appliquée à la même espèce n'a pas permis de mettre en évidence un changement dans le comportement migrateur, du moins pas au-delà de 500 m des éoliennes.

Enfin, une étude plus récente menée en Mer Baltique (proche de l'île d'Öland) a permis de montrer que la vitesse de nage des anguilles était significativement plus faible au niveau d'un câble non ensouillé (AC ; 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). Les auteurs jugent 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.

Des investigations de terrain ont aussi été menées sur le câble du parc éolien offshore danois de Nysted (AC ; 132 kV) entre 2001 et 2004, pour mesurer l'impact du CEM sur le comportement de quatre espèces de poissons (le cabillaud, le hareng de la Baltique, l'anguille et le flet: DONG Energy, 2006). Les données collectées semblent indiquer des comportements d'évitement ou d'attraction selon les espèces, mais restent trop parcellaires pour pouvoir être interprétées sans ambiguïté. Au cours de l'étude, seul le flet (*Platichthys flesus*) montrait une corrélation entre son comportement et la puissance estimée du CEM (mais celle-ci n'a pas été mesurée directement).

Au sein du parc éolien danois de Vindeby, le champ magnétique généré par le câble de raccordement (AC ; 10kV ; courant maximal pour chacune des phases du câble de 260 A) a été calculé en fonction de la distance au câble (Engell-Sørensen, 2002). L'intensité du champ magnétique serait de 33.1 μ T à un mètre et 3.31 μ T à 140 mètres. L'auteur estime que les poissons sensibles aux champs magnétiques et évoluant près du fond pourraient être affectés par ce champ dans une bande de un mètre de distance de part et d'autre du câble. A une distance de plus d'un mètre, ce champ magnétique n'est plus distinguable du champ magnétique terrestre, qui est d'environ 50 μ T dans cette région.

En Angleterre, des mesures de champ électromagnétique réalisées à proximité des câbles de raccordement de deux parcs éoliens offshore en fonctionnement (Burbo Bank et North Hoyle) montrent que des espèces naturellement sensibles aux CEM pourraient détecter le champ artificiel du câble à 295 m de distance, ce qui représente un corridor de détection relativement large (Gill *et al.*, 2009).

La pollution chimique (descripteur 8 de la DCSMM):

Ce type de pollution est considéré comme un faible facteur de stress pour les poissons, aussi bien à l'échelle de parc pilote que commercial. Polagye *et al.* (2011) estiment que ce risque est plus important pendant les phases d'installation, maintenance et démantèlement des installations,

en raison des risques plus élevés de collision en mer).

Dans le cas d'utilisation d'anodes sacrificielles pour protéger les structures métalliques immergées, le zinc libéré peut présenter un risque pour la faune marine.

Antifouling : voir paragraphe sur le plancton en fin de chapitre

L'augmentation de température :

L'impact de la pollution thermique sur les populations de poissons présente des caractéristiques analogues à celles déjà mentionnées pour d'autres organismes (effet sur le métabolisme, la reproduction, le comportement). Mais la grande mobilité des poissons fait qu'ils rechercheront des zones correspondant à leur préférendum thermique (MEDDE, 2012).

Interactions avec les poissons en mouvement (Moura *et al.*, 2010) :

- Collision et coups : exclusion et fuite

Une collision est définie ici comme une interaction entre animal et machine qui peut engendrer une blessure physique (il y a contact entre les deux). Les poissons vont percevoir la présence des machines comme la résultante d'un signal visuel ou sonore. Ils peuvent répondre à ce signal soit directement, soit par apprentissage. Les réponses des animaux à de tels signaux sensoriels peuvent être à différentes échelles mais sont rangées en deux catégories selon la menace perçue : exclusion ou fuite.

- En général, l'exclusion intervient à une échelle plus grande que celle de la taille de l'animal considéré. Cette exclusion sera à une telle échelle spatiale que l'animal sera tenu éloigné de toutes les parties de la machine. A cette échelle, il est peu vraisemblable que la détection visuelle joue un grand rôle. Les sons émis par les machines peuvent en revanche être détectés à une distance telle que l'exclusion soit possible.

- La fuite est définie comme la réponse directe à une agression ou à une agression perçue. Les poissons et aussi beaucoup d'invertébrés sont capables de telles réactions de fuite face à de tels signaux, souvent relayés neurologiquement par des réponses réflexes, dans le but d'échapper à des prédateurs ou pour préve-

nir une collision avec un objet immergé. Un modèle de fuite basé sur les réponses visuelles à des objets menaçants a été développé pour Equimar, et les résultats préliminaires indiquent que pour les poissons la probabilité de fuite augmente avec la taille du poisson, comme la vitesse maximale de nage augmente, mais est aussi dépendante de l'épaisseur des pales des hélices. La vitesse de rotation des turbines est aussi critique. Le risque de collision augmente rapidement à des vitesses de courant supérieures à 2 m s^{-1} .

- Il existe des modèles en écologie qui estiment le taux de rencontres de ce type (Wilson *et al.*, 2007) ; ils ont été utilisés en Ecosse pour prédire le taux de rencontre entre les vertébrés marins et les hélices des turbines hydroliennes. Le taux de rencontre dépend de la variation spatiale et temporelle du comportement des individus à l'intérieur du parc. En effet, bien que certaines espèces puissent être présentes dans un secteur donné, leur interaction avec les systèmes hydroliens va dépendre de leur répartition spatiale (dont verticale) et de la façon dont cette répartition varie à différentes échelles temporelles (diurne, tidale et saisonnière par exemple). Par exemple, les poissons peuvent éviter les courants de marée les plus intenses en se déplaçant vers des secteurs abrités (baies) d'intensité hydrodynamique moindre, ou en se rapprochant du fond.

- Effets de la pression (cavitation) et risque de cisaillement :

Les phénomènes de cavitation liés à la turbine peuvent avoir des effets sur les poissons : leurs vessies natatoires ne devraient pas être endommagées par une rapide augmentation de pression, causant une réduction de volume, mais pourraient l'être par une rapide expansion durant la phase de réduction de la pression.

L'autre effet possible est sur l'audition : les clupéidés (hareng, sardine...) ont des structures gazeuses qui peuvent être endommagées par de rapides variations de pression. Leur comportement ultérieur et leur capacité à fuir leurs prédateurs pourraient alors être altérées et entraîner une diminution de leur survie.

Les animaux peuvent aussi être endommagés par des cisaillements dus aux parties mobiles des machines. Cette sensibilité varie beaucoup selon

les espèces, les plus vulnérables étant celles qui peuvent perdre facilement leurs écailles (comme le hareng).

La survie des larves et juvéniles de poissons rencontrant des hélices d'hydroliennes est actuellement mal connue. Des études en bassin d'essais ont été menées sur trois espèces de poissons d'eaux douces (Schweizer *et al.*, 2012) et ont montré qu'il y a des différences de mortalité selon les profils des pales, la vitesse d'écoulement de l'eau, selon les espèces et leurs stades de vie (larves ou juvéniles).

Les niveaux de mortalité directe de poissons passant au travers des turbines peuvent être élevés (Deng *et al.*, 2011).

Interactions avec les migrations des animaux :

La mise en place de systèmes hydroliens à grande échelle (industrielle) peut potentiellement perturber les schémas de déplacement des animaux marins. Dans ce domaine, les questions posées sont les mêmes que celles liées aux effets du bruit. Tout élément qui entraîne un animal à changer ses voies migratoires peut avoir un effet à long terme sur le devenir des individus et leur contribution au recrutement (*fitness* en anglais). Si l'évitement nécessite de nager sur une plus grande distance, il y aura un surcoût énergétique direct. Si l'évitement nécessite de nager dans des conditions moins favorables, p. ex. un risque de prédation accru ou des opportunités d'alimentation diminuées, il y aura de nouveau un coût direct sur la *fitness* des individus (Moura *et al.*, 2010).

Il y a des interactions directes potentielles possibles entre les turbines en mouvement et les poissons migrateurs ou résidents (à leurs différents stades de vie). Ce point est de grande importance pour ce qui concerne les espèces en danger ou menacées.

Cas des poissons migrateurs : les poissons migrateurs comme les salmonidés sont souvent considérés comme étant en danger et à ce titre protégés par des réglementations ad'hoc. Les salmonidés (saumon, truite de mer) et autres poissons anadromes sont connus pour utiliser les courants de marée pour leur navigation dans les zones à forts courants (Moser et Ross, 1994 ; Levy et Cadzow, 1995 ; Barbin, 1998 ; Lacoste *et al.*, 2001 ; Metcalfe et Hunter, 2003).

L'installation de système hydrolien dans des corridors écologiques (voies migratoires) entre la côte et le plateau continental peut affecter directement certaines espèces à des stades particuliers de leur vie (ex élasmobranchés – famille des requins et raies- et salmonidés) conduisant à des changements de comportement.

De nombreuses espèces de poissons dépendent partiellement des courants pour le transport des petits individus. En conséquence, les structures qui ont un impact sur le régime des courants entre les aires de ponte et de nourrissage peuvent être dommageables, affectant ainsi la connectivité écologique et les relations trophiques (CIEM, 2011 ; Shaw, 1982).

Les populations de poissons peuvent être affectées par les changements dans la sédimentation, la turbidité et les flux de courants, aussi bien que par tout changement du benthos. Ces facteurs sont capables d'affecter les populations de poissons à différents stades de vie, avec des effets sur les frayères et les voies migratoires (Bell et Side, 2011).

Pour les poissons migrateurs diadromes dont les populations sont classées comme étant en danger (ex : liste américaine Endangered Species Act), selon Polagye *et al.* (2011) un « zéro impact » peut être demandé, au point que leur présence dans la zone puisse nécessiter l'arrêt des turbines. Tandis que pour les autres espèces, un niveau de blessures, mortalité ou changement de comportement peut être acceptable.

Il est improbable que les hydroliennes affectent les processus de reproduction et de recrutement sauf à ce que les structures unitaires soient très rapprochées. Dans de tels cas, il pourrait y avoir un effet sur le transport larvaire et le recrutement lié aux changements dans les courants et le substrat (Frid, 2012).

Mais d'une façon générale il est admis que la connaissance du comportement des poissons en interaction avec les hydroliennes est limitée et insuffisante pour en comprendre parfaitement les effets potentiels.

Effets liés à la présence physique des installations:

1) l'effet récif :

Tout comme les épaves, qui attirent les poissons qui bénéficient d'une protection par ces structures, ces dernières (systèmes d'ancrage, supports de turbines, enrochements de protection) seront recouvertes d'un bio-film et deviendront des récifs artificiels (Hiscock *et al.*, 2002). En général, les récifs artificiels sont colonisés assez rapidement. Ces structures immergées peuvent devenir des habitats intéressants pour des espèces mobiles (dont des poissons d'intérêt commercial), des crustacés et des mollusques, mais aussi des espèces invasives. De telles attractions peuvent entraîner des changements dans la composition spécifique de la zone d'étude et modifier les relations proies-prédateurs (Boehlert, 2008).

Une faune opportuniste peut envahir les récifs (Gill, 2005, dans Sotta *et al.* 2012), augmentant la compétition inter-spécifique. Il s'agit d'une invasion « subspontanée » car liée à une modification de l'habitat due à l'homme. La dominance peut alors être le fait des espèces ayant les plus fortes capacités d'adaptation (Milinski et Parker, 1991) et aura un effet en cascade sur la composition de la faune locale (Pimm, 1991 ; Daskalov, 2002).

D'une façon générale, il convient d'être prudent sur cet effet récif et il faut optimiser leur localisa-

tion en prenant en compte leur conception, tout en gardant à l'esprit que le site aura été choisi pour sa productivité énergétique et non biologique.

2) l'effet réserve:

La présence physique des structures va changer l'usage du site, souvent accompagné de restrictions d'accès. Du point de vue de la biodiversité, ces restrictions d'accès peuvent avoir des effets semblables à ceux associés aux Aires Marines Protégées (CIEM, 2011 ; Lindeboom, 2011). La création de ce type d'« AMP » et l'interdiction d'accès pour la pêche peut avoir des effets positifs sur les stocks de poissons (Witt *et al.*, 2012). Le chalutage sera strictement réglementé ou interdit, et en combinant les AMP et les récifs artificiels, les parcs hydroliens peuvent augmenter la diversité et la quantité d'espèces commerciales (Langhamer et Wilhelmsson, 2009 ; Martins *et al.*, 2010).

Polagye *et al.* (2011) résumant les effets sur le compartiment des poissons dits résidents (par opposition aux poissons diadromes) selon les deux matrices ci-dessous (Tab. 28 et 29), respectivement à l'échelle d'un site pilote et d'un site commercial :

	Présence de structures: perturbations : effets statiques	Présence de structures: perturbations : effets dynamiques	Perturbations chimiques	Perturbations acoustiques	Perturbations électromagnétiques	Diminution de l'énergie	Impacts cumulés
Population (augmentation ou mortalité)	△△	△△△	△△	△△	△△△	△	△
Interaction physique *	△	△△△	△△	△△	△△	△	△△
Comportement**	△	△△	△	△△△	△△△	△	△
Communauté (diversité spécifique/resilience)	△△	△△△	△△	△△	△△△	△	△

* Effets létaux et sublétaux : stress, échec de la reproduction, trouble toxique, modification de la croissance

** Evitement et/ou attraction des structures

Tableau 28 Matrice des récepteurs : poissons résidents, cas d'un site pilote

	Présence de structures: perturbations : effets statiques	Présence de structures: perturbations : effets dynamiques	Perturbations chimiques	Perturbations acoustiques	Perturbations électromagnétiques	Diminution de l'énergie	Impacts cumulés
Population (augmentation ou mortalité)	△△	△△△	△△	△△△	△△△	△△△	△△△
Interaction physique *	△	△△△	△△	△△△	△△△	△△△	△△△
Comportement**	△	△△	△	△△△	△△△	△△△	△△△
Communauté (diversité spécifique/resilience)	△△	△△△	△△	△△△	△△△	△△△	△△△

* Effets létaux et sublétaux : stress, échec de la reproduction, trouble toxique, modification de la croissance

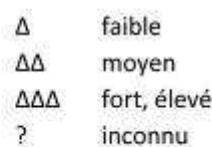
** Evitement et/ou attraction des structures

Tableau 29 Matrice des récepteurs : poissons résidents, cas d'un site de taille commerciale

niveau de significativité des couleurs



symboles d'incertitude



Cas particulier du plancton :

Les produits chimiques antifouling sont toxiques et peuvent entraîner une augmentation de la mortalité des espèces planctoniques ou affecter leur santé (Sotta *et al.*, 2012). Mais les produits modernes tendent à avoir une moindre toxicité et à être biodégradables, et la mise en œuvre de la réglementation en la matière dans le domaine marin devrait limiter les risques de contamination de ce type (Boehlert *et al.*, 2008 ; DFO, 2009).

Le zooplancton peut aussi être directement affecté et subir une augmentation de mortalité en passant au travers des parties mobiles des machines (Bickel *et al.*, 2011, Witt *et al.*, 2011), ce qui peut affecter leurs prédateurs comme les juvéniles de poissons, les oiseaux de mer et les mammifères marins (Witt *et al.*, 2011).

Les perturbations possibles liées aux modifications des courants et donc du transport larvaire pourraient, dans les cas les plus extrêmes, affecter ainsi la connectivité écologique entre les zones fonctionnelles du cycle de vie des populations ainsi que les relations trophiques (CIEM, 2011 ; Shaw, 1982).

Un exemple de retour d'expérience : le cas de la Baie de Fundy (FORCE, 2011) :

A partir d'une revue bibliographique approfondie, l'inventaire des espèces de poissons présentes dans la zone a été établi, et un classement intéressant de ces espèces en fonction de leur possible risque d'interaction avec des turbines et un dommage accidentel. Trois catégories sont ainsi définies : i) espèces qui ont une forte probabilité d'interaction et/ou de dommage significatif à leur population ; ii) espèces à probabilité modérée d'interaction et un risque faible à modéré de dommage ; iii) espèces à faible probabilité d'interaction et de dommage. Les facteurs de dommage potentiel sont la taille des individus et leur possibilité d'avoir un impact lors de leur passage dans la turbine (une grande taille augmente les possibilités de blessure ; effets de la pression et de la cavitation), leur habitat (pélagique ou benthique ; les pélagiques étant plus sensibles), leur importance dans les pêcheries et le statut de leur population (du point de vue de la conservation : en danger, menacé...).

En dehors de toute considération liée au statut de l'espèce, celles de grande taille, pélagique et nécrophages, sont considérées comme vulnérables car pourraient être attirées par des individus morts à proximité des turbines ; c'est le cas de certains requins comme l'aiguillat commun (*Squalus acanthias* ; dogfish). Le hareng, pour les effets liés à la pression, est également cité.

8.2.3. En phase de démantèlement

Les impacts sur les communautés ichthyologiques durant cette phase sont considérés comme semblables à ceux observés en phase d'installation (Bald *et al.*, 2010). Le bruit et les vibrations peuvent affecter les systèmes auditifs de certains poissons dans un rayon de 100m environ (Gill, 2005). Selon Boehlert *et al.* (2008) le démantèlement des ancrages et des infrastructures électriques peut avoir des impacts classés à un niveau moyen pour plusieurs espèces (poissons ronds démersaux, poissons plats, raies).

8.3. Identification des impacts cumulés

8.3.1. Impacts cumulés dus à l'échelle spatio-temporelle du déploiement

Les impacts physiques sur les habitats des structures pilotes sont considérés comme réversibles après le démantèlement car les secteurs géographiques les mieux adaptés à ce type d'installation EMR sont situés là où les forts courants génèrent naturellement de grandes perturbations pour les sédiments. Les effets cumulés de parcs industriels doivent être considérés à l'échelle du champ d'impact éloigné (Frid, 2012 ; voir aussi chapitre 8.1.2).

Quant au bruit, il est important que ses effets soient évalués au niveau du parc entier et non au niveau des hydroliennes individuelles (DOE US Department of Energy, 2009).

Les effets cumulés des différents facteurs de stress d'un parc à échelle commerciale (multiples turbines) sur les poissons migrateurs (modification des couloirs de migration et du comportement) doivent être mieux compris (Polagye *et al.*, 2011).

8.3.2. Impacts cumulés dus aux interactions avec d'autres pressions anthropiques

Les autres usages présents sur zone (dont d'autres types d'installations EMR par exemple) doivent également être pris en compte puisque générant eux aussi des pressions.

Champs électromagnétiques: le nombre de câbles va sans doute augmenter significativement dans les prochaines décennies avec le développement des EMR. L'augmentation du réseau de câbles peut causer des effets cumulés potentiellement néfastes pour le compartiment halieutique, difficiles à prédire, et pour lesquels il n'existe que peu de retours d'expérience scientifiques (Carlier et Delpech, 2011).

Pollutions accidentelles (Sotta *et al.*, 2012) : l'augmentation du nombre de structures industrielles offshore et dans les eaux côtières va accroître les dangers liés à la navigation pour les navires. La multiplication des activités a pour effet d'augmenter le risque de pollution par hydrocarbures et autres pollutions maritimes (Wilhelmsson *et al.*, 2010). D'autre part les fuites de liquide hydraulique des appareils de maintenance sont également une source potentielle de pollution.

Si les poissons migrateurs sont déjà stressés par les conditions environnantes du parc, ou en raison de leur stade de vie (ex : migration pour la reproduction chez les salmonidés), les effets du passage dans le parc pourront être plus importants (Polagye *et al.*, 2011).

8.4. Description du programme de suivi environnemental

Remarque générale : le suivi environnemental (en cours d'exploitation) à mettre en place doit être adapté aux spécificités du site et être en continuité avec celui mis en place pour l'état initial. Mais il peut être adapté en fonction des observations issues de l'état initial.

Selon Simas *et al.* (2010), les protocoles à opérer résulteront d'un équilibre entre une approche scientifique, réglementaire et industrielle afin d'optimiser les efforts. Tant que l'industrie hydrolienne en est encore à un stade précoce et que peu de retours d'expérience sont disponibles, il demeure un grand degré d'incertitude quant aux impacts environnementaux qui pourront résulter de déploiements industriels. Les protocoles qui sont fournis par Equimar doivent donc être considérés comme des guides de bonnes pratiques au regard de l'expérience disponible à ce jour. Quand c'est possible, les lacunes de connaissances seront identifiées afin de rendre évolutifs les protocoles au fur et à mesure que les connaissances s'amélioreront. Le concept de **protocole adaptatif** doit donc être retenu.

Bald *et al.*, (2010) recommande de mener une campagne annuelle comprenant au minimum 5 transects avec moyens vidéo pour estimer entre autre l'abondance. D'autres moyens comme l'utilisation d'engins de pêche pourront être mis en œuvre si la faisabilité est avérée sur le site. Afin de récolter des informations en continu sur la présence des poissons, un système de 3 bouées acoustiques peut être déployé pendant une durée de un an minimum. Dans le cas où des changements de comportements chez les poissons migrateurs seraient observés, les techniques de télémétrie et de marquage peuvent être employées.

OSPAR (2006) recommande dans le même esprit de suivre les agrégations de poissons autour des structures.

Moura *et al.* (2010) recommande de la même manière pour le suivi des poissons de réaliser des transects vidéo et photo sur le site et ses alentours, procéder au suivi des trajectoires de navires et analyser les effets récif et réserve en cas de restriction d'accès pour la pêche.

Pour le suivi des communautés de poissons, l'utilisation de filets dérivants et de systèmes acoustiques doit être envisagée. Les systèmes acoustiques peuvent comprendre des systèmes actifs (sonar), des caméras acoustiques, et la télémétrie acoustique (avec des récepteurs fixes et des hydrophones pour suivre les déplacements de poissons marqués). Mais la probabilité de

détection des petits poissons en utilisant des systèmes actifs peut être faible dans certains sites en raison de la charge élevée en sédiments, de mélanges turbulents d'eaux douces et salées, et de bullage important (Polagye *et al.*, 2011).

Pour les poissons migrateurs, des systèmes acoustiques actifs ont été utilisés avec quelque succès sur le projet RITE (Roosevelt Island Tidal Energy à New-York), bien que pour un coût élevé et des conclusions peu robustes. De nouvelles méthodes telles que la télémétrie acoustique et le marquage doivent être envisagés. Les modèles existants d'analyse du comportement des poissons devraient être adaptés au monitoring des projets hydroliens (Polagye *et al.*, 2011).

Pour les champs électromagnétiques, des expérimentations en milieu contrôlé doivent être menées pour les jeunes individus, tandis que pour les grandes espèces mobiles, on doit envisager les méthodes de marquage et de capture/recapture (Underwood 1992, Westerberg and Langenfelt 2008, Gill *et al.* 2009).

Polagye *et al.* (2011) recommande que des protocoles clairs de suivi environnemental et des approches innovantes (amélioration des modèles hydrodynamiques) en termes de suivi instrumenté soient développés et mis en œuvre. Ces protocoles doivent indiquer le type de données à collecter et le moyen de les collecter, ainsi que les traitements à leur appliquer ; ils doivent prendre en compte la variabilité naturelle et être suffisamment flexibles pour s'adapter aux spécificités des cas étudiés.

Les sites Ifremer suivants apportent également des informations utiles, notamment pour le traitement des données :

<http://wwz.ifremer.fr/drogm/Cartographie/Plateau-continental/Energies-marines-renouvelables/Protocole>

<http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Materiaux-marins/Protocoles/Ressources-halieuistiques>

En 2012 le Groupe d'étude du CIEM SGWTE (Study Group on Environmental Impacts of Wave and Tidal Energy) encourage le développement de

capteurs et de moyens de mesure. Il propose par ailleurs la création à partir de 2014 d'un nouveau Groupe de Travail, le WGME (Working Group on Marine Energy) pour coordonner les travaux scientifiques faits dans ce domaine et leur application à la gestion.

Pour la phase de démantèlement, on ne dispose pas de recommandations spécifiques pour l'acquisition de données. Januario *et al.*, (2007) considère que cette phase est l'inverse du processus d'installation et peut avoir des effets négatifs sur l'environnement et les activités commerciales alentour. La décision 98/3 de l'OSPAR donne des directives pour le démantèlement des installations de pétrole et gaz, mais il n'y a pas l'équivalent pour les installations EMR ; OSPAR a seulement fourni des recommandations pour les éoliennes offshore.

8.5. Mesures d'atténuation des impacts

Les mesures d'atténuation des impacts peuvent comprendre la sélection de site alternatif, la modification des méthodes de construction, la modification du design des structures.

La présence de zones particulièrement colonisées par une faune sédentaire (d'intérêt commercial, par exemple gisement naturel de coquillages ; ou d'intérêt patrimonial car rare), ou une flore remarquable (herbiers, algues exploitées ou non), sera un frein à la sélection de zone pour le développement des projets hydroliens, ces milieux pouvant être déjà classés comme secteurs à protéger.

Plusieurs des impacts associés à la phase de construction (par exemple le bruit lié à l'installation des fondations) peuvent être réduits grâce à un calendrier adapté par exemple en évitant les périodes de l'année critiques (phase de reproduction pour les espèces importantes, migration...) pour les mammifères marins et les poissons (Frid, 2012 ; Gill, 2005 ; Evans *et al.* (2008, in Sotta *et al.*, 2012)).

Il y a une longue expérience dans l'ingénierie des turbines en milieu fluvial pour réduire l'entraînement des poissons (Coutant et Whitney,

2000) et de telles mesures de réduction doivent être prises en compte dans le design de l'aménagement. Une vitesse de rotation de 25 à 50 tours/mn est considérée comme minimisant les mortalités de poissons dues au contact physique avec les pales (Pelc et Fujita, 2002).

Concernant les champs électromagnétiques (CEM), l'ensouillage des câbles (le recours à cette technique étant tributaire de la nature des fonds) est souvent présenté comme une mesure possible de réduction des effets. Même s'il est vraisemblable que cette technique protège des champs électriques et magnétiques les plus intenses en raison de la barrière physique du substrat, il y a des indications selon lesquelles ce serait inefficace pour contrer la totalité des champs magnétiques. La conversion de l'électricité en 60 Hertz synchrone AC et le blindage des câbles sont également attendus comme facteurs limitant les CEM. L'utilisation du principe de la cage de Faraday pour les machines et les postes sous-marins peut aussi être envisagée (COWRIE, 2008).

Evans *et al.* (2008, in Sotta *et al.*, 2012) recommande que plusieurs mesures réductrices soient mises en œuvre durant la phase de construction :

- Utiliser des rideaux de bulles (Wursig *et al.*, 2000 ; CALTRANS, 2011) qui agissent comme barrière à la propagation des sons. Une autre mesure réductrice du bruit possible est l'isolation des pieux (Illingworth et Rodkin, 2001 ; Thorson, 2004 ; Reyff et Thorson, 2004).

- Poursuivre l'étude de l'efficacité des systèmes répulsifs acoustiques tels que ceux utilisés pour les phoques (« *pingers* »).

Mesures pour limiter les risques de collision avec les machines : les réponses visuelles de fuite des animaux dépendent du contraste entre l'objet menaçant et le milieu ambiant. Afin de maximiser la probabilité de fuite il est essentiel que les machines aient des surfaces peintes de façon à ce que leur visibilité sous l'eau soit en cohérence avec le spectre lumineux à la profondeur d'immersion et avec les spectres de sensibilité des animaux et leurs réponses (Moura *et al.*, 2010).

8.6. Lacunes et programmes de recherche

Aujourd'hui les hydroliennes n'ont été déployées qu'à titre expérimental, aussi la prédiction de leurs impacts est basée sur un nombre limité de données (Frid, 2012). Un résumé des questions environnementales et des lacunes dans les connaissances est donné dans OSPAR (2006) et suggère que la plupart des problèmes potentiels puisse être liée au design des structures et propre à chaque site.

Les lacunes identifiées pour le compartiment poissons sont les suivantes (SGWTE, 2012) :

- interférences avec les voies migratoires ;
- le comportement des requins au repos en relation avec les fronts océanographiques ;
- les champs électromagnétiques ;
- le manque d'informations sur les poissons pélagiques ;
- les interactions générales des poissons avec les structures et leur comportement autour ;
- problème avec les méthodologies de suivi à adapter.

Concernant les champs électromagnétiques, les conclusions des études menées dans le cadre du programme COWRIE sont qu'il demeure de nombreuses questions sans réponse et qu'il faudrait résoudre afin de comprendre les impacts qui pourraient en découler. Le marquage (marques acoustiques par exemple) pourrait être envisagé dans les futures études *in situ* pour expliquer le rôle des CEM dans les migrations. En effet les expériences en laboratoire sont limitées dans ce domaine. Il est également important d'étudier les impacts que peuvent avoir les CEM sur les différents stades de vie des poissons car les jeunes individus tendent à être plus vulnérables, d'autant qu'ils migrent vers la côte pour se nourrir.

L'utilisation des courants de marée par les vertébrés marins nécessite de nouvelles recherches pour bien comprendre et prédire les risques de collision. De nouvelles recherches pluridisciplinaires doivent être entreprises pour élaborer des modèles qui puissent prédire la fuite des animaux en réponse au champ de pression autour des

pièces mobiles des machines (Moura *et al.*, 2010).

Le monitoring des interactions des animaux avec les hydroliennes est très difficile. Le marquage aux ultrasons et leur suivi est une possibilité, l'utilisation de modèles écologiques pour estimer

les effets (au niveau individuel et au niveau de la population) également (Moura *et al.*, 2010).

Le développement de modèles d'hydrodynamique sédimentaire doit être poursuivi (Polagye *et al.*, 2011).

Références clés

Moura A., Simas T., Batty R., Wilson B., Thompson D., Lonergan M., Norris J., Finn M., Veron G, Paillard M. Abonnel C., 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 (EQUIMAR), 24pp.

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 No. NOAA Technical Memorandum NMFS F/SPO-116). U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.

Simas T., Moura A., Batty R., Wilson B., Thompson D., Lonergan M., Norris J., 2010. Uncertainties and road map (No. Deliverable D6.3.2). Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact (EQUIMAR), 22pp.

Sotta C., Le Niliot P. and Carlier A., 2012. Documentary summary of the environmental impact of renewable marine energy, Task 3.2 of WP3 of the MERIFIC Project.

9. Mammifères marins

Les eaux sous juridictions françaises abritent environ 50 % de la biodiversité mondiale de mammifères marins. En France métropolitaine, une vingtaine d'espèces sont régulièrement rencontrées sur les façades de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée. La Manche est caractérisée par la présence en forte densité du marsouin commun. Disparu des côtes françaises depuis les années 60 après une surexploitation, le marsouin commun est en constance augmentation sur les côtes de Manche et d'Atlantique. Les côtes de Manche abritent également des colonies de phoques gris et veaux-marins, qui sont les plus méridionales pour ces espèces. Les colonies de phoques gris sont localisées dans l'archipel de Molène, aux Sept-Iles, en baie de Somme et en baies de Canche et d'Authie. Quant aux phoques veaux-marins, leurs colonies sont situées en baie du Mont Saint-Michel, en baie des Veys et en baie de Somme. La Manche occidentale abrite également la plus grande population résidente de grands dauphins d'Europe, distribuée à l'ouest du Cotentin et dans le golfe normand-breton. La façade atlantique enregistre une forte diversité spécifique qui se manifeste par la présence permanente de dauphins communs, marsouins communs, grands dauphins, globicéphales noirs, dauphins bleu-et-blanc, petits rorquals ou encore rorquals communs sur le plateau et le talus continental. De nombreux grands plongeurs comme les cachalots ou les baleines à bec sont également présent dans le sud du golfe de Gascogne. Des grands dauphins résidents sont également présents sur la façade atlantique, autour des îles de l'archipel de Molène. La Méditerranée abrite plusieurs populations dont le degré d'isolement reste à déterminer, dont les dauphins bleu-et-blanc, les grands dauphins, les globicéphales noirs, les rorquals communs, les cachalots ou la baleine à bec de Cuvier. Des grands dauphins sédentaires sont également localisés autour de la Corse (Martinez et al., 2011).

En Europe comme en France, les mammifères marins bénéficient d'un statut de protection stricte. Cétacés et pinnipèdes font l'objet de nombreuses réglementations et textes de protection internationaux comme la Convention de Washington (CITES), Convention de Berne, Convention sur les espèces migratrices (CMS), OSPAR... Des accords internationaux les concernent directement, comme ASCOBANS, ACCOBAMS ou encore la Commission Baleinière Internationale. A l'échelle européenne, la directive Habitat, Faune, Flore (Natura 2000) cite de nombreuses espèces de mammifères marins dans son Annexe IV (protection des espèces) et II (protection des espèces et de leurs habitats favorables). La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) s'intéresse également de près aux mammifères marins, et aux activités anthropiques qui les menacent, notamment le bruit. Les directives européennes sont par ailleurs reprises par des règlements nationaux, notamment le règlement 812/2004 visant à réduire les captures accidentelles de mammifères marins dans les engins de pêches. Enfin, l'arrêté de protection des mammifères marins du 1^{er} juillet 2011 fixe la liste de tous les mammifères marins présents dans les eaux françaises, et réaffirme leur protection, y compris concernant les dérangements intentionnels ou dégradations d'habitats.

Globalement, la présence des mammifères marins dans les eaux françaises est importante, et constitue donc un enjeu incontournable dans les problématiques d'implantation de dispositifs d'énergies marines.

En France et en Europe, les mammifères marins font l'objet d'un suivi régulier de la part des scientifiques, et de nombreuses données existent concernant leur distribution. Si ces données ne suffisent pas à établir un état initial d'une zone, elles apportent néanmoins de nombreuses informations sur l'enjeu que constitue le secteur pour les mammifères marins.

Les échouages sont suivis sur les côtes françaises depuis près de 40 ans par le Réseau National d'Échouages, coordonné par l'Observatoire PELAGIS, ce qui constitue l'une des plus importantes séries temporelles d'Europe. Des campagnes de recensement ont également été menées à l'échelle européenne (SCANS I en 1994, SCANS II en 2005) ou nationale (SAMM en métropole, REMMOA en outre-mer).

Durant la phase de construction d'un parc hydrolien, les nuisances engendrées peuvent se rapprocher de celles générées lors de l'implantation d'un parc éolien offshore en fonction des technologies utilisées, et engendrer une augmentation des niveaux sonores lors de la mise en place des machines et l'ensouillage des câbles (Wright *et al.*, 2009). Lors de l'exploitation, les enjeux sont potentiellement plus élevés pour l'hydrolien puisque les hydroliennes peuvent présenter un risque de collision en particulier pour les mammifères marins (Carter, 2007).

9.1. Description de l'état initial

La première étape consiste à établir un état initial de la zone, c'est-à-dire réaliser une étude préalable permettant de connaître la fréquentation de la zone par les mammifères marins et leur utilisation du site (sédentarité, saisonnalité...) avant l'implantation des machines.

L'état initial permet la réalisation d'une ligne de base de la fréquentation de la zone, en termes de diversité, d'abondance et de distribution spatio-temporelle. Cette étape est très importante et essentielle au projet, puisqu'elle permet à la fois d'établir un T_0 , mais également parce qu'elle requiert un niveau de détail qui doit permettre de détecter des changements éventuels durant le suivi des impacts. De plus, la réalisation de cette étape et les données acquises permettront d'introduire une réflexion sur les effets potentiels auxquels on peut s'attendre, la façon dont ils se manifesteront, et surtout les méthodes à employer pour les mesurer.

9.1.1. Définition de la zone potentiellement affectée

La réalisation de l'état initial requiert de définir une zone adaptée. En effet, les mammifères marins sont des espèces hautement mobiles, parcourant des dizaines de kilomètres par jour. Il convient donc de définir une échelle à la fois significative en termes de population, mais également en cohérence avec les impacts potentiels et l'ampleur du futur parc.

L'une des solutions proposées pour définir la zone d'étude consiste à se baser sur la réunion de deux zones complémentaires :

- ✓ l'empreinte sonore du projet d'une part ;
- ✓ les zones d'intérêt écologique pour lesquelles des individus sont susceptibles d'interagir avec les machines (direct ou indirect).

9.1.2. Identification d'indicateurs pertinents

Pour réaliser l'état initial des mammifères marins sur une zone donnée, les indicateurs suivants doivent à *minima* être renseignés :

- ✓ La diversité spécifique : les espèces présentes ou potentiellement présentes sur le site d'étude.
- ✓ La distribution : quelles sont les zones les plus fréquentées ? Quelles espèces sont présentes sur ces zones ?
- ✓ La fréquentation et l'utilisation du site : les espèces présentes le sont-elles toute l'année ? Sont-elles résidentes sur le site ou de passage ? Quelle est la saisonnalité de leur présence ? Quelle est l'importance de ce site par rapport aux environs ? La zone est-elle connue pour une utilisation particulière (alimentation, reproduction, nurserie) ?

9.1.3. Caractérisation de la variabilité naturelle du site d'implantation

Les écosystèmes sont naturellement soumis à des variations de paramètres environnementaux pouvant générer une variabilité (saisonnaire, annuelle...) qu'il convient de considérer lors d'un suivi. Pour les mammifères marins, il est recommandé d'étudier leur fréquentation sur au moins un cycle biologique, voire deux si l'on veut réduire le biais de variation interannuelle (MacLeod *et al.*, 2010). Cela représente une à deux années de suivi pour la caractérisation de l'état initial.

9.1.4. Méthodologies possibles d'acquisition d'information

Avant de lancer un suivi dédié sur plusieurs années, il convient de réaliser un inventaire des connaissances déjà existantes sur la zone. Que cela soit dans des publications scientifiques ou des rapports divers, des informations peuvent être obtenues sur les mammifères marins de la zone avant de commencer les suivis dédiés. De plus, des programmes de suivi des populations peuvent déjà exister. Même si les protocoles ou les paramètres enregistrés ne seront peut-être pas adaptés aux études réglementaires, ces données peuvent permettre d'obtenir des informations précieuses (séries temporelles longues, suivis multiples, connaissances spécifiques etc.). Dans les eaux françaises, certaines données existent déjà, suite aux diverses campagnes ayant eu lieu (SCANS, CODA, REMMOA, PACOMM...). Ces campagnes, menées à très grande échelle et de façon ponctuelle ne permettent pas de réaliser un état initial, mais peuvent être une source d'information contextuelle. Les échouages recensés par le Réseau National d'Echouages (RNE) depuis près de 40 ans peuvent en revanche éclairer sur les tendances à long terme, les zones et origines de mortalité. D'autres sources peuvent exister (plateformes d'opportunité, observations opportunistes, programme locaux...) portées par des laboratoires ou des associations. L'ensemble de ces données devrait permettre de mieux connaître la zone et ses enjeux, pour ensuite développer des programmes de suivis adaptés.

D'autre part, le recours à des techniques d'observation acoustique (où les mammifères marins sont observés via les sons qu'ils émettent) permet de compléter avantageusement les mesures visuelles lorsqu'il s'agit de caractériser une zone donnée, sur le long terme à coût maîtrisé indépendamment des conditions météorologiques, nuit/jour (Gervaise *et al.*, 2012). Ces mesures d'acoustique passive doivent être complétées par une évaluation statistique (Fig. 50 et 51) :

- ✓ De la portée²⁵ des hydrophones en fonction du temps, celle-ci étant largement dépendante des conditions océanographiques et météorologiques, de la bathymétrie, de la nature du fond, du bruit ambiant existant, et des espèces biologiques que l'on cherche à détecter et identifier ;
- ✓ Des performances de détection et de fausse alarme des algorithmes de détection/classification, largement dépendantes des algorithmes, des conditions océanographiques et météorologiques, de la bathymétrie, de la nature du fond, du bruit ambiant existant, et des bruits des espèces biologiques que l'on cherche à détecter et identifier ;

Pour un projet hydrolien, ce monitoring acoustique est mutualisable avec les efforts de mesures acoustiques réalisées pour la description du bruit ambiant des zones d'intérêt.

²⁵ La portée d'un hydrophone est le volume d'eau l'entourant dans lequel un bruit particulier peut être identifié dans le chorus sonore ambiant.

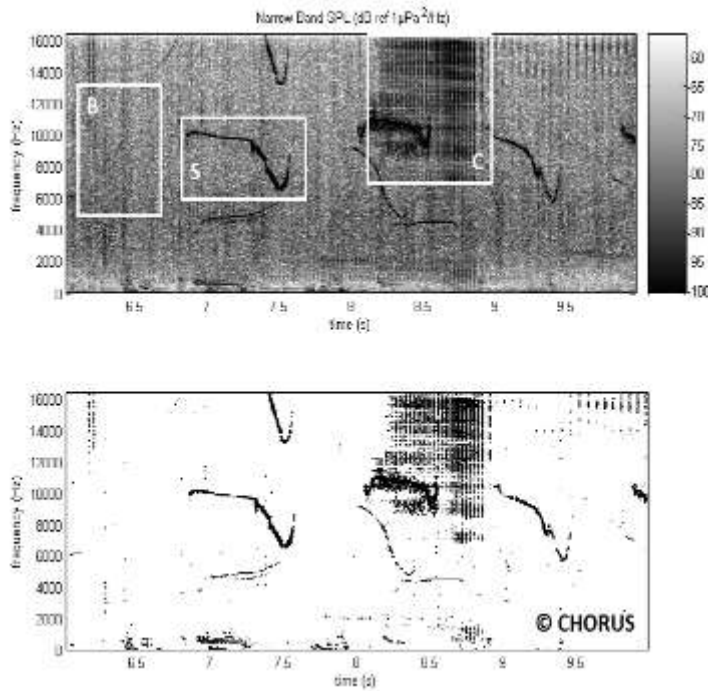


Figure 50 Exemple du résultat de l'application d'outils de traitement automatique sur un segment court (4 secondes)

En haut spectrogramme des données brutes (cartographie de l'énergie sonore reçue en fonction du temps et de la fréquence), ce spectrogramme présente un fond de bruit (boite B) sur lequel s'ajoute des sifflements de grands dauphins (boite S) et des clics d'écholocation (boite C). En bas résultat des algorithmes de détection où les pixels noirs correspondent aux détections automatiques, qui rendent bien compte des signaux émis par les dauphins, source CHORUS.

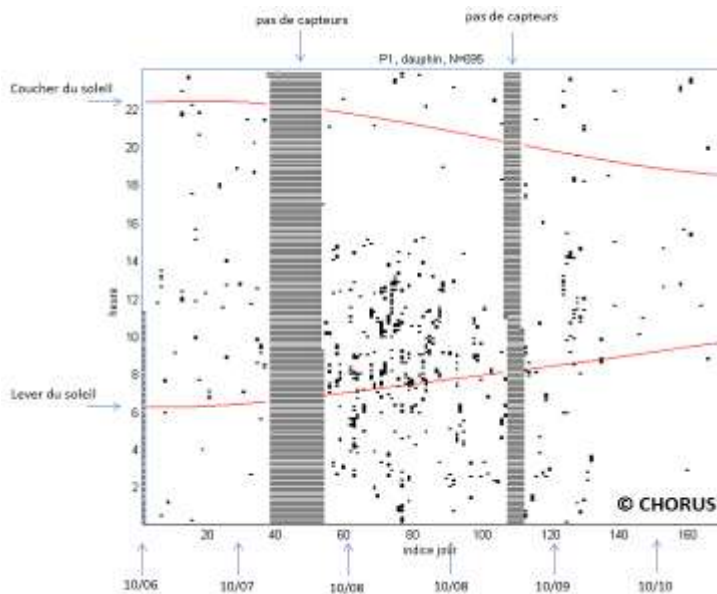


Figure 51 Exemple d'analyses permises par l'acoustique passive pour étudier la population de grand dauphin de l'archipel de Molène

Jour (en abscisse) et heure (en ordonnée) des détections acoustiques de dauphin, chaque pixel noir représente 10 minutes recouvertes d'activité sonore de dauphins. Un examen de ces détections démontre une activité sonore nettement plus riche en Aout et Septembre que les autres mois et que l'activité sonore a lieu majoritairement entre le lever du soleil et 12 heures. Source: Chorus.

9.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

Les mammifères marins apparaissent comme des espèces-clés à suivre avec attention lors des projets d'énergies marines. Particulièrement sensibles aux nuisances acoustiques, ils peuvent être fortement impactés par ces installations et notamment durant les phases de chantier (Madsen *et al.*, 2006).

9.2.1. Problématique de la zone de témoin

La plupart des études d'impacts pour les EMR se basent sur un protocole de type BACI (Before After Control Impact) (Green, 1979). Ce type de protocole nécessite de suivre deux sites en parallèle : le site concerné par le dispositif hydrolien et un site témoin, peu importe la technique de suivi utilisée. Les deux sites doivent être en tout point comparables afin de permettre la détection de tout changement (spécifique, abondance...) dans le cadre de l'implantation des hydroliennes.

En pratique, la sélection d'un site témoin est souvent compliquée. Le protocole BACI est facilement utilisable dans le cadre de zones et d'impacts ayant des limites clairement identifiables, ce qui n'est, le plus souvent, pas le cas dans les projets hydroliens.

Un autre type de design peut être utilisé, dit *gradient sampling*. Il consiste à suivre sur un seul site l'impact des nuisances en fonction de la distance à la source (Ellis et Schneider, 1997). Particulièrement adapté aux suivis par acoustique passive, ce type de protocole permet d'estimer les différentes réactions des mammifères marins en fonction de la distance à la source de bruit. Toutefois, cela reste peu applicable dans le cas de parcs séparés par une faible distance. En effet, les impacts cumulés des différents projets rendent impossible l'estimation des impacts de chaque projet.

Aucun de ces types de design n'est idéal. Les caractéristiques de la zone et la proximité des autres projets pourront permettre de privilégier un protocole plutôt que l'autre.

La solution se trouve peut-être dans une combinaison de ces deux types de suivis. Elle peut également se trouver dans un suivi à l'échelle de l'ensemble des projets, plutôt que site par site. Etant donné le nombre de projets d'EMR et la proximité de certaines zones pressenties, il semble difficile de mener une étude environnementale isolée, sans prendre en compte les effets des sites voisins.

9.2.2. Collisions/enchevêtrement

L'un des risques majeurs concerne les collisions avec les pales des hydroliennes, et dans une moindre mesure l'enchevêtrement dans les câbles de mouillage (Carter, 2007). Le risque est d'autant plus grand que les hydroliennes sont souvent implantées dans des zones étroites et agitées, largement soumises aux marées, constituant potentiellement une zone d'alimentation pour les mammifères marins (Inger *et al.*, 2009 ; Brown et Simmonds, 2010).

Il est probable que dans la plupart des zones les hydroliennes soient détectées acoustiquement par les mammifères marins avant de l'être visuellement (Wilson *et al.*, 2007). Les distances de détection et de réaction d'évitement des machines sont fonction des conditions environnementales (turbidité, visibilité, bruit ambiant...). Si les niveaux de bruit ambiant sont élevés, et excèdent les capacités des mammifères marins à distinguer le bruit des hydroliennes en fonctionnement du reste du bruit ambiant, il est possible que ces derniers ne puissent détecter les machines, et ne puissent donc éviter la collision (Carter, 2007). Divers paramètres comme la taille de l'animal, son comportement, son activité, son âge, la présence de congénères... vont intervenir dans la réaction vis-à-vis de l'obstacle (Wilson *et al.*, 2007).

Durant l'installation et durant la maintenance, les collisions avec les navires sont également à considérer. Les collisions avec les navires sont l'une des causes de mortalité les plus importantes, en particulier chez les grands cétacés (Evans *et al.*, 2011).

9.2.3. Modification d'habitats

9.2.3.1. Remise en suspension sédiments /polluants

L'implantation d'un parc hydrolien va nécessairement modifier les habitats existants. La remise en suspension des sédiments lors de la mise en place des machines et l'enfouissement des câbles va provoquer une augmentation de la turbidité temporaire et localisée dans la zone. Par ailleurs, cette remise en suspension pourrait, le cas échéant, libérer va également libérer des polluants chimiques, minéraux ou organiques (organochlorés...) en fonction de la qualité des sédiments. La turbidité impacte peu les mammifères marins, en raison de leur utilisation préférentielle de l'écholocalisation, en particulier en milieu côtier. En revanche, elle pourra impacter les organismes benthiques ou pélagiques, se répercutant ainsi les autres chainons du réseau trophique par effet « *bottom up* » (Whilhelmson *et al.*, 2009).

Concernant les polluants, il est encore plus difficile de qualifier leur impact. Non seulement, la zone concernée par leur dispersion dépend beaucoup des conditions topographiques, courantologiques et de la marée, mais en plus la détermination de leurs effets sur les mammifères marins est difficile (Hall *et al.*, 2006).

9.2.3.2. Impacts sur le réseau trophique/effet récif

L'implantation d'hydrolienne va modifier l'habitat et peut donc modifier l'écosystème. Elle pourrait signifier une perte d'habitat pour certaines espèces, en particulier celles aux territoires restreints (Dolman et Simmonds, 2010). Elle pourrait également impliquer la disparition de certaines espèces proies de ces zones, avec des répercussions sur l'ensemble du réseau trophique (Gill, 2005)

Comme n'importe quelle structure solide implantée dans le milieu, l'hydrolienne pourrait constituer un « récif artificiel » (Thomsen *et al.*, 2006).

La structure implantée peut devenir un nouvel habitat à coloniser pour de nombreuses espèces, d'autant plus si le substrat est meuble (Vella *et al.*, 2001). Cette colonisation va entraîner la reformation d'un réseau trophique complexe et agir comme un « îlots de biodiversité » attirant potentiellement les prédateurs dont les mammifères marins. Ces îlots peuvent ainsi permettre le développement de nouveaux écosystèmes, mais ils peuvent également concentrer la biodiversité déjà présente au détriment des zones alentours (Grossman *et al.*, 1997). Cela est toutefois à confirmer, car les zones favorables à l'implantation d'hydrolienne sont soumises à des conditions courantologiques spécifiques qui pourraient rendre difficile le développement d'un tel écosystème.

Dans l'hypothèse où cet effet récif serait effectif, les zones d'hydroliennes pourraient alors devenir des zones de nourrissage, notamment pour les pinnipèdes ou pour les cétacés, à l'instar des parcs éoliens en mer (Scheidat *et al.*, 2011). Cette attraction augmenterait alors la probabilité de collision (Wilson *et al.*, 2007).

9.2.3.3. Effet barrière physique

L'implantation des hydroliennes se fait généralement en zone côtière, étroite et soumise à une forte marée. La proximité et l'orientation des machines sont des paramètres importants, car selon les caractéristiques de la zone, les hydroliennes peuvent former une « barrière » pour les mammifères marins. Si la zone est un corridor migratoire et que des hydroliennes y sont déposées, elles peuvent bloquer le passage des mammifères marins (Wilson *et al.*, 2007).

9.2.4. Modification de l'habitat lié au bruit

9.2.4.1. Contexte scientifique

Au cours des dix dernières années un certain nombre d'institutions scientifiques, d'agences gouvernementales et d'organes intergouvernementaux ont étudié les effets des sons sur les mammifères marins, en produisant

des revues articles (Richardson *et al.*, 1995 ; Würsig et Richardson, 2002 ; Popper et McCauley, 2004 ; Hastings et Popper, 2005 ; Hildebrand, 2005 ; National Research Council, 2003 et 2005 ; Wahlberg et Westerberg, 2005 ; Thomsen *et al.*, 2006 ; Madsen *et al.*, 2006 ; Southall *et al.*, 2007 ; Nowacek *et al.*, 2007). Ces études documentent aussi bien la présence que l'absence d'effets physiologiques et de réactions comportementales aux divers signaux acoustiques sur les mammifères marins, les poissons et un certain nombre d'espèces d'invertébrés. Les impacts individuels se traduisent par des changements physiologiques sur l'appareil auditif (Temporary Threshold Shift (TTS), Permanent Threshold Shift (PTS)) ou des changements comportementaux (masquage acoustique, altération de l'attention, augmentation des hormones de stress, changement d'activité, fuite), qu'ils soient aigus ou chroniques et se traduisent *in fine* par une réponse populationnelle. Une synthèse de différents travaux réalisés par des chercheurs bio-acousticiens (Southall *et al.*, 2007) constitue une base pour l'évaluation de l'impact dans une logique dite de 'Dose-Response'.

9.2.4.2. Risques biologiques individuels et risques sur les populations

L'évaluation de l'impact d'une activité humaine sur la vie marine peut s'effectuer sur un continuum de niveaux allant du niveau individuel jusqu'au niveau des populations. Le manque de connaissance et l'ampleur nécessaire des études au niveau de la population est une lacune reconnue à ce jour par la communauté scientifique internationale. Les travaux présentés dans ce guide adressent le niveau de l'impact sur l'individu en trois termes :

- ✓ Pertes auditives permanentes ;
- ✓ Pertes auditives temporaires ;
- ✓ et dérangements comportementaux pouvant engendrer des effets indirects.

D'une manière générale, les impacts potentiels peuvent être au niveau d'un individu et au niveau des populations, avec des effets différents :

- ✓ Au niveau d'un individu, l'échelle des im-

pacts couvre, d'un côté du spectre, la modification du comportement et des facultés à communiquer, à chasser ou à se reproduire, et de l'autre côté du spectre, à la destruction physiologique totale ou partielle des capacités auditives, perte pouvant entraîner la mort pour les effets les plus extrêmes ;

- ✓ Au niveau des populations, l'échelle des impacts couvre la décroissance de la natalité, l'augmentation de la mortalité infantile, ou encore l'abandon du site.

9.2.4.3. Evaluation des risques de dépassement des seuils

En l'état actuel des connaissances, seule l'estimation de l'impact sur l'individu est réalisable à partir de l'évaluation statistique de l'empreinte sonore du projet effectivement perçue par les espèces. En effet, seuls les seuils de tolérance et de dommage physiologiques individuels sont connus, reconnus par la communauté scientifique internationale, et quantifiés à ce jour (Southall *et al.*, 2007).

Les zones affectées par l'empreinte sonore du projet sont donc ainsi converties en termes de niveau d'exposition sonore. L'exposition sonore correspond au bruit perçu spécifiquement par chaque espèce pendant une durée donnée. Les zones de risques sont ensuite identifiées d'après les seuils de tolérance définis par Southall *et al.*, (2007) (Tab. 30), et dans une perspective d'aide à la décision :

- ✓ Une zone de faible probabilité d'incidence, car située en dehors de l'empreinte statistique du projet. Tout animal présent dans cette zone ne devrait pas « percevoir » les bruits induits par le projet. Si cela devait être le cas, la « perception » est faible et très limitée dans le temps.
- ✓ Une zone de faible probabilité de dommage physiologique direct, car la zone, bien que dans l'empreinte sonore du projet (l'animal pourra y percevoir certains bruits du projet), est en dessous de tous les seuils connus de perturbation ;
- ✓ Une zone de réactions comportementales potentielles, dont, à ce jour, les seuils de tolérance ne sont connus que pour les espèces

hautes fréquences ;

- ✓ Une zone de forte probabilité de dommages physiologiques directs temporaires de l'appareil auditif ;
- ✓ Une zone de forte probabilité dommages physiologiques directs permanents de l'appareil auditif.

Ces évaluations sont réalisées sous forme de cartographie statistique à partir de la prédiction de la distribution statistique des niveaux sonores d'une part, et des informations sur la fréquentation potentielle par les mammifères marins d'autre part.

Changements physiologiques de l'appareil auditif		Types de son		
		Impulsion sonore unique	Multiples impulsions sonores	Bruits non-impulsifs
Cétacés basse-fréquence	Niveau de pression perçu	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{lf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{lf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{lf})
Cétacés moyenne-fréquence	Niveau de pression perçu	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{mf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{mf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{mf})
Cétacés haute-fréquence	Niveau de pression perçu	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa	230 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{hf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{hf})	198 dB réf. 1µPa ² -s (M _{hf})
Pinnipèdes (dans l'eau)	Niveau de pression perçu	218 dB re: 1µPa	218 dB re: 1µPa	218 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	203 dB réf. 1µPa ² -s (M _{pw})	203 dB réf. 1µPa ² -s (M _{pw})	203 dB réf. 1µPa ² -s (M _{pw})

Changements du comportement		Impulsion sonore unique
Cétacés basse-fréquence	Niveau de pression perçu	224 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	183 dB réf. 1µPa ² -s (M _{lf})
Cétacés moyenne-fréquence	Niveau de pression perçu	224 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	183 dB réf. 1µPa ² -s (M _{mf})
Cétacés haute-fréquence	Niveau de pression perçu	224 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	183 dB réf. 1µPa ² -s (M _{hf})
Pinnipèdes (dans l'eau)	Niveau de pression perçu	212 dB re: 1µPa
	Niveau d'exposition sonore	271 dB réf. 1µPa ² -s (M _{pw})

Tableau 30 Tableaux issus de Southall et al., 2007 fournissant les seuils de niveau perçus et d'exposition sonore pour les changements physiologiques de l'appareil auditif (TTS) et du comportement.

9.2.4.4. Effet de barrière sonore

L'augmentation du bruit à l'entrée d'une baie ou sur un point de passage peut générer un effet de barrière acoustique. En effet, lorsque l'effet de répulsion sonore est important, les espèces peuvent chercher à s'éloigner de la zone de bruit (Fig. 52).

Cela peut nécessiter une attention toute particulière lorsque cette augmentation sonore est située dans des zones de passage spécifiques (entre deux îles, à l'entrée d'une baie, etc.) ou dans des lieux ayant un rôle écologique particulier (zone de transit de migration, etc.) (Fig 53).

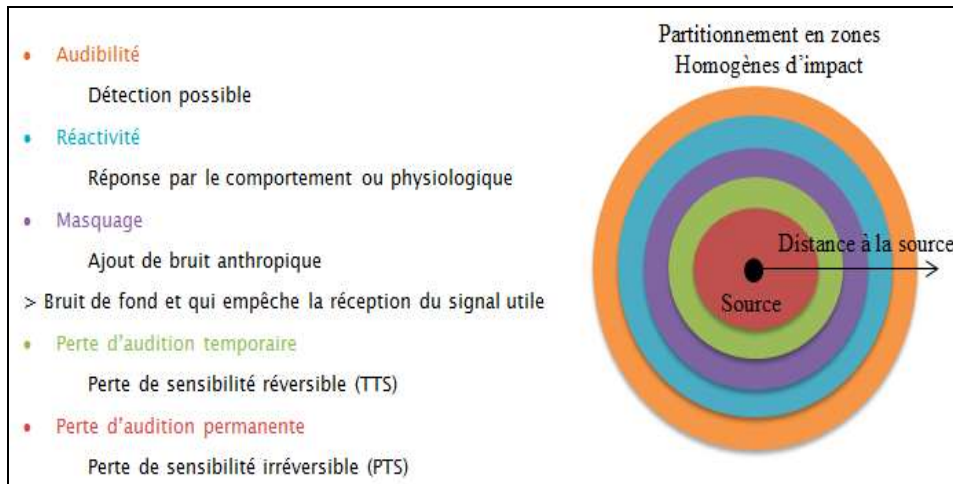


Figure 52 Partitionnement du voisinage d'une source sonore en zone homogène d'impact en fonction de son SEL ou son SPL, construit à partir de Richardson et al., 1995.

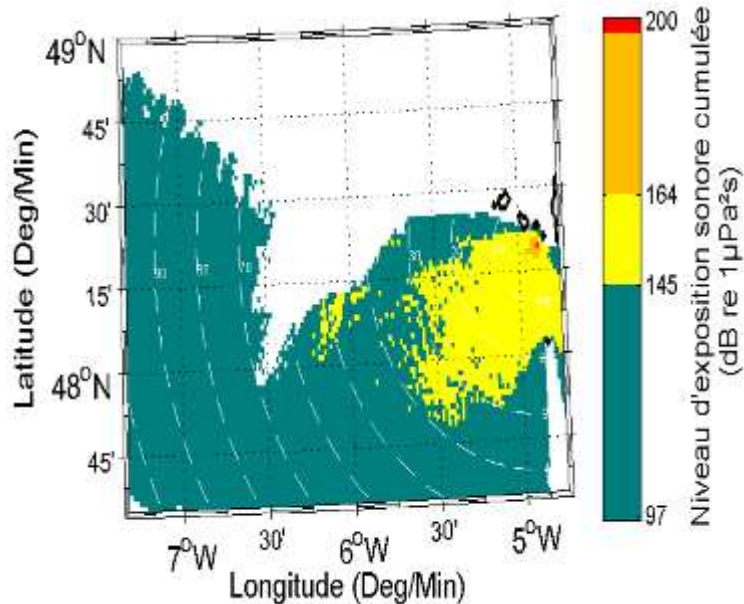


Figure 53 Exemple de carte de risque d'une opération de construction vis-à-vis d'une classe d'espèces de mammifères marins (source Quiet-Oceans (Folegot et Clorennec, 2013)) : en blanc, la zone où le bruit du projet est masqué par d'autres bruits anthropiques déjà existants ; en vert, la zone d'émergence du bruit du projet à faible risque d'impact ; en jaune : zone de probabilité de modification du comportement ; en orange : zone de probabilité de dommage physiologique temporaire ; en rouge zone de probabilité de dommage physiologique permanent.

9.2.4.5. *Lacunes de connaissances et limites méthodologiques sur l'évaluation des impacts sonores*

L'évaluation de l'impact d'une activité humaine sur la vie marine peut s'effectuer sur un continuum de niveaux (National Research Council, 2005) allant du niveau individuel jusqu'au niveau des populations. Cette étude pointe clairement le manque de connaissance et l'ampleur nécessaire des travaux à réaliser au niveau de la population. Compte tenu de la difficulté d'équiper des animaux vivants *in situ*, la connaissance de l'audition des mammifères marins et de l'impact des émissions sonores sur cette audition a été majoritairement acquise sur un faible nombre d'individus et d'espèces, ceci plutôt en bassin (grands dauphins, béluga, marsouin, orque) ou pour des espèces potentiellement accessibles de la côte (phoques). Aujourd'hui, l'audiogramme ou la sensibilité auditive à certaines fréquences de seulement 32 espèces de mammifères marins ont été mesurés (Simard et Leblanc, 2010).

En l'état actuel des connaissances, les études ne peuvent donc adresser le niveau de l'impact sur l'individu qu'en trois termes : pertes auditives permanentes, pertes auditives temporaires et dérangements comportementaux (Southall *et al.*, 2007). Par conséquent, les protocoles de mesures *in situ* proposés à partir de cette évaluation individuelle en trois niveaux doivent intégrer des points de mesure permettant le recueil d'informations utiles à la caractérisation des impacts sur les populations.

Suivant les techniques utilisées, les émissions sonores peuvent s'étaler sur des durées pouvant atteindre plusieurs jours. A cause des protocoles de mesures des capacités auditives sur des animaux vivants, l'impact de ces émissions de longue durée n'a jamais, à notre connaissance, été évalué. Conscient de ce besoin de caractérisation, des expérimentations récentes se sont intéressés à des expositions sonores s'étalant entre 1 minute et 240 minutes (Popov *et al.*, 2011 ; Kastelien *et al.*, 2012), n'atteignant pas nécessairement les durées des travaux d'installation des hydroliennes.

Afin de palier à ces incertitudes, il est possible d'appliquer les règles proposées par la communauté scientifique en les interpolant si nécessaire.

D'une manière générale, l'impact acoustique sur les mammifères marins est un thème de fort intérêt pour la communauté scientifique et fait l'office d'une production scientifique importante et foisonnante. Il est conseillé que les études d'impact comprennent systématiquement une mise à jour bibliographique pour les espèces de mammifères marins de la zone d'étude.

9.2.5. *Autres impacts*

9.2.5.1. *Impacts électromagnétiques*

Certaines études évoquent les effets possibles des champs électriques produits sur la navigation des mammifères marins (Dolman et Simmonds, 2010), mais il n'existe pas à l'heure actuelle de preuve de ces impacts. Les effets de ces champs électriques sont difficiles à évaluer, tout comme l'utilisation du champ magnétique terrestre par les cétacés lors de déplacements (Gould, 2008). Certains échouages en masse de cétacés ont toutefois été mis en relation avec des zones de diminution du champ magnétique terrestre (Walker, 2002). Des recherches spécifiques sont nécessaires.

9.2.5.2. *Pollution accidentelle*

Les chantiers en mer peuvent induire des pollutions localisées de plusieurs natures. Ces pollutions peuvent être causées par la phase de chantier, provoquant la remise en suspension des sédiments, voire de polluants (cf II.2.3). Cela concerne essentiellement des polluants organiques persistants (POPs) comme les organochlorés (DDT, PCB...). L'impact sur les mammifères marins est difficile à évaluer, et dépend surtout des concentrations remises en suspension.

L'autre type de pollution principal concerne le rejet de substances nocives dans l'environnement, en particulier depuis les navires (huile, carburant...). Même si les protocoles et normes assurent le respect des règlements en vigueur, des accidents sont toujours possibles. Néanmoins, le cas de ces pollutions localisées est trop général pour pouvoir être traité ici.

L'utilisation de biocides antifouling peut également être à l'origine de rejets de contaminants chimiques dans le milieu. De même que

l'utilisation d'huile ou autres produits de maintenance dans l'entretien des hydroliennes.

9.2.5.3. Lacunes de connaissances et limites méthodologiques

De nombreuses lacunes subsistent concernant ces impacts potentiels. L'impact des champs électromagnétiques et des polluants sur les mammifères marins sont des sujets de recherche pour lesquels peu de certitudes existent à l'heure actuelle. La difficulté à étudier ces animaux, couplée à la difficulté de mettre en évidence ce type d'impact sur un individu, et d'autant plus à l'extrapoler à la population, expliquent en partie le manque de connaissance dans ces domaines.

9.3. Identification des impacts cumulés

L'étude des impacts des projets hydroliens doit prendre en compte le cumul des effets avec les autres activités anthropiques, à savoir :

- ✓ les impacts cumulés dus à l'échelle spatio-temporelle du projet ;
- ✓ les impacts cumulés dus aux interactions avec d'autres pressions anthropiques.

9.3.1. Impacts cumulés dus à l'échelle spatio-temporelle du projet

Les projets d'EMR se multiplient en Europe, et notamment en France. Que cela soit l'hydrolien, l'éolien ou le houlomoteur, les projets sont nombreux, mais leur réalisation ne se fera pas sans impact sur l'environnement. Or, ces impacts peuvent se manifester sur de grandes distances (plusieurs dizaines de kilomètres lors de la construction), parfois plus que les distances séparant deux projets. Les impacts pourraient être amplifiés, voire se cumuler.

Les impacts se cumulent en raison de la proximité des projets, mais également de leur calendrier. Si les phases de constructions se font de façon simultanée, il n'est pas impossible que les impacts cumulés puissent être plus importants que les impacts d'un seul chantier. Toutefois, le cumul se fait aussi sur le long terme (IWC, 2005). En effet, l'exposition répétée des mammifères marins aux

nuisances engendrées par des chantiers proches, même s'ils n'ont pas lieu en même temps, peut avoir des impacts et notamment créer un état de stress chronique (Wright *et al.*, 2007).

Il conviendrait ainsi de considérer différentes échelles spatio-temporelles dans l'évaluation des impacts. L'évaluation des impacts à long terme d'un parc hydrolien sur les mammifères marins mériterait un programme de suivi adapté dans le temps pour apporter des éléments de réponse à cette problématique.

9.3.2. Impacts cumulés dus aux interactions avec d'autres pressions anthropiques

Aux pressions nouvelles générées par les énergies marines, se combinent également les pressions anthropiques déjà existantes dans le milieu.

Que cela soit le bruit ambiant déjà généré par les activités humaines (trafic maritime, travaux et aménagements, extraction de granulats...), les collisions avec les navires ou les captures accidentelles dans les engins de pêche, de nombreuses pressions pèsent déjà sur les mammifères marins en France (Martinez *et al.*, 2011). Prendre en compte ces pressions dans l'évaluation des impacts est essentiel, puisque les impacts générés par les projets hydroliens ou EMR en général vont venir s'ajouter à ceux déjà existants. Une évaluation des impacts globaux est donc indispensable.

9.4. Description du programme de suivi environnemental

9.4.1. Les facteurs à considérer

Chaque parc est unique : la technologie utilisée, le nombre d'hydroliennes, le type de fondation retenu, la nature du sol, la profondeur d'eau sont autant de paramètres qui varient considérablement d'un site à l'autre. Selon les fondations utilisées, différentes opérations de construction devront être menées, produisant ainsi différents types de bruits à différents niveaux d'émissions, ce qui engendrera différents niveaux de dérangement... Tous ces facteurs conditionnent les impacts environnementaux, et soulignent la nécessité d'un traitement au cas par cas. Malgré les retours d'expériences ou études conduites à

l'étranger, il est impossible de généraliser les suivis à effectuer (Wilson *et al.*, 2007). Les espèces présentes sont également variables. Il est donc impossible de définir des protocoles « types » convenant à n'importe quel dispositif hydrolien sur n'importe quelle zone. Un travail « sur-mesure » se doit d'être conduit.

Pour définir un programme de suivi, il est essentiel de se poser la question des objectifs de ce suivi. Quelles sont les questions auxquelles on souhaite répondre ? Quels sont les impératifs réglementaires et quelles sont les volontés du maître d'ouvrage ? En fonction des questions posées, les données à acquérir, les techniques utilisées et donc les moyens à allouer seront différents.

L'enjeu constitué par la zone d'implantation est également un facteur à considérer.

Une zone écologiquement très importante ou fréquentée par certaines espèces devra faire l'objet d'un suivi rigoureux et approfondi, à la hauteur des enjeux identifiés dans l'étude d'impact.

Le coût d'un suivi est largement dépendant de la méthode utilisée. Le choix d'une technique se fait donc en fonction de son efficacité et des résultats qu'elle apporte, mais aussi en fonction de son coût. L'idéal étant alors d'optimiser le rapport entre le coût d'une technique et les résultats qu'elle apporte. Le plus souvent, il semble opportun d'utiliser plusieurs techniques pour réduire les biais. En l'occurrence, les méthodes les plus efficaces pour les cétacés ne le seront pas pour les pinnipèdes, et inversement. Il convient alors de combiner les techniques qui semblent les plus adaptées à la situation.

9.4.2. Recommandations générales

9.4.2.1. Echelles et objectifs

L'un des enjeux majeurs dans un suivi des mammifères marins est de le faire à une échelle à la fois spatiale et temporelle pertinente. La définition même de la surface de la zone dépend des objectifs du suivi. Selon que l'on veuille réaliser l'inventaire des mammifères marins présents dans le secteur, évaluer leur mode d'utilisation de la zone, comprendre leur saisonnalité ou encore évaluer les impacts de l'implantation d'un

parc hydrolien, les zones à prendre en compte peuvent différer. Globalement, il convient donc de bien définir les objectifs du suivi en amont de la définition de la zone d'étude.

Concernant l'échelle temporelle du suivi, comme pour tout organisme vivant, il convient de suivre les mammifères marins sur au moins un cycle biologique, soit une année.

9.4.2.2. Mutualisation

L'implantation d'un parc hydrolien passe par des démonstrateurs et des parcs pilotes avant d'envisager un parc commercial.

Le budget alloué aux études environnementales n'est donc pas du même ordre de grandeur entre ces deux types de parcs. Toutefois, les sites propices à l'installation de parcs hydroliens sont peu nombreux. Il pourrait alors être judicieux de mutualiser les suivis des différents projets afin d'optimiser les études. En effet, au lieu que chaque développeur finance seul une étude à petite échelle ou restreinte au niveau des possibilités de suivi, la mise en commun pourrait permettre de réaliser une seule étude à échelles pertinentes et selon les techniques les plus adaptées pour un coût finalement moindre. En effet, en réalisant un seul grand suivi plutôt que plusieurs sur des petites zones, la possibilité de mutualiser les efforts, les personnels et le matériel diminue les coûts. Cela impliquerait une harmonisation des protocoles, des objectifs et de l'échantillonnage (fréquence, saisonnalité, design...). Outre une organisation plus facile des suivis, la mutualisation peut également s'appliquer au stockage des données et à l'analyse, afin d'optimiser les coûts. Cela pourra également permettre une compréhension des phénomènes pouvant être observés à une échelle en adéquation avec les espaces utilisés par les mammifères marins, et une prise en compte du cumul des effets.

Par ailleurs, une mutualisation est également possible entre les suivis des différents compartiments au sein d'un même site, et mérite d'être réfléchi en amont du lancement des études. Les volets suivis visuels des mammifères marins et des oiseaux peuvent ainsi facilement être mutualisés.

Les déploiements/récupération/maintenance des dispositifs acoustiques peuvent être mutualisés avec d'autres travaux maritimes etc.

9.4.2.3. Concertation et intégration

Les retours d'expérience sur l'hydrolien sont encore peu nombreux. L'installation de tels dispositifs en France pose de nombreuses questions, mais ouvre également la voie à des thématiques de recherche.

L'installation d'un parc hydrolien et la conduite des études environnementales requièrent l'intervention d'un certain nombre d'acteurs pour s'assurer que les études sont à la fois pertinentes et bien menées, qu'elles répondent aux exigences réglementaires et qu'elles permettent de parer au besoin de connaissance dans ce domaine.

Les problématiques posées par les parcs hydroliens et les parcs EMR en général rejoignent les préoccupations nationales et communautaires concernant la conservation des mammifères marins et leurs habitats. Dans le contexte des directives européennes (Directive Habitats, Faune, Flore, Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin...), l'acquisition de connaissances dédiées aux mammifères marins est au cœur des réflexions de la communauté scientifique. Les programmes menés pour le suivi des mammifères marins dans les parcs hydroliens doivent donc s'inscrire dans ces réflexions, et suivre des protocoles standardisés comparables à la fois entre eux et avec les programmes nationaux.

Si la question de la diffusion publique et surtout de la forme des données publiées reste délicate, il semble en revanche pertinent de recommander la création d'une base de données nationale des suivis mammifères marins dans le cadre des EMR. Tout en respectant les clauses de confidentialité, il peut être envisagé de compiler toutes les données acquises, du moins pour les mammifères marins, dans une base de données nationale, accessible selon des modalités prédéfinies. Deux arguments majeurs viennent étayer cette proposition : tout d'abord, cela pourra permettre une visibilité d'ensemble et une analyse globale des données et des impacts à travers les différents projets en cours ou à venir. De plus, cela apportera une réelle transparence des informations collectées, tout en assurant une mise en commun

des différentes sources de données et donc une harmonisation due à la nécessaire compatibilité. Réussir à concerter les différents partis pour le bon déroulement du projet tout en s'assurant de la transparence des études et de l'acceptation des usagers et du public est un réel challenge.

En ce sens, la collaboration entre les sociétés en charge de développer les projets, la communauté scientifique, les bureaux d'études environnementaux et bien sûr, les institutions gouvernementales doit être encouragée.

9.4.3. Mise en œuvre

9.4.3.1. Définition de la zone de suivi

Le suivi d'une population doit avoir lieu sur une échelle spatiale cohérente pour l'espèce et appropriée au questionnement biologique. Les groupes de travail sur le bruit des accords internationaux (Wilson *et al.*, 2007) recommandent de mener les suivis en se basant sur les unités de gestion ou les populations concernées, sans limitation de frontière. Pour des espèces comme les mammifères marins, cela implique des échelles spatiales très importantes. Il est donc probable que la surface couverte par un développeur isolé dans le cadre d'une étude d'impact soit trop petite pour permettre l'acquisition de données significatives pour la population. Le challenge est donc de trouver un compromis entre une zone suffisamment grande pour être intéressante et un périmètre d'étude qui soit viable économiquement. Il s'agit à la fois de pouvoir mesurer un éventuel impact tout en rendant les coûts de suivi accessibles aux développeurs.

Une mutualisation des suivis entre projets proches peut être envisagée lorsque cela est possible, afin d'optimiser les dépenses et d'augmenter la pertinence des suivis.

Une autre piste consiste à définir la zone en fonction de l'emprise maximale des impacts envisagés. A défaut d'être significatif à l'échelle de la population, le suivi pourra confirmer ou infirmer l'impact local sur les mammifères marins.

9.4.3.2. Suivi par méthodes visuelles

Un programme de *monitoring* peut se résumer en 3 objectifs principaux :

- ✓ Caractériser les espèces présentes, leur distribution, leur abondance ;
- ✓ Suivre le statut des populations et des impacts des activités anthropiques ;
- ✓ Définir l'utilisation spatio-temporelle des habitats pour identifier les zones importantes (alimentation, reproduction...).

De nombreuses techniques sont généralement utilisées pour suivre les populations de mammifères marins. Elles sont fonctions de l'espèce étudiée, des caractéristiques de la zone, de la nature et de la localisation du projet, des moyens disponibles et des résultats attendus. Chacune de ces techniques présente des avantages et des limites (Tab. 31), qu'il convient généralement de réduire en combinant plusieurs méthodes.

Il ne s'agit pas ici de dresser une liste exhaustive des différentes méthodes de suivis des populations, mais de lister les principales et celles utilisées plus spécifiquement en France et en Europe. Pour les observations visuelles, on peut distinguer trois grandes catégories : celles utilisant des plateformes dédiées (avion, bateau), celles utilisant des plateformes d'opportunités (navires scientifiques, ferries...) et les observations réalisées depuis la côte.

Le principal intérêt d'utiliser des plateformes dédiées à l'observation des mammifères marins est le contrôle du schéma d'échantillonnage, conçu pour optimiser les résultats en permettant des estimations d'abondances absolues (MacLeod *et al.*, 2010). Ces suivis sont donc relativement coûteux. Des plateformes d'opportunités sont parfois utilisées afin de réduire les coûts d'un suivi dédié. Le plan d'échantillonnage n'est alors plus maîtrisé, et peut ne pas correspondre aux exigences requises pour l'observation des mammifères marins. Il est néanmoins possible de calculer des densités relatives et des taux de rencontre, si l'effort est enregistré.

Les observations depuis la côte peuvent être possibles depuis un certain nombre de sites. Très peu onéreuse, cette méthode est toutefois très limitée au niveau de l'échantillonnage et des ana-

lyses possibles.

9.4.3.3. Suivi par méthodes d'acoustique passive

Le suivi acoustique a deux objectifs :

- ✓ La caractérisation de la pression anthropique sonore du projet ;
- ✓ L'évaluation de l'usage écologique du site par les espèces sensibles.

Les mammifères marins sont des espèces qui utilisent l'acoustique pour se déplacer, chasser, s'orienter ou communiquer. Utiliser les sons qu'ils produisent pour détecter leur présence peut donc également être une méthode de suivi approprié. Contrairement au suivi visuel, l'acoustique passive ne dépend pas des conditions météorologiques, et peut être utilisée de jour comme de nuit.

L'utilisation est en revanche restreinte à certaines espèces et sur une zone limitée à la portée²⁶ de l'hydrophone de mesure. Par ailleurs, l'extrapolation des détections acoustiques vers des abondances ou des densités fait actuellement l'objet de recherche et de développement méthodologique, dont une piste prometteuse consiste à calibrer les observations acoustiques avec les observations visuelles (Simard *et al.*, 2010).

L'utilisation des hydrophones pour l'évaluation écologique des sites peut potentiellement être limitée par les effets suivants :

- ✓ Réduction de la performance de détection des bruits biologiques à cause du courant ;
- ✓ Evaluation limitée aux instants où les mammifères vocalisent (p. ex. une zone peut être utilisée par des espèces, mais qui ne seront pas détectées si elles n'y émettent pas de sons).

²⁶ La portée d'un hydrophone est le volume d'eau l'entourant dans lequel un bruit particulier peut être identifié dans le chorus sonore ambiant.

9.4.3.4. Suivi par méthodes d'imagerie sous-marine

Il existe des caméras acoustiques qui permettent d'imager un espace à une cadence donnée, pouvant donc avoir un intérêt au voisinage immédiat des structures pour évaluer en particulier les réactions et les interactions des individus avec la turbine. Elles présentent l'avantage de fournir une imagerie même lorsque les conditions de visibilité sont dégradées.

Les caméras acoustiques, dont le coût peut être important, fonctionnent à très hautes fréquences afin de fournir des images avec une résolution suffisante (Fig. 54). Par conséquent, la portée de ces caméras est souvent réduite à quelques mètres, au mieux quelques dizaines de mètres. La vitesse du son étant de 1500m/s, la cadence des images est de l'ordre de 2 à 20 images par seconde et est dépendante de la portée.

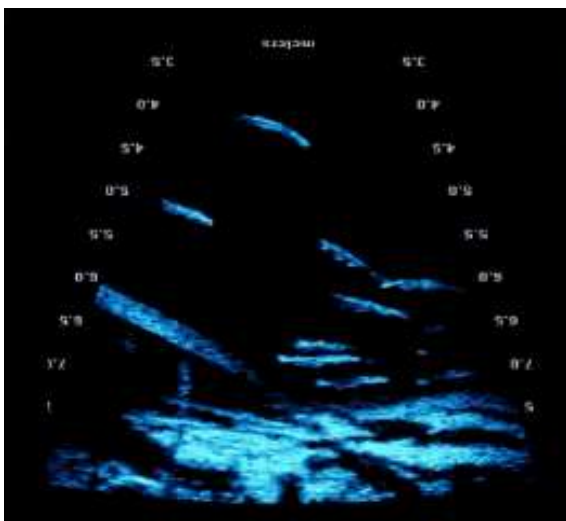


Figure 54 Exemple d'image par caméra acoustique de saumons (source : www.soundmetrics.com)

9.4.3.5. Autres méthodes

Certaines méthodes de suivis sont essentiellement destinées aux cétacés (acoustique passive, suivis visuels en mer...), d'autres aux pinnipèdes (télémétrie) (Tab. 31). Cela n'est cependant pas exclusif, les survols pouvant être élargis aux suivis de phoques à terre. La télémétrie peut également être envisagée pour les cétacés, même si du développement est encore nécessaire. Par ailleurs, d'autres techniques sont en cours de développement, à l'image de la photographie HD. Même si à l'heure actuelle ces nouvelles technologies sont encore difficiles à utiliser, elles ont le potentiel pour devenir des outils utiles dans les années à venir.

Les données d'échouage ont souvent été négligées dans les stratégies de suivi des mammifères marins en raison de l'absence de stratégie d'échantillonnage et de significativité des échouages par rapport aux populations en mer. Néanmoins, les suivis des échouages sont la seule source de matériel biologique pour ces espèces protégées et leur faible coût est un argument en faveur de leur utilisation comme source d'indicateurs. Des travaux récents (Peltier, 2011) ont permis d'améliorer la compréhension du processus échouage et de définir qualitativement et quantitativement la relation entre cétacés échoués et les populations en mer. Ces travaux sont basés sur la modélisation des trajectoires en mer de cétacés échoués à l'aide d'un modèle de dérive. Il est devenu ainsi possible de retrouver les zones de mortalité en mer des cétacés échoués. Ces indicateurs devront être associés à d'autres sources de données, qui permettront de mettre en place des stratégies de suivis pertinentes à l'échelle des populations de mammifères marins.

Méthodes de suivi (exemple ; référence)	Variables estimées	Avantages	Limites
Observations visuelles sur transects linéaires à double plateforme (campagne SCANS ; Hammond <i>et al.</i> , 2002)	Distribution, abondance absolue (individus), densité corrigée dans une aire prédéfinie	Méthodes standardisées, réduction des biais, grande emprise géographique, adapté pour cétacés au large	Coût élevé, périodicité de mesure limitée, prise en compte complexe des biais d'observation
Observations visuelles sur campagnes océanographiques (campagne PELGAS ; Certain <i>et al.</i> , 2008)	Distribution, densités relatives (individus.km ⁻²) en relation avec paramètres environnementaux <i>in situ</i> dans une aire prédéfinie	Coûts limités, co-variables environnementales collectées simultanément, périodicité annuelle	Maîtrise partielle de l'échantillonnage, certains biais non quantifiés mais supposés constants
Observations visuelles sur plates-formes d'opportunité (ferries ; Kiszka <i>et al.</i> , 2007)	Taux de rencontre (observations.unité d'effort ⁻¹ ou individus.unité d'effort ⁻¹) sur une ligne prédéfinie	Coûts limités, périodicité mensuelle ou hebdomadaire	Maîtrise limitée de l'échantillonnage
Dénombrements sur sites spécifiques (SIG-Phoques ; Vincent <i>et al.</i> , 2010)	Nombre d'individus présents	Coûts modérés, surtout applicable sur reposoirs et colonies de phoques	Biais peu maîtrisés, sans doute variables entre les sites, les saisons et les conditions
Suivis focaux sur sites d'intérêt (<i>Tursiops</i> ; Liret <i>et al.</i> , 2006)	Mode d'utilisation de l'espace par des groupes focaux (temps passé.maillage ⁻¹ , par catégorie d'activité)	Coûts modérés, compréhension spatiale fine	Limité aux groupes de petits cétacés côtiers résidents et par les conditions d'observation visuelle
Photo-identification (Phoque gris lroise ; Gerondeau <i>et al.</i> , 2007)	Probabilité de présence d'individus marqués, permettant d'estimer l'abondance (Individus), des paramètres démographiques ou la connectivité entre sites	Coûts modérés, adapté pour petites populations localisées, avec forte proportion d'individus reconnaissables naturellement	Peu adapté pour populations abondantes et dispersées, avec faible proportion d'individus reconnaissables naturellement
Programmes d'observation liés aux pressions (OBSMAM, OBSMER ; Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2008)	Impact d'une activité humaine (ex. nombres de captures accidentelles par unité d'effort de pêche)	Evaluation directe d'un impact par estimation de la mortalité additionnelle	Surtout limité aux programmes prévus par le règlement 812/2004 ; difficultés d'échantillonnage, d'extrapolation, et d'organisation en liaison avec les professions concernées
Observations opportunistes (cétacés en Manche ; Kiszka <i>et al.</i> , 2004)	Présence d'une espèce, sans effort d'observation quantifiable	Coûts très faibles, peut révéler les espèces rares	Aucune extrapolation possible
Echouages (Réseau échouages ; Van Canneyt <i>et al.</i> , 2010)	Variations spatio-temporelles des compositions d'animaux échoués (espèces, sexes, âge, cause de mortalité, état de santé, état biologique...)	Coûts faibles, grande emprise spatiale et temporelle, accès à des prélèvements biologiques, révèle les espèces rares	Interprétation complexe de l'origine et de la signification des échouages
Observation acoustique grands dauphins PNMI (projet AcDau) (Gervaise <i>et al.</i> , 2012)	Série temporelle d'activité sonore, étude des rythmes d'activité (circadien, circatidal), variation saisonnière, interaction avec une série temporelle activité motorisée de surface	Coût faible, observation continue sur 6 mois, accès à la variabilité spatio-temporelle	Technicité des analyses Phase de calibration entre les observations visuelles et les observations acoustiques.
Observations acoustiques passives (projet SAMBAH ; http://www.sambah.org)	Taux de détection pendant la période de déploiement (détectations.unité d'effort ⁻¹) permettant d'estimer la présence saisonnière et spatiale	Déteçtabilité indépendante de la visibilité, méthode non invasive,	Rayon de détection limité, identification limitée des espèces (selon outil utilisé) et des nombres d'individus, coût élevé pour des applications de grande emprise géographique
Télémetrie individuelle (Phoques ; Vincent <i>et al.</i> , 2005 ; Vincent <i>et al.</i> , 2010)	Suivi longitudinal des localisations et des activités d'individus équipés permettant d'analyser les domaines vitaux et modes d'utilisation de l'espace et la connectivité entre sites	Compréhension spatiale fine, indépendant des conditions de mer et de visibilité	Essentiellement limité aux phoques et grands cétacés, méthodes de marquage souvent complexes, difficulté d'extrapolation aux populations

Tableau 31 Sélection des principales méthodes de suivi des populations de mammifères marins et principales références associées

9.4.4. Lacunes de connaissances et limites méthodologiques

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. La ou les méthodes à utiliser doit donc se faire en fonction des questions posées, des caractéristiques de la zone, des espèces présentes mais également de l'ampleur du projet et du budget alloué. Il convient généralement de combiner plusieurs méthodes afin de réduire les biais inhérents à chacune.

9.5. Mesures d'atténuation des impacts

9.5.1. Réduction

Cette étape repose sur les informations produites par l'étape de cartographie des risques biologiques statistiques liés au projet. Lorsque le risque de dommage physiologique est avéré, la mitigation des risques peut se réaliser selon quatre leviers principaux :

- ✓ Mettre en place des mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels ; cela consiste à modifier, lorsque cela est possible, la technique de travaux, ou son mode opératoire afin de réduire le niveau émis à la source ;
- ✓ Mettre en place des mesures de réduction des niveaux sonores cumulés ; cela consiste à adapter, lorsque cela est possible, l'organisation et le planning des travaux, en particulier lorsque plusieurs tâches ont lieu en même temps ;
- ✓ Mettre en place des systèmes qui entravent la propagation du bruit dans l'océan ; cela consiste à entraver la propagation du bruit dans le milieu, en particulier dans les directions qui présentent un réel enjeu ; il est essentiel d'évaluer la pertinence technique de ces solutions, qui, dans un contexte de site à forts courants, peut s'avérer difficile et/ou inefficace (Greanjean, 2012).
- ✓ Mettre en place des mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque ; une augmentation progressive du bruit avant le démarrage des ateliers de construction en particulier, peut jouer le rôle d'avertisseur et permettre aux espèces potentiellement en présence de s'éloigner temporairement.

Les effets des mesures identifiées ci-dessus doivent être modélisés afin de quantifier les effets prévisibles de leur mise en œuvre et d'évaluer la pertinence économique de la mesure de réduction.

9.5.2. Choix des périodes de travaux

Une solution de réduction des impacts peut également consister à aménager le calendrier des travaux en fonction des périodes propices aux mammifères marins. Si l'utilisation de l'habitat des mammifères marins est difficile à appréhender, certains secteurs sont connus pour être des lieux de reproduction ou d'alimentation pour les mammifères marins. Lors de leur présence saisonnière sur ces secteurs, ils sont particulièrement vulnérables aux nuisances. En minimisant les dérangements lors de ces périodes, on diminue la probabilité d'impacter ces espèces.

9.6. Lacunes et programmes de recherche

L'implantation d'hydroliennes en milieu marin est récente, et peu de retours d'expérience existent. De nombreuses lacunes et manques de connaissances persistent concernant les impacts sur les mammifères marins.

En premier lieu, les connaissances fondamentales sur la distribution des mammifères marins restent parcellaires, notamment en termes de variabilités saisonnière et interannuelle. Des acquisitions de connaissances restent donc à mener pour identifier les zones d'enjeu et l'évaluation spatio temporelle de la distribution des mammifères marins.

Les mécanismes sous-jacents déterminants cette distribution restent également mal connus : zones d'alimentation, schémas migratoires et zones de passages ou encore utilisation globale des habitats... Ces éléments restent peu connus pour les mammifères marins, en particulier les cétacés.

S'il n'est pas du ressort des porteurs de projets de financer de tels besoins de recherche, les suivis environnementaux menés dans le cadre des études de site pourraient y contribuer.

Par ailleurs, l'implantation d'hydroliennes se fait dans les zones à forts courants et aux conditions environnementales particulières. L'utilisation de ces zones par les mammifères marins est méconnue, mais nécessaire pour comprendre l'enjeu qu'elles représentent pour ces espèces. Un travail de suivi de l'utilisation de la zone et du comportement des mammifères marins sur ces secteurs est à encourager.

Concernant les impacts acoustiques, les connaissances sur les capacités auditives des mammifères marins restent souvent lacunaires pour permettre une évaluation fine des impacts sur ces espèces. Il est essentiel de mieux appréhen-

der les réactions des mammifères marins vis-à-vis du bruit in situ. Des études peuvent être envisagées sous différentes formes, mais les fermes-pilotes ou les démonstrateurs apparaissent comme des contextes très opportuns pour étudier ces effets.

Pour tous ces axes, l'amélioration des outils et des méthodologies est nécessaire car les méthodes existantes ne permettent pas de répondre à tous les besoins (suivi visuel et acoustique sous-marins notamment).

Références clés

Carter, 2007. Marine Renewable Energy Devices : a collision Risk for Marine Mammals ?, MSc Aberdeen

Martinez L, Dabin W, Caurant F, Kiszka J, Peltier H, Spitz J, Vincent C, Van Canneyt O, Dorémus G, Ridoux V, 2011. Contributions thématiques concernant les pressions et les impacts s'exerçant sur les populations de mammifères marins dans les régions golfe de Gascogne, Mers Celtiques, Manche Mer du Nord et Méditerranée Occidentale dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM), Rapport CRMM pour Ifremer-Agence des Aires Marines Protégées- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.

Southall B., Bowles A., Ellison W., Finneran J., Gentry R., Greene C., Tyack P., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*, 33: 411-521.

Wilson B., Batty R.S., Daunt F., Carter C., 2007. Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds. Report to the Scottish Executive. Scottish Association for Marine Science, Oban, Scotland, PA37 1QA.

10. Avifaune

Les activités humaines en mer, telles que pêcheries, trafic maritime, exploitations pétrolières et minières, parcs éoliens offshore ou hydroliens, peuvent avoir un impact, parfois important, sur l'avifaune marine. Cela peut se traduire par de la mortalité directe ou par des effets indirects liés par exemple à des modifications d'abondance ou d'accessibilité des ressources alimentaires, au dérangement sur des zones importantes pour l'accomplissement de leur cycle de vie annuel. Dans le contexte des développements technologiques récents pour exploiter les énergies marines renouvelables, l'implantation de parcs hydroliens est susceptible d'engendrer des modifications affectant l'habitat des oiseaux marins et côtiers. Certaines de ces modifications sont susceptibles d'engendrer des impacts plus ou moins significatifs sur ces populations d'oiseaux, impacts potentiels qu'il convient d'évaluer au mieux.

10.1. Description de l'état initial

La première phase du projet consiste à réaliser un état environnemental initial, avant le développement des activités humaines liées au projet. Cet état initial doit permettre de caractériser les populations d'oiseaux qui fréquentent la zone d'étude, et l'exploitation du milieu marin par ces espèces, pour différents types d'activités liés à leur biologie. Il peut en effet s'agir de zones d'alimentation régulières ou ponctuelles ou de zones de stationnement prolongé, par exemple en période de mue ou d'élevage des jeunes. Ce premier diagnostic devra permettre par ailleurs de remettre en perspective le rôle du site pilote au sein d'un environnement plus large afin notamment de mieux appréhender les enjeux réels liés à ce site.

10.1.1. Définition de la zone potentiellement impactée et choix de la zone de référence

Le choix de la zone d'implantation pour le développement d'un projet de parc hydrolien dépend en premier lieu de caractéristiques liées à la cou-

rantologie et à la géographie des fonds marins. Or, ces zones particulières sur le plan de l'océanographie physique et biologique sont susceptibles de jouer un rôle important pour divers organismes marins, dont les oiseaux marins, prédateurs supérieurs qui peuvent par exemple exploiter ces zones pour s'alimenter (Zamon, 2003 ; Schwemmer *et al.*, 2009). Pour évaluer au mieux les impacts potentiels des activités humaines liées au projet d'hydroliennes, il est donc indispensable de connaître les variations spatio-temporelles de l'utilisation de l'espace marin par les oiseaux, et de leur abondance, durant l'ensemble du cycle annuel, ainsi que l'écologie alimentaire des espèces présentes. Hors de la zone potentiellement directement impactée par le projet, la zone de référence doit au minimum prendre en considération les éventuelles colonies de reproduction situées à quelques kilomètres ou quelques dizaines de kilomètres (distance variable selon l'écologie des espèces présente), et l'espace marin associé. Il sera par ailleurs important de mener les investigations nécessaires à une échelle plus large afin de pouvoir évaluer le rôle écologique réel du site pour l'avifaune au sein de l'ensemble fonctionnel dans lequel s'inscrit celui-ci. La définition de cet ensemble sera variable selon la localisation du site projet et dépendra des conditions océanographiques locales et régionales, mais aussi des peuplements aviaires en présence.

10.1.2. Description du contexte écologique du site d'implantation (fonctions écologiques du site d'implantation pour l'avifaune)

10.1.2.1. Espèces marines et côtières

Les espèces à considérer sont d'une part des oiseaux marins, ou espèces apparentées, qui dépendent étroitement du milieu marin pendant une période plus ou moins longue de leur cycle annuel et, d'autre part, des espèces côtières inféodées à l'estran. Le projet de parc hydrolien peut avoir un impact en mer sur le premier groupe d'espèces durant les phases d'implantation, d'exploitation et de démantèlement, et à terre sur le deuxième groupe d'espèces principalement durant les phases

d'implantation et de démantèlement, au niveau de la zone d'atterrissage des câbles.

Les oiseaux marins qui fréquentent les eaux françaises regroupent diverses espèces : Procellariidés (fulmar, puffins), Hydrobatidés (océanites), Sulidés (fou), Phalacrocoracidés (cormorans) (Fig. 55), Stercoraridés (labbes), Laridés (mouettes, goélands), Sternidés (sternes, guifettes) et Alcidés (guillemot, pingouin, macareux) (Fig. 55). Il faut ajouter à ces espèces, classiquement identifiées comme oiseaux marins, d'autres espèces qui exploitent régulièrement le milieu marin. Il s'agit des Gaviidés (plongeurs), Podicipédidés (grèbes), et de certaines espèces d'Anatidés (canards marins type eider, macreuse ou harle) et de Scolopacidés (phalaropes) (Comolet-Tirman *et al.*, 2007).



Figure 55 Guillemots de Troïl (à gauche) et cormorans huppés (à droite), deux espèces d'oiseaux marins plongeurs du littoral français (clichés Matthieu Fortin, Bretagne Vivante)

10.1.2.2. Approche spatio-temporelle

Pour les différentes espèces, il convient de distinguer la fréquentation de la zone d'étude en période de reproduction et hors période de reproduction. Certaines espèces ne fréquentent en effet les eaux marines françaises que durant la période inter-nuptiale, lors de leurs migrations entre les zones d'hivernage et les zones de reproduction, ou lors de leur hivernage (Comolet-Tirman *et al.*, 2007). Il faut également distinguer le type d'activités en mer durant les différentes périodes de leur cycle annuel, à savoir l'utilisation de l'espace marin comme zone d'alimentation, zone de repos, zone de mue ou encore zone de

Si le milieu marin est le principal milieu de vie pour certaines de ces espèces, qui ne viennent à terre que pour les besoins de la reproduction (cas des Procellariidés, Sulidés, Alcidés), d'autres espèces fréquentent quotidiennement à la fois le milieu marin et le milieu terrestre (cas des Laridés, Phalacrocoracidés).

Les espèces côtières inféodées à l'estran sont classiquement regroupées sous l'appellation oiseaux d'eau et comprennent notamment les limicoles : Charadriidés (gravelots, pluviers), Haematopodidés (huîtrier-pie), Scolopacidés (barges, bécasseaux, chevaliers, tournepierre à collier), auxquelles il faut également rajouter quelques Anatidés (bernache et tadorne de Belon notamment, et autres espèces de canards).

transit (axe de migration, trajet régulier vers les zones de pêche). Il faut également souligner que le rayon de prospection alimentaire des adultes peut varier en période de reproduction entre la période d'incubation des œufs et la période d'élevage des poussins. De manière analogue, les espèces qui fréquentent l'estran peuvent utiliser cet espace comme zone d'alimentation ou comme zone de repos, certaines d'entre elles pouvant aussi s'installer sur les hauts d'estran pour la reproduction (cas des gravelots par exemple).

10.1.2.3. *Écologie alimentaire des espèces présentes*

Les oiseaux marins ont des modes d'alimentation différents selon les espèces, et peuvent exploiter la colonne d'eau à des profondeurs variables. Certaines espèces se nourrissent exclusivement, ou principalement, en surface, d'autres en subsurface et d'autres plus ou moins profondément en plongée, parfois à plus de 50 m (Langton *et al.*, 2011 ; RPS, 2011a ; Furness *et al.*, 2012). Par ailleurs, certaines espèces s'alimentent plutôt en zone côtière, zone potentielle d'implantation des technologies hydroliennes, alors que d'autres s'alimentent plutôt au large. Il est donc essentiel de dresser une liste des espèces présentes à différentes périodes du cycle annuel, en fonction de leur écologie alimentaire, afin d'évaluer au mieux les effets potentiels du projet en termes d'impact sur l'avifaune.

10.1.3. *Caractérisation de la variabilité naturelle du site d'implantation*

L'environnement marin n'est pas un environnement figé, et la fréquentation d'une zone particulière par l'avifaune est étroitement liée à des variations naturelles susceptibles d'influencer, par exemple, l'abondance ou l'accessibilité des proies exploitées. Les oiseaux marins sont des espèces mobiles qui exploitent un environnement changeant. Il est donc important de ne pas tirer de conclusions hâtives sur la base de données parcellaires, ou collectées ponctuellement dans le temps, sur la répartition spatiale et l'abondance des oiseaux marins à l'échelle de la zone d'étude. La réalisation de l'état initial doit donc nécessairement s'étaler sur une année entière au minimum, pas de temps qui ne permet cependant pas d'identifier d'éventuelles variations spatio-temporelles interannuelles.

10.1.4. *Identification d'indicateurs pertinents*

L'état initial de l'avifaune sur la zone d'étude doit permettre de disposer d'éléments précis sur la diversité des espèces présentes, sur leur abondance et leur répartition, sur le type d'utilisation de l'habitat marin et sur leurs comportements en

mer et à terre durant l'ensemble de leur cycle annuel.

Ensuite, sur la base de ces résultats et selon les caractéristiques biologiques propres à chaque espèce, qu'il s'agisse par exemple de leur écologie alimentaire, des comportements vis-à-vis du trafic maritime, de leurs traits démographiques ou de leur statut de conservation, il est possible de définir une échelle de sensibilité (Wilson *et al.*, 2007 ; Furness *et al.*, 2012 ; McCluskie *et al.*, 2012 ; voir 10.2).

10.1.5. *Méthodologies possibles d'acquisition d'information : bibliographie et acquisition de données*

En premier lieu, une analyse bibliographique des publications et ouvrages concernant les oiseaux marins et côtiers, nicheurs ou hivernants, permet de dresser une liste des espèces présentes, ou potentiellement présentes, sur la zone concernée par le projet de parc hydrolien.

En ce qui concerne les oiseaux marins en mer, les connaissances à l'échelle des eaux françaises sont encore imparfaites (voir par exemple Castège et Hémery, 2009), mais des données nouvelles ont été collectées récemment dans le cadre du programme PACOMM (programme d'acquisition de connaissances sur les oiseaux et mammifères marins ; données en cours d'analyse, publiées uniquement sous forme de rapports de campagne pour le moment ; Pettex *et al.*, 2012a, 2012b). Les oiseaux marins nicheurs font quant à eux l'objet d'enquêtes nationales réalisées sur une base décennale (Cadiou *et al.*, 2004 ; nouvelle enquête en cours 2009-2012), mais aussi pour certaines espèces de recensements plus réguliers à des échelles départementales ou régionales. En ce qui concerne les oiseaux marins nicheurs, il est donc relativement facile de trouver la documentation adéquate permettant de répertorier les colonies situées dans la zone d'étude et de connaître leur importance numérique. Le calendrier de reproduction des oiseaux marins sur les côtes françaises est également parfaitement connu et documenté (cantonement, construction des nids, ponte, élevage des jeunes, dispersion).

Pour les espèces d'anatidés et de limicoles côtiers présentes en hiver, des dénombrements sont

réalisés annuellement sur le littoral français au mois de janvier (Deceuninck *et al.*, 2013 ; Mahéo et Le Dréan-Quéneq'hdu, 2013). Ces espèces font également l'objet d'enquêtes nationales en période de reproduction (dernière enquête réalisée sur la période 2010-2011, résultats non publiés à ce jour).

L'acquisition de données nouvelles reste incontournable, principalement pour les oiseaux en mer, pour avoir une vision plus fine de la situation à l'échelle de la zone d'implantation du projet de parc hydrolien (Fox *et al.*, 2006). La collecte de données doit se faire selon les méthodologies standardisées, classiquement utilisées pour le suivi des oiseaux en mer, et adaptées si besoin à l'échelle de la zone d'étude (voir 10.4).

10.2. Méthodes d'identification et d'analyse des changements écologiques potentiels

Les impacts potentiels sur l'avifaune en mer sont à la fois liés aux dispositifs techniques mis en place (profondeur d'installation des machines, caractéristiques techniques des structures immergées, présence ou non de structures émergées, etc.), et aux modalités de maintenance des installations (fréquence de rotation des navires, durée de présence sur la zone, etc.) (Fig. 56, Tab. 32). Les impacts potentiels à terre concernent les risques de dérangement sur la zone d'atterrissage, essentiellement en phase d'installation et de démantèlement. McCluskie *et al.* (2012) ont réalisé une synthèse particulièrement détaillée des impacts potentiels des technologies d'énergie marine renouvelable sur l'avifaune, qu'ils soient directs (effet des structures en elles même) ou indirects (par exemple effets d'un accroissement de la turbidité sur la prospection alimentaire des oiseaux, ce qui constitue une modification de leur habitat), négatifs (mortalité due à des collisions avec les structures) ou positifs (concentration de proies). Compte tenu que les énergies marines renouvelables sont des technologies récentes, il n'existe quasiment aucune étude d'impact sur

l'avifaune marine (RPS, 2011a ; Witt *et al.*, 2012). Les impacts potentiels demeurent donc hypothétiques à l'heure actuelle. Une partie des impacts potentiels identifiés sont similaires à ceux mis en avant dans le cas des champs éoliens offshore ou des activités d'extraction de sédiments marins (Garthe et Hüppop, 2004 ; Petersen *et al.*, 2006 ; Cook et Burton, 2010).

Les principaux risques concernent la mortalité par collision avec les structures immergées (turbines, éventuels câbles ou chaînes d'ancrage), ou avec les navires opérant sur la zone ou les éventuelles structures émergées, les modifications comportementales liées au dérangement et à l'évitement de la zone d'implantation et les modifications de l'habitat marin pouvant avoir des répercussions sur les ressources alimentaires disponibles pour les oiseaux (Fox *et al.*, 2006 ; McCluskie *et al.*, 2012). La mise en suspension des sédiments marins est susceptible d'engendrer une moindre visibilité pour des oiseaux pêcheurs utilisant surtout leur vue et une diminution de la productivité primaire du fait de la moindre pénétration de la lumière, mais aussi une dissémination de polluants dans le milieu (McCluskie *et al.*, 2012).

D'autres risques de pollution existent également (McCluskie *et al.*, 2012), dont le risque de pollution par les hydrocarbures (navires effectuant les opérations de maintenance) ou par les liquides hydrauliques utilisés pour certains types de machines (Boehlert et Gill, 2010). Cela peut exposer les oiseaux marins à des pollutions chroniques, ou massives en cas d'incident, avec des conséquences en termes de survie des oiseaux.

Que ce soit en phase d'installation, d'exploitation ou de démantèlement, les principaux risques potentiels pour l'avifaune sont les mêmes, mais l'intensité de ces pressions peut varier selon la phase considérée. Il est donc important de prendre en compte l'aspect spatial et temporel des différents types de perturbation potentielle, ainsi que leur durée, leur fréquence et leur intensité (Boehlert et Gill, 2010).

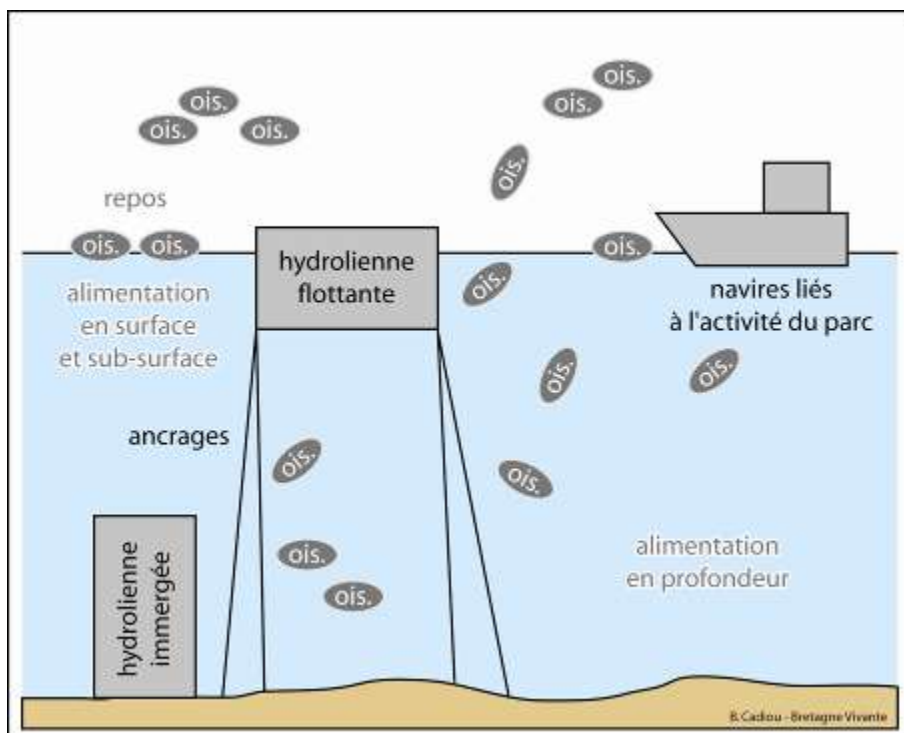


Figure 56 Schéma simplifié des interactions entre parc hydrolien et avifaune marine

Hypothèse technique		Impact envisagé	Type d'impact		Méthode d'identification du changement
Zone*	Phases		Durée	Intensité et étendue	
À terre	Installation + démantèlement	dérangement	provisoire	élevée et localisée	suivi des stationnements
	Exploitation	dérangement et perte d'habitats	définitif	faible à élevée et + ou - localisée	évolution spatio-temporelle de l'abondance des oiseaux
En mer	Installation + démantèlement	dérangement et perte d'habitats	provisoire	élevée et + ou - localisée	évolution spatio-temporelle de l'abondance des oiseaux
	Exploitation	dérangement et perte d'habitats	définitif	faible à élevée et + ou - localisée	évolution spatio-temporelle de l'abondance des oiseaux
	Installation + exploitation + démantèlement	collisions avec structures et navires	définitif	faible à élevée + ou - localisée	suivi comportemental + fréquence d'échouage d'oiseaux
	Installation + exploitation + démantèlement	turbidité	provisoire à définitif	faible à élevée et potentiellement étendue	évolution spatio-temporelle de l'abondance des oiseaux
	Exploitation	accessibilité des proies (accrue ou réduite)	définitif	faible à élevée et + ou - localisée	évolution spatio-temporelle de l'abondance des oiseaux
	installation + exploitation + démantèlement	pollution par hydrocarbures ou autres produits	définitif	faible à élevée et potentiellement étendue	fréquence d'échouage d'oiseaux

Tableau 32 Principaux impacts potentiels susceptibles d'affecter l'avifaune. * à terre (zone d'atterrage) ou en mer (zone d'implantation des machines et zone de transit des navires)

Impacts directs

Sous l'eau, les espèces les plus à risque en termes de collision avec les structures immergées sont les oiseaux qui plongent le plus profondément et qui recherchent et poursuivent leurs proies dans la colonne d'eau ou près du fond (alcidés et cormorans notamment, mais aussi fou de Bassan et plongeurs ; voir Fig. 1 dans Langton *et al.*, 2011). Le risque de collision est lié à différents paramètres : l'étendue de la superposition entre les zones d'alimentation et le parc hydrolien, le mode de pêche (profondeur des plongées, vitesse de nage), le rythme journalier d'activité de recherche alimentaire (fréquence des phases d'alimentation nocturne variable selon les espèces), le niveau d'attraction exercée sur l'espèce par des structures émergées (qui peuvent être utilisées comme perchoirs), les effets éventuels du parc hydrolien sur la turbidité ou sur la courantologie (Wilson *et al.*, 2007). Les projets actuels font état le plus souvent de machines installées au fond, avec des turbines au-dessus d'un socle, mais il existe aussi des technologies flottantes, qui concernent la strate surface et sub-surface de la colonne d'eau. Si le premier groupe de machines présente un risque seulement pour les quelques espèces d'oiseaux marins qui plongent profondément, le second groupe de machines est susceptible de générer des interactions avec un plus grand nombre d'espèces d'oiseaux marins.

En surface, la présence de navires, ou d'éventuelles structures émergées, peut entraîner des modifications des trajectoires de vol des oiseaux qui transitent sur la zone, ou entraîner le dérangement des oiseaux sur leur zone d'alimentation ou de repos, et leur déplacement vers d'autres zones potentiellement moins favorables, ce qui se traduit par une perte d'habitat pour ces espèces.

Impacts indirects

La présence de nombreuses structures immergées sur une large zone est susceptible d'avoir des répercussions sur les espèces proies exploitées par les oiseaux marins, mais l'impact des hydroliennes sur les poissons demeure encore très mal connu (voir partie 8 – Halieutique). Il peut y avoir un effet de concentration des proies

au niveau des structures (effet récif), de perturbation des proies les rendant plus accessibles (collisions, courants, etc.), mais aussi un effet inverse de réduction de l'accessibilité des proies consécutive à une modification locale de la courantologie ou à d'autres facteurs (Langton *et al.*, 2011 ; Shields *et al.*, 2011). Cette modification de la courantologie peut se produire à l'échelle du champ hydrolien (>1 km), à une distance plus importante (1-10 km), voire à une échelle régionale (>10 km ; Shields *et al.*, 2011).

Récapitulatif

Sur la base des indices de sensibilité ou de vulnérabilité mis en avant dans diverses publications (Cook et Burton, 2010 ; Wilson *et al.*, 2007 ; Furness *et al.*, 2012 ; McCluskie *et al.*, 2012), il est possible d'identifier les espèces sur lesquelles une attention particulière doit être portée, compte tenu de la plus forte probabilité des interactions avec les technologies hydroliennes et les activités associées à la maintenance du parc (Tab. 33).

10.3. Identification des impacts cumulés

L'avifaune marine est soumise à de multiples facteurs de pression anthropiques en mer (pollutions, trafic maritime, loisirs nautiques, surpêche, etc. ; Croxall *et al.*, 2012), et les développements récents des projets d'énergie renouvelable en mer (éolien, hydrolien, etc.) en constituent un nouveau, qui s'additionne aux autres, et qui concerne à la fois des zones côtières et des zones plus au large. Il convient donc d'évaluer au mieux les effets cumulés de l'ensemble de ces facteurs de pression, et les impacts mesurés, en prenant en compte les échelles spatiales et temporelles appropriées à tous ces facteurs, ainsi que la durée et l'intensité des différentes perturbations environnementales identifiées (Petersen *et al.*, 2006 ; Boehlert et Gill, 2010 ; Masden *et al.*, 2010).

Il est utile de s'inspirer des préconisations formulées dans le contexte de l'éolien offshore (King *et al.*, 2009), notamment en termes de dérangement en mer et de déplacements des oiseaux liés

à des pertes d'habitat. Il est ainsi possible d'envisager des modélisations des impacts cumulés sur les budgets énergétiques des oiseaux, en prenant en compte à la fois leurs paramètres démographiques et leur plasticité en termes d'exploitation des habitats et des ressources (King *et al.*, 2009).

10.4. Description du programme de suivi environnemental

L'évaluation de l'impact environnemental nécessite la mise en place d'un programme de suivi adéquat pour permettre de recueillir les données indispensables sur l'avifaune marine comme sur les autres compartiments marins. Comme pour le cas des projets de champs éoliens en mer (Camphuysen *et al.*, 2004), les informations à recueillir sur l'avifaune à l'échelle des zones de projets hydroliens concernent :

- la répartition des oiseaux en mer ;
- l'abondance des différentes espèces présentes ;
- le type d'activités en mer (alimentation, repos, zone de mue, transit) ;
- les axes migratoires et les zones de transit ;
- les zones d'alimentation ;
- les facteurs influant la répartition et l'abondance des espèces ;
- la variabilité spatio-temporelle de répartition et d'abondance (saisonnalité, cycle journalier en lien avec le cycle des marées) ;
- l'évaluation du risque de collision et des modifications comportementales.

Pour appréhender au mieux la problématique concernant les interactions potentielles entre l'avifaune et le projet hydrolien, il faut envisager deux années de suivi de l'état initial, avec du recueil de données sur une base mensuelle. Cela s'avère d'autant plus indispensable qu'il n'existe quasiment aucun retour d'expérience dans ce domaine, contrairement au contexte de l'éolien offshore.

Selon la localisation et la configuration de la zone d'implantation du projet hydrolien, les observa-

tions doivent se faire depuis la terre, depuis une embarcation ou depuis un aéronef ou en couplant plusieurs moyens d'investigations. Les suivis sont à mettre en œuvre en utilisant des méthodes standardisées (Camphuysen *et al.*, 2004 ; Maclean *et al.*, 2009 ; Perrow *et al.*, 2010 ; RPS, 2011b, Tab. 34). En fonction de l'étendue de la zone d'étude retenue, ces méthodes générales peuvent être adaptées au contexte local (RPS, 2011b ; voir également le tableau 3 de comparaison des méthodes par bateau et par aéronef dans Camphuysen *et al.*, 2004, ainsi que les retours d'expérience présentés par Maclean *et al.*, 2009). Par rapport au contexte des champs éoliens offshore, l'acquisition des données pour les parcs hydroliens nécessite moins de suivis, notamment parce que le risque d'effet barrière lié aux structures émergées n'existe pas, ou très peu. Pour les risques de collision avec les structures, ils ne sont pas aériens mais sous-marins et concernent un nombre restreint d'espèces d'oiseaux. Compte tenu que les zones d'implantation des projets hydroliens sont caractérisées par des difficultés d'accès potentiellement importantes, liées à la courantologie notamment, le choix des méthodes de suivi et le calendrier prévisionnel des suivis doivent être adaptés au mieux pour chercher à évaluer la variabilité spatio-temporelle. Il est important de disposer des données permettant de connaître les variations saisonnières en lien avec le cycle annuel des espèces (en considérant au moins la dichotomie : périodes de reproduction et hors reproduction).

La mesure des perturbations environnementales et des impacts sur l'avifaune ne peut se faire que si l'état initial a été évalué de manière rigoureuse, permettant ainsi de comparer les situations avant le lancement du projet, puis durant les phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement. Selon les espèces présentes et les risques potentiels encourus en fonction de leurs caractéristiques biologiques (mode d'alimentation, etc. ; voir Tab. 33), des suivis spécifiques peuvent être mis en place pour affiner la mesure des impacts.

Nom vernaculaire	Nom scientifique	directive oiseaux	d'après CT et al. 2007		situation en Manche-Atlantique			UICN et al. 2011	UICN et al. 2011	à surveiller contexte hydrolien
			côtier	haute mer	nidification	migration	hivernage	liste rouge France nicheurs	liste rouge France hivernants	
GAVIIDAE										
Plongeon catmarin	Gavia stellata	Anx. 1	P	---	---	P	P		NA	OUI
Plongeon arctique	Gavia arctica	Anx. 1	P	---	---	P	P		NA	OUI
Plongeon imbrin	Gavia immer	Anx. 1	P	---	---	P	P		VU	OUI
PODICIPEDIDAE										
Grèbe huppé	Podiceps cristatus	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		NA	oui
Grèbe jougris	Podiceps grisegena	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		NA	NON
Grèbe esclavon	Podiceps auritus	Anx. 1	P	---	---	P	P		VU	OUI
Grèbe à cou noir	Podiceps nigricollis	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		LC	oui
PROCELLARIIDAE										
Fulmar boréal	Fulmarus glacialis	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	---	LC	NA	NON
Puffin cendré	Calonectris diomedea	Anx. 1	P	P	---	P	---	VU	NA	NON
Puffin majeur	Puffinus gravis	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[NA]	NON
Puffin fuligineux	Puffinus griseus	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[NA]	oui
Puffin des Anglais	Puffinus puffinus	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	---	VU	[NA]	oui
Puffin des Baléares	Puffinus mauretanicus	Anx. 1	P	P	---	P	P		[VU]	OUI
Puffin Yelkouan	Puffinus yelkouan	Anx. 1	---	---	---	---	---	VU	NA	oui
HYDROBATIDAE										
Océanite tempête	Hydrobates pelagicus	Anx. 1	P	P	N	P	---	NT	[NA]	NON
Océanite culblanc	Oceanodroma leucorhoa	Anx. 1	P*	P	-	P	---		[NA]	NON
SULIDAE										
Fou de Bassan	Morus bassanus	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	NT	[NA]	OUI
PHALACROCORACIDAE										
Grand Cormoran	Phalacrocorax carbo	Migr. art. 4.2	P	P*	N	P	P	LC	LC	OUI
Cormoran huppé	Phalacrocorax aristotelis	Migr. art. 4.2	P	---	N	P	P	LC	NA	OUI
ANATIDAE										
Bernache cravant	Branta bernicla	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		LC	NON
Tadorne de Belon	Tadorna tadorna	Migr. art. 4.2	P	---	N	P	P	LC	LC	NON
Fuligule milouinain	Aythya marila	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		NT	NON
Eider à duvet	Somateria mollissima	Migr. art. 4.2	P	---	N*	P	P	CR	NA	OUI
Harelda boréale	Clangula hyemalis	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		NA	NON
Macreuse noire	Melanitta nigra	Migr. art. 4.2	P	P*	---	P	P		LC	OUI
Macreuse brune	Melanitta fusca	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		EN	OUI
Garrot à Oeil d'or	Bucephala clangula	Migr. art. 4.2	P	---	---	P	P		NA	OUI
Harle huppé	Mergus serrator	Migr. art. 4.2	P	---	N*	P	P		LC	OUI
SCOLOPACIDAE										
Phalarope à bec étroit	Phalaropus lobatus	Anx. 1	P	---	---	P	---		[NA]	NON
Phalarope à bec large	Phalaropus fulicarius	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[NA]	NON
STERCORARIIDAE										
Labbe pomarin	Stercorarius pomarinus	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	(?)		[LC]	NON
Labbe parasite	Stercorarius parasiticus	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[LC]	NON
Labbe à longue queue	Stercorarius longicaudus	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[VU]	NON
Grand Labbe	Stercorarius skua	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	(?)		[LC]	NON
LARIDAE										
Mouette mélanocéphale	Larus melanocephalus	Anx. 1	P	P	N	P	P	LC	NA	NON
Mouette pygmée	Larus minutus	Anx. 1	P	P	---	P	P		LC	NON
Mouette de Sabine	Larus sabini	Migr. art. 4.2	P	P	---	P	---		[NA]	NON
Mouette nieuse	Larus ridibundus	Migr. art. 4.2	P	P*	N	P	P	LC	LC	NON
Goéland cendré	Larus canus	Migr. art. 4.2	P	---	N	P	P	VU	LC	NON
Goéland brun	Larus fuscus	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	LC	LC	NON
Goéland argenté	Larus argentatus	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	LC	NA	NON
Goéland leucopnée	Larus michaelis	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	LC	NA	NON
Goéland bourgmestre	Larus hyperboreus	Anx. 1	P	P*	---	P	P		NA	NON
Goéland marin	Larus marinus	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	LC	NA	oui
Mouette tridactyle	Rissa tridactyla	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	NT	NA	NON
STERNIDAE										
Sterne caugek	Sterna sandvicensis	Anx. 1	P	P	N	P	---	VU	[LC]	oui
Sterne de Dougall	Sterna dougallii	Anx. 1	P	P*	N	P	---	CR	NT	NON
Sterne pierregarin	Sterna hirundo	Anx. 1	P	P*	N	P	---	LC	[LC]	NON
Sterne arctique	Sterna paradisaea	Anx. 1	P	P	N*	P	---	CR	[LC]	oui
Sterne naine	Sterna albifrons	Anx. 1	P	P*	N	P	---	LC	[LC]	NON
Guifette noire	Chlidonias niger	Anx. 1	P	P*	---	P	---	VU	[DD]	NON
ALCIDAE										
Guillemot de Troil	Uria aalge	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	EN	DD	OUI
Pingouin torda	Alca torda	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	P	CR	DD	OUI
Mergule nain	Alle alle	Migr. art. 4.2	P	P*	---	P	---		NA	oui
Macareux moine	Fratercula arctica	Migr. art. 4.2	P	P	N	P	---	CR	NA	OUI

Tableau 33 Liste des espèces d'oiseaux marins potentiellement présentes sur les zones d'implantation de parcs hydroliens sur le littoral Manche-Atlantique, et identification des espèces ayant la plus forte probabilité d'interactions avec les technologies hydroliennes (légende ci-après).

Liste des espèces établie d'après Comolet-Tirman et al. (2007) :

Statut en Manche et Atlantique : P = présent, P* = présent très rare, --- = absent (aucune mention), N = nicheur régulier, N* = nicheur occasionnel, (?) = statut mal connu ou non évalué

UICN et al. 2011 = liste rouge des oiseaux de France

Nicheurs, hivernants ou de passage (entre []); en italique : passage de manière occasionnelle ou marginale
CR : En danger critique ; EN : En danger ; VU : Vulnérable ; NT : Quasi menacée ; LC : Préoccupation mineure ; DD : Données insuffisantes ; NA : Non applicable ; NE : Non évaluée

Méthodes de suivi	Variables étudiées	Avantages	Limites
Depuis la terre	Répartition et abondance	Plus adapté pour couvrir fréquemment des zones de faible surface ; Moins dépendant de l'état de la mer	Distance entre les points d'observation favorables et la zone d'étude
	Identification des espèces (pour les oiseaux plongeurs)	Plus adapté pour l'identification à l'échelle de l'espèce	
	Comportement des oiseaux	Plus adapté pour collecter des informations comportementales	
Depuis une embarcation	Répartition et abondance	Plus adapté à la fois pour couvrir fréquemment des zones de faible surface ou pour couvrir des zones de large surface	Plus dépendant de l'état de la mer
	Identification des espèces (pour les oiseaux plongeurs)	Plus adapté pour l'identification à l'échelle de l'espèce	
	Comportement des oiseaux	Plus adapté pour collecter des informations comportementales	
Depuis un aéronef	Répartition et abondance	Plus adapté pour couvrir des zones de large surface ; Moins dépendant de l'état de la mer	Moins adapté pour couvrir fréquemment des zones de faible surface
	Identification des espèces (pour les oiseaux plongeurs)		Moins adapté pour l'identification à l'échelle de l'espèce
	Comportement des oiseaux		Moins adapté pour collecter des informations comportementales

Tableau 34 Principales méthodes de suivi des oiseaux en mer, et avantages et limites dans le contexte des projets hydroliens (compilation simplifiée établie d'après Camphuysen et al., 2004 ; Maclean et al., 2009 ; Perrow et al., 2010 ; RPS, 2011b)

Il existe en effet un certain nombre d'espèces d'oiseaux marins pour lesquelles la mise en place de parcs hydroliens est susceptible d'engendrer des impacts significatifs, et qui nécessitent donc une attention particulière dans le cadre du programme de suivi environnemental. Cela peut être le cas par exemple, pour connaître les variations d'activités à des échelles temporelles journalières (activité diurne, et parfois nocturne, souvent en lien avec le rythme des marées).

Une fois la phase d'installation achevée, une nouvelle série de suivis sera impérativement à mener lors des premières actions de maintenance sur le parc (relève des machines pour inspection, etc.).

10.5. Mesures d'atténuation des impacts

À l'heure actuelle, faute de recul suffisant dans le domaine des technologies hydroliennes, il est impossible de connaître les impacts avérés qu'engendrera la mise en place des parcs sur l'avifaune. Il est néanmoins possible de distinguer deux cas de figure, à savoir les perturbations temporaires et les perturbations permanentes de l'environnement exploité par l'avifaune marine et côtière.

Dans les cas où la perturbation est temporaire, de l'ordre de quelques semaines à quelques mois, le

choix de la période optimale d'intervention sera fait en adéquation avec les contraintes techniques et logistiques inhérentes à la technologie hydrolienne mise en place et avec le cycle annuel des espèces d'oiseaux présentes (reproduction, hivernage...), afin de réduire au maximum les interactions ou d'en diminuer l'intensité.

Dans les cas où la perturbation est permanente (perte d'habitat par exemple), il faudra évaluer au mieux son ampleur et les répercussions, en termes d'impacts significatifs, sur les différentes espèces d'oiseaux concernées, afin d'envisager des mesures d'atténuation.

10.6. Lacunes et programmes de recherche

Une des principales lacunes actuelles concerne la réaction des oiseaux, et les éventuelles modifications comportementales, face à l'implantation de structures immergées (turbines, éventuels câbles ou chaînes d'ancrage) dans leurs zones d'alimentation habituelles. Il faut pour cela pouvoir étudier et comparer ce qui se passe dans la colonne d'eau avant puis après l'installation des machines en termes d'activité de recherche alimentaire et d'interactions : profondeur de plongée, type de nage, évitement des structures, collision... Cela nécessite des investigations préalables pour la recherche des méthodologies de suivi les plus appropriées.

Références clés

Furness R.W., Wade H.M., Robbins A.M.C., Masden E.A., 2012. Assessing the sensitivity of seabird populations to adverse effects from tidal stream turbines and wave energy devices. *ICES Journal of Marine Science*, 69 : 1466-1479.

Langton R., Davies I.M., Scott B.E., 2011. Seabird conservation and tidal stream and wave power generation : information needs for predicting and managing potential impacts. *Marine Policy*, 35 : 623-630.

McCluskie A.E., Langston R.H.W., Wilkinson N.I. ,2012. Birds and wave & tidal stream energy: an ecological review. RSPB Research Report 42. RSPB, The Lodge, Sandy, Bedfordshire.

RPS, 2011a. Assessment of Risk to Diving Birds from Underwater Marine Renewable Devices in Welsh Waters. Phase 1 - Desktop study of Birds in Welsh Waters and Preliminary Risk Assessment. RPS report on behalf of The Welsh Assembly Government, February 2011.

RPS, 2011b. Assessment of Risk to Diving Birds from Underwater Marine Renewable Devices in Welsh Waters. Phase 2 – Field methodologies and sites assessments. RPS report on behalf of The Welsh Assembly Government, February 2011.

Conclusion

Le consortium de spécialistes impliqués dans le projet collaboratif Ghydro et les experts consultés ponctuellement issus d'horizons différents, ont permis de tendre à l'exhaustivité, en l'état actuel des connaissances. En particulier, ont été traités dans ce document : l'établissement de l'état initial, la caractérisation des impacts potentiels et les suivis environnementaux pour les différents compartiments physiques et biologiques des écosystèmes marins (Tab. 35).

Cependant, les technologies hydroliennes ne sont pas encore en phase de déploiement industriel sur les sites d'exploitation. Il n'y a donc pas aujourd'hui de retour d'expérience de dimension suffisante pour caractériser les impacts éventuels de fermes de production.

Le projet Ghydro initie ainsi un processus itératif, avec une fréquence de mise à jour bisannuelle,

qui permettra d'améliorer le contenu du document au fur et à mesure des retours d'expérience qui l'alimenteront. Des projets de recherche contribueront également à réduire progressivement la méconnaissance que nous avons de ces milieux très énergétiques (paramètres physiques et biologiques) et des impacts potentiels.

France Energies Marines a d'ores et déjà initié des projets de R&D qui permettront d'améliorer ces connaissances, par exemple :

- ✓ Caractérisation de l'état initial du benthos sur un site hydrolien,
- ✓ Utilisation de l'acoustique passive pour caractériser les impacts sur le benthos,
- ✓ Etudes des interactions des usages en zone hydrolienne,
- ✓ Etudes sur sites estuarien.

	Etat initial				Identification des changements écolologiques potentiels	Proposition de programme de suivi environnemental	Exemples de mesures d'atténuation des impacts
	Objets	Périmètre spatial	Périmètre temporel	Méthodologies			
Fonds marins	Bathymétrie Nature des fonds Epaisseur sédiments meubles	Quelques km2 autour de la zone d'exploitation et du tracé du câble	1 levé d'état initial	Bibliographie/carto Levés géophysiques	Les impacts sur les fonds marins: - sont directement liés aux choix techniques : du type de fondations, du type de pose de câbles, de la technique d'atterrage du câble sous-marin, - évoluent durant les trois phases de vie d'un projet hydrolien: construction, exploitation, démantèlement.	Un premier levé de suivi à 1 an d'exploitation puis tous les 5 ans si impacts observés: outils d'acquisition bathymétriques (sondeur multifaisceaux ...), outils d'acquisition d'imagerie (sonars ...).	Adaptation du design des structures, des techniques de pose...
Océanographie	Marée Courant Houle Vent Dynamique sédimentaire	De quelques km2 à plusieurs dizaines de km2	. Reconstitution sur une vingtaine d'années . Pas de temps de quelques s à 10 min	Bibliographie/bases de données Acquisition de données Modélisation	Les impacts sur l'océanographie: - sont directement liés à la présence d'un obstacle dans la colonne d'eau et celle d'un ouvrage sur le fond, - sont liés principalement à la phase d'exploitation d'un projet hydrolien.	Plateforme d'océanographie opérationnelle qui fonctionnera tout au long de la vie du projet: Appareils de mesure et modélisation numérique en continu.	Choix de la zone d'implantation Adaptation des techniques de travaux Optimisation de la géométrie des turbines Adaptation du design et mise en place de dispositifs anti-affouillement autour des pieux et des fondations gravitaires
Bruit sous marin	Bruit initial	Empreinte sonore Bande de sensibilité des espèces	. 4 saisons . Pas de temps d'1 s	Bibliographie Acquisition de données Modélisation	Les impacts sur le bruit sous-marin: - sont directement liés aux phases de vie d'un projet hydrolien: construction, exploitation, démantèlement, - sont directement liés au choix techniques: des outils d'installation et de démantèlement, et de la conception des éléments du parc hydrolien.	Phase de construction et de démantèlement: mesures d'acoustique passive à réaliser en concomitance avec les phases effectives de travaux . Phase d'exploitation: mesures d'acoustique passive à réaliser tous les trimestres pour (N), (N+1), (N+5), (N+10) Mettre en place des mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels ; . Mettre en place des mesures de réduction des niveaux sonores cumulés ; . Mettre en place des systèmes qui entravent la propagation du bruit dans l'océan ; . Mettre en place des mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque.
Benthos	Communautés benthiques	Légèrement plus grand que la zone d'exploitation et du tracé du câble	2 saisons par an pendant 1 an pour le scénario minimal et 3 ans pour le scénario optimal	Bibliographie/bases de données Acquisition de données	Les impacts sur les communautés benthiques: - sont directement liés aux choix techniques: du type de fondations, du câble et de son type de pose, de la conception des éléments du parc hydrolien, - dépendent de la vulnérabilité des communautés concernées, - évoluent durant les trois phases de vie d'un projet hydrolien: construction, exploitation, démantèlement.	Premier suivi dans les 2 mois qui suivent la fin de l'installation et une autre saison dans la première année. Scénario optimal: 2 saisons par an à +2ans et +3 ans. Scénario minimal: 2 saisons à +5 ans. Puis la fréquence des suivis suivants sera déterminée en fonction des résultats des premiers suivis.	Mesures d'évitement: sélection de sites d'implantation alternatifs, modification des méthodes d'installation, modification du design des structures (ex. embase/fondations des machines). Mesures de réduction: emprise spatiale des fondations, profondeur d'ensouillage du câble, modification du design des structures pour minimiser la perturbation des courants Mesures de compensation: Appliquées au maximum sur les espèces/fonctionnalités des habitats (ou communautés) impactés.

	Etat initial				Identification des changements écolologiques potentiels	Proposition de programme de suivi environnemental	Exemples de mesures d'atténuation des impacts
	Objets	Périmètre spatial	Périmètre temporel	Méthodologies			
Halieutique	Ressources halieutiques	De quelques centaines de m2 à plusieurs dizaines de km2	. Dépend du cycle des espèces . De jour et de nuit	Bibliographie Acquisition de données	Les impacts sur les communautés pélagiques: - sont directement liés à la présence d'un obstacle dans la colonne d'eau qui peut entraîner une modification des courants, - sont liés au choix technique des turbines pour le risque de collision, - sont liés principalement à la phase d'exploitation d'un projet hydrolien. La phase d'installation est à prendre en compte également pour les impacts acoustiques	. Méthodes par capture et méthodes par observation, adaptées à un fort hydrodynamisme. . Programme de suivi dépend de l'état initial: comporte des campagnes annuelles et des systèmes d'observation acoustique en continu sur le site.	Sélection de sites d'implantation alternatifs Adaptation des méthodes d'installation Calendrier d'intervention adapté (perturbations temporaires), Adaptation du design des structures Ensuillage des câbles
Mammifères marins	Mammifères marins	Empreinte sonore	1 à 2 ans de suivi	Bibliographie Acquisition de données	Les impacts sur les mammifères marins: - sont liés au choix technique des turbines, mouillages et aux navires pour le risque de collision, - sont directement liés au choix techniques des méthodes utilisées lors des phases d'installation et de démantèlement, et de maintenance pour les impacts liés au bruit. - sont liés aux impacts sur leurs habitats	Suivis par méthodes visuelles, par méthodes d'acoustique passive, par méthodes d'imagerie sous-marine acoustique au niveau des turbines.	. Mettre en place des mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels ; . Mettre en place des mesures de réduction des niveaux sonores cumulés ; . Mettre en place des systèmes qui entravent la propagation du bruit dans l'océan ; . Mettre en place des mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque. Calendrier d'intervention adapté, adaptation des méthodes de travaux, du design des structures.
Avifaune	Oiseaux marins Oiseaux côtiers	De quelques km2 à plusieurs dizaines de km2	1 à 2 ans Pas de temps mensuel	Bibliographie Acquisition de données	Les impacts sur l'avifaune marine sont principalement de trois types: - risques de collision avec les turbines en phase d'exploitation et avec les navires pendant les 3 phases de vie du projet, - dérangement (bruits, modification de l'accessibilité aux proies) en mer (3 phases) et sur l'estran pour l'atterrissage du câble (phases 1 et 2). - modification de leur habitat	Identification d'une liste d'espèces sur lesquelles une attention particulière doit être portée. Méthodes de suivis adaptées à la courantologie des sites et au cycle annuel des espèces	Dans le cas des perturbations temporaires: choix de la période optimale d'intervention. Dans le cas des perturbations permanentes: besoin de connaissances sur les impacts pour déterminer des mesures d'atténuation.

Tableau 35 Tableau de synthèse

Bibliographie

ADEME, 2013. Appel à Manifestations d'Intérêt (AMI), Energies marines renouvelables – Démonstrateurs et briques technologiques. 10pp.

Albertelli G., Covazzi-Harriague A., Danovaro R., Fabiano M., Frascchetti S., Pusceddu A., 1999. Differential responses of bacteria, meiofauna and macrofauna in a shelf area (Ligurian Sea, NW Mediterranean): role of food availability. *Journal of Sea Research* 42 : 11–26.

Andrulewicz E., 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. *Journal of Sea Research*, 49: 337-345.

Anon. 2008. Minimizing the introduction of incidental noise from commercial shipping operations into the marine environment to reduce potential adverse impacts on marine life. Work Programme of the Committee and Subsidiary Bodies. Submitted by the United States. International Maritime Organization Marine, Environment Protection Committee. MEPC 58/19. 15pp.

Anon. Roosevelt Island Tidal Energy Project, 2008. Draft Kinetic Hydropower Pilot Licence Application, 2.

Ardhuin F., Roland A., Dumas F., Bennis A-C., Sentchev A., Forget P., Wolf J., Girard F., Osuna P., Benoît M., 2012. Numerical Wave Modelling in Conditions with Strong Currents: Dissipation, Refraction, and Relative Wind. *Journal of Physical Oceanography*, 42 : 2101-2120.

Augris, C., 2005. Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez (Finistère). Ifremer

Augris C., Menesguen A., Hamon D., Blanchet A., Le Roy P., Rolet J., Jouet G., Veron G., Delannoy H., Drogou M., Bernard C., Maillard X., 2005. Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez (Finistère). Partenariat IFREMER et ville de Douarnenez. Ed. IFREMER,

Atlas et Cartes, 10 cartes, échelle 1/25000 + livret d'accompagnement, 135 p.

Bajjouk, T., Derrien-Courtel, S., Gentil, F., Hily, C., Grall, J., 2011. Typologie d'habitats marins benthiques : analyse de l'existant et propositions pour la cartographie. Habitats côtiers de la région Bretagne - Note de synthèse n° 2, Habitats du circalittoral (Projets REBENT-Bretagne et Natura 2000-Bretagne. RST/IFREMER/DYNECO/AG/11-03/TB).

Bald J., Del Campo A., Franco J., Galparsoro I., González M., Liria P., Muxika I., Rubio A., Solaun O., Uriarte A., Comesaña M., Cacabelos A., Fernández R., Méndez G., Prada D., Zubiate L., 2010. Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters. *Revista de Investigación Marina*, 17 : 62-138.

Barillier A., Dubreuil J, Hily C., 2013. Parc hydrolien EDF de Paimpol-Bréhat : premiers résultats de la restauration expérimentale des herbiers de zostères. Communication au Congrès SHF EMR 2013, Brest 9 et 10 octobre 2013.

Bickel S. L., Malloy Hammond J. D., Tang K. W., 2011. Boat-generated turbulence as a potential source of mortality among copepods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 401: 105-109.

Boehlert G.W., Gill A.B., 2010. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development : a current synthesis. *Oceanography*, 23 : 68-81.

Boehlert G., 2008. Ecological Effects of Wave Energy Development in the Pacific Northwest Workshop Summary. A Scientific Workshop U.S. Dept. Commerce. G. W. Boehlert, G. R. McMurray y C. E. Tortorici (Ed.). Newport, Oregon NOAA Tech. Memo. NMFS-F/SPO-92 : 174.

Boyé H., Caquot E., Clément P., De La Cochetière L., Nataf J.-M., Sergent P., 2013. Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables. 104pp.

Brown V.C., Simmonds M.P., 2010. Marine Renewable Energy Developments : an update on current status in Europe and possible conservation implications for cetaceans, IWC.

Cadiou B., Pons J.-M., Yésou P. (éds), 2004. Oiseaux marins nicheurs de France métropolitaine (1960-2000). Éditions Biotope, Mèze, 218 p.

Camphuysen C.J., Fox A.D., Leopold M.F., 2004. Towards standardised seabirds at sea census techniques in connection with environmental impact assessments for offshore wind farms in the U.K: A comparison of ship and aerial sampling methods for marine birds, and their applicability to offshore wind farm assessments. COWRIE Report, 38 p.

Carlier A., Delpech JP., 2011. Synthèse bibliographique : Impacts des câbles sous-marins sur les écosystèmes côtiers. Cas particulier des câbles électriques de raccordement des parcs éoliens offshore (compartiments benthiques et halieutiques). RST - DYNECO/EB/11-01/AC. Contrat RTE-Ifremer, rapport final.

Carter, 2007. Marine Renewable Energy Devices : a collision Risk for Marine Mammals ?, MSc Aberdeen

Castège I., Hémary G. (coord.), 2009. Oiseaux marins et cétacés du golfe de Gascogne. Répartition, évolution des populations et éléments pour la définition des aires marines protégées. Éditions Biotope, Mèze et Muséum National d'Histoire naturelle, Paris, 176 p.

CETMEF, 2008. Le GPS différentiel (DGPS) et temps réel (GPS RTK). Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales - Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, 6p.

Comolet-Tirman J., Hindermeyer X., Siblet J.-P., 2007. Liste française des oiseaux marins suscep-

tibles de justifier la création de Zones de Protection spéciale. Convention MEDD/MNHN 2006 - Fiche n°4. Rapport SPN 2007/5, 11 p.

Cook A.S.C.P., Burton N.H.K., 2010. A review of the potential impacts of marine aggregate extraction on seabirds. Marine Environment Protection Fund (MEPF) Project 09/P130.

Coutant CC., Whitney RR., 2000. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines, a review. Transactions of the American Fisheries Society, 129 : 351-380.

COWRIE (2008). Guidance for assessment of cumulative impacts on the historic environment from offshore renewable energy. COWRIE Report CIARCH-11-2006. Prepared for COWRIE Limited by Oxfors Archaeology with George Lambrick Archaeology and Heritage. COWRIE Limited, London.

Croxall J.P., Butchart S.H.M., Lascelles B., Stattersfield A.J., Sullivan B., Symes A., Taylor P., 2012. Seabird conservation status, threats and priority actions : a global assessment. Bird Conservation International, 22 : 1-34.

Dauvin, J.C., 1997. Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord. Synthèse, menaces et perspectives, Patrimoines Naturels.

Deceuninck B., Maillet N., Ward A., Dronneau C., Mahéo R., 2013. Synthèse des dénombrements d'anatidés et de foulques hivernant en France à la mi-janvier 2012. Rapport LPO, Wetlands international, Rochefort, 42 p.

Derrien-Courtel, S., 2010. Faune et Flore benthiques du littoral breton. Proposition d'espèces déterminantes pour la réalisation des fiches ZNIEFF-Mer et de listes complémentaires. Document CSRPN Bretagne.

Deng Z., Carlson TJ., Dauble DD., Plokey GR., 2011. Fish passage assessment of an advanced hydropower turbine and conventional turbine using blade-strike modeling. Energies, 4 : 57-67.

Deveau D.M., Stein P.J., Rotker N.A., Scribner H.C., Edson P., 2011. Noise measurements of a prototype tidal energy turbine. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129 : 2498

DGEC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat), 2012. *Energies marines renouvelables. Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques*. 361 pp.

Di Lorio L., Gervaise C., Le Niliot P., 2010. Passive acoustic assessment of habitat use by bottlenose dolphins in the 'Parc Naturel Marin d'Iroise'. *Parc Naturel Marin D'Iroise*.

DIRM Manche est Mer du Nord, 2013. *Recherche maritime et valorisation de la mer et de ses ressources*.

DOE (U.S. Department of Energy). 2009. *Report to Congress on the Potential Environmental Effects of Marine and Hydrokinetic Energy Technologies : Prepared in Response to the Energy Independence and Security Act of 2007, Section 633(B). Wind & Power Program, Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy. December 2009.*

Dolman S., Simmonds M., 2010, *Towards best environmental practice for cetacean conservation in developing Scotland's marine renewable energy*, *Marine Policy*, 5 : 1021-1027.

DONG Energy, Vattenfall, 2006. *The Danish Energy Authority and The Danish Forest and nature Agency, DANISH OFFSHORE WIND : Key environmental issues, Denmark*, 142 p.

DONG-Energy y Vattenfall-a/S, 2006. *Review Report 2005. The Danish Offshore Wind farm Demonstration Project : Horns Rev and Nysted Offshore Wind Farm Environmental impact assessment and monitoring. Report prepared by Dong Energy and Vattenfall A/S for : The Environmental Group of the Danish Offshore Wind Farm Demonstration Projects*. 150 pp.

Ellis J.I., Schneider D.C., 1997. *Evaluation of a gradient sampling design for environmental impact assessment. Environmental Monitoring and Assessment*, 48 : 157-172.

EMEC, 2008. *Environmental Impact Assessment – Guidance for Developers, Guidelines GUIDE003-01-03*.

EMEC and Xodus AURORA, 2010. *Consenting, EIA and HRA Guidance for Marine Renewable Energy Developments in Scotland, Part Three – EIA & HRA GUIDANCE, Assignment Number : A30259-S00 Scottish Government, Report, A-30259-S00-REPT-01-R01*.

EMEC, 2011, *Guidance for Developers at EMEC Grid Connected Sites : Supporting Environmental, Documentation Guidance GUIDE009-01-02*.

EMEC, 2012. *Billia Croo Fisheries Project. Final report to the scottish government. 8 pp + annexes*.

Evans P.G.H., Baines M., Anderwald P., 2011. *Risk Assessment of Potential Conflicts between Shipping and Cetaceans in the ASCOBANS Region. AC18/Doc.6-04, available at http://www.service-board.de/ascobans_neu/files/ac18/AC18_6-04_rev1_ProjectReport_ShipStrikes.pdf*

Folegot T., Clorennec D., Stephan Y., Gervaise C., Kinda B., 2013. *Now-casting ambient noise in high anthropogenic pressure areas. European Conference on Underwater Acoustics. Edinburgh, Scotland*.

Folegot T., Clorennec D., 2013. *A Monté-Carlo approach to anthropogenic sound mapping. Underwater Acoustics Conference. Corfu, Greece: Institute of Acoustics*.

Folegot T., Clorennec D., Sutton G., Jessopp M., *Mapping the spatio-temporal distribution of underwater noise in Irish Waters, Environmental Protection Agency STRIVE Programme 2007-2013, 2011-W-MS-7, Dublin, 2013*.

FORCE (Fundy Ocean Research Center for Energy), 2011. *Environmental effects Monitoring report, September 2009 to January 2011*.

Fox A.D., Desholm M., Kahlert J., Christensen T.K., Petersen I.K., 2006. *Information needs to support environmental impact assessment of the effects*

of European marine off-shore windfarms on birds. *Ibis*, 148 : 129-144.

Frid C., Andonegi E., Depestele J., Judd A., Rihan D., Rogers S.I., Kenchington E., 2012. The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. *Environmental Impact Assessment Review*, 32 : 133-139.

Furness R.W., Wade H.M., Robbins A.M.C., Masden E.A., 2012. Assessing the sensitivity of seabird populations to adverse effects from tidal stream turbines and wave energy devices. *ICES Journal of Marine Science*, 69 : 1466-1479.

Garthe S., Huppopp O., 2004. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology*, 41 : 724-734.

Gervaise C., Barazzutti A., Busson S., Simard Y., Roy N., 2010. Automatic detection of bioacoustics impulses based on kurtosis under weak signal to noise ratio. *Applied Acoustics*, 71 : 1020-1026.

Gervaise C., 2011. Brevet n° 11305917.4. European Patent Office.

Gervaise C., Di Lorio L., Lossent J., 2012. Rapport final étude PNMI AcDau, Etude réalisée au profit du Parc Naturel Marin d'Iroise. Brest : Agence des Aires Marines Protégées.

Gervaise C., Simard Y., Roy N., Kinda B., Ménard N., 2012. Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 : 76.

Gill A. 2005. Offshore renewable energy : Ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology*, 42 : 605-615.

Gill A.B., Gloyne-Philips I., Neal K.J., Kimber J.A., 2005. Cowrie 1.5 Electromagnetic Fields review. The potential effects of electromagnetic fields generated by sub-sea powercables associated with offshore wind farm developments on elec-

trically and magnetically sensitive organisms – a review.

Gill A.B., Huang Y., Gloyne-Philips I., Metcalf J., Quayle V., Spencer J., Wearmouth V., 2009. Cowrie 2.0 Electromagnetic fields 2.0 EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub-sea electricity cables of the type used by the offshore renewable energy industry – Final report. Available online at: http://www.offshorewindfarms.co.uk/Assets/COWRIE_Final_compiled.pdf

Gould J. 2008. Animal Navigation : The Evolution of Magnetic Orientation. *Current Biology*, 18: 482-485.

Green R.H., 1979 *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists* , Wiley, Chichester.

Grossman G.D., Jones G.P., Seaman W.J., 1997. Do artificial reefs increase regional fish production? A review of existing data. *Fisheries*, 22: 17-23.

Hastings M. C., Popper A. N., 2005. Effects of sound on fish. Report to Jones and Stokes for California Department of Transportation.

Hildebrand J. A., 2005. Impacts of anthropogenic sound. J. E. Reynolds, *Marine mammal research : conservation beyond crisis*. Baltimore, Maryland : The Johns Hopkins University Press, 101-124.

Hiscock K., Southward A., Tittley I., Hawkins S., 2004. Effects of changing temperature on benthic marine life in Britain and Ireland. *Aquatic Conservation of Marine Freshwater Ecosystems*, 14 : 333-362.

ICES, 2012. Report of the Study Group on Environmental Impacts of Wave and Tidal Energy (SGWTE), 4-6 May 2012, Stromness, Orkney, UK. ICES CM 2012/SSGHIE : 14. 190 pp.

IEEM, 2010. Guidelines for Ecological Impact Assessment in Britain and Ireland : Marine and Coastal. Institute of Ecology and Environmental Management. Final version 5 August 2010.

Inger I., Attrill M.J., Bearhop S., Broderick A.C., Grecian W.J., Hodgson D.J., Mills C., Sheehan E., Votier S.C., Witt M.J., Goodley B.J., 2009. Marine renewable energy : potential benefits to biodiversity ? An urgent call for research. *Journal of Applied Ecology*, 46 : 1145-1153.

International Whaling Commission. 2005. Report of the Scientific Committee. Annex K. Report of the standing Working Group on Environmental Concerns. *Journal of Cetacean Research and Management*, 7 : 267-307.

Januario C., Semino S., Bell M., 2007. Offshore windfarm decommissioning : A proposal for guidelines to be included in the European Maritime Policy.
http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/contributions_post/247offshore_windfarm.pdf

Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H., 2000. *Computational Ocean Acoustics* (Vol. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing). Springer.

Judd A., 2012. Guidelines for data acquisition to support marine environmental assessments for offshore renewable energy projects. CEFAS contract report : ME5403-Module 15.

Kastelein R.A., 2012. Hearing threshold shifts and recovery in harbor seals (*Phoca vitulina*) after octave-band noise exposure at 4 kHz. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (4): 2745-2761.

Karsten R.H., McMillian J.M., Lickley M.J., Haynes R.D., 2008. Assessment of tidal current energy in Minas Passage, Bay of Fundy. *Proc. IMechE, Part A : J. Power and Energy*, 222(5) : 493-507.

Keenan G., Sparling C., Williams H., Fortune F., 2011. SeaGen Environmental Monitoring Programme. Final Report. Royal Haskoning Enhancing Society.

King S., Maclean I.M.D., Norman T., Prior A., 2009. *Developing guidance on ornithological cu-*

mulative impact assessment for offshore wind farm developers. COWRIE.

Kogan I., Paull C., Kuhnz L., Burton E., Vonthun S., Garygreene H., Barry J., 2006. ATOC/Pioneer Seamount cable after 8 years on the seafloor : Observations, environmental impact. *Cont. Shelf Res.* 26 : 771-787.

Langhamer O., 2010. Effects of wave energy converters on the surrounding soft-bottom macrofauna (west coast of Sweden). *Marine Environmental Research*, 69: 374-381.

Langhamer O., Wilhelmsson D., 2009. Colonisation of fish and crabs of wave energy foundations and the effects of manufactured holes - a field experiment. *Marine Environmental Research*, 68 : 151-157.

Langton R., Davies I.M., Scott B.E., 2011. Seabird conservation and tidal stream and wave power generation : information needs for predicting and managing potential impacts. *Marine Policy*, 35 : 623-630.

Lindeboom H.J., Kouwenhoven H.J., Bergman M.J.N., Bouma S., Bresseur S., Daan R., Fijn R.C., de Haan D., Dirksen S., van Hal R., Hille Ris Lambers R., ter Hofstede R., Krijgsveld K.L., Leopold M., Scheidat M., 2011. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone ; a compilation. *Environmental Research Letters*, 6 : 035101.

Linley E.A.S., Wilding T.A., Black K., Hawkins A.J.S., Mangi S., 2007. Review of the reef effects of offshore wind farm structures and their potential for enhancement and mitigation. Report from PML Applications Ltd and the Scottish Association for Marine Science to the Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform (BERR), Contract No : RFCA/005/0029P. 113 pp.

Maclean I.M.D, Wright L.J., Showler D.A., Rehfisch M.M., 2009. A review of assessment methodologies for offshore windfarms. British Trust for Ornithology Report Commissioned by Cowrie Ltd, 76 p.

MacLeod K., Du Fresne S., Mackey B., Faustino C., Boyd I., 2010. Approaches to marine mammal monitoring at marine renewable energy developments, SMRU Ltd. 110 pp.

Madsen P., Wahlberg M., Tougaard J., Lucke K., Tyack, P., 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. Marine Ecology Progress Series, 309 : 279-295.

Mahéo R., Le Dréan-Quénech'hdu S., 2013. Limicoles séjournant en France (littoral) janvier 2012. Rapport ONCFS, Wetlands international, Villiers-en-Bois, 49 p.

Martin B., 2012. Measurement of Long-Term Ambient Noise and Tidal Turbine Sound Levels in the Bay of Fundy. European Conference on Underwater Acoustics. Edinburg.

Martinez L, Dabin W, Caurant F, Kiszka J, Peltier H, Spitz J, Vincent C, Van Canneyt O, Dorémus G, Ridoux V, 2011. Contributions thématiques concernant les pressions et les impacts s'exerçant sur les populations de mammifères marins dans les régions golfe de Gascogne, Mers Celtiques, Manche Mer du Nord et Méditerranée Occidentale dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM), Rapport CRMM pour Ifremer-Agence des Aires Marines Protégées- Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer.

Masden E.A., Fox A.D., Furness R.W., Bullman R., Haydon D.T., 2010. Cumulative impact assessments and bird/windfarm interactions: developing a conceptual framework. Environmental Impact Assessment Review, 30 : 1-7.

McCluskie A.E., Langston R.H.W., Wilkinson N.I., 2012. Birds and wave & tidal stream energy: an ecological review. RSPB Research Report 42. RSPB, The Lodge, Sandy, Bedfordshire.

MEDDE, 2012. Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser sur les impacts sur le milieu naturel. 9pp.

Merck T., Wasserthal R., 2009. Assessment of the environmental impacts of cables, Biodiversity Series. OSPAR commission.

Michaud H., 2011. Impact des vagues sur les courants marins, modélisation multi-échelle de la plage au plateau continental, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Géosciences UMR 5243 CNRS/UM2, Laboratoire d'Aérodynamique UMR 5560 CNRS/Univ.Toulouse, SIBAGHE, 333 pp.

MMS (Minerals Management Service), 2007. Programmatic Environmental Impact Statement for Alternative Energy Development and Production and Alternate Use of Facilities on the Outer Continental Shelf. U.S. Department of the Interior. OCS EIS/EA MMS 2007-046. October 2007.

Moura A., Simas T., Batty R., Wilson B., Thompson D., Lonergan M., Norris J., Finn M., Veron G, Paillard M. Abonnel C., 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 (EQUIMAR), 24pp.

National Research Council, 2003. Ocean Noise and Marine Mammals. The National Academies Press.

National Research Council, 2005. Marine mammal populations and ocean noise: determining when noise causes biologically significant effects, Vol. National Academies Press, Washington, D.C.

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.

Nowacek D. P., Thorne L. H., Johnston D. W., Tyack P. L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. Mammal Rev, 37: 81-115.

Ona E., Godø O.R., Handegard N.O., Hjellvik V., Patel R., Pedersen G., 2007. Silent vessels are not quiet. Journal of the Acoustical Society of America, 121, EL145-EL150.

OSPAR, 2006. An overview of the environmental impact of non-wind renewable energy systems in the marine environment. Biodiversity Series. Oslo: OSPAR Commission ; 2004.

OSPAR, 2008. Background Document on potential problems associated with power cables other than those for oil and gas activities.

Pelc M., Fujita RM., 2002. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26: 471-9.

Peltier H., 2011. Cétacés et changements environnementaux : développement et test d'indicateurs d'état de conservation en vue d'établissement des stratégies de surveillance. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 243p.

Perrow M.R., Gilroy J.J., Skeate E.R., Mackenzie A. 2010. Quantifying the relative use of coastal waters by breeding terns: towards effective tools for planning and assessing the ornithological impacts of offshore wind farms. ECON Ecological Consultancy Ltd. Final report to COWRIE Ltd.

Petersen I.K., Christensen T.K., Kahlert J., Desholm M., Fox A.D., 2006. Final results of bird studies at the offshore wind farms at Nysted and Horns Rev, Denmark. National Environmental Research Institute Report, Commissioned by DONG Energy and Vattenfall A/S.

Pettex E., Stéphan E., David L., Falchetto H., Levesque E., Dorémus G., Van Canneyt O., Sterckeman A., Bretagnolle V., Ridoux V., 2012a. Suivi Aérien de la Mégafaune Marine dans la ZEE et ZPE de France métropolitaine. SAMM – Hiver 2011/12. Rapport de campagne, Université de La Rochelle, CEBC, APECS, écoOcéans, AAMP, MEDDE.

Pettex E., Stéphan E., David L., Falchetto H., Dorémus G., Van Canneyt O., Sterckeman A., Bretagnolle V., Ridoux V., 2012b. Suivi Aérien de la Mégafaune Marine dans la ZEE de France métropolitaine. SAMM – Été 2012. Rapport de campagne. Rapport de campagne, Université de La Rochelle, CEBC, APECS, écoOcéans, EDF, AAMP, MEDDE.

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 No. NOAA Technical Memorandum NMFS F/SPO-116). U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.

Polagye B, C Bassett, J Thomson, 2011. Estimated Received Noise Levels for Marine Mammals from Openhydro Turbines in Admiralty Inlet, Washington. Technical Report UW-2011-01, Northwest National Marine Renewable Energy Center, University of Washington, Seattle.

Polagye B.L. ; Epler J. ; Thomson J., 2010. "Limits to the predictability of tidal current energy," *OCEANS* 2010, 20-23 Sept. 2010, 1-9.

Popov V.V., Supin A.Y., Wang D., Wang K., Dong L., Wang S., 2011. Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130 (1): 574-584.

Popper A. F., McCauley R., 2004. Anthropogenic sound: Effects on the behavior and physiology of fishes. *Marine Technology Society Journal*, 37(4): 35-40.

Richardson W., Malme C., Green C., Thomson D., 1995. *Marine Mammals and Noise*. San Diego, CA: Academic Press.

RPS, 2011a. Assessment of Risk to Diving Birds from Underwater Marine Renewable Devices in Welsh Waters. Phase 1 - Desktop study of Birds in Welsh Waters and Preliminary Risk Assessment. RPS report on behalf of The Welsh Assembly Government, February 2011.

RPS, 2011b. Assessment of Risk to Diving Birds from Underwater Marine Renewable Devices in Welsh Waters. Phase 2 – Field methodologies and sites assessments. RPS report on behalf of The Welsh Assembly Government, February 2011.

RTE, 2013 : accueil de la production hydrolienne : étude prospective. 12pp.

Sand O., Karlsen H.E., 2000. Detection of infrasound, and linear acceleration in fish. Philosophical Transactions of the Royal Society, series B 355: 1295-1298.

Sand O., Karlsen H.E., Knudsen F.R., 2008. Comment on "Silent research vessels are not quiet". Journal of the Acoustical Society of America 123 (4): 1831-1833.

Shaw R., 1982. Wave energy: a design challenge. New York: Halsted Press.

Schwemmer P., Adler S., Guse N., Markones N., Garthe S., 2009. Influence of water flow velocity, water depth and colony distance on distribution and foraging patterns of terns in the Wadden Sea. Fisheries Oceanography, 18 : 161-172.

Schweizer P., Cada G. and M. Bevelhimer, 2012. Effects of hydrokinetic turbine blade strike on fish early life stages – Laboratory studies and projections to large river developments. 9th ISE 2012, Vienna.

Sheehan E.V., Gall S.C., Cousens S.L., Attrill M.J., 2013. Epibenthic assessment of a renewable tidal energy site. ScientificWorldJournal 2013.

Sheehan E.V., Stevens T.F., Attrill M.J., 2010. A Quantitative, Non-Destructive Methodology for Habitat Characterisation and Benthic Monitoring at Offshore Renewable Energy Developments. Plos One 5, e14461.

Scheidat M., Tougaard J., Brasseur S., Carstensen J., Van Polanen Petel T., Teilmann J., Reijnders P., 2011. Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms : a case study in the Dutch North Sea, Environmental Research Letters, 6 : 1-10.

Shields M.A., Woolf D.K., Grist E.P.M., Kerr S.A., Jackson A., Harris R.E., Bell M.C., Beharie R.A., Want A., Gibb S.W., Osalusi E., Side J., 2011. Marine renewable energy: the ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine

environment. Ocean and Coastal Management, 54 : 2-9.

Shumchenia E.J., Smith S.L., McCann J., Carnevale M., Fugate G., Kenney R.D., King J.W., Paton P., Schwartz M., Spaulding M., Winiarski K.J., 2012. An Adaptive Framework for Selecting Environmental Monitoring Protocols to Support Ocean Renewable Energy Development. Scientific World Journal.

Sigray P., Andersson M.H., 2011. Particle motion measured at an operational wind turbine in relation to hearing sensitivity in fish. Journal of the Acoustical Society of America, 130: 200-207.

Simard Y., Leblanc E., 2010. Impact of shipping noise on marine animals, Canadian Science Advisory Secretariat.

Simard Y., Roy N., Giard S., Gervaise C., Conversano M., Ménard N. 2010. Estimating whale density from their whistling activity: example with St. Lawrence beluga. Applied Acoustics, 71(11): 1081-1086.

Simas T., Moura A., Batty R., Wilson B., Thompson D., Lonergan M., Norris J., 2010. Uncertainties and road map (No. Deliverable D6.3.2). Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact (EQUIMAR), 22pp.

Smith E.P., Orvos D.R., Cairns Jr. J., 1993. Impact Assessment Using the Before-After-Control-Impact (BACI) Model: Concerns and Comments. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 50 : 627–637.

Sotta C., Le Nilot P. and Carlier A., 2012. Documentary summary of the environmental impact of renewable marine energy, Task 3.2 of WP3 of the MERIFIC Project.

Southall B., Bowles A., Ellison W., Finneran J., Gentry R., Greene C., Tyack P., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. Aquatic Mammals, 33: 411-521.

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. *Bulletin of Marine Science*, 78: 57-70.

Thomsen F., Ludemann K., Kafemann R., Piper W., 2006. Effects of Offshore Wind Farm Noise on Marine Mammals and Fish. Biola, Hamburg, Germany, on behalf of COWRIE Ltd., Newbury, UK, 62 pp.

Thomson, J., Polagye, B., Richmond, M., Durgesh, V., 2010. Quantifying turbulence for tidal power applications. *OCEANS 2010*, 20-23 Sept. 2010, 1-8.

US Department of Energy, 2009. Report to Congress on the Potential Environmental Effects of Marine and Hydrokinetic Energy Technologies. Washington D.C.: US Department of Energy.

Van Canneyt O., Boudault P., Dabin W., Dorémus G., Gonzalez L., 2010. Les échouages de mammifères marins sur le littoral français en 2009. Rapport CRMM pour le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, Direction de l'eau et de la biodiversité, Programme Observatoire du Patrimoine Naturel: 48pp.

Vella G., Rushforth I., Mason E., Hough A., England R., Styles P., Holt T. Thorne P., 2001. Environmental Impact Assessment Investigation of marine mammals in relation to the establishment of a marine wind farm on Horns Reef, 107pp.

Vincent C., Fedak M.A., McConnell B.J., Meynier L., Saint-Jean C., Ridoux V., 2005. Status and conservation of the grey seal, *Halichoerus grypus*, in France. *Biological Conservation*, 126 (1): 62-73.

Vincent C., Blaize C., Deniau A., Dumas C., Dupuis L., Elder J.-F., Fremau M.-H., Gautier G., Karpouzopoulos J., Lecarpentier T., Le Nuz M., Thierry P., 2010. Le « Réseau Phoques », site thématique de Sextant (Ifremer) : Synthèse et représentation cartographique du suivi des colonies de phoques en France de 2007 à 2010". Rapport méthodolo-

gique pour le "Réseau Phoques" sous Sextant (Ifremer), Université de La Rochelle, Décembre 2010. 23 pp.

Wahlberg M., Westerberg H., 2005. Hearing in fish and their reactions to sound from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*, 288: 295-309.

Wentz G.M., 1962. «Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources.» *Journal of the Acoustical Society of America*, 34: 1936-1956.

Westerberg H., Lagenfelt I., 2008. Sub-sea power cables and the migration of behavior of the European eel. *Fisheries Management and Ecology*, 15: 69-75.

Wright D., Brown V., Simmonds M.P., 2009. A Review of Developing Marine Renewable Technologies. Paper submitted to the Scientific Committee of the IWC. IWC/SC/61/E6.

Wilhelmson D., Malm T., Thompson R., Tchou J., Sarantakos G., McCormick N., Luitjens S., Gullström M., Patterson Edwards J.K., Amir O., Dubi, A. (eds.), 2010. Greening Blue Energy: Identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of off shore renewable energy, Gland, Switzerland. IUCN. 102pp.

Willis M.R., Broudic M., Haywood C., Masters I., Thomas S., 2013. Measuring underwater background noise in high tidal flow environments. *Renewable Energy*, 49: 255-258.

Wilson B., Batty R.S., Daunt F., Carter C., 2007. Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds. Report to the Scottish Executive. Scottish Association for Marine Science, Oban, Scotland, PA37 1QA.

Witt M.J., Sheenan E.V., Bearhop S., Broderick A.C., Conley D.C., Cotterel S.P., Crow E., Grecian W.J., Halsband C., Hodgson D.J., Hosegood P., Inger R., Miller P.I., Sims D.W., Thompson R.C., Vanstaen K., Votier S.C., Attrill M.J., Godley B.J., 2012. Assessing wave energy effects on biodiver-

sity : the Wave Hub experience. Philosophical transactions of The Royal Society A., 307: 502-529.

Woodruff D.L., Ward J.A., Schultz I.R., Cullinan V.I., Marshall K.E., 2012. Effects of Electromagnetic Fields on Fish and Invertebrates. Task 2.1.3: Effects on Aquatic Organisms Fiscal Year 2011 Progress Report. Pacific Northwest National Laboratory.

Würsig B., Richardson W., 2002. Effects of Noise. Dans Perrin W., Würsig B., Thewissen J., The Encyclopedia of Marine Mammals. New-York: Academic Press. 794-802.

Zamon J.E., 2003. Mixed species aggregations feeding upon herring and sandlance schools in a nearshore archipelago depend on flooding tidal currents. Marine Ecology Progress Series, 261: 243-255.

Liste des figures et photos

Figure 1 Carte des principaux sites R&D, site d'essais et sites pilotes français pour les technologies hydroliennes	9
Figure 2 Ressource hydro-cinétique au large des côtes bretonnes et Normandes.....	13
Figure 3 Schéma de principe d'un parc hydrolien et du dispositif de raccordement.....	14
Figure 4 Différents types de turbines : à flux axial (a), à flux transverse (b), à ailes battantes (c) et à flux canalisé (d).....	15
Figure 5 Différents types de fondation.....	16
Figure 6 Exemple d'éléments constitutifs d'une turbine hydrolienne	16
Figure 7 Exemples de plateformes de transformation du courant électrique en mer	20
Figure 8 Foreuse hydraulique - Exemple de collier d'ancrage	21
Figure 9 Matelas en béton	21
Figure 10 Mise en place des coquilles	21
Figure 11 Exemple de rock dumping.....	22
Figure 12 Cavalier en béton.....	22
Figure 13 Exemple d'ensouillage d'un câble	22
Figure 14 Technique du « jetting »	23
Figure 15 Charrue d'ensouillage	23
Figure 16 BRH.....	23
Figure 17 Trancheuse.....	23
Figure 18 Travaux de pose au niveau de la plage.....	24
Figure 19 Schéma de principe d'un forage dirigé	24
Figure 20 Boîte de jonction	24
Figure 21 Logigramme relatif au déroulement de la procédure d'évaluation environnementale.....	28
Figure 22 Paramètres du milieu physique étudiés (bleu marine), leurs interactions (flèches bleues) et leurs domaines d'études (orange)	36

<i>Figure 23 Extrait des dalles bathymétriques du SHOM, sur le secteur de la pointe Bretonne</i>	<i>38</i>
<i>Figure 24 Carte de Nature des fonds de la baie de Saint-Brieuc de l'Ifremer</i>	<i>39</i>
<i>Figure 25 (a) Schéma de l'acquisition au sondeur multifaisceau, (b) extrait de sonogramme avec ses faciès et figures sédimentaires associés</i>	<i>41</i>
<i>Figure 26 Cartes issues de l'Atlas thématique de l'environnement marin de la baie de Douarnenez42</i>	
<i>Figure 27 Schéma théorique de la stratégie de mise en place du suivi des fonds marins, sur la durée du projet hydrolien</i>	<i>51</i>
<i>Figure 28 Schéma de différentes solutions techniques visant à atténuer les impacts du projet sur une éventuelle modification des fonds marins.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 29 Modèles disponibles et exemple de sortie sur le site de PREVIMER</i>	<i>58</i>
<i>Figure 30 Exemples de profileurs de courant et de représentation de données</i>	<i>59</i>
<i>Figure 31 Exemples de dispositifs de mesures de turbidité et de M.E.S.</i>	<i>60</i>
<i>Figure 32 Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins moyens émis à un mètre dans une bande.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 33 Evaluation du bruit moyen en fonction de la fréquence et de la nature des bruits. Unité utilisée : dB re 1 μPa/Hz</i>	<i>73</i>
<i>Figure 34 Exemples d'enregistreurs sous-marins autonomes d'acoustique passive Aural, DSG Ocean, SM2M et RTSYS.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 35 Exemple de carte statistique de bruit généré par le trafic maritime dans le tiers d'octave 125 Hz.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure36: Mesure de bruit après traitement dans le tiers d'octave 125Hz, sur une période de 15 jours.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 37 Exemple d'estimation de l'empreinte sonore (ou émergence statistique) d'un bruit anthropique de forte intensité au large de Molène</i>	<i>82</i>
<i>Figure 38 Fonctions de pondération en fonction de la fréquence, et par classe d'espèce de mammifère marin.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 39: Axes de développement des solutions de réduction et d'évitement des risques sonores vis-à-vis des mammifères marins.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 40 Modélisation de l'intensité du champ magnétique induit à l'interface eau-sédiment par différents câbles de raccordement (ensouillés et actuellement en fonctionnement) en fonction de l'éloignement par rapport au câble.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 41 Compartiments biologiques étudiés et leurs interactions (bleu), sous l'influence des différentes pressions (en noir).....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 42 Carte d'un site d'essais houlomoteur montrant les stations de suivi (à g). Carte du site hydrolien démonstrateur SeaGen dans le détroit de Strangford, montrant les stations de suivi (à d)95</i>	

<i>Figure 43 Aperçu de la diversité des peuplements benthiques de substrat dur observée sur le site hydrolien de Paimpol-Bréhat.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 44 Cartographie des principales unités biosédimentaires obtenue sur le site du projet SeaGen par acoustique sonar, imagerie vidéo (bâti suspendu) et plongée.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 45 Emprises au sol de différents modèles de fondations d'hydroliennes.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 46 Colonisation de structures artificielles par des organismes benthiques de substrats durs.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 47 Schéma théorique de la stratégie de mise en place du suivi benthique sur la durée du projet hydrolien, de la définition de l'état initial à la fin de la période d'exploitation.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 48 Modifications successives du tracé de la route du câble SwePol lors de la phase de planification dues à des conflits potentiels avec les usagers et à la présence d'une aire marine protégée.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 49 Techniques de pêche et espèces cibles.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 50 Exemple du résultat de l'application d'outils de traitement automatique sur un segment court (4 secondes).....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 51 Exemple d'analyses permises par l'acoustique passive pour étudier la population de grand dauphin de l'archipel de Molène.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 52 Partitionnement du voisinage d'une source sonore en zone homogène d'impact en fonction de son SEL ou son SPL, construit à partir de Richardson et al., 1995.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 53 Exemple de carte de risque d'une opération de construction vis-à-vis d'une classe d'espèces de mammifères marins.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 54 Exemple d'image par caméra acoustique de saumons.....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 55 Guillemots de Troïl (à gauche) et cormorans huppés (à droite), deux espèces d'oiseaux marins plongeurs du littoral français.....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 56 Schéma simplifié des interactions entre parc hydrolien et avifaune marine.....</i>	<i>155</i>

Liste des tableaux

Tableau 1 Calendrier de développement des projets hydroliens français.....	10
Tableau 2 Tableau de navigation dans le guide méthodologique.....	12
Tableau 3 Exemples de différentes technologies hydroliennes.....	17
Tableau 4 Exemples de différentes technologies hydroliennes - Suite.....	18
Tableau 5 Indications techniques à fournir dans l'étude d'impact environnementale d'un projet de parc hydrolien (hors démantèlement).....	25
Tableau 6 Cadre réglementaire s'appliquant aux parcs hydroliens en mer.	26
Tableau 7 Changements potentiels en phase de construction pour une fondation gravitaire	44
Tableau 8 Changements potentiels en phase de construction pour une fondation de type pieux....	44
Tableau 9 Changements potentiels en phase de construction pour une structure ancrée.....	45
Tableau 10 Changements potentiels en phase de construction liés à la pose de câbles.....	46
Tableau 11 Changements potentiels en phase de construction liés à l'atterrage	46
Tableau 12 Changements potentiels en phase d'exploitation liés aux fondations	47
Tableau 13 Changements potentiels en phase d'exploitation liés aux câbles.....	47
Tableau 14 Changements potentiels en phase d'exploitation liés à l'atterrage.....	48
Tableau 15 Changements potentiels en phase de démantèlement liés aux fondations.....	49
Tableau 16 Changements potentiels en phase de démantèlement liés aux câble.....	49
Tableau 17 Changements potentiels en phase de démantèlement liés à l'atterrage	50
Tableau 18 Synthèse des impacts potentiels en fonction du type de travaux.....	63
Tableau 19 Synthèse des impacts potentiels en phase d'exploitation	65
Tableau 20 Synthèse des impacts potentiels du démantèlement.....	66
Tableau 21 Définitions et unités de mesure	71
Tableau 22 Principales contributions au bruit ambiant dans un contexte de site hydrolien.....	74
Tableau 23 Liste non-exhaustive des origines possibles des bruits liés aux projets hydroliens.....	83
Tableau 24 Boîte à outils du suivi acoustique	86

<i>Tableau 25 Définitions des 6 listes d'espèces benthiques déterminantes proposées pour la Bretagne et des listes complémentaires proposées pour les espèces insuffisamment connues</i>	102
<i>Tableau 26 Résumé du programme de suivi du compartiment benthique</i>	111
<i>Tableau 27 Techniques d'échantillonnage des poissons utilisées dans les études en écologie</i>	116
<i>Tableau 28 Matrice des récepteurs : poissons résidents, cas d'un site pilote</i>	127
<i>Tableau 29 Matrice des récepteurs : poissons résidents, cas d'un site de taille commerciale</i>	127
<i>Tableau 30 Tableaux issus de Southall et al., 2007 fournissant les seuils de niveau perçus et d'exposition sonore pour les changements physiologiques de l'appareil auditif (TTS) et du comportement.....</i>	140
<i>Tableau 31 Sélection des principales méthodes de suivi des populations de mammifères marins et principales références associées</i>	148
<i>Tableau 32 Principaux impacts potentiels susceptibles d'affecter l'avifaune.</i>	155
<i>Tableau 33 Liste des espèces d'oiseaux marins potentiellement présentes sur les zones d'implantation de parcs hydroliens sur le littoral Manche-Atlantique.....</i>	158
<i>Tableau 34 Principales méthodes de suivi des oiseaux en mer, et avantages et limites dans le contexte des projets hydroliens.....</i>	159
<i>Tableau 35 Tableau de synthèse</i>	164