



Projet interdisciplinaire II (ENVI-F-501)

*La politique climatique et les stratégies bas-carbone :
une évaluation intégrée des impacts potentiels*

Travail individuel :
Energies marines renouvelables dans les mers du Nord :
quels impacts pour l'environnement marin ?

*« Utilisez la nature, cette immense auxiliaire dédaignée. Faites travailler pour vous
tous les souffles de vent, toutes les chutes d'eau, tous les effluves magnétiques. [...]
Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées.
Qu'est-ce que l'océan? Une énorme force perdue. Comme la terre est bête ! Ne pas employer
l'océan ! » - Victor Hugo.*

Travail présenté par :

Aline Spriet - Groupe 8

Titulaires de cours :

Thomas BAULER, Pierre REGNIER

Assistante :

Emilie MUTOMBO

Année académique 2012-2013

1. Introduction

Les mers et océans, qui représentent 75% de la surface terrestre, représentent un immense réservoir d'énergie pouvant être mis à profit dans la transition vers une économie bas carbone. Les pays du nord de l'Europe, pionniers en la matière, misent déjà sur le développement à grande échelle de l'éolien offshore. A l'avenir, ils pourraient recourir massivement aux autres énergies marines renouvelables (EMR) en phase de développement, telles que l'énergie des vagues et des courants marins. Mais avant de s'engager plus avant dans un scénario de développement massif de ces énergies de la mer, il convient d'être conscient de leurs impacts potentiels au niveau environnemental. Quel est, en particulier, l'impact des EMR sur les écosystèmes marins ? Comment les dispositifs de captage et de transport de l'énergie interagissent-ils avec les différents compartiments de l'environnement marin ? C'est ce que nous tenterons de voir dans les chapitres ci-après.

Les technologies étudiées seront celles liées aux énergies du vent (ou énergie éolienne offshore), des marées (ou énergie marémotrice), des courants marins (ou énergie hydrolienne) et des vagues (ou énergie houlomotrice). Il s'agira d'analyser les impacts des installations énergétiques sur l'environnement marin au cours des différentes phases de leur cycle de vie : construction, fonctionnement et démantèlement. Les interactions avec les compartiments de l'environnement suivants seront étudiées : hydrodynamisme, sédimentologie, benthos, poissons, oiseaux et mammifères marins. Lorsque nécessaire, les impacts positifs seront distingués des impacts négatifs. Cette présentation sera abordée sous un angle générique, sans se focaliser sur une zone particulière.

Etant donné l'ampleur du sujet, nous ne tendrons pas à l'exhaustivité et certains aspects ne seront pas abordés, comme par exemple les impacts liés à la phase de repérage, aux opérations de maintenance ou aux événements accidentels, les spécificités liées à certaines technologies émergentes comme l'éolien flottant ou les lagons marémoteurs artificiels ou encore les aspects réglementaires liés, par exemple, aux aires marines protégées.

Rappelons que les impacts sur les écosystèmes résultent de la conjugaison de deux composantes : d'une part, un effet physique engendré sur le milieu, et d'autre part, la présence d'espèces ou d'habitats soumis à cet effet [1]. On comprendra dès lors que la localisation des installations EMR constitue un critère déterminant dans la survenue et l'ampleur de leurs impacts sur les écosystèmes marins.

2. L'énergie du vent : les éoliennes en mer

2.1. Introduction

Le déploiement commercial de l'éolien offshore a démarré dans les années 1990 avec une dynamique de croissance exponentielle jusqu'à aujourd'hui. Pour distinguer les impacts environnementaux liés aux éoliennes des variations naturelles des écosystèmes marins, des études de suivi à long terme sont nécessaires. Or, de telles études sont encore peu nombreuses. Les premiers suivis environnementaux de parcs éoliens ont été effectués au Danemark, pour les parcs de Horns Rev et de Nysted mis en service en 2002 et 2003. Les résultats, publiés en 2006, ont conclu est que les éoliennes offshore, à condition d'être correctement localisées, peuvent être exploitées sans dommage significatif pour l'environnement marin, les risques pour les oiseaux, poissons et mammifères marins étant faibles [2]. Le Royaume-Uni a également mis en place une structure dédiée à la recherche sur les impacts de l'éolien offshore sur l'environnement, le Collaborative Offshore Wind Research into the Environment (COWRIE), qui a financé plusieurs études. En Belgique, où les premières éoliennes offshore ont été installées en 2008, un programme de suivi écologique est également en cours et des rapports annuels sont publiés depuis 2009. Toutefois, malgré ces développements, la base scientifique reste à ce jour limitée et les impacts environnementaux de l'éolien offshore restent sujets à débat [3, 4].

2.2. Phase de construction

C'est pendant la phase de construction que l'on observe les impacts négatifs les plus importants des éoliennes offshore sur l'environnement marin [5]. Ces impacts sont de nature temporaire. Ils dépendent de la taille des installations et des techniques utilisées mais aussi de la capacité de résilience des organismes marins [6]. Les principaux impacts liés à la construction sont les suivants :

- Le bruit : associé aux vibrations, il constitue la préoccupation majeure liée aux opérations de construction. Les causes en sont la circulation des navires d'intervention, la préparation des fonds (forage, nivellement), l'ensouillage des câbles électriques sous-marins et, surtout, l'enfoncement des pieux de fondations dans le substrat. Le bruit a un impact démontré sur les espèces sensibles comme les mammifères marins [7]. Une baisse d'abondance des marsouins pendant la phase de construction a été observée jusqu'à 15 km de la zone de travaux au Danemark [7] et jusqu'à 22 km en Belgique [8], cette distance allant jusqu'à 40 km

pour les phoques aux Pays-Bas [9]. Les fortes pressions sonores engendrées par le battage de pieux peuvent également entraîner des dommages physiques pour les espèces sensibles à proximité [6]. Les effets sur les poissons sont moins bien connus, mais la littérature suggère un risque de perturbation [10] confirmé par certaines études [11], et même un risque de mortalité à faible distance [5, 12]. L'impact sonore dépend des techniques utilisées, de la sensibilité acoustique des espèces présentes ainsi que de leur tolérance au bruit et leur capacité de s'y habituer [6]. Des mesures de réduction du bruit existent, comme par exemple l'émission de rideaux de bulles lors du battage de pieux ou l'utilisation de répulsifs acoustiques, mais elles n'ont qu'un effet limité [12].

- La perte d'habitat : elle est due à la perturbation des fonds marins à l'occasion de la construction des fondations, de l'ensouillage des câbles et de l'ancrage des navires d'intervention. Après la cessation des travaux, le délai de restauration du benthos varie de plusieurs mois à plusieurs années en fonction de la capacité de recolonisation des espèces [6].
- L'augmentation de la turbidité : elle est due aux solides mis en suspension lors des travaux et dispersés par les courants, et varie selon l'hydrodynamisme et la topographie du lieu [4]. Les particules mises en suspension peuvent se redéposer sur des oeufs, algues et organismes sessiles qui peuvent ainsi être enterrés ou étouffés [4, 6, 13].

2.3. Phase de fonctionnement

Impacts négatifs

- Consommation d'espace : l'espace consommé par les parcs éoliens entraîne une perte directe d'habitat pour une série d'organismes marins. Cette perte d'habitat peut être particulièrement sensible pour les espèces sédentaires ou pour certains poissons fidèles à leurs zones de frayères ou de nurseries [6]. Par ailleurs, certains oiseaux marins semblent éviter totalement les parcs éoliens alors que d'autres semblent s'habituer à leur présence, sans que l'on puisse pour l'instant déduire un impact en termes de populations [9, 14].
- Effet barrière : pour éviter les éoliennes, certains oiseaux peuvent être contraints de changer de direction pendant la migration ou lors de leurs déplacements locaux. L'impact dépend de la taille de la ferme et de sa configuration et varie selon les espèces et leur capacité à compenser l'énergie supplémentaire dépensée [15]. L'impact de l'effet barrière sur les populations d'oiseaux est difficilement quantifiable. Une étude a montré qu'une distance supplémentaire de 500 m était parcourue par certains oiseaux migrateurs pour éviter la ferme éolienne danoise de Nysted. Cela peut sembler négligeable au regard du trajet migratoire total, mais le risque tient notamment aux impacts cumulés de multiples installations humaines en mer. Le risque pourrait également être plus important pour certains oiseaux marins sédentaires [16].
- Risque de collision dans l'air : le risque de collision des oiseaux avec les structures aériennes des éoliennes est un sujet controversé [5] qui se heurte notamment à l'absence de technique fiable de quantification des collisions mortelles en mer [9, 17]. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer ce risque, sachant qu'il varie en fonction de la vulnérabilité des espèces d'oiseaux mais aussi en fonction du nombre, de la taille et de l'espacement des éoliennes ainsi que de leur localisation par rapport aux corridors de migration et aux lieux de reproduction [5, 6, 18]. Le risque peut augmenter en cas de mauvaises conditions météo ainsi que la nuit en raison de l'attraction exercée sur les oiseaux par les dispositifs lumineux des éoliennes [5]. Une partie de la littérature, qui porte principalement sur l'éolien onshore, semble indiquer que les oiseaux apprennent rapidement à éviter les éoliennes. La mortalité aviaire due aux éoliennes serait ainsi négligeable en comparaison des impacts d'autres activités humaines telles que déforestation et urbanisation [3, 19, 20]. Pourtant, d'autres études ont montré une hausse de mortalité [6, 17]. Sovacool propose de quantifier le nombre de décès par gigawattheure d'électricité produit pour différentes technologies. Ses calculs préliminaires, basés sur l'éolien onshore, suggèrent que les éoliennes auraient un impact bien moindre que d'autres modes de production d'électricité tels que le nucléaire ou les centrales au charbon [21]. Notons que le risque de collision existe également pour les chauves-souris actives en mer [1].
- Risque de collision sous l'eau : le risque de collision de vertébrés marins avec les structures sous-marines des éoliennes est jugé faible, car les éoliennes sont des structures fixes et de grande taille. Toutefois, peu de données sont disponibles et ce risque reste à investiguer [5].
- Bruit et vibrations : les bruits et vibrations liés à la rotation des pales ne sont généralement pas considérés comme une menace pour les organismes marins. Plusieurs études ont montré un retour des marsouins dans les parcs après l'arrêt des travaux [9, 22]. Les phoques sont plus sensibles au bruit des éoliennes et des

études supplémentaires sont nécessaires [9]. Les effets du bruit des éoliennes sur les oiseaux n'ont pas été étudiés de manière approfondie ; des recherches complémentaires sont nécessaires notamment pour évaluer les effets à long terme [5, 6]. Une hypothèse à confirmer est que le bruit aiderait les oiseaux à éviter les éoliennes, ce qui ne plaide pas pour s'efforcer de le réduire [5].

- Perturbations hydro-sédimentaires : la présence de structures sous-marines modifie localement les mouvements de l'eau et les transits sédimentaires, et les fonds marins subissent des érosions et des accrétions sédimentaires au pied des éoliennes, ce qui a un impact sur les organismes benthiques [8].
- Electromagnétisme : de nombreux animaux marins tels que les élasmobranches (requins et raies), les anguilles et les mammifères marins utilisent le champ magnétique terrestre pour s'orienter, d'autres utilisent les champs électriques pour repérer leurs proies. La question se pose de savoir dans quelle mesure les champs électromagnétiques générés par les câbles et autres équipements électriques sous-marins pourraient perturber leurs comportements. Les études menées sur les poissons et organismes benthiques n'ont pas montré d'impact significatif [4, 7]. De plus, le champ émis décroît rapidement et devient négligeable au-delà d'une zone de quelques mètres autour des éléments électriques. Certains auteurs estiment que cet impact est peu significatif et pourrait être mitigé par l'ensouillage des câbles [4]. Toutefois, d'autres auteurs recommandent la prudence [7] et préconisent une poursuite de la recherche [5, 6].

Impacts positifs

- Effet réserve : pour des raisons pratiques et de sécurité des installations, les parcs éoliens sont généralement accompagnés d'une zone d'interdiction de navigation et de pêche commerciale, notamment au chalut. Or, les zones d'interdiction de pêche, même de petite taille, favorisent le nombre et la taille des poissons, ainsi que la diversité d'espèces, de manière comparable à une aire marine protégée [4, 5, 8]. L'exclusion de la navigation contribue aussi à créer une zone refuge pour les animaux marins [9].
- Effet « récif artificiel » : il désigne « le processus par lequel une structure à substrat dur conçue par l'homme et immergée en mer peut assurer des fonctions écologiques similaires aux récifs marins naturels » [23]. La présence d'un récif artificiel augmente l'hétérogénéité tridimensionnelle de l'habitat, ce qui procure de nouvelles niches écologiques et donc des opportunités de colonisation pour les organismes marins. Ceci entraîne une augmentation locale de la biodiversité et de la biomasse [4, 6]. A titre d'exemple, au pied des parcs de Horns Rev et Nysted, la biomasse en organismes benthiques fixés sur le substrat a augmenté d'un facteur 50 à 150 [2]. Cependant, la question se pose de savoir s'il s'agit d'une réelle augmentation de la biodiversité, ou d'une simple concentration des organismes environnants [4, 5, 6]. Par ailleurs, l'effet récif est susceptible de favoriser davantage les espèces opportunistes que les espèces plus spécialisées, ce qui entraîne un changement dans l'équilibre entre espèces [6]. Il risque aussi de favoriser des espèces exotiques au détriment des espèces indigènes [4, 6], certains auteurs parlant de possible "bombe à retardement" pour ce qui est des espèces exotiques envahissantes [24]. Des recherches complémentaires sont donc nécessaires. Si l'effet récif est recherché, il peut être intégré au stade de la conception des dispositifs [5].
- Attraction d'oiseaux et de mammifères marins : par ricochet, l'augmentation de biodiversité liée à aux effets réserve et récif procure une source de nourriture accrue aux niveaux trophiques supérieurs que sont les oiseaux et les mammifères marins. Dans les parcs éoliens belges, une attraction a été notée pour plusieurs espèces de mouettes, goélands et sternes, bien que d'autres espèces comme le guillemot aient plutôt montré des comportements d'évitement [8]. Une étude néerlandaise a montré l'attraction exercée sur les grands cormorans ainsi que sur les marsouins présents en plus grand nombre dans le parc éolien où ils bénéficieraient de davantage de tranquillité et d'une source de nourriture plus abondante [9].

2.4. Phase de démantèlement

Il n'y a à l'heure actuelle pas de retour d'expérience sur le démantèlement d'éoliennes offshore. On estime que les impacts attendus seront globalement similaires aux impacts de la phase de construction, avec toutefois une différence de taille : la dépose des fondations conduira à l'élimination des habitats créés par l'effet récif, et donc à une perte de biodiversité. On peut donc se demander si cette dépose est opportune [5, 6].

3. L'énergie des marées : les usines marémotrices

3.1. Introduction

Même si la technologie marémotrice est une technologie fiable et mature basée sur une énergie hautement prévisible, seule une poignée d'usines marémotrices existent dans le monde étant donné la rareté des sites favorables, l'ampleur des investissements requis pour construire les infrastructures et les impacts environnementaux souvent décrits [25, 26]. En Europe, la seule usine marémotrice est l'usine de la Rance, en Bretagne, mise en service en 1966. Ses conséquences environnementales ne sont pas évaluables compte tenu de l'absence de données de référence collectées avant sa construction et l'absence de suivi écologique. Malgré les obstacles, l'intérêt pour cette technologie demeure, et plusieurs projets sont à l'étude en Europe et dans le monde. Au Royaume-Uni, un projet d'usine marémotrice dans l'estuaire de Severn a fait l'objet d'une étude de faisabilité, mais a été abandonné par le gouvernement britannique en 2010 au vu de l'importance des coûts, des risques et des impacts potentiels pour l'environnement révélés par cette étude [27]. Pourtant, l'amplitude exceptionnelle des marées dans l'estuaire de Severn (14 mètres) permettrait à un barrage de fournir 5% de l'électricité britannique. C'est pourquoi un nouveau projet a été mis à l'étude en 2012 par David Cameron [28].

3.2. Phase de construction

La construction d'un barrage dans un estuaire ou une baie nécessite des travaux d'envergure exceptionnelle qui se déroulent sur une longue période. A titre d'exemple, les travaux de construction de l'usine de la Rance se sont étalés sur une période de 6 ans et ont nécessité la construction de trois barrages provisoires pour assécher la zone [29]. Parmi les impacts de la construction, on peut citer la destruction d'habitats dans la zone des travaux [7]. Les autres impacts sont rapprocher de ceux de l'éolien offshore, mais sur une durée et avec une ampleur considérablement plus élevées, et dans des zones (baies et estuaires) généralement considérées comme des zones d'intérêt particulier pour la biodiversité.

3.3. Phase de fonctionnement

- Modification du régime des marées et de la dynamique sédimentaire : la présence d'un barrage entraîne une modification complète du régime des marées et des mouvements de sédiments, ce qui modifie fondamentalement l'écosystème de l'estuaire. Les eaux en amont du barrage deviennent plus calmes et claires, alors que celles en aval sont davantage sujettes aux courants lors de l'écoulement du barrage et deviennent plus turbides. La zone d'estran, source de nourriture pour de nombreuses espèces d'oiseaux notamment, est réduite et moins souvent exposée à l'air même si sa productivité peut augmenter [7]. L'étude de faisabilité du barrage Severn a montré que le projet aurait entraîné la diminution d'habitats tels que marais salants et vasières, ce qui aurait eu un effet négatif sur une trentaine d'espèces d'oiseaux [27]. La modification des habitats peut également altérer la capacité des sites à servir d'aires de reproduction pour les poissons [7].
- Effet barrière : le barrage peut supprimer ou restreindre l'accès des poissons et mammifères marins à leurs zones de reproduction ou de nourrissage, et constituer un obstacle aux déplacements d'espèces migratrices telles que les saumons et anguilles. De plus, les turbines peuvent avoir un effet délétère important sur les poissons et autres organismes marins les traversant [26, 30]. L'étude de faisabilité du barrage Severn a montré que les poissons auraient été très affectés, avec des effondrements de populations et des extinctions locales pour certaines espèces telles que le saumon atlantique et l'alose feinte. Le nouveau projet actuellement à l'étude serait pourvu d'un nouveau type de turbines à rotation lente permettant de limiter l'impact sur les poissons et les habitats d'oiseaux marins [28]. Pour les poissons migrateurs, l'impact peut être mitigé par des dispositifs type « échelles à poissons » tels que ceux installés sur les barrages hydromoteurs [7].
- Bruit : il n'existe pas d'étude sur le bruit généré par les usines marémotrices en phase opérationnelle [7].

3.4. Phase de démantèlement

Une centrale marémotrice ayant une longévité exceptionnelle, aucun retour d'expérience n'est disponible sur leur démantèlement. De tels barrages ont, en effet, une durée de vie estimée de plus de 100 ans [7].

4. L'énergie des courants marins : les hydroliennes

Les impacts des hydroliennes sur l'environnement marin sont mal connus car il existe à ce jour très peu de données collectées, les technologies étant au stade de prototype [7]. Les données recueillies auprès de dispositifs de test isolés peuvent conduire à conclure à un impact minime, mais elles ne sont pas représentatives de l'impact de fermes hydroliennes déployées à large échelle [31]. De plus, la grande variété des dispositifs ne permet pas de généraliser les impacts. Il n'est donc possible que de faire des hypothèses sur les risques possibles, et ce à partir de données limitées.

4.1. Phase de construction

Lorsque les hydroliennes sont stabilisées par des fondations, les impacts de la phase de construction peuvent être rapprochés de ceux de l'éolien offshore [7, 10]. L'impact est moindre lorsque les dispositifs sont amarrés aux fonds marins ou stabilisés par gravité [10, 32], comme c'est le cas pour le parc démonstrateur de Paimpol en France pour lequel l'impact de la construction a été jugé minime dans l'étude préalable d'impact [33].

4.2. Phase de fonctionnement

Impacts négatifs

- **Consommation d'espace** : comme pour les éoliennes, l'empreinte spatiale des hydroliennes sur les fonds marins entraîne une perte directe d'habitat benthique.
- **Risque de collision sous l'eau** : il serait plus élevé qu'avec les éoliennes parce que les dispositifs hydroliens comprennent des pales en rotation sous l'eau, mais des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux l'évaluer [5]. Pour les cétacés et oiseaux, le risque serait faible à l'exception d'oiseaux plongeant à grande profondeur, avec un risque de mortalité faible dû à la vitesse lente de rotation. En comparaison avec une turbine d'usine marémotrice, les pales d'hydroliennes tournent en effet beaucoup plus lentement et sont plus faciles à éviter puisqu'elles sont installées en pleine eau [7, 32]. Par ailleurs, certains dispositifs hydroliens n'utilisent pas de turbines rotatives [7] ou utilisent des turbines à centre évidé, ce qui diminue le risque [33]. Cependant, la turbidité accrue générée par les hydroliennes pourrait réduire la visibilité et accroître le risque [7].
- **Perturbations hydro-sédimentaires** : la pose d'hydroliennes modifie les mouvements d'eau et de sédiments en aval des installations, ce qui peut affecter les habitats benthiques [7]. Il a été montré que les dépôts de sable générés par les turbines peuvent diminuer le rythme de croissance et augmenter la mortalité des herbiers. Si cet effet semble réversible lors du démantèlement des installations, l'impact cumulé de nombreuses turbines reste à évaluer [7]. Les turbines causent également un mélange accru de la colonne d'eau, ce qui peut altérer l'équilibre des écosystèmes là où les gradients de salinité et de température sont bien définis [7]. Enfin, à large échelle, l'extraction de l'énergie cinétique des courants de marées diminue l'amplitude des marées ainsi que la vitesse des courants et la hauteur des vagues [7].
- **Bruit** : l'impact sonore des hydroliennes reste assez peu connu [7]. Les effets cumulatifs de dispositifs multiples pourraient masquer les signaux de communication et d'écholocation émis par les organismes marins [7]. Comme pour les éoliennes, l'hypothèse que le bruit faciliterait l'évitement et réduirait par conséquent le risque de collision pour certaines espèces animales, reste à confirmer [5].
- **Electromagnétisme** : impact identique à celui généré par l'éolien offshore.

Impacts positifs

Les **effets réserve et récif** sont à rapprocher de ceux des éoliennes offshore [7].

4.3. Phase de démantèlement

Aucun retour d'expérience sur le démantèlement n'est actuellement disponible. Les impacts probables sont à rapprocher de ceux de la phase d'installation, à la différence près qu'un enlèvement des structures fixes pourrait conduire à une diminution de l'hétérogénéité d'habitat et donc à la suppression d'une large composante de la communauté benthique [6].

5. L'énergie des vagues : les fermes houlomotrices

Il s'agit là aussi d'une technologie naissante et vu la grande variété des dispositifs testés, les incertitudes portant sur les impacts environnementaux sont, comme pour l'énergie hydrolienne, relativement importantes.

5.1. Phase de construction

Pour les dispositifs houlomoteurs stabilisés par des fondations, les impacts de la phase de construction peuvent être rapprochés de ceux de l'éolien offshore [7, 10]. L'impact, notamment sonore, est moindre lorsque les dispositifs sont simplement ancrés ou amarrés aux fonds marins [10, 32].

5.2. Phase de fonctionnement

En phase de fonctionnement, les effets bénéfiques des dispositifs houlomoteurs sur l'environnement pourraient être plus importants que les effets négatifs, mais des études à long terme sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse [4].

Impacts négatifs

- **Consommation d'espace** : l'empreinte spatiale des fermes houlomotrices peut être calculée verticalement ou horizontalement ; elle entraîne une perte directe d'habitat pour une série d'espèces [10].
- **Effet barrière** : des bouées houlomotrices installées sur de grandes surfaces pourraient agir comme barrière aux déplacements d'espèces migratrices ou constituer un obstacle aux mouvements locaux, notamment pour les mammifères marins qui parcourent de grandes distances pour se nourrir. L'appréciation de cet impact se heurte au manque de connaissances sur les trajets empruntés par les animaux marins. Ces trajets peuvent dépendre des courants, des saisons, et du climat local et régional. La réponse à cette question sera cruciale dans la détermination des sites propices au développement de l'houlomoteur [4].
- **Risques de collision et d'enchevêtrement** : les dispositifs houlomoteurs sont généralement mobiles à la surface ou dans la colonne d'eau, reliés entre eux par des câbles et aux fonds marins par des chaînes d'amarrage, ce qui augmente les risques de collision par rapport à des structures fixes [5, 32]. Un risque d'enchevêtrement et de piégeage dans les câbles a été signalé pour les tortues, poissons de grande taille et mammifères marins [7, 31]. Un risque de collision existerait avec les oiseaux plongeurs, en fonction de la profondeur de plongée des oiseaux [13]. Pour les mammifères marins le risque de collision semblerait limité, mais le peu de recul doit amener à considérer cette hypothèse avec précaution [23].
- **Perturbations hydro-sédimentaires** : l'amortissement des vagues peut diminuer l'érosion et causer des changements écologiques au niveau du trait de côte [7, 23]. A l'inverse, des batteries de dispositifs peuvent concentrer les vagues vers la côte et accroître l'érosion [7]. L'amortissement des vagues conduit à une mer plus calme, dans laquelle les eaux de surface sont moins mixées, ce qui peut avoir un impact sur la vie marine [7]. La modification des courants peut aussi avoir un impact sur les populations de poissons dont les larves sont transportées par les courants. Toutefois, ces effets pourraient être compensés par l'effet récif qui entraînerait, au contraire, une augmentation du développement des poissons (voir ci-dessous).
- **Bruit** : l'impact sonore des dispositifs houlomoteurs en phase de fonctionnement est encore assez peu connu; des études de suivi à long terme sont nécessaires [4, 7]. Le bruit généré varie en fonction des dispositifs de captage d'énergie : béliers hydrauliques et turbines à air figurent parmi les plus sonores [10]. Une étude suédoise a montré que phoques et marsouins étaient observés régulièrement près d'une ferme houlomotrice en fonctionnement, ce qui semble indiquer un impact sonore assez limité [4]. Comme pour les autres EMR, l'hypothèse d'un impact positif du bruit pour faciliter l'évitement reste à confirmer [5].
- **Electromagnétisme** : impact identique à celui généré par l'éolien offshore (voir ci-avant).

Impacts positifs

- **Effet réserve** : les fermes houlomotrices ne permettent pas la pêche commerciale dans leur zone d'implantation. L'effet réserve est donc à rapprocher de celui généré par les éoliennes offshore.
- **Effet récif** : l'effet récif est similaire à celui observé pour les éoliennes offshore. Il concerne à la fois les dispositifs d'ancrage et les bouées elles-mêmes qui sont rapidement colonisées par des organismes sessiles et procurent de nouvelles niches écologiques aux poissons et autres organismes marins (protection contre

les prédateurs, source de nourriture, etc.) [5]. Une étude suédoise a montré qu'environ 150 kg de biomasse peuvent se fixer à une bouée de 3 mètres de diamètre. Cette colonisation, aussi appelée "biofouling", favorise la biodiversité mais pourrait devenir un inconvénient au niveau technique en diminuant l'efficacité des dispositifs, même si cela reste à confirmer [4]. Il faut noter que selon Inger *et al.*, les structures flottantes auraient pour seul effet de concentrer les poissons environnants, et non d'augmenter réellement leur nombre. Leur seul impact positif serait donc d'attirer les poissons dans des zones où la pêche est interdite [5]. Par ailleurs, les structures flottantes pourraient jouer le rôle de reposoir pour l'avifaune [13, 23].

5.3. Phase de démantèlement

Même constat que pour l'hydrolien (voir ci-dessus).

6. Conclusions

6.1. Nécessité de poursuivre la recherche

Les impacts environnementaux des EMR sont à ce jour insuffisamment étudiés et compris. En effet, les écosystèmes marins sont moins bien connus que les écosystèmes terrestres parce que les études en milieu marin sont coûteuses et nécessitent des technologies sous-marines avancées [4, 32]. De plus, les interactions entre dispositifs EMR et environnement marin sont complexes et doivent être étudiées sur de larges échelles géographiques et temporelles [4, 6, 13, 15]. Par conséquent, il est indispensable de poursuivre les efforts de recherche multidisciplinaire afin d'acquérir une connaissance des effets à long terme des EMR sur l'environnement marin [3, 5]. Pour les technologies en cours de développement comme l'hydrolien ou l'houlomoteur, la connaissance des impacts environnementaux peut influencer sur la mise au point des techniques dès le stade de la conception [4, 5]. Une bonne connaissance des effets environnementaux peut également influencer positivement sur l'acceptabilité sociale des projets [4].

La recherche s'impose notamment pour évaluer les impacts cumulés des installations et leurs conséquences en termes de populations, ce qui requiert de prendre en considération la totalité des EMR au sein d'une zone donnée ainsi que les autres usages humains pouvant contribuer aux impacts (plateformes pétrolières, ponts, trafic maritime, pêche, etc.). Les effets cumulés seront mieux évalués sur une échelle transnationale, ce qui implique une coopération entre états riverains et la mise au point de méthodologies communes [4, 14, 15].

6.2. Nécessité d'une planification stratégique pour minimiser les impacts

Même si les études semblent montrer que les ERM, à l'exception des usines marémotrices, ne représentent pas pour l'instant une menace importante pour les écosystèmes marins, le choix de leur localisation est un enjeu crucial [7, 34]. En effet, la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que les impacts négatifs sur l'environnement marin peuvent être minimisés à condition d'éviter les zones d'habitats et d'espèces les plus sensibles. Inger *et al.* [5] considère même que les ERM pourraient devenir des alliées de la conservation de la nature si elles sont situées dans des zones d'habitat dégradé qu'elles pourraient contribuer à restaurer via l'effet récif, donnant lieu à une "win-win ecology". Une planification temporelle des travaux de construction, évitant les périodes de l'année critiques pour les animaux marins, est un autre moyen de réduire les impacts [7, 6].

Il importe donc de planifier le développement des ERM sur un vaste périmètre géographique, tout en tenant compte des autres conflits d'usage. C'est là un des enjeux de la politique maritime intégrée proposée par la Commission européenne [35]. Ceci implique que l'ensemble des parties intéressées, des producteurs d'énergie aux communautés locales en passant par les pêcheurs, les ONG environnementales et les institutions académiques, soient impliquées à tous les stades du développement des ERM [7].

Les impacts négatifs résiduels sur l'environnement marin ne seront vraisemblablement pas nuls, mais ils doivent être mis en balance avec les bénéfices attendus d'une production à grande échelle d'énergie à faible contenu en carbone. L'objectif final étant d'utiliser l'énergie fournie par la mer tout en protégeant celle-ci, en gardant à l'esprit le degré d'incertitude lié à nos connaissances.

Glossaire

Benthos	Ensemble des êtres vivants animaux ou végétaux fixés au fond des eaux (benthos sessile) ou s'en éloignant peu (benthos vagile) <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Benthique	Relatif fond des mers ou des eaux douces <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Biofouling	Fouling (incrustations sur une matière solide immergée dans un milieu aquatique) constitué d'êtres vivants ou dû à des êtres vivants aquatiques <i>Source : Wikipedia</i>
Elasmobranchie	Nom de classe des poissons dont le squelette reste cartilagineux chez l'adulte : requins, raies et chimères <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Ensouillage	Enfouissement d'une canalisation sous-marine (oléoduc, câble) dans le sol marin, après creusage d'une souille <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Espèce opportuniste	Espèce peu spécialisée qui est capable de s'adapter à des conditions de vies variées <i>Source: Futura-Sciences</i>
Estran	Partie du littoral alternativement couverte et découverte par la mer <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Frayère	Endroit où les poissons déposent leurs œufs <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>
Nurserie	Pour des mollusques, crustacés et poissons sauvages, il s'agit d'un site occupé par les juvéniles, entre le stade larvaire et le stade adulte. <i>Source : Aquaportail</i>
Sessile	Désigne les organismes, notamment les micro-organismes aquatiques, définitivement fixés sur le substrat <i>Source : Wikipedia</i>
Turbidité	Caractère plus ou moins trouble d'un liquide ; grandeur mesurant ce caractère. <i>Source : dictionnaire Larousse en ligne</i>

Bibliographie

- [1] **Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.** 2010. *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens : actualisation 2010*. En ligne. 183 p. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_eolien_15072010_complet.pdf>. Consulté le 10 novembre 2012.
- [2] **Dong Energy,** Vattenfall, Danish Energy Authority et Danish Forest and Nature Agency. 2006. *Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues*. En ligne. 142 p. <<http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Havvindmoeller/index.htm>>. Consulté le 20 décembre 2012.
- [3] **Leung, Dennis Y.C** et Yuan Yang. 2012. «Wind energy development and its environmental impact: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no 16, p. 1031-1039.
- [4] **Langhamer, Olivia,** Kalle Haikonen et Jan Sundberg. 2010. «Wave power - Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters». *Renewable Sustainable Energy Reviews*, no 14, p. 1329–1335.
- [5] **Inger, Richard,** Martin J. Attrill, Stuart Bearhop, Annette C. Broderick, W. James Grecian, David J. Hodgson, Cheryl Mills, Emma Sheehan, Stephen C. Votier, Matthew J. Witt1 et Brendan J. Godley. 2009. «Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research». *Journal of Applied Ecology*, no 46, p. 1145–1153.
- [6] **Gill, Andrew B.** 2005. «Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone». *Journal of Applied Ecology*, no 42, p. 605–615
- [7] **Frid, Chris,** Eider Andonegi, Jochen Depestele, Adrian Judd, Dominic Rihan, Stuart I. Rogers et Ellen Kenchington. 2012. «The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices». *Environmental Impact Assessment Review*, no 32, p. 133-139.
- [8] **Degraer, Steven,** Robin Brabant et Bob Rumes (Eds). 2012. *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Heading for an understanding of environmental impacts*. Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Marine ecosystem management unit. En ligne. 155 p. + annexes. <http://www.mumm.ac.be/Downloads/News/winmon_report%202012_cor.pdf>. Consulté le 30 décembre 2012.
- [9] **Lindeboom, H.J.,** H. J. Kouwenhoven, M. J. N. Bergman, S. Bouma, S. Brasseur, R Daan, R. C. Fijn, D. de Haan, S. Dirksen, R. van Hal, R. Hille Ris Lambers, R. ter Hofstede, K. L. Krijgsveld, M. Leopold et M. Scheidat. 2011. «Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation». *Environmental Research Letters*, no 6, p. 1-13.
- [10] **Margheritini, Lucia,** Anne Merrild Hansen et Peter Frigaard. 2012. «A method for EIA scoping of wave energy converters – based on classification of the used technology». *Environmental Impact Assessment Review*, no 21, p. 33-44.
- [11] **Mueller-Blenkle, Christina,** Peter K. McGregor, Andrew B. Gill, Mathias H. Andersson, Julian Metcalfe, Victoria Bendall, Peter Sigray, Daniel Wood et Frank Thomsen. 2010. *Effets of pile-driving noise on the behaviour or marine fish*. En ligne. 57 p. <<http://www.thecrownestate.co.uk/media/354807/2010-03%20Effects%20of%20pile%20driving%20noise%20on%20fish.pdf>>. Consulté le 12 janvier 2013.
- [12] **Thomsen, Frank,** Karin Lüdemann, Rudolf Kafemann et Werner Piper. 2006. *Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish*. En ligne. 62 p. <http://archive.iwcoffice.org/documents/sci_com/premeetings/Thomsen_et_al._2006%20Effects%20OWF%20noise%20on%20marine%20mammals%20and%20fish.pdf>. Consulté le 10 décembre 2012.
- [13] **Lin, Lan** et Haitao Yu. 2012. «Offshore wave generation devices: impacts on ocean bio-environment ». *Acta Ecologica Sinica*, no 32, p. 117-122.
- [14] **Busch M.,** A. Kannen, S. Garthe, M. Jessopp. 2013. «Consequences of a cumulative perspective on marine environmental impacts: offshore wind farming and seabirds at North Sea scale in context of the EU Marine Strategy Framework Directive». *Ocean and Coastal Management*, no 71, p. 213-224.

- [15] **Fox, A.D.**, Mark Desholm, Johnny Kahlert, Thomas Kjaer Christensen et I.B. Krag Petersen. « Information needs to support environmental impact assessment of the effects of European marine offshore wind farms on birds». *IBIS, the International Journal of Avian Science*, no 148, p. 129–144.
- [16] **Masden, Elizabeth A.**, Daniel T. Haydon, Anthony D. Fox, Robert W. Furness, Rhys Bullman et Mark Desholm. «Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds». *ICES Journal of Marine Science*, no 66, p. 746–753.
- [17] **Everaert, Joris** et Eric W. M. Stienen. 2007. « Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium) ». *Biodiversity Conservation*, no 16, p. 3345-3359.
- [18] **Garthe, Stefan** et Ommo Hüppop. 2004. «Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index». *Journal of Applied Ecology*, no 41, p. 724-734.
- [19] **De Lucas, Manuela**, Guyonne F. E. Janns et Miguel Ferrer. 2004. «The effects of a wind farm on birds in a migration point: the Strait of Gibraltar». *Biodiversity and Conservation*, no 13, p. 395-407.
- [20] **Desholm, Mark** et Johnny Kahlert. 2005. «Avian collision risk at an offshore wind farm». *Biology Letters*. no 1, p. 296-298.
- [21] **Sovacool, Benjamin K.** 2013. «The avian benefits of wind energy: a 2009 update». *Renewable Energy*, no 49, p. 19-24.
- [22] **Diederichs, Ansgar**, Veit Hennig, et Georg Nehls. 2008. *Investigations of the bird collision risk and the responses of harbour porpoises in the offshore wind farms HornsRev, North Sea, and Nysted, Baltic Sea, in Denmark. Part II: Harbour porpoises*. En ligne. 95 p. <http://bioconsult-sh.de/pdf/Final%20Report%20Offshore%20Collision%20Risk%20Porpoises%20DK%2020081219.pdf>. Consulté le 12 janvier 2013.
- [23] **Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie**. 2012. *Energies marines renouvelables : étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques : version 2012*. En ligne. 358 p. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/120615_etude_version_finale.pdf>. Consulté le 20 décembre 2012.
- [24] **Petersen, Jen Kjerulf** et Torleif Malm. 2006. «Offshore windmill farms: threats to or possibilities for the marine environment». *Ambio*, no 35, pp. 75-80.
- [25] **Esteban, Miguel** et David Leary. 2012. «Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy». *Applied Energy*, no 90, p. 128-136.
- [26] **O'Rourke, Fergal**, Fergal Boyle et Anthony Reynolds. 2010. «Tidal energy update 2009». *Applied Energy* no 87, p. 398–409.
- [27] **Department of Energy and Climate Change**, South West RDA et Welsh Assembly Government. 2010. *Severn Tidal Power: Feasibility Study Conclusions and Summary Report*. En ligne. 75 p. <<http://www.decc.gov.uk/media/viewfile.ashx?filetype=4&filepath=What%20we%20do/UK%20energy%20supply/Energy%20mix/Renewable%20energy/severn-tp/621-severn-tidal-power-feasibility-study-conclusions-a.pdf&minwidth=true>>. Consulté le 30 décembre 2012.
- [28] **Hickman, Leo**. 2012. «Abandoned Severn tidal power project to be reconsidered». *The Guardian*. En ligne. 20 août 2012. <http://www.guardian.co.uk/environment/2012/aug/20/severn-estuary-tidal-power-project>. Consulté le 12 décembre 2012.
- [29] **De Laleu, V.** 2009. «La Rance tidal power plant. 40-year operation feedback – Lessons learnt». In: *British Hydropower Association Annual Conference, Liverpool (UK), 14-15 October 2009*. En ligne. 40 p. <<http://www.british-hydro.org/downloads/La%20Rance-BHA-Oct%202009.pdf>>. Consulté le 12 janvier 2013.
- [30] **Dadswell, M. J.** et R. A. Rulifson. 1994. «Macrotidal estuaries: a region of collision between migratory marine animals and tidal power development». *Macro Biological Journal of the Linnean Society*, no 51 p.93-113.
- [31] **Boehlert, George W** et Andrew B. Gill. 2010. «Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis». *Oceanography*, no 23, p. 68-81.

- [32] **Grecian, W. James**, Richard Inger, Martin J. Attrill, Stuart Bearhop, Brendan J. Godley, Matthew J. Witt et Stephen C. Votier. 2010. « Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds ». *IBIS, the International Journal of Avian Science*, no 152, p. 683-697.
- [33] **Anonyme**. 2010. *Rapport relatif à l'enquête publique sur le projet d'implantation d'un parc démonstrateur d'hydroliennes sur le site de Paimpol-Bréhat*. En ligne. 107 p. <http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/energies_marines/paimpol/document/Rapport_fin_enquete_082010.pdf>. Consulté le 10 décembre 2012.
- [34] **Wiser, Ryan**, Zhenbin Yang, Maureen Hand, Olav Hohmeyer, David Infield, Peter H. Jensen, Vladimir Nikolaev, Mark O'Malley, Graham Sinden, Arthouros Zervos. 2011. «Wind energy». In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, p. 535-607. En ligne. Cambridge (United Kingdom) et New York (USA) : Cambridge University Press. <<http://www.ipcc-wg3.de/special-reports/srren/special-report-renewable-energy-sources>>. Consulté le 10 décembre 2012.
- [35] **Commission européenne**. 2012. *Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions : Rapport sur l'état d'avancement de la politique maritime intégrée de l'UE*. COM(2012) 491 final. En ligne. 12 p. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:DKEY=688422:FR:NOT>>. Consulté le 13 janvier 2013.