



*Ouvrage collectif  
coordonné par*

Michel Paillard  
Denis Lacroix  
Véronique Lamblin

# Énergies renouvelables marines

Étude prospective  
à l'horizon 2030

éditions  
**Quæ**



# Énergies renouvelables marines

Étude prospective  
à l'horizon 2030



File d'éoliennes au Danemark (© Dong Energy, Dk)

Éditions Quæ  
RD 10  
78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2009  
ISBN 978-2-7592-0176-1

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6<sup>e</sup>.

*Ouvrage collectif  
coordonné par*

Michel Paillard  
Denis Lacroix  
Véronique Lamblin

# Énergies renouvelables marines

Étude prospective  
à l'horizon 2030

éditions  
Quæ



# ■ ■ Préface

---

Plus que jamais, la conjonction des engagements que la France a pris en matière énergétique tant à l'échelon européen que dans le cadre du Grenelle de l'environnement, ainsi que le contexte né du nouveau choc pétrolier, doivent conduire à une réflexion active sur les énergies renouvelables.

Conscient de ces évolutions, j'avais décidé de lancer en mars 2007 un travail de réflexion prospective sur les énergies renouvelables d'origine marine à l'horizon 2030. En effet, l'océan en constitue un immense réservoir (vents, courants, vagues, marées, biomasse, chaleur...) et la France dispose d'un potentiel considérable de développement de ces énergies, du fait aussi bien de l'étendue de ses façades maritimes, tant en métropole qu'outre-mer, que des savoirs et des savoir-faire disponibles dans notre pays.

Une vingtaine de partenaires français représentant les principaux acteurs du secteur ont participé à ce travail. Je tiens à les remercier vivement de leur engagement. Ce travail a permis de décrire un éventail de futurs possibles (en fonction du contexte mondial, de l'évolution de la demande énergétique, du jeu des acteurs, etc.), ainsi que leurs conséquences sur le développement des différentes technologies connues à ce jour et ce qu'elles impliquent en termes de recherche et développement.

Ce travail s'inscrit également dans une vision prospective européenne dans la mesure où il montre aussi les avantages des multiples formes de collaboration et de synergie possibles entre les pays européens et pour les vingt ans à venir.

Ainsi l'Ifremer, conformément à sa vocation, contribue à l'effort collectif de réflexion visant à éclairer la décision publique dans le domaine de l'énergie et en particulier celui des énergies renouvelables marines.

Il appartient maintenant à chacun de s'emparer de ces réflexions et de les faire vivre. L'Ifremer, pour sa part, va en tirer des conséquences concrètes dans le cadre de son plan stratégique.

*Jean-Yves Perrot*  
Président-directeur général de l'Ifremer



# Remerciements

Michel Paillard, Denis Lacroix et Véronique Lamblin remercient tous les membres du comité de pilotage qui ont accepté de participer, dès l'origine, à ce travail collectif mené sur une année. Leur soutien et leurs avis ont beaucoup contribué à la réalisation de ce document.

Les coordinateurs de l'étude remercient aussi tout particulièrement les membres du groupe de travail qui ont assuré la charge de l'analyse depuis la définition des variables jusqu'à la synthèse finale. Ils méritent tous d'être cités ici : Cyrille Abonnel (EDF), Marc Bœuf (DCNS), Jérôme Clazure, Marie-Cécile Degryse, Sophie-Dorothee Duron, Cyril Pouvesle (Meeddat), Antoine-Tristan Mocilnikar (DIDD puis UPM), Jacques Ruer (Saipem), Nils Siebert (Ademe), Nicolas Tcherniguin (Technip), Stéphane Thomas (Veolia) et, pour l'Ifremer, Jean-Paul Cadoret, Bertrand Chapron, Jean-Luc Devenon, Luc Drevès, Régis Kalaydjian, Jean Marvaldi et Patrick Vincent.

Ils remercient aussi Olivier Barbaroux et Gérard Véron pour leur contribution à l'iconographie, ainsi que tous les auteurs de fiches variables qui ont pris soin de les illustrer.

De vifs remerciements également à Janet Heard-Carnot et Valérie Howe pour la traduction et l'édition de la version anglaise de l'ouvrage. L'équipe de la Communication du siège de l'Ifremer doit aussi être remerciée pour son soutien dans la phase finale de valorisation des travaux, notamment Pascale Pessey-Martineau et Mathieu Jahnich. Merci enfin, à Nelly Courtay pour son aide efficace, sa ténacité et sa patience dans la réalisation de ce livre.





# ■ ■ Préambule

---

En mars 2007, le président de l'Ifremer a lancé un travail de réflexion prospective sur les énergies renouvelables marines à l'horizon 2030 avec une vingtaine de partenaires français représentant les principaux acteurs du secteur : ministères, industriels, instituts de recherche et agences spécialisées. Le caractère pluridisciplinaire de ce groupe de réflexion est largement justifié pour un dossier qui relève à la fois de la diversification énergétique, de l'engagement européen dans la lutte contre l'effet de serre, des impacts environnementaux des aménagements en mer, ainsi que de la valorisation des zones côtières, siège d'une diversité d'usages en interaction et en concurrence. L'objectif du travail est de contribuer à une synthèse de ces différents aspects : il s'agit d'identifier les enjeux, les conditions d'émergence et les technologies majeures à moyen terme afin de redéfinir un positionnement de l'Ifremer dans ce domaine, au-delà de l'expertise, et d'identifier les partenariats et les programmes stratégiques adaptés dans le champ de compétence de l'Institut. La question des énergies renouvelables marines s'intègre à celle des énergies renouvelables qui est centrale, notamment dans les pays occidentaux, sous contrainte de besoins énergétiques et de coût des hydrocarbures mais aussi de réchauffement climatique. Compte tenu de l'effort nécessaire sur les énergies renouvelables, les marges de manœuvre relatives au développement des énergies renouvelables marines doivent être identifiées en fonction de leurs coûts estimés, des contraintes technologiques et d'aménagement à terre comme en mer, ou encore des impacts environnementaux potentiels. Ce travail a permis de rassembler et de synthétiser un grand nombre de données et d'études. Il a réduit le champ des incertitudes et offre une capacité d'évaluation objective pour de multiples opportunités de partenariats. Mobilisant une quinzaine d'experts sur une période d'un an, ce travail a bénéficié d'un appui du bureau d'études Futuribles pour la mise en œuvre de la méthode dite des « scénarios »<sup>1</sup>. Les trente « variables » étudiées ont conduit à la sélection de quatre « scénarios » contrastés dont les « déterminants » principaux sont les suivants : marché dans un contexte de crise, politique énergétique mondiale et durabilité, intérêt national et sécurité énergétique, développement local avec prise de risques.

Toutes les technologies étudiées présentent un intérêt de développement, avec des atouts très différents selon :

- **le contexte énergétique et socio-économique** qui conduit soit à développer dans l'urgence seulement les technologies les plus matures comme l'éolien, soit à rechercher des synergies entre les technologies, comme l'énergie thermique des mers et la biomasse ;

---

1 Un glossaire relatif à cette méthode des scénarios apparaît en annexe 4.



■ Photo 1 : le Pelamis, système de récupération de l'énergie des vagues, en test par mauvais temps à l'EMEC (European Marine Energy Center) en Écosse (© Pelamis Wave Power Ltd, UK).

- la **possibilité de fabriquer de l'hydrogène** pour stocker l'énergie intermittente et d'éloigner les systèmes de production de la côte (accès à des ressources supplémentaires) : intérêt pour l'éolien flottant et les vagues par exemple ;
- le **périmètre géographique** : l'énergie thermique des mers présente un potentiel important dans les îles tropicales des départements et collectivités de l'outre-mer français ;
- la **spécificité du besoin énergétique** : la biomasse marine est la seule des sept ressources qui permette de produire directement un carburant liquide « renouvelable » pouvant se substituer au pétrole pour le transport.

Ces technologies présentent aussi des caractéristiques différentes du point de vue de leur insertion dans les zones côtières, selon la taille des aménagements et les propriétés physico-chimiques du milieu marin qu'elles exploitent.

Disposant du second potentiel d'Europe pour l'hydrolien et l'éolien marin, d'une excellente ressource houlomotrice et de grandes étendues marines tropicales, la France peut jouer un rôle important en recherche comme en développement surtout si les risques liés aux choix de technologies sont partagés entre tous les acteurs, dont l'État. Ce dernier dispose en effet de nombreux leviers pour fédérer les compétences et cofinancer les prises de risques. Enfin, plus la concertation sera menée en amont des réalisations, plus l'acceptabilité sociale sera élevée.

Dans ces conditions, les énergies renouvelables marines peuvent contribuer à tenir les objectifs de l'Union européenne en 2020 en matière d'énergie renouve-

lable, tout en développant des technologies exportables. Un scénario « normatif » intégrant des hypothèses concrètes et équilibrées de réalisations fait ainsi apparaître un apport net possible des énergies marines de 1,5 million de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) par an (17,2 TWh/an) pour l'horizon 2020, ce qui représente 7,7 % des 20 Mtep d'augmentation de la production d'énergie renouvelable, ce dernier objectif étant celui envisagé dans le cadre du Grenelle de l'environnement. Dans ce scénario, ces 7,7 % se décomposeraient en 5,2 % pour l'éolien marin et 2,5 % pour les autres énergies marines.

Un tel scénario indique bien les efforts en termes de soutien aux filières qu'il conviendrait de mettre en place pour atteindre cet objectif. Cela passe par la mise en œuvre des conditions favorisant à la fois le renforcement des compétences françaises dans le domaine, un meilleur soutien aux technologies en développement en France et la mise en place de premiers démonstrateurs en mer. En effet, malgré un développement soutenu de ces filières dans quelques autres pays d'Europe et dans le monde, aucun dispositif, hormis en éolien marin, n'a encore été qualifié au niveau industriel. Il est donc encore temps, pour la France, de prendre une place dans ce marché en devenir tout juste émergent. Ainsi, à l'horizon 2020, en tenant compte des résultats des premiers démonstrateurs en mer qualifiés en France et en Europe, on pourrait assister à un développement industriel de parcs permettant d'atteindre un objectif du type 7,7 % des 20 Mtep d'augmentation de la production d'énergie renouvelable.



# ■ ■ Sommaire

---

Préface	
Remerciements	
Préambule	

## ■ ■ Partie 1 – Synthèse des travaux

Cadrage de l'étude	17
Méthodologie	21
Rappel sur les énergies marines : ressources et technologies	23
Quatre scénarios possibles contrastés	27
Conditions d'émergence considérées dans les scénarios possibles	31
Conséquences des scénarios possibles sur le développement des technologies	37
Intégration environnementale : quels impacts et quels risques ?	43
Intégration des énergies renouvelables marines à l'offre énergétique française	45
Proposition d'un scénario normatif dans le contexte du Grenelle de l'environnement	49
Conclusion	59

## ■ ■ Partie 2 – Construction des scénarios

Contexte	63
Structure et méthode de l'étude	65
Construction des micro-scénarios par composante	71
Construction des macro-scénarios	83
Description des macro-scénarios	87
Scénario 1 : crise, urgence énergétique	87
Scénario 2 : coopération vertueuse par nécessité	93
Scénario 3 : peu d'évolution, chacun pour soi	101
Scénario 4 : développement local autonome	106

## ■ ■ Partie 3 – Dossier technique

### Composantes et fiches variables

V1 : Géo-économie mondiale	115
V2 : Gouvernance climatique mondiale	124
V3 : Demande énergétique dont l'Europe par région	130

V4 : Demande en eau douce par région . . . . .	138
V5 : Sécurité et prix des énergies fossiles . . . . .	145
V6 : Stratégie politique & indépendance énergétique : objectifs . . . . .	160
V7 : Spécificité des îles (dont RUP et DOM-COM) . . . . .	171
V8 : Respect-contrôle, outils afférents en France . . . . .	175
V9 : Outils de régulation pour les biocarburants . . . . .	179
V10 : Budget de recherche énergie et arbitrage par source d'énergie . . . . .	182
V11 : Structuration et gestion du réseau électrique . . . . .	187
V12 : Technologies de stockage et de transport énergétiques . . . . .	192
V13 : Évolutions des moyens de production centralisés . . . . .	202
V14 : Répartition démographique : Monde dont littoral européen . . . . .	210
V15 : Planification régionale des zones marines . . . . .	215
V16 : Acceptabilité sociale . . . . .	220
V17 : Évolutions des usages en mer et conflits . . . . .	232
V18 : Adaptation de la réglementation . . . . .	240
V19 : Impacts sur l'environnement . . . . .	246
V20 : Hydrolien (courants) . . . . .	252
V21 : Marémoteur . . . . .	258
V22 : Houlomoteur (vagues) . . . . .	266
V23 : Biomasse . . . . .	274
V24 : Éolien marin . . . . .	280
V25 : Énergie thermique des mers (ETM) . . . . .	288
V26 : Pression osmotique . . . . .	297
V27 : Solutions technologiques hybrides . . . . .	302
V28 : Potentiel de nouveaux gisements . . . . .	304
V29 : Connaissance du milieu marin et des impacts . . . . .	307
V30 : Jeu des acteurs publics et privés . . . . .	311

## ■ Annexes

1. Liste des membres du comité de pilotage . . . . .	323
2. Liste des membres du groupe de travail . . . . .	325
3. Glossaire des acronymes . . . . .	326
4. Glossaire relatif à la méthode des scénarios . . . . .	328
5. Liste des 30 variables regroupées par composante et auteur(s) correspondant(s) . . . . .	329
6. Évaluation chiffrée des scénarios possibles et du scénario normatif . . . . .	330

PARTIE 1

# Synthèse des travaux



Photo 2 : parc éolien offshore  
de Nysted, Danemark  
(© Ifremer, G. Véron).

# ■ ■ Cadrage de l'étude

---

Les énergies renouvelables marines (EnRM) sont citées comme une des composantes du bouquet énergétique européen dans les objectifs de l'Union européenne à l'horizon 2020 (20 % de l'énergie consommée devront être produits à partir d'énergies renouvelables). De même, nombre de conférences internationales sur l'avenir de l'environnement y font référence. Ce sujet important manquant de visibilité en France, le président de l'Ifremer a proposé en mars 2007 aux principaux acteurs de la recherche et du développement en matière d'énergies renouvelables marines ainsi qu'aux ministères concernés, de participer à une étude prospective collective sur ce sujet.

On observe quatre justifications majeures d'une réflexion sur le sujet des énergies marines :

- la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- les risques à court et moyen termes sur l'approvisionnement en hydrocarbures ;
- la nécessité de s'intéresser à toutes les pistes de production énergétique renouvelable ;
- l'utilité de s'interroger sur les impacts de ces nouveaux équipements sur les zones côtières et leurs usages (les impacts environnementaux et l'acceptabilité étant des aspects essentiels).

Il faut en outre rappeler que la France a été pionnière en la matière avec la première usine marémotrice du monde (la Rance), dès les années 60, et surtout qu'il existe des réalisations et une demande croissante dans le domaine des énergies renouvelables marines, y compris dans l'outre-mer lointain : climatisation d'un hôtel à Bora-Bora, projet identique pour l'hôpital de Tahiti, sécurité et coûts de l'énergie dans les grandes îles tropicales françaises...

Ainsi, le cadrage initial du travail était proposé sous la forme de trois questions majeures :

- quelles sont les technologies au service de la production d'énergies renouvelables d'origine marine ?
- quelles sont les conditions socio-économiques pour assurer leur émergence et leur compétitivité ?
- quels sont les impacts respectifs de ces technologies sur les énergies et l'environnement ?

Les grandes caractéristiques de l'étude sont les suivantes :

- *horizon temporel* : 2030.
- *champ d'étude* : la France, dans un contexte mondial et notamment européen.
- *technologies* : toutes les technologies liées à la mer, hors énergies fossiles.

- *méthode* : méthode des scénarios (avec l'appui du bureau d'études Futuribles).
- *délai* : 10 mois.

Les ressources potentielles des énergies renouvelables marines entrent dans cinq catégories :

- *le vent en milieu marin* pour la production électrique avec des éoliennes en mer (le transport maritime ou le routage n'entrent pas dans le champ de l'étude) ;
- *les mouvements de l'eau* par la récupération de l'énergie des courants, des vagues et des marées ;
- *la température de l'eau* que ce soit l'énergie récupérable par les gradients de température entre la surface et la profondeur marine ou l'utilisation directe d'eau froide pompée en profondeur pour la production de froid ;
- *la biomasse marine* à des fins énergétiques, surtout les végétaux marins (micro-algues) ;
- *la pression osmotique* issue du mélange de deux eaux de concentrations salines différentes (eau douce/eau de mer).

Les combustibles (outre l'uranium présent dans l'eau de mer) qui pourraient être extraits de la mer, comme les hydrates de méthane, sont hors du champ car considérés comme des ressources non renouvelables *stricto sensu*, d'autant plus



■ Photo 3 : installation de l'hydrolienne Seagen sur le site de Strangford Narrows, Irlande du Nord, par la barge-grue Rambiz. (© Marine Current Turbines, Uk).