

Les énergies renouvelables marines

Synthèse d'une étude
prospective à l'horizon 2030



AUTRE PUBLICATION IFREMER À DÉCOUVRIR

Synthèse des données économiques maritimes françaises 2007



Lancée il y a dix ans, la publication biennale des Données économiques maritimes françaises (DEMF) analyse les activités maritimes en France dans leur diversité. Elle en évalue le poids économique à partir d'un jeu d'indicateurs mis à jour régulièrement. Cette synthèse des DEMF 2007 dégage les principaux aspects des activités liées à la mer en France

sous la forme de « fiches » sectorielles fournissant les données de production, d'emploi et d'effort budgétaire des années récentes.

Le secteur marchand comprend l'exploitation des ressources marines, le manufacturier, les services. Le secteur public comprend la Marine, l'intervention publique, l'éducation, la protection de l'environnement littoral, la recherche marine..

La synthèse de cette étude, publiée en juillet 2008, est disponible sur le site www.ifremer.fr à la rubrique « Éditions ».



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, thermie...) 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 développement.

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



Les énergies renouvelables marines

Synthèse d'une étude
prospective à l'horizon 2030

*Synthèse des travaux menés de mars 2007 à février 2008
par un groupe d'experts de douze structures (industriels,
ministères, instituts, agences, organismes de recherche).
Ces travaux, coordonnés par Ifremer, ont été réalisés
avec l'appui du bureau d'études Futuribles.*



Sommaire

1. Cadrage de l'étude	6
2. Méthodologie	8
3. Rappel sur les énergies marines : ressources et technologies	9
4. Quatre scénarios possibles contrastés	10
5. Conditions d'émergence considérées dans les scénarios possibles	11
6. Conséquences des scénarios possibles sur le développement des technologies	14
7. Intégration environnementale : quels impacts et quels risques ?	18
8. Intégration des énergies renouvelables marines à l'offre énergétique française à l'horizon 2030 selon les scénarios possibles	18
9. Proposition d'un scénario normatif dans le contexte du Grenelle de l'Environnement	20
10. Conclusion	25
Notes	26
Références bibliographiques	26

Annexes

1. Liste des membres du comité de pilotage	27
2. Liste des membres du groupe de travail	29
3. Glossaire relatif à la méthode des scénarios	29
4. Liste des 30 variables regroupées par composantes et auteurs correspondants	30
5. Hypothèses sur les niveaux de développement par type d'énergie	31
6. Les quatre scénarios majeurs	32
7. Évaluation chiffrée des scénarios possibles et normatif	34

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 interactions 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 douzaine 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 »⁽¹⁾. 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 ;
- ▶ **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 renouvelable 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 (17,2TWh/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.



I // 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 devra être produite 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 lisibilité 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...

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

- 1 - Quelles sont les technologies au service de la production d'énergies renouvelables d'origine marine ?
- 2 - Quelles sont les conditions socio-économiques pour assurer leur émergence et leur compétitivité ?
- 3 - 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 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 considérées comme des ressources non renouvelables stricto sensu, d'autant plus que leurs utilisations émettent des gaz à effet de serre. L'étude prend en considération l'intérêt du dessalement de l'eau de mer couplé à la production d'énergie.

Enfin, l'approche est de type « Ressources potentielles - Besoins » en incluant les sciences sociales.

L'analyse des facteurs de développement ou des conditions de développement des énergies renouvelables marines à l'avenir nécessite de se faire une idée de leurs usages potentiels.

Source marine	Usages		
	Électricité	Chaleur ou froid	Carburants
Vent	■		
Mouvements	■		
Température	■	■	
Biomasse	■	■	■ Liquides
Pression osmotique	■		

Tableau 1 : Sources renouvelables d'énergie marine et usages potentiels

- Nota 1 : L'électricité peut produire du froid ou de la chaleur qui peuvent être utilisés pour des usages industriels ou des productions manufacturées comme l'eau (dessalement).
- Nota 2 : Il faut noter la contrainte suivante : les produits (électricité/froid/chaleur) de la plupart de ces sources d'énergies ne sont pas transportables loin sauf les produits de la biomasse et les produits manufacturés (biofuels, eau...).



2 // MÉTHODOLOGIE

C'est la méthode des scénarios, complexe mais puissante, qui a été utilisée par le groupe de travail avec l'appui continu du bureau d'études Futuribles. Un comité de pilotage, qui rassemblait tous les représentants des organismes impliqués dans l'étude, avait pour fonction de suivre les travaux et d'en affiner les objectifs à mesure de leur avancement.

Futuribles a encadré l'emploi de la méthode des scénarios en suivant les étapes suivantes :

- 0 - Définir le sujet et l'horizon temporel (cf. supra).
- 1 - Identifier les variables clefs et leurs relations (composantes).
- 2 - Explorer les évolutions possibles des variables clefs (jeux d'hypothèses).
- 3 - Construire les micro-scénarios exploratoires au sein des composantes.
- 4 - Construire les macro-scénarios (scénarios) en combinant les micro-scénarios.
- 5 - Identifier les enjeux selon les scénarios et explorer les conséquences en termes de développement et de moyens de recherche pour les technologies.

1. La phase de la sélection et de l'analyse des variables clefs est celle de la construction des « briques » du système. Elle se décompose en deux étapes :

1.1. L'identification des variables : dans le système des EnRM, trente variables ont été identifiées, réparties en cinq « composantes » dont celle des technologies (sept technologies distinctes plus les systèmes hybrides). La liste détaillée des variables clefs regroupées par composante est donnée en annexe 4.

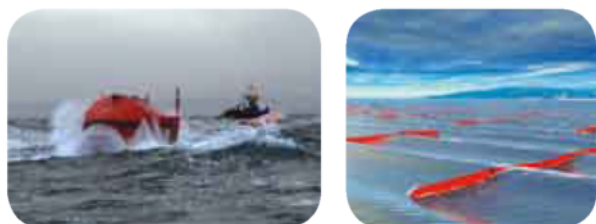
1.2. L'analyse documentée de chaque variable clef suivant un schéma standard : définition de la variable, indicateurs pertinents, rétrospective (sur les trente dernières années), prospective (à 2030) et sélection d'un jeu d'hypothèses, entre deux et quatre, d'évolution de cette variable (cf. annexe 5 qui présente les hypothèses définies pour les variables sur les technologies).

2. La phase d'élaboration des micro-scénarios consiste à combiner au sein de chaque composante ou thématique (par exemple le contexte mondial, la régulation énergétique européenne et française, les zones d'exploitation...), les jeux d'hypothèses sur les variables. On aboutit ainsi à trois ou quatre micro-scénarios par composante en utilisant tout ou partie des hypothèses par variable.

3. La phase d'élaboration des macro-scénarios consiste à combiner à leur tour les micro-scénarios afin de faire émerger des scénarios globaux contrastés permettant de déduire le moteur de développement des technologies dans chaque scénario. Ainsi un bouquet d'énergies renouvelables marines a pu être associé à chaque scénario ou histoire d'avenir possible en utilisant les atouts et contraintes des différentes technologies (cf. leur présentation au chapitre 4 et en annexe 6).

4. La phase d'identification des enjeux et des leviers dans les scénarios analyse d'abord les déterminants majeurs qui les sous-tendent (le marché, la gouvernance mondiale pour le climat, la sécurité énergétique et le développement local), ce qui permet de faire un choix des technologies à associer en fonction de leurs atouts, contraintes et de leur potentiel de développement. Chaque scénario a des conséquences que l'on peut estimer en termes de puissance potentielle installée ou encore de contraintes spécifiques (l'espace en mer par exemple). Enfin sont identifiés, pour chaque sous-système, les leviers éventuels de passage d'un scénario à un autre, comme une crise sur le prix du pétrole ou l'évolution du climat.

5. La dernière phase, celle des conséquences des conclusions des phases précédentes, conduit à s'interroger sur les possibilités d'accroître les capacités de recherche et développement sur telle ou telle technologie, ce qui conduira à sélectionner les partenariats stratégiques et les financements à mettre en place ou à renforcer (dernier point en dehors du champ de cette étude).



3 // RAPPEL SUR LES ÉNERGIES MARINES : RESSOURCES ET TECHNOLOGIES

Il est d'abord nécessaire de donner quelques ordres de grandeur des ressources naturelles de chacune des énergies marines, puis des ressources techniquement exploitables – valeurs moindres que celles des ressources naturelles – qui tiennent compte, pour la plupart, des contraintes technologiques, industrielles, administratives, environnementales... Bien sûr, le développement de ces technologies ne se fera qu'en concertation étroite avec les autres usagers de la mer et du littoral. Le potentiel « socio-économiquement » exploitable, en raison du nécessaire partage de l'espace, sera inférieur au potentiel techniquement exploitable.

L'énergie éolienne en mer

Il s'agit d'exploiter l'énergie du vent soufflant sur les étendues marines par des éoliennes qui produisent de l'électricité exportée à terre par des câbles sous-marins. Selon une étude de l'Agence Internationale de l'Énergie, conduite en 2000, le potentiel européen techniquement exploitable serait de l'ordre de 313 TWh/an en considérant les sites à moins de 20 km des côtes et de moins de 20 m de profondeur. Il est envisagé pour le futur d'utiliser des éoliennes flottantes qui seraient ancrées sur le fond et pour lesquelles la limitation de profondeur serait moins contraignante. Elles donneraient accès à une ressource beaucoup plus importante en permettant de s'éloigner des côtes.

L'énergie thermique des mers (ETM)

L'idée consiste à utiliser une différence de température d'au moins 20 °C entre l'eau en profondeur (6 °C en seuil haut) et la surface (26 °C en seuil bas) pour produire de l'électricité, mais également de l'eau douce, du froid pour la climatisation et des produits dérivés pour l'aquaculture suivant le type de processus (cycle ouvert ou cycle fermé). La ressource mondiale théorique basée sur un gradient de température de 20 °C au moins permettrait de produire environ 80 000 TWh/an dans les zones intertropicales. Cette ressource théorique n'est actuellement exploitable que très partiellement et ponctuellement, en raison de l'absence de zones de consommation électrique, notamment dans la zone intertropicale Pacifique. Un stockage via l'hydrogène est envisageable à terme. Un autre usage thermique, en zones tempérées, consiste à utiliser l'eau proche de la surface comme source de chaleur pour des installations de chauffage/climatisation par pompe à chaleur.

L'énergie des courants (hydrolienne)

Énergie prédictible et fluctuante, l'énergie cinétique des courants de marée pourrait être de la « semi-base ». Tandis que le potentiel techniquement exploitable mondial est estimé à 450 TWh/an, celui de l'Europe serait compris entre 15 et 35 TWh/an, pour quelques 10 GW. Le potentiel techniquement exploitable français serait compris entre 5 et 14 TWh/an selon EDF, soit entre 2,5 et 3,5 GW⁽²⁾. Les sites potentiels sont spécifiques (détroits, caps, goulets... où l'on observe une augmentation des vitesses) et bien identifiés (en France : Raz Blanchard, Fromveur, Raz de Sein, Héaux de Bréhat, Raz de Barfleur... et en Outre Mer : effets de pointe, passes...). Les grands courants marins (Gulf Stream, Kuroshio...) sont également une source potentielle d'énergie marine importante.

L'énergie marémotrice

Le Conseil Mondial de l'Énergie, estime le potentiel mondial pour des sites « classiques à un seul réservoir »⁽³⁾ à 380 TWh/an pour 160 GW. Après les 240 MW de la Rance inaugurés en 1966, l'énergie marémotrice vit un renouveau hors de France. En Corée du Sud avec la construction de la centrale de Sihwa (260 MW) et l'étude du projet Garolim (500 MW), au Royaume-Uni avec la relance des études sur la Severn (8,6 GW), intégrant les concepts novateurs de lagons artificiels ou les centrales à multiples bassins.

L'énergie des vagues (houlomoteur)

Toujours selon le Conseil Mondial de l'Énergie, environ 10 % de la demande annuelle mondiale en électricité⁽⁴⁾ pourrait être couverte par la production houlomotrice, soit un potentiel techniquement exploitable de 1 400 TWh/an. En France métropolitaine, le potentiel techniquement exploitable peut être estimé à 10 % au moins de la ressource théorique (400 TWh/an) soit 40 TWh/an que pourraient produire quelques 10 à 15 GW situés principalement sur la façade atlantique. Dans les DOM-POM, un fort potentiel est identifié à la Réunion, en Polynésie et Nouvelle-Calédonie ainsi que localement en Martinique et Guadeloupe.

La biomasse marine

On estime entre 200 000 et un million le nombre d'espèces d'algues existant dans le monde. Cette diversité biologique, répondant à une exceptionnelle adaptabilité, laisse préjuger d'une richesse proportionnelle en molécules originales et en lipides (algo-carburants). Comparativement aux espèces oléagineuses terrestres, les microalgues présentent de nombreuses caractéristiques favorables à une production d'acides gras qui pourraient notamment être mises à profit pour produire des algo-carburants. Les principaux atouts sont un rendement environ 10 fois supérieur en biomasse et l'absence de conflit avec l'eau douce et les terres agricoles. La production pourrait représenter 20 000 à 60 000 litres d'huile par hectare par an contre 6 000 litres

pour l'huile de palme, un des meilleurs rendements terrestres. Il reste à identifier les surfaces mobilisables et travailler sur une diminution des coûts.

L'énergie des gradients de salinité (pression osmotique)

Lorsqu'un fleuve se jette dans la mer, une grande quantité d'énergie est potentiellement libérée en raison de la différence de concentration en sel. Deux méthodes de récupération de cette énergie sont testées : la première est basée sur l'osmose (en Norvège), la seconde sur l'électrodialyse inversée (aux Pays-Bas). En Norvège, le potentiel de cette technologie est estimé à 10 % des besoins annuels en énergie.

4 // QUATRE SCÉNARIOS POSSIBLES CONTRASTÉS

Quelles sont les conditions d'émergence et de compétitivité ? Cette question est l'objectif premier de l'élaboration des scénarios. Le groupe de travail a élaboré quatre scénarios volontairement contrastés, dont l'annexe 6 présente les caractéristiques et les projections de mise en œuvre potentielle pour les différentes technologies. Les désignations des quatre scénarios, sont les suivantes :

Scénario 1 - Crise, urgence énergétique.

Scénario 2 - Coopération vertueuse par nécessité.

Scénario 3 - Peu d'évolution, chacun pour soi.

Scénario 4 - Développement local autonome.

Dans chaque scénario sont présentées les technologies les mieux adaptées et les plus susceptibles de développement.

Scénario 1 - Crise, urgence énergétique

Le déterminant de ce scénario est le marché dans un contexte de crise énergétique et de compétition économique. L'enjeu majeur est celui de la maîtrise des technologies les plus compétitives et les mieux adaptées via des partenariats stratégiques forts. Comme le soutien politique est faible, les investissements sont le fait de consortiums d'opérateurs privés privilégiant le développement à partir de « démonstrateurs » de taille croissante. Les conflits récurrents dans l'accès à l'espace conduisent à la mise en place de parcs dédiés éventuellement multi-usages. La recherche s'oriente vers l'amélioration technologique, clef de la compétitivité, et la meilleure compréhension des impacts.

Ce contexte favorise les technologies éprouvées : l'éolien, le marémoteur et le thermique. En raison de son intérêt stratégique, la biomasse est rapidement développée en extensif. Les systèmes hybrides sont explorés notamment pour optimiser les investissements. Les systèmes appliqués aux vagues et aux courants sont peu ou pas étudiés, faute de rentabilité à court terme.

Scénario 2 - Coopération vertueuse par nécessité

Ici, le déterminant est la volonté politique de durabilité à l'échelle internationale dans un contexte d'extension régulière des accords de Kyoto. La conséquence majeure est celle du soutien à la recherche et aux technologies les moins matures afin de faciliter l'investissement privé et de diversifier les technologies. Ces efforts conduisent à accroître la prise de risque dans de nouvelles technologies et notamment leur hybridation, ce qui conduit aussi à maîtriser le stockage de l'énergie, ouvrant ainsi la voie à des systèmes au large à grande échelle. La recherche travaille à de nouveaux concepts en visant à minimiser les impacts environnementaux.

Cette dynamique à l'échelle mondiale fait émerger de multiples technologies : hydroliennes de grande profondeur, lagons artificiels, systèmes houlomoteurs au large (profondeur > 50 m), éoliennes flottantes, énergie thermique en association avec l'aquaculture, biomasse à grande échelle (fabrication intensive à terre, OGM et multi-produits), osmotique (mise au point de membranes économiques avec quelques micro-centrales). Ce foisonnement des technologies favorise les usages hybrides notamment dans les DOM-POM^[5].

Scénario 3 - Peu d'évolution, chacun pour soi

Dans ce scénario, le déterminant est l'intérêt national et la sécurité énergétique dans un contexte de faible coopération mondiale. L'enjeu majeur est celui de la maîtrise des sources d'énergie au plan national alors que montent les tensions et le protectionnisme. Après le Sud, la dégradation du climat fait apparaître des besoins en eau douce au Nord. Le soutien public est donc orienté vers la sécurité énergétique mais à faible coût ce qui a pour conséquence l'absence de renforcement des réseaux pour viser une prise en compte de moyens de production décentralisés et la fin des tarifs de rachat électrique après 2020. Il apparaît des parcs énergétiques dédiés et on observe un développement indépendant des technologies ce qui entraîne une recherche spécialisée par technologie intégrant les impacts sur l'environnement.

Cette situation n'entraîne que de faibles développements pour presque toutes les technologies car les investisseurs publics et privés privilégient la sécurité sans prise de risque technologique. Le développement indépendant des technologies freine la recherche des synergies dans les financements comme dans le partage des connaissances dans les études d'impacts.

Scénario 4 - Développement local autonome

Dans ce cas, le déterminant est le développement local avec prise de risque dans un contexte

de montée des tensions et du protectionnisme, ainsi que le besoin de sécurité énergétique. Les besoins en eau douce au Nord, en plus de ceux du Sud, justifient à la fois ces technologies et l'initiative décentralisée. Les biocarburants en intensif (photoréacteurs) deviennent rentables (arrêt de la défiscalisation vers 2015) et le soutien public (via les régions) vise à stimuler autant la maîtrise des technologies que la compétitivité.

Cette dynamique entraîne le renforcement des réseaux électriques pour prendre en compte les moyens de production décentralisés et un développement différencié des technologies selon les régions et leurs atouts spécifiques. La recherche contribue à la mise au point des technologies (opportunités locales) et accompagne le lancement de démonstrateurs locaux. Cette évolution, et la prise de risques afférente, implique un fort investissement des décideurs politiques afin de faciliter l'acceptabilité sociale des expérimentations.

La conséquence sur les technologies est l'apparition d'un marché de niches avec un effet d'échelle uniquement au niveau mondial. L'éolien, le thermique et la biomasse atteignent des niveaux de développement industriels, tandis que les autres technologies se développent localement à petite échelle. La recherche reste parcellaire, très focalisée sur les contraintes locales avec un rôle premier pour les universités du littoral soutenues par les régions.

**5 // CONDITIONS D'ÉMERGENCE
CONSIDÉRÉES DANS LES SCÉNARIOS
POSSIBLES**

L'exercice de prospective n'a pas l'ambition de décrire ce que sera demain, mais de proposer un éventail de futurs possibles en choisissant les plus contrastés. Les scénarios sont donc des sortes de « caricatures » de ce qu'il peut advenir.

À l'étape de construction des micro-scénarios, le groupe de travail a repéré les facteurs (appelés « leviers ») qui permettent aux différents sous-systèmes d'évoluer d'une configuration à une autre. Ainsi, à l'étape des macro-scénarios peuvent être déduits de cet exercice les facteurs qui favorisent ou au contraire freinent le développement des énergies renouvelables marines ou leurs conditions de développement.

Les éléments du contexte mondial, européen et national

Dans les éléments de contexte mondial, un accord sur le climat (type Kyoto II), avec des engagements

de réduction des gaz à effet de serre pour diviser par deux les émissions mondiales à l'horizon 2050, accélérerait très probablement le développement des énergies renouvelables dont les énergies marines. Le cas le plus favorable serait qu'un tel accord voie le jour rapidement, vers 2010, pour laisser du temps au soutien politique et financier et au développement technique et industriel des technologies marines grâce à la recherche.

En l'absence d'un tel accord mondial, l'accroissement des tensions dans le domaine de l'énergie (prix, risques de rupture dans l'approvisionnement) ou la perception aiguë des risques climatiques sont aussi des facteurs qui pourraient contribuer à davantage de coopérations technologiques entre régions du monde pour développer de nouvelles sources d'énergie.

En termes de [politique européenne et de politique nationale sur l'énergie](#), les conditions favorables au développement des énergies renouvelables marines relèvent à la fois du soutien aux filières énergétiques et de la coopération des acteurs tant institutionnels qu'opérateurs de la production énergétique.

Plus la politique de soutien aux énergies renouvelables sera diversifiée entre les technologies matures et celles qui le sont moins, plus se développera une variété⁽⁶⁾ importante de technologies marines, voire de technologies hybrides. Sans ce soutien diversifié, le risque serait de rechercher d'emblée une standardisation des solutions technologiques d'énergies renouvelables dans une logique d'effets d'échelle. Dans cette dernière hypothèse, il serait alors difficile d'élaborer des solutions adaptées à la diversité des spécificités locales et des ressources.

La coopération européenne apparaît comme un puissant levier de développement de ces technologies, tant en termes d'outils de planification des zones marines et d'identification des ressources disponibles à l'échelle européenne qu'en termes de partage de connaissances sur les impacts des premières expérimentations de technologies marines. En effet, cette coopération permettrait :

- ▶ aux opérateurs de construire une stratégie de développement industriel à l'échelle européenne, éventuellement en partenariat, tout en assurant un progrès continu sur la technologie ou sur la façon de l'implanter,
- ▶ de fournir des outils pour améliorer le dialogue avec les populations littorales auxquelles un projet d'implantation d'EnRM serait proposé :
 - la mise en perspective de l'exploitation d'une ressource locale au regard des ressources européennes et des retours d'expériences ailleurs, tant positifs que négatifs, en intégrant d'emblée les populations locales, faciliterait considérablement l'acceptabilité sociale,
 - l'implication des chercheurs dans la concertation avec la population serait susceptible d'être aussi un facteur de succès car ces experts ne sont pas juges et partis dans le projet industriel et peuvent apporter un regard extérieur.

À l'heure actuelle, les études d'impacts et le suivi environnemental demeurent coûteux et participent de manière importante à la prise de risque des développeurs de projets. Cet élément explique, entre autres, la faible émergence de projets innovants.

Des initiatives intéressantes

Il existe des expériences étrangères intéressantes en matière de capitalisation des impacts et/ou de cofinancement.

Le [Danemark](#) est pionnier dans le domaine du monitoring des impacts liés à ces aménage-

ments énergétiques en mer. En effet, les parcs de Horns Rev⁽⁷⁾ et de Nysted⁽⁸⁾ ont fait l'objet d'un programme intégré de suivi environnemental dont les résultats ont été communiqués lors de la conférence d'Helsingør⁽⁹⁾ (nov. 2006). Ces parcs ont également fait l'objet d'une étude d'impact dont un résumé non technique est disponible sur les sites internet des parcs.

Le programme de suivi a démarré en 1999, les études environnementales ont bénéficié d'un budget de 11 millions d'euros, financé par les consommateurs danois au titre d'une obligation de service public. Différents thèmes ont été explorés : aspects géophysiques et benthos, poissons, mammifères marins, oiseaux et effets socio-économiques. Ce programme de suivi a été coordonné par le Danish Environmental Group, qui regroupe des partenaires privés et publics et les résultats ont été évalués par un panel d'experts internationaux (IAPEME)⁽¹⁰⁾ et des discussions furent régulièrement menées avec des représentants d'associations.

Le [Royaume-Uni](#) a également mis en place une structure unique en Europe, dédiée à la recherche et à l'amélioration des connaissances sur les impacts de l'éolien offshore sur l'environnement : le COWRIE (Collaborative Offshore Wind Research into the Environment).

Créé en 2001 par le Crown Estate, lors de l'annonce du lancement du premier Round éolien⁽¹¹⁾, les fonds déposés par les 18 porteurs de projet ont servi à mettre en place le COWRIE et sont utilisés pour mener une série d'études environnementales (impacts négatifs et positifs). Un comité de pilotage réunissant différents experts du milieu marin et des personnalités qualifiées (Ministères, BWEA, RSPB, industriels du Round 1...) détermine quels types de recherches doivent être menés. Cet organisme mène des recherches en toute indépendance par rapport au Gouvernement et la présence des industriels a favorisé son bon fonctionnement. Le même système de droit d'entrée payé par les porteurs de projet lauréats fut appliqué lors du Round 2 en 2003.

L'un des objectifs importants du COWRIE est d'assurer une large diffusion des résultats obtenus. Les études menées ont permis d'améliorer la connaissance des impacts environnementaux potentiels et surtout de publier des documents guides (bonnes pratiques) à destination des industriels afin de s'assurer qu'ils minimisent ces impacts. Les cinq thèmes de recherche prioritaires sont : oiseaux et benthos, champs électromagnétiques, méthodologie d'études des oiseaux marins, techniques de télésurveillance, bruits sous-marins et vibration. Le ministère de l'environnement (DEFRA) et celui de l'industrie (BERR, ex-DTI) financent également des projets de recherche sur l'éolien offshore et l'environnement. Trois projets sont menés par exemple par le CEFAS (Center for Environment,

Fisheries and Aquaculture Science)⁽¹²⁾. Ils portent sur l'évaluation des modifications dans le régime des vagues, le développement de guides pour le suivi des transports sédimentaires et la recherche des impacts socio-économiques sur l'industrie de la pêche.

D'autres pays, comme l'Allemagne, développent des plates-formes technologiques, notamment dans l'éolien. Ces actions peuvent permettre de faciliter l'émergence des énergies renouvelables marines mais aussi de progresser positivement et dans un souci de capitalisation et de diffusion des connaissances sur leurs impacts en mer.

Ainsi, l'ADEME, en collaboration avec l'Ifremer, a réalisé en 2006/2007 une étude sur les stratégies nationales de développement et de gestion des impacts des énergies renouvelables marines en Europe. Un manuel préliminaire d'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en mer auquel l'Ifremer a contribué est également en cours d'élaboration par l'ADEME. Ce document vise à jeter les bases d'un futur guide d'études d'impact des parcs éoliens offshore, qui pourrait être étendu aux différentes énergies marines. Il est destiné aux porteurs de projets, à l'instar de celui publié pour les parcs éoliens terrestres.

Une nécessaire mutualisation des compétences et coopération

La coopération des acteurs industriels avec ceux de la recherche et d'autres activités marines, apparaît nécessaire pour optimiser la production énergétique si celle-ci doit se concentrer dans des espaces dédiés pour éviter des conflits avec d'autres usages de la mer.

En effet, la production au mètre carré occupé et le coût de maintenance peuvent être améliorés par la recherche de complémentarités sur la zone, ou à proximité, entre plusieurs technologies énergétiques ou entre une technologie de l'énergie et une autre activité comme l'aquaculture. La recherche de synergies entre activités peut permettre d'améliorer la compétitivité des technologies par une mutualisation des études comme des coûts (entretien, câbles pour ramener l'énergie à terre).

Or, les acteurs industriels, en raison de leur histoire propre, tendent à se spécialiser sur une technologie pour laquelle ils sont experts. La mutualisation de compétences et la coopération n'est pas une démarche naturelle. Les pouvoirs publics et les acteurs de la recherche en mer peuvent contribuer à faciliter le rapprochement et surtout la compréhension mutuelle de plusieurs parties prenantes sur un même projet.

Des évolutions technologiques indispensables

Enfin, un certain nombre d'évolutions technologiques faciliterait aussi le développement des énergies renouvelables marines.

L'évolution la plus importante au vu de la rupture qu'elle génère est le stockage de l'énergie, car il permet de profiter pleinement du potentiel d'énergies intermittentes et variables comme le vent ou les vagues. Stocker la production électrique plus permanente ou prévisible d'autres ressources, quand la demande électrique est faible, changerait aussi considérablement le potentiel exploitable de nombreuses ressources énergétiques (c'est-à-dire toutes les énergies renouvelables sauf la biomasse, qui se stocke, mais aussi le nucléaire).

Une voie possible est de stocker de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. L'hydrogène peut-être ensuite converti en électricité à l'aide de pile à combustible ou en énergie mécanique via un moteur. Le verrou sur ce vecteur énergétique est davantage dans la logistique (stockage, transport, source d'énergie pour sa production)⁽¹³⁾ que dans sa consommation (il reste cependant le problème de la gestion d'un gaz volatil difficile à liquéfier et très inflammable). Un second intérêt majeur de la production d'hydrogène par les énergies renouvelables marines est que les installations de production pourraient alors s'éloigner des côtes, ce qui augmenterait la ressource exploitable et limiterait les risques de conflits d'usages. Des sites d'exploitation éloignés, l'hydrogène produit en mer pourrait alors être transporté dans des navires spécialisés. D'autres solutions sont aussi à l'étude comme le stockage électrochimique à grande échelle.

Par ailleurs, le stockage électrique pour de courtes périodes (de quelques secondes à quelques heures en recourant à diverses techniques allant des supercondensateurs à l'hydro-pneumatique) améliorerait la qualité du courant et la gestion d'énergies intermittentes sur le réseau.

Un autre levier pour promouvoir le développement et la compétitivité de ces technologies est l'hybridation des technologies (illustrée dans le scénario 2) : tant la création de technologies mixtes exploitant par exemple l'énergie thermique des mers et l'énergie des vagues que la recherche de technologies couplées à l'énergie solaire ou à une activité comme l'aquaculture en mer. Mais le préalable à la mise au point de technologies hybrides sera souvent, pour deux expertises industrielles et de recherche différentes, la nécessité de coopérer.

Enfin, améliorer la fiabilité des technologies pour limiter les interventions d'entretien apparaît comme un enjeu fondamental de leur compétitivité à court et moyen terme, ceci d'autant plus, qu'outre le coût d'intervention, les conditions de mer peuvent empêcher temporairement d'intervenir. Cela concerne les systèmes mais aussi les ancrages car les dispositifs devront être conçus et réalisés pour supporter des conditions de mer extrêmes.

6// CONSÉQUENCES DES SCÉNARIOS POSSIBLES SUR LE DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES

Deux types d'analyse ont été menés sur les conséquences des quatre scénarios possibles sur le développement des technologies :

► **qualitative** sur le développement en fonction des conditions retenues par scénario,

► **quantitative** avec fourniture, pour chaque scénario, d'un ordre de grandeur chiffré de la capacité installée de chaque technologie et de ses produits (TWh électriques pour l'électricité, TWh thermiques et TWh électriques économisés pour la climatisation, volume d'eau douce).

Analyse qualitative

Méthode

Trois paramètres ont été pris en compte pour évaluer le potentiel de développement des différentes technologies :

- 1 - La ressource: pour la production éolienne et houlomotrice, elle est intermittente et variable, ce qui est aujourd'hui une difficulté pour la production d'électricité. Mais les progrès réalisés dans la prévision grâce aux modèles utilisant notamment des données satellitaires faciliteront la gestion de leurs apports aux réseaux.
- 2 - La possibilité d'utiliser la technologie en synergie avec un autre usage : l'énergie thermique des mers peut remonter des profondeurs des nutriments pour l'aquaculture, le lagon artificiel marémoteur peut aussi intégrer une activité aquacole, les houlomotrices peuvent, dans certaines configurations, agir en brise-lame vis-à-vis de la côte, les éoliennes peuvent être associées, à proximité, à des installations aquacoles (filieres conchylicoles) ou encore, lorsqu'elles seront amenées à se développer sur des aires marines protégées, contribuer aux mesures de gestion des zones Natura 2000 via la contractualisation. Il convient toutefois de préciser que les aires marines protégées regroupent différents types de zones qui ont des degrés de protection différents.
- 3 - La possibilité de faire cohabiter certaines de ces technologies dans des parcs dédiés (scénario 1) ou d'hybrider les technologies (scénario 2).

Filières

L'énergie éolienne en mer est celle qui contribue le plus à la production électrique quel que soit le scénario. La maturité de cette technologie en Europe et son potentiel de ressources, notamment dans l'hémisphère Nord, contribuent à expliquer cette place. C'est à l'évidence la technologie la plus proche de la rentabilité commerciale. Cette maturité permet aussi d'oser des chiffres de production importants, bien plus que sur d'autres technologies encore à l'état de prototype aujourd'hui. Le développement de cette technologie va être confronté aux enjeux liés aux impacts environnementaux et aux multiples usages de l'espace marin à proximité des côtes. De nouveaux concepts destinés à permettre de s'éloigner des côtes, comme des structures flottantes, sont d'ores et déjà étudiés.

L'énergie thermique des mers (ETM) a l'avantage de permettre tant la climatisation que la production d'eau et d'électricité ce qui lui donne un atout considérable en termes d'usages. Mais elle n'est exploitable pour tous ces usages que sous les tropiques. En zones tempérées, elle ne peut être utilisée que pour le chauffage/la climatisation comme source thermique d'une pompe à chaleur.

L'énergie des courants (hydrolien) a un potentiel moindre en Europe que d'autres technologies. Si les hydroliennes parviennent à être totalement sous-marines elles peuvent s'implanter dans des zones de passage maritime où il sera difficile



d'implanter d'autres énergies marines ou d'autres activités. Par ailleurs la technologie est relativement connue et peut, pour certains concepts, bénéficier de l'expérience acquise dans le développement d'hydroliennes fluviales. Le développement ne devrait requérir que du progrès technologique incrémental bien que les contraintes d'installation (ancrage) et maintenance nécessiteront le développement de solutions innovantes.

L'énergie marémotrice, captée en barrant un estuaire, est connue mais présente l'inconvénient d'affecter les écosystèmes humides. Pour pallier cet inconvénient, une autre solution envisagée à l'avenir serait de construire un lagon artificiel en mer. Mais comme pour le barrage, il s'agit d'infrastructures lourdes, qui ont également des impacts sur l'environnement et sur les activités en place et qui se justifient en terme d'investissement à partir d'une puissance minimum d'installation à dimension plus industrielle qu'expérimentale – de l'ordre de quelques centaines de MW.

L'énergie des vagues est une ressource bien répartie entre les deux hémisphères et dont le potentiel est élevé en comparaison de la plupart des ressources marines étudiées ici. La difficulté majeure de cette technologie est son caractère novateur : pour l'imposer, ses développeurs vont devoir confirmer leur capacité à réaliser une rupture technologique. Les systèmes qui auront démontré leur fiabilité mais aussi conçus pour la survie en mer lors des conditions extrêmes s'imposeront. Par ailleurs, bien que peu sensible au risque d'impact paysager, l'espace occupé en surface pour exploiter cette énergie devra tenir compte du risque de conflits d'usages avec d'autres activités. Toutefois la capacité d'installation au km² est supérieure à celle de l'éolien (30 MW/km² pour vagues et courants contre 6 à 10 MW/km² pour éolien marin).

L'utilisation de la biomasse marine issue de la culture de microalgues présente des atouts forts pour produire des biocarburants : croissance rapide, rendement et capacité de capture de CO₂ élevés (au moins 10 fois ceux des meilleures plantes terrestres), pas de conflit avec la production alimentaire. Cependant sa culture extensive dans des lagunes est limitée en Europe par l'espace

disponible et peut présenter un risque de prolifération. Les risques, évoqués récemment, de contribution des agrocarburants à l'augmentation de l'effet de serres, sont vraisemblablement applicables aux microalgues même si cette donnée scientifique n'a pas encore été documentée.

La culture intensive à terre dans des structures verticales transparentes et le progrès en matière de maîtrise des biotechnologies (OGM) permettent d'envisager des rendements à l'hectare très élevés. Ces investissements dans les biotechnologies sont aussi justifiés à moyen terme pour la production de molécules dans le domaine médical (pharmacie) ou dans l'agroalimentaire.

Dans les scénarios envisagés, les chiffres de production de biocarburants d'origine marine en France restent faibles. L'évolution des prix relatifs des énergies pourrait susciter l'intérêt industriel pour l'usage des biotechnologies. En production extensive, les pays disposant de grandes surfaces lagunaires pourraient devenir d'importants producteurs de carburant.

L'énergie des gradients de salinité (pression osmotique) est, de toutes les technologies envisagées, la moins mature en raison de la difficulté de mettre au point une membrane semi-perméable performante. De plus, pour utiliser cette ressource, la nécessité de disposer à la fois d'eau douce et d'eau salée limite les zones d'implantation possible si l'on cherche à réduire les risques de conflits. Enfin, la demande en eau douce ne cessant de croître, un sous-produit comme l'eau saumâtre n'a pas d'intérêt, au contraire.

Évaluation qualitative

Le tableau 2 synthétise une première évaluation qualitative des technologies en fonction de leur développement propre dans chaque scénario. La cotation mesure le niveau de développement : 0 pour aucun développement, 1 s'il est faible, 2 s'il est moyen et 3 s'il est fort. La somme des cotations considère implicitement que les quatre scénarios sont équiprobables, ce qui représente une hypothèse de travail en première approche. Cette équiprobabilité mériterait une étude plus approfondie.

Technologies	Scénario 1 crise, urgence énergétique	Scénario 2 coopération vertueuse par nécessité	Scénario 3 peu d'évolution, chacun pour soi	Scénario 4 développement local autonome	Somme
Courants	1,5	3	1	1	6,5
Marée	3	2	1	0	6
Vagues	1,5	3	1	1,5	7
Biomasse	3	3	1	2	9
Éolien	3	3	1	2	9
Thermique	2	3	1	3	9
Osmotique	0	1	0	1	2

Tableau 2 : Évaluation qualitative des technologies selon les scénarios

Ce tableau résume schématiquement le potentiel de développement des technologies. Cette synthèse vaut surtout pour la France (DOM-POM inclus) et sous-valorise certaines technologies comme l'hydrolien sous-marin qui devrait pouvoir être implanté avec moins de risque de conflits d'usage dans des zones où l'on ne peut pas installer d'autres types de technologies (lieux de trafic maritime soumis à de forts courants par exemple).

Cette approche tendrait à mettre en avant trois technologies (biomasse, éolien et thermique) qui se détachent d'un second groupe (vagues, courants, marée et hybride, si l'on globalise les scénarios). Cette approche est celle de la recherche du minimum de risque d'erreur dans le choix d'une ou de certaines technologies. Elle doit être pondérée par les atouts et contraintes des différentes technologies mais aussi par la réalité quantitative des productions de chaque technologie.

Analyse quantitative

Afin de comparer les scénarios en terme de production énergétique, il faut d'abord noter que le chiffrage des scénarios est réalisé pour la France et ses DOM-POM. La contribution des énergies renouvelables marines à la production énergétique n'est valable que dans ce contexte. De fait, la hiérarchie des technologies résultant de la comparaison chiffrée (en ordre de grandeur) des différents scénarios serait différente dans tout autre contexte national. Chaque pays dispose de ressources naturelles spécifiques à exploiter en termes d'énergies marines.

Les besoins énergétiques des îles, plus particulièrement des DOM-POM, influent sur les choix de technologies que l'on trouve dans les scénarios et ce d'autant plus que les alternatives énergétiques renouvelables sont structurellement plus rentables dans nombre de ces îles éloignées de la côte que sur le continent. Cette diversité de la situation géo-

graphique française est aussi un atout. Elle offre des débouchés pour des technologies dont le potentiel est principalement dans des pays du Sud, comme pour l'énergie thermique des mers.

Quelle que soit la technologie envisagée, le potentiel est encore souvent entaché d'une incertitude majeure car les chiffres cités dans les diverses études varient jusqu'à un facteur dix, en particulier pour le potentiel techniquement exploitable.

Les tableaux ci-contre présentent la contribution des différentes filières à la production énergétique pour chacun des scénarios en Mtep/an et en TWh/an pour la France et les DOM-POM.

Ces valeurs représentent des ordres de grandeur. Le niveau de précision (2 décimales) indiqué dans le tableau 3.1 ne sous-entend pas que le degré d'incertitude est inférieur à la précision mais relève de la conversion TWh/Mtep.

Le détail de ces évaluations chiffrées apparaît en annexe 7. On retrouve dans les évaluations chiffrées la prééminence de l'éolien dans tous les scénarios puis de l'énergie thermique des mers (en particulier dans les DOM-POM) dans trois scénarios sur quatre. La culture de biomasse marine se développe dans tous les scénarios mais ce n'est pas toujours pour du carburant. L'énergie marémotrice présente plus un risque d'acceptabilité qu'un risque technologique, sauf pour accroître la puissance de l'usine de la Rance, et ne se développe pas dans tous les scénarios. Elle apparaît en technologie de lagon artificiel sur de nouveaux sites dans deux scénarios sur quatre. Le développement de l'hydrolien comme de l'énergie des vagues requiert une forte justification (crise / urgence ou coopération volontariste) afin de franchir les difficultés voire barrières de la mise au point technologique et de la complexité de mise en œuvre à l'échelle industrielle. Enfin, quel que soit le scénario, la pression osmotique ne rencontre pas de conditions favorables de développement.

	Production énergétique (Mtep/an)			
Technologies	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Éolien	1,03	2,58	0,52	1,03
ETM clim Métropole Économisé	0,06	0,12	0,03	0,12
ETM élec Tropiques	0,03	0,06	0,02	0,06
ETM clim Tropiques Économisé	0,06	0,31	0,03	0,31
Courants	0,03	0,26	0,05	0,01
Marémoteur	0,09	0,13	0,05	0,05
Vagues	0,03	0,52	0,03	0,04
Biomasse	0,05	2,50	négligeable	1,25
Osmotique	0,00	0,00	0,00	0,00
BILAN (Mtep/an)	1,38	6,48	0,73	2,87
Électricité	1,21	3,55	0,67	1,19
Climatisation	0,12	0,43	0,06	0,43
Carburant	0,05	2,50	négligeable	1,25

3-1 : chiffrage en Mtep/an Conversion : 1 TWh = 0,086 Mtep

	Production énergétique (TWh/an)			
Technologies	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Éolien	12,0	30,0	6,0	12
ETM clim Métropole Économisé	0,7	1,5	0,4	1,5
ETM élec Tropiques	0,4	0,7	0,2	0,7
ETM clim Tropiques Économisé	0,7	3,6	0,4	3,6
Courants	0,3	3,0	0,6	0,2
Marémoteur	1,0	1,5	0,6	0,6
Vagues	0,3	6,0	0,3	0,5
Biomasse	-	-	-	-
Osmotique	0,0	0,0	0,0	0,0
BILAN (TWh/an)	15,4	46,3	8,4	19,1
Électricité	14,0	41,2	7,7	14,0
Climatisation	1,4	5,1	0,7	5,1
Carburant	-	-	-	-

3-2 : chiffrage en TWh/an (sans la biomasse ni le carburant)

Tableau 3 : Analyse quantitative des technologies selon les scénarios (en Mtep/an et en TWh/an)

7 // INTÉGRATION ENVIRONNEMENTALE : QUELS IMPACTS ET QUELS RISQUES ?

La connaissance des impacts environnementaux constitue une dimension essentielle de l'insertion des équipements d'EnRM dans les zones côtières. Celles-ci sont le siège d'un grand nombre d'usages concurrents qui exploitent, eux aussi, les ressources physiques et biologiques du milieu marin. Une bonne gestion de ces usages dépend d'une analyse de leurs impacts.

En l'occurrence, les impacts environnementaux sont particulièrement difficiles à évaluer car il n'y a pas assez de retour d'expérience (hors éolien et marémoteur), surtout sur les effets cumulatifs, les technologies étant au stade de prototype. Par ailleurs, les perturbations du milieu risquent d'être englobées dans la variabilité générale, notamment celle entraînée par le changement climatique à l'horizon 2030.

Il est avéré que la technologie marémotrice avec barrage dans un estuaire altère le fonctionnement de l'écosystème. Pour les autres technologies envisagées, il n'est possible que de faire des hypothèses sur les risques possibles.

L'exploitation de courants permanents pourrait modifier ces flux et les mouvements sédimentaires qui leur sont liés. L'exploitation extensive de microalgues, si elle n'est pas faite avec précaution, pourrait conduire à une prolifération incontrôlée de ces microorganismes.

En revanche, l'installation de structures en mer (lagon, éoliennes...) peut créer un effet « récif »

sur des fonds sableux et favoriser la présence de poissons, voire la constitution d'écosystèmes originaux. Les impacts écologiques des lagons artificiels marémoteurs restent à étudier. Les connaissances sur l'évolution des écosystèmes associés aux infrastructures progresseraient comme le montre l'amélioration des connaissances ornithologiques marines permise grâce aux études d'impact et aux suivis réalisés sur les premiers parcs éoliens marins (cf. expérience danoise).

En conséquence, il apparaîtra une demande soutenue sur les impacts des différentes technologies sur le milieu, avec des interrogations spécifiques pour les systèmes hybrides, pour lesquels on peut anticiper des effets croisés et non additifs, comme par exemple pour la combinaison éolien/houlomoteur ou thermique/biomasse.

De même, les études seront à mener sous toutes les latitudes car le fouling en mer du Nord est très différent en composition comme en évolution de celui des zones tropicales (rôle important des coraux et des mollusques colonisateurs qui alourdissent structures et ancrages).

Compte tenu de la durée et de la complexité des études, il serait légitime que ces études soient soutenues par la communauté internationale via les commissions spécialisées des Nations Unies (PNUE, PNUD, FAO...) ou l'Europe, voire des commissions régionales ou des organisations mixtes type UICN.

8 // INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES MARINES À L'OFFRE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE À L'HORIZON 2030 SELON LES SCÉNARIOS POSSIBLES

Les scénarios prospectifs énergétiques de référence pour l'électricité

Pour évaluer la part que peuvent représenter les énergies marines renouvelables, il convient de comparer les résultats des scénarios « possibles » de cette étude à diverses prospectives ou prévisions sur la consommation énergétique électrique en France à l'horizon 2020-2030.

Les études de référence utilisées^[14] pour comparer la production des EnRM en 2030 par rapport à la consommation électrique française, en énergie finale, sont l'étude DGEMP^[15] de 2004 sur la prévision tendancielle de la production/consommation énergétique à l'horizon 2030, celle de la DGEMP – Enerdata/Pôles « facteur 4 » et l'étude Négawatt 2006 « facteur 4 »^[16].

Pour les deux scénarios de « facteur 4 » pris ici en référence :

- ▶ Le scénario DGEMP Poles « Facteur 4 » compte surtout sur l'énergie nucléaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Aussi, même si des technologies de basse consommation sont utilisées, certains besoins de chaleur et une part de l'énergie pour les transports utilisent l'électricité. La demande électrique reste donc forte et augmente avec le temps.
- ▶ Le scénario Négawatt opte pour une maîtrise de la consommation plus draconienne avec l'ambition de réduire l'appel à l'énergie nucléaire. En conséquence l'électricité est moins utilisée pour de nouveaux usages et sa consommation baisse avec le temps.

Les deux scénarios atteignent l'objectif européen de 20 % de la consommation d'énergie finale réalisée avec des énergies renouvelables en 2020.

Le scénario 3 est a priori compatible avec le scénario tendanciel tandis que le scénario 4 ne peut se construire qu'avec une politique énergétique très volontariste, donc n'est compatible qu'avec un scénario de type « facteur 4 ». Les scénarios 1 et 4 sont construits sur la base de politiques énergétiques intermédiaires.

Les scénarios 1, 2 et 4 permettent aux EnRM de produire en général plus de 3 % de la consommation électrique française à l'horizon 2030 sous réserve d'être dans un contexte de relative maîtrise de la demande électrique (les deux réf-

rences « facteur 4 »). Seul le scénario 2 permet aux énergies marines de représenter plus de 5 % de la consommation électrique à cet horizon.

Les scénarios prospectifs énergétiques de référence pour les carburants

La consommation finale de produits pétroliers en France est aujourd'hui de 50 Mtep/an pour le transport. Selon les scénarios disponibles, la consommation d'énergie pour le transport varie de 40 à 60 Mtep à l'horizon 2030. Cette variation est due aux prévisions de progrès en consommation des moteurs thermiques ainsi qu'à l'évolution de la mobilité et à la part de véhicules électriques.

Les scénarios 2 et 4 conduisent à une production nationale qui n'est pas négligeable (2,5 et 1,25 Mtep respectivement) par rapport à la consommation actuelle soit 5 % et 2,5 %. Dans le scénario 1, l'apport de biocarburants marins produits à l'étranger en culture extensive pourrait cependant peser davantage sur la même quantité de carburant consommé.

Il faut souligner que ces 2 Mtep/an de biocarburants marins sont du même ordre de grandeur que les productions d'agroc carburants de première génération^[17] retenues dans les scénarios « volontaristes » du récent rapport du Centre d'Analyse Stratégique (CAS), soit une production inférieure ou égale à 4 Mtep/an jusqu'en 2025, production qui double (jusqu'à 10 Mtep/an) avec les agroc carburants de seconde génération entre 2025 et 2030.

Année	Consommation annuelle (en TWh)	Année	Consommation annuelle (en TWh)
1973	180	1995	425
1979	245	2000	470
1985	320	2005	515
1990	375	2006	485

Source : Bilan électrique français 2006/RTE

Tableau 4 : Consommation électrique annuelle en France de 1973 à 2006

(chiffres arrondis en TWh, y compris consommation de la branche énergie)

Horizon	2020	2030
Tendanciel DGEMP 2004	635	715
DGEMP « Facteur 4 » 2005	520	590
Négawatt 2006	435	420
moyenne	530	575

Tableau 5 : Prévisions de consommation électrique annuelle en France (en TWh/an)

Scénario & estimation de production EnRM	Scénario 1 (15,5 TWh/an)	Scénario 2 (46 TWh/an)	Scénario 3 (8,5 TWh/an)	Scénario 4 (19 TWh/an)
Tendanciel 2030 (715 TWh/an)	2,2 %	Sans objet (S.O.)	1 %	S.O.
Poles fact 4 (590 TWh/an)	2,6 %	7,8 %	S.O.	3,2 %
Négawatt fact 4 (420 TWh/an)	3,7 %	11 %	S.O.	4,5 %

Tableau 6 : La part des énergies renouvelables marines dans la consommation annuelle électrique 2030, selon les scénarios possibles de l'étude

9// PROPOSITION D'UN SCÉNARIO NORMATIF DANS LE CONTEXTE DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT

À ce stade de l'étude, il peut sembler difficile de passer d'un éventail de scénarios possibles (tels que décrits par l'analyse prospective fournissant des ordres de grandeur sur les productions que pourraient représenter les énergies renouvelables marines) à un scénario concret, opérationnel, pouvant servir de support à des recommandations précises pour une réelle prise en compte des EnRM. Le Comité de Pilotage a donc demandé que soit proposé par le groupe de travail un scénario dit « normatif » visant à décliner la contribution des différentes énergies marines dans un objectif global de l'ordre de 2 à 3 % (hors éolien offshore) de la part des énergies renouvelables marines à l'horizon 2020 dans la consommation finale d'énergie en France.

S'appuyant sur le débat suscité par le Grenelle de l'Environnement, ce scénario « normatif » explore la part que pourraient prendre les énergies marines renouvelables dans cet objectif qui est bien « d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables (énergie finale) en 2020 dans de bonnes conditions environnementales et de faisabilité. Cela suppose d'augmenter de 20 Mtep la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique à l'horizon 2020 en suivant deux lignes stratégiques, autonomisation et décentralisation, là où c'est possible » (Jean-Louis Borloo – 26 décembre 2007).

On peut également rappeler qu'un des objectifs du Comité opérationnel Outre-Mer du Grenelle de l'Environnement est, sur le thème énergie : l'autonomie énergétique des collectivités d'outre-mer par le biais de la maîtrise des consommations et le recours aux énergies renouvelables à hauteur de 50 %.

Cinq éléments majeurs plaident actuellement en faveur des énergies renouvelables :

- ▶ le décalage croissant entre la demande en énergie fossile et l'offre,
- ▶ la lenteur de la cinétique du développement, surtout dans le nucléaire,
- ▶ la probable extension des accords de Kyoto avec une feuille de route indiquant des objectifs chiffrés avant 2012,
- ▶ la confirmation des ambitions de l'UE dans ce domaine à l'horizon 2020 et le choix d'objectifs assez réalistes pour permettre des investissements,
- ▶ la probabilité sérieuse d'un remodelage profond du marché de l'énergie à moyen terme.

Dans le cadre des débats du Grenelle de l'Environnement, le Syndicat des Énergies Renouvelables (SER) a proposé sa vision des potentiels de croissance des filières pour atteindre l'objectif européen, soit un accroissement net de 20 Mtep/an des énergies renouvelables à l'horizon 2020. Parmi les contributions des différentes filières d'énergie renouvelable dans ce scénario du SER, la contribution de l'éolien marin s'élève à 6000 MW en puissance installée.

Au plan européen, les États membres de l'UE pourraient avoir du mal à remplir leurs obligations en termes d'énergies renouvelables à l'horizon 2020. Or, si l'énergie solaire propose de séduisantes perspectives, comme le photovoltaïque, les États auront tendance à aller d'abord vers les technologies les plus simples et les plus rentables comme l'éolien et la biomasse terrestres.

Il est utile de rappeler plusieurs faits :

- ▶ La France a le 2^e potentiel d'Europe, après la Grande Bretagne qui est très active dans ce domaine, en énergie des vagues et des courants de marée.
- ▶ La France dispose également d'une très grande ressource en énergie thermique des mers avec son territoire ultramarin (DOM-POM).
- ▶ Il existe une masse critique de recherche, y compris en recherche appliquée avec des industriels, en matière d'énergies renouvelables marines aujourd'hui qui montre un dynamisme incluant une capacité de prise de risques.
- ▶ Comme l'indique une étude de Douglas-Westwood⁽¹⁸⁾ de 2005, le marché mondial des énergies marines (courants et vagues) représente 10 à 30 fois le marché européen.

Ce scénario normatif tente de manière réaliste de sélectionner les technologies susceptibles de développement et d'estimer les niveaux de puissance et de production à partir de projections chiffrées. Il permet donc en particulier d'évaluer les efforts organisationnels, de recherche et d'industrialisation à déployer pour que cette contribution puisse avoir lieu si elle est jugée pertinente. Les énergies renouvelables marines auront en effet leur part si des réseaux de partenariats stratégiques et d'expérimentations pré-industrielles voire industrielles sont en place d'ici 2020.

Ainsi, si une décision d'un objectif de 2 à 3 % (par exemple) pour les EnRM était prise à l'horizon 2020 pour la France, cela aurait des conséquences importantes en termes de :

- ▶ politique énergétique,
- ▶ structuration du dispositif de recherche et développement dans ce domaine en France,
- ▶ création de plates-formes expérimentales,
- ▶ appuis (toutes formes de soutien financier et organisationnel),
- ▶ stimulation du développement technologique à une échelle industrielle.

Dans le scénario normatif, la répartition pourrait suivre le schéma suivant, par contribution énergétique décroissante, synthétisée dans un tableau en annexe 7.

Éolien

C'est la technologie la plus mature et la plus développée aujourd'hui dans le monde. En France, en raison d'un potentiel significatif combinant les critères de puissance, régularité du vent et de caractéristiques du plateau continental, plusieurs fermes marines d'éoliennes verront le jour sur les trois façades maritimes en métropole. Il s'agira d'ensembles de quelques dizaines (voire plus) d'éoliennes de grande puissance (5 MW et plus) implantées à quelques kilomètres des côtes afin de trouver un compromis entre coût des investissements et de la maintenance d'une part et impact visuel d'autre part.

Le point le plus complexe sera celui de la compatibilité avec les autres usages, notamment la pêche et le tourisme, d'où l'importance d'un travail précoce de sensibilisation, de pédagogie et surtout de développement de l'emploi local y compris dans le tourisme énergétique (comme sur l'usine marémotrice de la Rance). Par ailleurs, l'acceptabilité sociale sera d'autant plus élevée que ces sites auront mis en place des technologies hybrides (couplage avec les vagues par exemple) et des usages associés comme l'aquaculture. La compatibilité avec le développement du réseau d'aires marines protégées et leurs divers niveaux de protection sera également un facteur à prendre en compte.

Estimation pour l'éolien marin

4000 MW de puissance installée et environ 12 TWh de production d'énergie, soit par exemple 16 fermes de 50 éoliennes de 5 MW chacune à 3 000 h de fonctionnement par an.

Thermique

Cette forme d'énergie doit être développée dans les DOM-POM français à la fois pour des raisons d'utilité directe, d'économie de long terme sur les carburants fossiles et de valeur démonstrative pour les pays tropicaux voisins. Elle est valorisable

sous de multiples formes (eau, froid, électricité) et pourrait accroître ses rendements sur les îles disposant d'eaux chaudes d'origine volcanique. Les îles des Antilles, de la Réunion et de Tahiti auront leur centrale avec des adaptations importantes en fonction des spécificités locales.

Estimation pour le thermique

En électrique : 200 MW de puissance installée et environ 1,4 TWh de production d'énergie soit par exemple 10 centrales de 20 MW chacune à 7 000 h de fonctionnement par an.
En froid : 55 MW électrique économisés soit 0,4 TWh soit par exemple 12 centrales de 20 MW chacune à 7 000 h de fonctionnement par an.

Hydrolien

Cette technologie a d'importants atouts en France, notamment en raison de la puissance des courants de marée sur les côtes Nord-Ouest, la prévisibilité des productions, le faible impact visuel en surface et l'occupation d'un espace de passage maritime où il sera difficile d'implanter d'autres énergies marines ou d'autres activités. Elle progressera jusqu'au stade industriel mais les sites éligibles resteront peu nombreux.

Estimation pour l'hydrolien

400 MW de puissance installée et environ 1,4 TWh de production d'énergie soit par exemple 5 sites de 80 turbines de 1 MW chacune à 3 500 h de fonctionnement par an.

Marémoteur

La puissance de la marée est reconnue et bénéficie d'une image positive dans l'opinion publique mais les impacts environnementaux durables et peu réversibles condamnent son développement sous forme de barrage en France. Aussi, pour des raisons d'affichage et de valorisation de la technologie française, un lagon artificiel (tidal lagoon) à dimension industrielle sera construit.

Estimation pour le marémoteur

500 MW de puissance installée et environ 1,25 TWh de production d'énergie soit par exemple une centrale de type lagon de 500 MW à 2 500 h de fonctionnement par an. Ce scénario considère que l'usine marémotrice de la Rance, en exploitation depuis 40 ans, ne contribue pas à l'objectif du Grenelle d'augmentation de 20 Mtep de la contribution des énergies renouvelables d'ici à 2020.

Vagues

Le potentiel est élevé mais diffus et les technologies ne sont pas aussi matures que l'éolien. Comme la gestion de l'hydrogène ne sera probablement pas au point en 2020, les systèmes très au large ne sont pas développés. En revanche, en raison d'un plus fort potentiel pour les vagues que l'éolien (30 MW/km² en vague et 10 MW/km² en éolien), plusieurs sites industriels seront aménagés sur la façade atlantique ainsi que dans les DOM-POM.

Estimation pour l'énergie des vagues :
200 MW de puissance installée et environ 0,8 TWh de production d'énergie.
Soit par exemple : 20 sites de 10 machines à 1 MW unitaire pour 4000 h de fonctionnement/an (50% dans les DOM-POM).

Biomasse

Le potentiel de la biomasse marine à des fins énergétiques est considérable alors qu'il commence à peine à être exploré. La France a de nombreux atouts dans ce domaine, même si elle part tardivement. La variété des espèces utilisables à toutes les latitudes fera que des développements industriels apparaîtront en métropole comme dans plusieurs régions tropicales françaises dont la Guyane. Les systèmes intensifs seront privilégiés dans cette première vague de réalisation pour mieux maîtriser les coûts comme les critiques. De fait, la pression croîtra sur l'utilisation des terres à des fins de production alimentaire pour des raisons de démographie en hausse, de sécurité alimentaire et de changements climatiques.

Estimation pour la biomasse
Un site développé d'abord comme démonstrateur puis comme pilote industriel, puis comme usine soit par exemple 2 000 ha à 30 t. d'huile /ha, soit 25 tep/ha, soit environ 0,05 Mtep /an.

Pression osmotique

Les contraintes technologiques et celles de l'environnement, notamment les besoins en espace et en eau douce, ne permettront pas l'émergence de prototype à l'échelle industrielle.

Hybride

L'hybridation des technologies est relativement facile à mettre en œuvre dans deux cas : éoliennes flottantes/ dispositif houlomoteur sur le même périmètre et énergie thermique des mers/biomasse grâce aux minéraux remontés des eaux profondes (sans compter les applications intéressantes en aquaculture). Les estimations de puissance ont déjà été comptabilisées séparément.

Présentation synthétique et chiffrée du scénario normatif

Le tableau 7 résume les apports respectifs des technologies dans le scénario normatif. On note le poids de l'éolien, ce qui est normal en raison de la maturité de la technologie et du temps à courir.

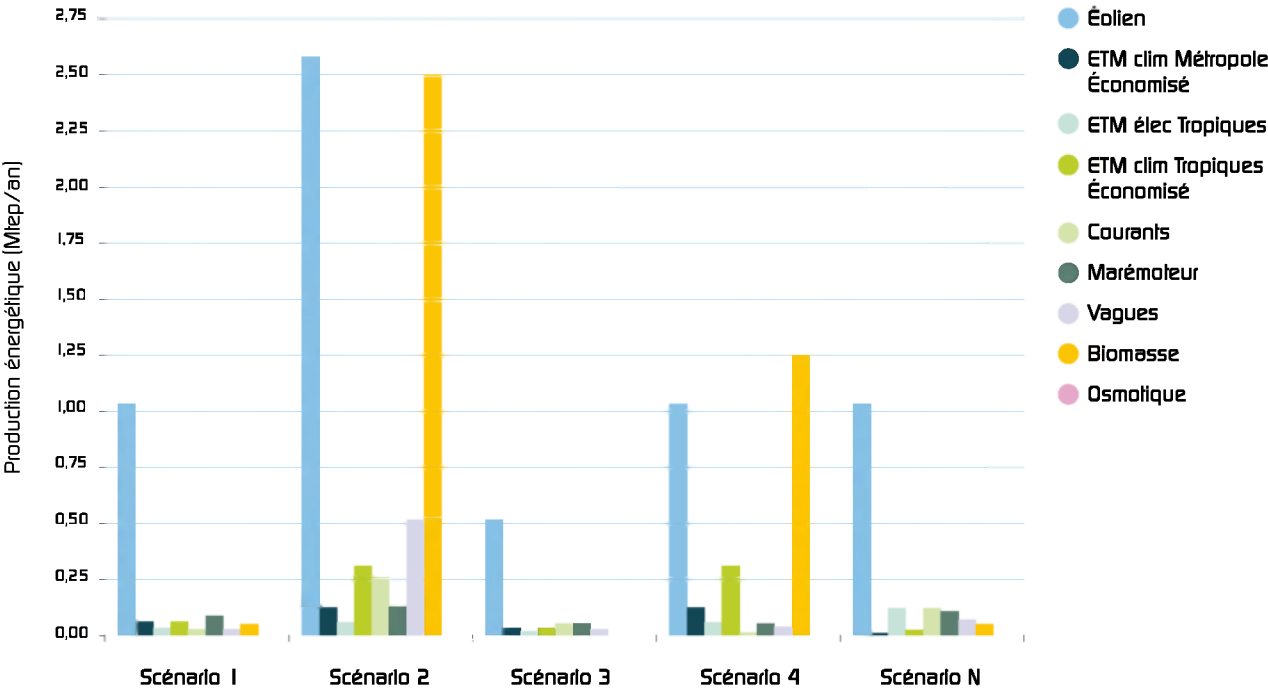
On observe donc que par rapport aux objectifs européens pour la France, repris dans le cadre du Grenelle de l'environnement (soit + 20 Mtep d'énergies renouvelables à l'horizon 2020) l'apport des énergies marines dans le scénario normatif, éolien marin compris, serait de l'ordre de 1,5 Mtep, soit 7,7 %, ce qui est significatif par rapport aux autres filières renouvelables. Un tel scénario indique bien les efforts qu'il conviendrait de produire pour atteindre cet objectif.

Type d'énergie renouvelable marine	Puissance installée (MW)	Heures de fonctionnement par an	Énergie électrique (TWh/an)	Énergie (Mtep/an)	% - Réf Objectif 2020 20 Mtep/an
Éolien offshore	4000	3000	12	1,03	5,2 %
ETM elec	200	7000	1,4	0,12	0,6 %
ETM froid - économisé	55	7000	0,4	0,03	0,2 %
Marémoteur	400	3500	1,4	0,12	0,6 %
Hydrolien	500	2500	1,25	0,11	0,5 %
Vagues	200	4000	0,8	0,07	0,3 %
Biomasse	-	-	-	0,05	0,3 %
Total			17,2 TWh/an	1,5 Mtep/an	7,7 %
Total hors éolien			5,2 TWh/an	0,5 Mtep/an	2,5 %

Tableau 7 : Puissance et production des technologies selon le scénario normatif

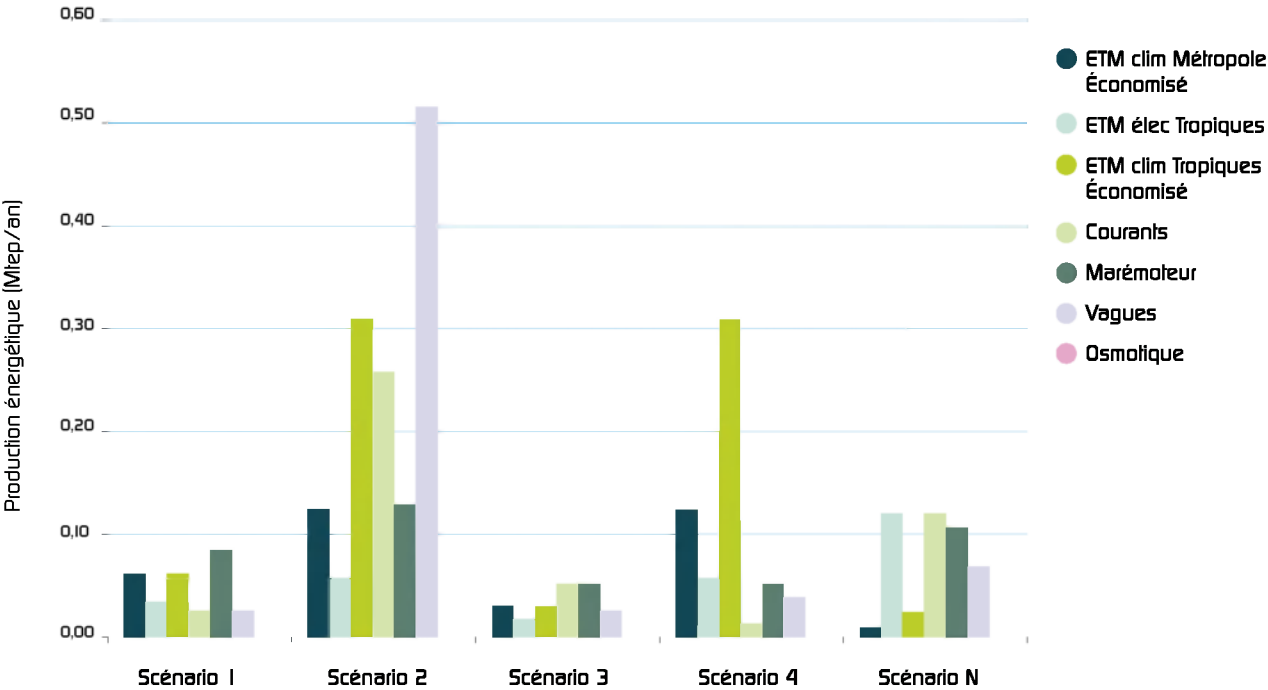
Conversion : 1 TWh = 0,086 Mtep

Part de chaque technologie par scénario (avec éolien)



Graph 1 : répartition de la production énergétique des technologies
suivant les scénarios (4 scénarios contrastés à 2030
1 scénario normalif à 2020 suivant engagement UE)
visualisation avec éolien marin

Part de chaque technologie par scénario (hors éolien et biomasse)



Graph 2 : répartition de la production énergétique des technologies
suivant les scénarios (4 scénarios contrastés à 2030
1 scénario normalif à 2020 suivant engagement UE)
visualisation sans éolien marin ni biomasse

La mise en perspective de ce scénario normatif avec les quatre scénarios possibles apparaît à l'annexe 7. Selon ce scénario normatif, si l'on raisonne en part de la consommation électrique française à l'horizon 2020 (soit 530 TWh estimés – cf. tableau 5), les EnRM apporteraient 17,2 TWh soit 3,2 % du total, ce qui serait loin d'être négligeable.

Compte tenu du progrès des technologies, y compris les sauts comme la maîtrise du stockage de l'hydrogène, en parallèle à une amélioration des rendements énergétiques et des économies d'énergie notamment dans les villes, on peut raisonnablement tabler sur un accroissement plus rapide de cette fraction des énergies renouvelables marines entre 2020 et 2030 qui pourrait alors peser 4 à 5 % de la consommation électrique française, voire plus selon le contexte mondial.

Si ce scénario normatif est considéré comme souhaitable en raison de ses résultats, il est justifié d'essayer de voir quelles décisions et actions concrètes doivent être mises en place pour dérouler ce scénario. Bien sûr, cette dynamique doit rester évolutive en fonction des résultats de pilotes industriels ailleurs dans le monde (hydrolien en Grande Bretagne, houlomoteur en Grande Bretagne et au Portugal, biomasse à Hawaï, etc.) ce qui renforce l'importance de la veille technologique. Cette dynamique ne sera efficace et durable que si tous les acteurs sont organisés et complémentaires. Ils peuvent l'être à quatre niveaux : l'État en France, les régions maritimes (notamment outre-mer), les entreprises et enfin l'Union européenne.

Au niveau de l'État en France

L'État s'est engagé à tenir ses obligations en termes d'énergies renouvelables. Il en va de la crédibilité de la France vis à vis de l'UE comme des autres pays signataires de la convention sur le changement climatique et de son protocole de Kyoto. Le groupe de travail ayant réalisé cette étude, et élaboré ce scénario normatif, suggère que l'État exerce un rôle de soutien, d'information et de suivi et propose les pistes de réflexion suivantes :

Un rôle de soutien :

- ▶ Soutien à la recherche publique en renforçant les laboratoires spécialisés dans les instituts de recherche français et les universités et en favorisant leur synergie, soutien via les appels d'offres de l'ANR, l'action auprès de Bruxelles pour stimuler ce secteur, la future agence d'orientation de la recherche et soutien à la recherche privée (renforcement du crédit impôt recherche CIR), l'attribution de bourses de recherche favorisant les partenariats avec les entreprises innovantes (type CIFRE).

- ▶ Soutien aux « démonstrateurs » pour faciliter le passage des études au test en vraie grandeur.
- ▶ Appui aux pôles de compétitivité s'engageant dans ce secteur comme les Pôles Mer Bretagne et PACA, les différents Pôles ayant vocation « énergies » en métropole : Tenerrdis, Capénergies, Derbi... ainsi que Synergile en Guadeloupe et d'autres en création ou envisagés dans les DOM-POM.
- ▶ Soutien au prix du rachat du KWh pour qu'il favorise la prise de risque des investisseurs.

Un rôle d'information :

- ▶ Veille technologique (et stimulation des partenariats scientifiques) avec la mobilisation des services de veille technologique dans les ambassades des pays les plus avancés (UE, USA, Japon, Australie) et la centralisation des informations et leur synthèse régulière. Dans cette optique, le montage de partenariats scientifiques est à stimuler à l'Ifremer.
- ▶ Appui méthodologique aux études d'impact avec l'élaboration d'un guide pour les études d'impact environnementales.
- ▶ Information des décideurs des zones littorales et communication à tous les niveaux.

Un rôle de suivi :

- ▶ Un rôle de suivi, d'encadrement, d'adaptation des procédures aux spécificités des énergies renouvelables marines en vue également de la définition de zones favorables au développement des énergies marines.

Au niveau des régions maritimes notamment outremer

Les régions jouent déjà un rôle majeur dans l'aménagement du territoire, rôle susceptible de croître à l'avenir car les régions sont l'échelle pertinente de ce type de réalisation. Leur implication en amont dès l'origine des projets dans la sélection des zones favorables et la valorisation locale des projets apparaît comme un facteur du développement et comme un élément facilitateur de leur acceptation sociale.

Au niveau des entreprises

Il ne s'agit pas d'intervenir dans les stratégies des acteurs industriels mais de faciliter l'émergence de partenariats complémentaires et stables. Une fois atteinte la taille critique, ces consortiums doivent mobiliser les multiples moyens leur permettant de passer du stade du pilote au stade industriel.

Il faut attendre des entreprises, notamment les grandes entreprises du secteur de l'énergie, qu'elles prennent leur part de risque dans le montage de projets pour lancer la filière. Les plus petites entreprises peuvent également jouer un rôle d'innovation en étant à l'origine de nouveaux concepts repris ultérieurement dans des partenariats industriels. D'autres entreprises intermédiaires, de sous-traitance pour les études d'impact par exemple, peuvent également contribuer à l'amélioration des connaissances dans ce domaine en relation avec des organismes de recherche (sur financement ANR par exemple).

IO // CONCLUSION

Cet effort collectif d'une année a permis de réduire le champ des incertitudes et de montrer l'important potentiel français dans ce domaine tant au plan des ressources naturelles qu'au plan des moyens intellectuels, scientifiques et industriels mobilisables.

L'analyse des scénarios souligne l'importance du contexte international pour la définition des stratégies nationales et, par ailleurs, au plan national, l'importance du rôle de l'État dans le développement des énergies renouvelables marines. Ce rôle pourrait s'entendre comme coordinateur des compétences et des moyens ou encore comme soutien d'initiatives ciblées.

La dynamique des entreprises engagées dans ce domaine doit s'articuler d'une part avec la recherche universitaire et les instituts spécialisés et d'autre part avec la volonté de contribuer à l'émergence de partenariats avec d'autres entreprises.

Il importe pour tous les acteurs, institutionnels ou non, d'adopter une vision commune de long terme afin de pouvoir intégrer des changements fondamentaux du contexte énergétique international (cours du pétrole, climat, opinion publique...), des percées technologiques (stockage/transport de l'hydrogène, sélection de souches performantes d'algues...) et des impacts sur l'environnement marin et les usages côtiers liés à l'installation de nouveaux aménagements.

Dans cette perspective, il est légitime de conclure à l'importance du renforcement des travaux de recherche et développement en matière d'énergies renouvelables marines dans plusieurs

Au niveau de l'Union européenne

La France doit se mobiliser pour que les énergies renouvelables marines bénéficient d'un soutien spécifique dans les divers programmes européens en mobilisant notamment la recherche sur les aspects d'impacts sur l'environnement, insuffisamment étudiés à ce jour. Par ailleurs le renforcement de la coopération entre l'Europe et la Méditerranée devrait conduire à des actions spécifiques en matière d'énergie renouvelables marines (éolien, biomasse...).

disciplines scientifiques et d'ingénierie, en conservant le rôle de coordinateur de long terme à l'État et en définissant les moyens de soutien des opérateurs désireux de s'engager, seuls ou collectivement : entreprises, agences de moyens, agences de financement, régions, Union européenne.

Par ailleurs, dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, l'État met en place un fonds de soutien pour des démonstrateurs en matière de nouvelles technologies de l'énergie. Les énergies renouvelables marines devraient y avoir accès à travers un appel à projets.

Enfin, si de nouvelles plates-formes technologiques devaient être envisagées, les énergies renouvelables marines devraient en bénéficier. Cela permettrait, à travers la mise en place de collaborations, de favoriser le développement de sites d'essais et de démonstrations en mer.

Dans ces conditions, les énergies renouvelables marines peuvent contribuer de manière significative à tenir les objectifs de l'UE en 2020 en matière d'énergie renouvelable tout en développant des technologies à fort potentiel d'exportation, notamment sur la ceinture tropicale. Enfin, les tendances lourdes discernables aujourd'hui en terme de conséquences du changement climatique d'une façon générale mais particulièrement sur le domaine marin (vents, vagues, courants, efflorescences algales, température...) justifient de plus en plus le recours à ces formes d'énergie.

En conséquence, il est d'autant plus stratégique de s'approprier rapidement ces technologies qu'il est encore temps d'en faire des atouts compétitifs de long terme.

NOTES

1 - Un glossaire relatif à cette méthode des scénarios apparaît en annexe 3.

2 - En fonction des durées annuelles de fonctionnement considérées.

3 - Estuaires avec un marnage supérieur à 5 m.

4 - La demande annuelle mondiale en électricité est de 14 000 TWh/an.

5 - À noter que la Nouvelle Calédonie dispose d'un statut spécifique et que la Polynésie Française est qualifiée de « pays d'outre-mer ».

6 - La variété signifie ici aussi bien la coexistence de différentes technologies utilisant la même ressource – l'éolien flottant en complément de l'éolien offshore classique – que des technologies utilisant des ressources différentes.

7 - http://www.hornsrev.dk/Engelsk/default_ie.htm

8 - <http://www.nystedhavmoellepark.dk/frames.asp>

9 - Un ouvrage synthétique reprenant les résultats des études menées est disponible en ligne sur le site de l'Autorité danoise de l'énergie. http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Havindmoeller/havindmoellebog_nov_2006_skrn.pdf

10 - International Advisory Panel of Experts on Marine Ecology.

11 - Le site Internet du COWRIE est très complet, régulièrement mis à jour, il comporte tous les rapports des études financées par l'organisme : <http://www.offshorewindfarms.co.uk/>

12 - <http://www.cefas.co.uk/>

13 - Dans l'industrie, l'hydrogène est aujourd'hui produit surtout pour la chimie, essentiellement, à partir de gaz naturel fossile donc avec émissions de gaz à effet de serre.

14 - Les travaux récents du Centre d'Analyse Stratégique (CAS) parus en 2007 ne sont pas utilisés ici en référence pour trois raisons :

► Les résultats du scénario tendanciel en termes de consommation électrique sont peu différents de ceux de l'étude DGEMP 2004 : les hypothèses optimistes de croissance économique et de prix des énergies fossiles de l'étude 2004 sont compensés dans l'étude 2007 par une croissance démographique plus importante.

► Les résultats de consommation électrique des scénarios « volontaristes » sont intermédiaires entre le scénario tendanciel 2004 et les deux scénarios « facteur 4 » retenus.

► Les scénarios « volontaristes » de l'étude 2007 ne se positionnent pas sur une trajectoire de « facteur 4 » mais de division par deux des émissions de gaz à effet de serre en France à l'horizon 2050. L'objectif européen de 20 % d'énergies renouvelables finales à l'horizon 2020 n'est atteint dans aucun des scénarios « volontaristes » ce qui est en contradiction avec les hypothèses de construction de trois des scénarios de ce rapport sur les énergies marines.

15 - DGEMP : Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières. www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/prosp-ir-2030-2050.htm

16 - www.negawatt.org/telechargement/Scenario%20nW2006%20Synthese%20v1.0.2.pdf

17 - Première génération fabriquée à partir de « graines » (blé, colza, betterave ...) ; seconde génération fabriquée à partir de cellulose (pailles, bois).

18 - Marine Renewable Energy Report – Global markets, forecast and analysis 2005-2009 – Douglas-Westwood 2005

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

► International Energy Agency, 2007. World Energy Outlook, China and India Insights, Résumé, 18 p.

► Commission of the European Communities, 2007. Energy Policy and Maritime Policy: Ensuring a better fit, 21 p.

► European Commission, 2006. World Energy Technology Outlook – WETO H2. EUR 22038, 168 p.

► Centre d'analyse stratégique, Syrota J. (Président Commission « Énergie »), 2007. « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 ». Rapport de synthèse commission « Énergie », 16 p.

► Grenelle de l'environnement, 2008. « Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie ». Rapport de synthèse du groupe 1, 108 p.

► Association négaWatt, 2005. « Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable ». Document de synthèse, 15 p.

► La prospective française énergétique à l'horizon 2030 – 2050 – Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières – MEDAD 2007.

► Adam Westwood, may 2005, Marine renewable Energy Report – Global markets, forecasts and analysis 2005-2009.

► Review and analysis of ocean energy systems – Development and supporting policies. International Energy Agency's implementing agreement on Ocean Energy Systems – June 2006.

► IEA Ocean Energy Systems Implementing Agreement – 5 year Strategic Plan 2007 – 2011. 14 November 2006.

ANNEXE I : LISTE DES MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE

Nom	Fonction	Organismes
Jean-Yves PERROT	Président-Directeur Général	Ifremer
Maurice HERAL	Directeur de la Prospective et de la stratégie scientifique	Ifremer
Jean-Luc DEVENON	Conseiller Scientifique et Technologique	Ifremer
Michel PAILLARD	Chef de projet Énergies renouvelables marines	Ifremer
Antoine PRESTAT	Directeur adjoint à la valorisation	Ifremer
Denis LACROIX	Animateur de la Cellule Prospective	Ifremer / Agropolis
Expertise en animation et méthodologie en Prospective		
Hugues de JOUVENEL	Directeur général de Futuribles	Futuribles
Véronique LAMBLIN	Directrice d'Études de Prospective et de Stratégie	Futuribles
Experts extérieurs		
Cyrille ABONNEL	Chef du projet « Énergies marines » à EDF / R&D	EDF
Jean-Luc ACHARD	Directeur de recherche, responsable du Projet Harvest	CNRS LEGI Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels
Jean-Louis BAL	Directeur des Énergies Renouvelables	ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Marc BOEUF	Responsable R&D et responsable naval Pôle Mer	DCNS
Philippe BREANT	Directeur du département eau potable et membranes	VEOLIA Environnement R&D
Matthieu CHABANEL	Adjoint au sous-directeur	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (MEEDDAT)- Direction des Transports Maritimes, Routiers et Fluviaux
Rep. par Katrin MOOSBRUGGER	Chef du bureau littoral & environnement (PVL3)	
Pierre CHAUCHOT	Président du Club pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer	Centre IFREMER de Brest - DCB/ERT
Martine CHOQUERT	Chargée de mission	MEEDDAT - Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP)
Alain CLEMENT	Directeur du laboratoire de mécanique des fluides. Responsable du Projet SEAREV	École Centrale de Nantes – Labo- ratoire de Mécanique des Fluides (LMF)
Bernard COMMERE	Chargé de mission	Ministère de l'Enseignement Su- périeur et de la Recherche – DGRI Département A4 - Biotechnologies, Ressources, Agronomie
Pascale DELECLUSE	Directeur Adjoint de la Recherche	METE0-France - CNRM

Nom	Fonction	Organismes
Anna GIGANTINO	Responsable de projets en Sciences et Technologies	Commission Européenne / DG Recherche. Unité 3 : Sources d'énergies nouvelles et renouvelables
Frédéric JOUVE	Directeur Délégué aux Énergies renouvelables et à l'Environnement	EDF / R&D - Direction de la Recherche et du Développement
Éric LEMAITRE	Chargé de mission	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche DGRI
Gilbert LE LANN	Chargé de mission	Secrétariat Général de la Mer
Philippe MAZENC rep. par Sophie-Dorothée DURON	Chef du bureau Activités littorales et maritimes Chef du pôle Environnement maritime	MEEDDAT - Direction des Affaires maritimes
Antoine-Tristan MOCILNIKAR	Responsable Environnement et Développement durable	Mission Union pour la Méditerranée
Sylvain DE MULLENHEIM rep. par Frédéric LE LIDEC	Directeur des affaires publiques Directeur du développement Mer	DCNS
Christian NGO	Délégué général de l'association ECRIN Directeur scientifique au cabinet du Haut Commissaire à l'énergie atomique	ECRIN - CEA
Cyril POUVESLE	Chargé de mission au bureau de l'Énergie, de l'Agriculture et de l'Industrie	MEEDDAT - Direction des Études Économiques et de l'Évaluation Environnementale (D4E)
Jacques RUER	Directeur Adjoint Innovation et technologies émergentes ; Développement des technologies	SAIPEM SA - Direction du Développement des Technologies
Philippe SERGENT	Directeur Scientifique	CETMEF Centre d'Etudes techniques maritimes et fluviales
Hélène THIENARD	Chargée de mission à l'Observatoire de l'Energie	MEEDDAT - Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DDGEMP)
Pierre-Armand THOMAS rep. par Nicolas TCHERNIGUIN	Directeur du Développement des nouvelles Technologies Offshore Adjoint au Directeur du Développement des nouvelles Technologies Offshore	TECHNIP
Stéphane THOMAS	Responsable du pôle Énergies décentralisées et Énergies renouvelables	VEOLIA Environnement R&D Énergie
Didier VERGEZ rep par: Thomas RENAUT	Responsable Affaires nouvelles et Participations Responsable Énergies marines	TOTAL Direction Gaz et Énergies nouvelles



ANNEXE 2 : LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Nom	Fonction	Organisme
Cyrille ABONNEL	Chef de projet « Énergies marines »	EDF- Direction de la R & D
Marc BŒUF	Responsable de la R&D	DCNS / Brest
Jean-Paul CADORET	Responsable du laboratoire Physiologie et biotechnologie des algues	Ifremer
Bertrand CHAPRON	Directeur du laboratoire Océanographie spatiale	Ifremer
Jérôme CLAUZURE	Chargé d'études	MEEDDAT - DTMRF / PVL3
Marie-Cécile DEGRYSE	Chargée de mission au bureau de l'Énergie, de l'Agriculture et de l'Industrie	MEEDDAT - D4E
Jean-Luc DEVENON	Conseiller scientifique et technologique	Ifremer
Luc DREVES	Directeur du département Environnement littoral et ressources aquacoles	Ifremer
Sophie-Dorothée DURON	Chef du pôle environnement maritime	MEEDDAT - DAM
Régis KALAYDJIAN	Chercheur en économie maritime	Ifremer
Denis LACROIX	Coordinateur de la Cellule Prospective Co-animateur du groupe de travail	Ifremer / Agropolis
Véronique LAMBLIN	Directrice d'Études de Prospective et de Stratégie Co-animatrice du groupe de travail	Futuribles
Jean MARVALDI	Ingénieur au département TSI	Ifremer
Antoine-Tristan MOCILNIKAR	Responsable Environnement et Développement durable	Mission Union pour la Méditerranée
Michel PAILLARD	Chef de projet Énergies renouvelables marines Co-animateur du groupe de travail	Ifremer
Cyril POUVESLE	Chargé de mission au bureau de l'Énergie, de l'Agriculture et de l'Industrie	MEEDDAT - D4E
Jacques RUER	Directeur Adjoint Innovation et Technologies émergentes ; Développement des technologies	SAIPEM SA - Direction du Développement des Technologies
Nils SIEBERT	Chargé de mission au département des Énergies Renouvelables	ADEME
Nicolas TCHERNIGUIN	Adjoint au Directeur du Développement des Nouvelles Technologies Offshore	TECHNIP Nouvelles Technologies Offshore
Stéphane THOMAS	Responsable du pôle Énergies décentralisées et Énergies renouvelables	VEOLIA Environnement R&D Energie
Patrick VINCENT	Directeur des Programmes et de la Coordination des Projets	Ifremer

ANNEXE 3 : GLOSSAIRE RELATIF À LA MÉTHODE DES SCÉNARIOS

Variable : facteur, paramètre ou déterminant qui influe sur le système et dont la connaissance peut contribuer à en comprendre l'état, à en appréhender, voire à en maîtriser l'évolution. Élément du système qui exerce ou est susceptible d'exercer une influence sur le problème étudié. Souvent une variable dans un système prospectif est un mélange de facteur et d'acteur (un facteur évolue le plus souvent sous l'influence d'un acteur ou de plusieurs acteurs).

Variable-Clé : les variables les plus influentes sur le système considéré (les plus dépendantes sont écartées).

Hypothèse : évolution possible d'une variable à un horizon donné.

Composante : ensemble de variables liées autour d'une même thématique ou d'un même groupe d'acteurs.

Scénario : la description du système à un horizon donné et du cheminement conduisant à son état final.

Micro-scénarios : scénarios partiels relatifs à une composante du système.

Macro-scénarios : ou scénarios globaux relatifs à l'ensemble du système.

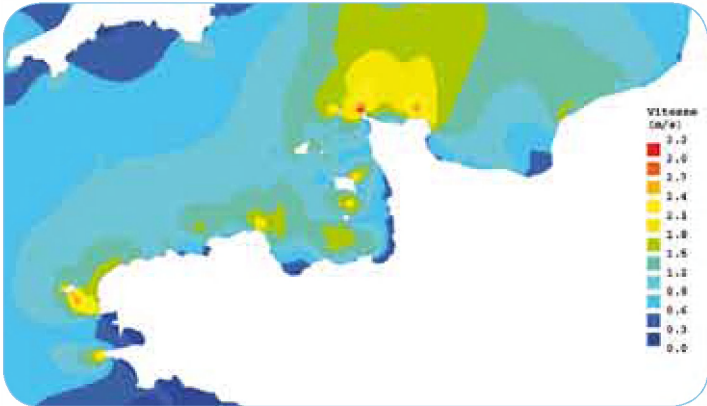
Enjeu : Problématique identifiée qui porte en elle un potentiel de changements, positifs (opportunités) ou négatifs (menaces) et qu'il est nécessaire de prendre en compte pour construire une prospective et déterminer une stratégie. L'enjeu est ce qui, sur le terrain ou le champ de bataille, peut être perdu ou gagné. Un des rôles de la prospective consiste à identifier des enjeux futurs, imaginables, et, surtout de long terme.

ANNEXE 4 : LISTE DES 30 VARIABLES REGROUPÉES PAR COMPOSANTES ET AUTEURS CORRESPONDANTS

CADRAGE MONDE	
1. Gééconomie mondiale	Futuribles
2. Gouvernance climatique	MEEDDAT
3. Demande énergétique dont Europe par région	Futuribles
4. Demande eau douce par région	Futuribles
5. Sécurité et prix des énergies fossiles	Technip
CADRAGE EUROPE et FRANCE	
6. Stratégie politique/indépendance énergétique : objectifs (EnR, CO ₂)	DIDD
7. Spécificités des îles (dont RUP et COM)	Ifremer + Collectif
8. Respect/contrôle, outils afférents (incitations, taxes CO ₂)	MEEDDAT
9. Outils de régulation pour les biocarburants	MEEDDAT
10. Budget recherche énergie et arbitrage par source d'énergie	Futuribles
11. Structuration et gestion du réseau électrique (pour EnR)	ADEME
12. Technologies de stockage et de transport énergétique (dont hydrogène)	SAIPEM
13. Évolution des moyens de production centralisés	EDF R&D
ZONES D'EXPLOITATION	
14. Répartition démographique Monde dont littoral UE	Futuribles + Ifremer
15. Planification régionale des zones marines (EnRM)	ADEME
16. Acceptabilité sociale ; Formation/éducation (écologie et environnement)	Ifremer
17. Évolution des usages en mer et conflits (transport, pêche, etc)	MEEDDAT
18. Adaptation de la réglementation (Zones réglementées, procédures)	MEEDDAT
19. Impacts des EnRM (hors marémoteur)	Ifremer
ÉNERGIES RENOUVELABLES MARINES	
20. Courants	EDF R&D
21. Marée	EDF R&D
22. Vagues	ECN + Ifremer
23. Biomasse	Ifremer
24. Éolien offshore	SAIPEM
25. Thermique	Ifremer
26. Pression osmotique	Veolia
27. Solutions technologiques hybrides (hybridation des usages)	Collectif
R & D ÉNERGIES RENOUVELABLES MARINES	
28. Potentiel de nouveaux gisements de ressources marines	Ifremer + Collectif
29. Connaissance du milieu et des impacts	Ifremer + Collectif
30. Jeu des acteurs EnRM public -privé (dont formation R&D)	DCNS + Ifremer

ANNEXE 5 : HYPOTHÈSES SUR LES NIVEAUX DE DÉVELOPPEMENT PAR TYPE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE MARINE

Technologies	Hypothèse 1 (H1)	Hypothèse 2 (H2)	Hypothèse 3 (H3)	Hypothèse 4 (H4)
V20 Courants (Hydrolien) Électricité	Technologie bridée par les problèmes (coûts) de maintenance : restriction aux hydroliennes en surface (partie de la structure porteuse aérienne)	Hydroliennes sous-marines (Exploitation des courants de marée uniquement ; pas de conflit d'usage en surface)	Exploitation avec hydroliennes en grande profondeur : machines plus puissantes et exploitation des courants océaniques	
V21 Marée Électricité	Sites naturellement favorables (faible profondeur et marée fort) exploitation à visée uniquement électrique	Sites développés en marémoteur et autre usage (aquaculture)	Pas de développement	
V22 Vagues Électricité Eau	Exploitation en faible profondeur proche de la côte (y compris orientation de brise lames pour plus de régularité)	Exploitation au large, 50-100 m d'eau (+ de ressources) si coûts acceptables	Exploitation limitée aux sites isolés	
V23 Biomasse Tout	Fabrication extensive sur foncier maritime aménagé	Développement à l'étranger (importé en France)	Application limitée à des produits high tech	Systèmes High Tech, Fabrication intensive à terre, OGM Multi-applications
V24 Éolien offshore Électricité	Simple adaptation des éoliennes terrestres à l'offshore avec baisse des coûts. Développement limité	Développement d'éoliennes spécifiquement offshore (encore – chères + maintenance)	Développement d'éoliennes flottantes et accès à davantage de ressources	
V25 Thermique Électricité Eau Froid	Applications froid-climatisation (+ pompes à chaleur) Usages électricité-eau pour sites isolés tropicaux	Applications froid-climatisation (+ pompes à chaleur) Usages électricité-eau dans zones tropicales	H2 + valorisation biologique et des minéraux des eaux profondes	
V26 Pression osmotique Eau Électricité	Mise au point de membranes économiques. Microcentrales	Pas de compétitivité	Rupture technologique (nano-bio technologie de pompe à sel ; électro osmose)	
V27 Solutions technologiques hybrides	Développement indépendant. Pas de synergies sauf niches très favorables	Développement opportuniste (sites multi – usages)	Développement volontariste	



ANNEXE 6 : LES QUATRE SCÉNARIOS POSSIBLES

SCÉNARIO 1 : CRISE, URGENCE ÉNERGÉTIQUE.

Combinaison : A3, B3, C4, E2 (en jaune).
Déterminant : marché.

Traduction sur les technologies : investissement essentiellement dans les technologies éprouvées.

Composante	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4
A - Cadrage monde	A1 Coopération mondiale énergie – climat	A2 choc psycho-climatique et coopération	A3 Crise énergétique et opportunités	A4 Chacun pour soi
B - Europe et France Système énergétique	B1 Objectifs non tenus et pragmatisme	B2 Sécurité et volontarisme écologique (diversification)	B3 Priorités industrielles (technologies éprouvées ou marché mondial)	B4 Marché de niches
C - Zones d'exploitation	C1 Exploitation concertée et intégrée	C2 Zonage planifié	C3 Zonage décentralisé et conflictuel	C4 Zonage négocié
E -R&D énergie marine	E1 Peu d'évolution	E2 Crise et opportunité	E3 Sauts technologiques et partenariats multiples	

Contexte : crise énergétique et compétition économique.
Enjeu énergie : partenariats technologiques et compétition sur ce marché.
Soutien politique : que le meilleur gagne ! Investissement de clusters d'opérateurs privés Marketing du démonstrateur.
Développement conflictuel : parcs dédiés sites multi-usages.
Recherche : développement et études d'impacts.
Impacts technologies : technologies éprouvées.

Courants (H1 ou pas de développement) : restriction aux hydroliennes de surface ou pas de développement.

Marée (H2) : sites développés et autre usage (aquaculture).
Vagues (H1 ou pas de développement) : proche de la côte (40 m d'eau) ou pas de développement.
Biomasse (H1 + H2) : extensive sur foncier aménagé + développement à l'étranger.
Éolien (H1) : adaptation des éoliennes terrestres.
Thermique (H2) : climatisation pour le Nord et froid - électricité - eau pour sites isolés et zones tropicales.
Osmotique (H2) : pas de développement.
Hybrides (H2) : développement sites multi-usages, surtout : marée moteur, éolien, biomasse et source froide pour thermique.

Remarque : la notation (H1, h2...) par technologie fait référence au niveau de développement présenté dans le tableau de l'annexe 5.

SCÉNARIO 2 : COOPÉRATION VERTUEUSE PAR NÉCESSITÉ.

Combinaison : A1, B2, C1, E3 (en jaune).
Déterminants : Politique mondiale pour durabilité.

Traduction technologies : Volontarisme et efficacité.

Composante	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4
A - Cadrage monde	A1 Coopération mondiale énergie – climat	A2 choc psycho-climatique et coopération	A3 Crise énergétique et opportunités	A4 Chacun pour soi
B - Europe et France Système énergétique	B1 Objectifs non tenus et pragmatisme	B2 Sécurité et volontarisme écologique (diversification)	B3 Priorités industrielles (technologies éprouvées ou marché mondial)	B4 Marché de niches
C - Zones d'exploitation	C1 Exploitation concertée et intégrée	C2 Zonage planifié	C3 Zonage décentralisé et conflictuel	C4 Zonage négocié
E - R&D énergie marine	E1 Peu d'évolution	E2 Crise et opportunité	E3 Sauts technos et partenariats multiples	

Contexte : collaboration mondiale et Kyoto II
Enjeu énergie : investissement public et privé
Soutien public : recherche et technologies les moins matures
Efficacité : stockage de l'énergie intermittente, H2 + hybridation des technologies. Acceptabilité bien concertée (mais peu nécessaire in fine)
Recherche : nouveaux concept et hybridation. Impacts environnementaux. Prise de risque technologique
Impacts sur les technologies : développement efficace et maximaliste des EnRM.

Courants (H3) : hydroliennes de grande profondeur (y.c. courants océaniques). Fort développement.
Marée (H2) : sites développés marémoteur + autre usage, aquaculture). Développement moyen : plus de puissance sur barrages existants + lagon artificiel.
Vagues (H2 + H3) : exploitation loin des côtes (> 50 m d'eau) + sites isolés. Fort développement et grande profondeur.

Biomasse (H4) : fabrication intensive à terre + OGM et multi-produits. Fort développement.
Éolien (H3) : éoliennes flottantes. Fort développement
Thermique (H3) : climatisation au nord, froid - électricité - eau sous les tropiques + valorisation biologique et des minéraux des eaux profondes. Fort développement et synergie avec aquaculture.
Osmotique (H1) : mise au point de membranes économiques ; quelques micro-centrales.
Hybrides (H3) :
- développement volontariste Nord : éolien + vagues (+ solaire flottant) + hydrolien courant quand ressource disponible.
- Développement indépendant : hydrolien marée (proche) ou hybrides possibles.
- Marémoteur : lagon + aquaculture (poissons)
Tropiques : ETM + aquaculture (grâce à ETM) + vagues + solaire flottant + éolien adapté aux cyclones.

SCÉNARIO 3 : PEU D'ÉVOLUTION, CHACUN POUR SOI.

Combinaison : A4, B1, C4, E1 (en jaune)

Déterminant : Intérêt national et sécurité énergétique.

Traduction technologies : développement minimaliste par technologie.

Composante	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4
A - Cadrage monde	A1 Coopération mondiale énergie – climat	A2 choc psycho-climatique et coopération	A3 Crise énergétique et opportunités	A4 Chacun pour soi
B – Europe et France Système énergétique	B1 Objectifs non tenus et pragmatisme	B2 Sécurité et volontarisme écologique (diversification)	B3 Priorités industrielles (technologies éprouvées ou marché mondial)	B4 Marché de niches
C - Zones d'exploitation	C1 Exploitation concertée et intégrée	C2 Zonage planifié	C3 Zonage décentralisé et conflictuel	C4 Zonage négocié
E - R&D énergie marine	E1 Peu d'évolution	E2 Crise et opportunité	E3 Sauts technologiques et partenariats multiples	

Contexte : peu de coopération mondiale
Enjeu énergie : montée des tensions et protectionnisme, sécurité. Besoin en eau douce au nord.
Soutien public : sécurité mais à faible coût :
- pas de décentralisation des réseaux,
- fin des tarifs de rachat électrique après 2020.
Parcs dédiés mais développement indépendant des technologies.
Recherche : chacun sa technologie + études d'impact.
Impacts sur les technologies : développement minimaliste, parcs dédiés par technologie

Courants (H2) : Hydroliennes sous-marines ; faible développement.
Marée (H1) : Sites naturellement favorable, visée électrique uniquement.
Vagues (H1) faible développement Proche des côtes
Biomasse (H3) production limitée à des produits high tech.
Éolien (H1) : faible développement. Adaptation des éoliennes terrestres.
Thermique (H1) faible développement : climatisation au Nord, froid – électricité - eau pour sites isolés sous les tropiques.
Osmotique (H2) : pas de développement.
Hybrides (H1) : développement indépendant par technologie.

SCÉNARIO 4 : DÉVELOPPEMENT LOCAL AUTONOME.

Combinaison : A4 (ou A3), B4, C3, E2 (en jaune).

Déterminant : Développement local avec prise de risque.

Traduction technologies : très différencié selon les régions côtières, marché de niches.

Composante	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4
A - Cadrage monde	A1 Coopération mondiale énergie – climat	A2 choc psycho-climatique et coopération	A3 Crise énergétique et opportunités	A4 Chacun pour soi
B – Europe et France Système énergétique	B1 Objectifs non tenus et pragmatisme	B2 Sécurité et volontarisme écologique (diversification)	B3 Priorités industrielles (technologies éprouvées ou marché mondial)	B4 Marché de niches
C - Zones d'exploitation	C1 Exploitation concertée et intégrée	C2 Zonage planifié	C3 Zonage décentralisé et conflictuel	C4 Acceptation progressive
E - R&D énergie marine	E1 Peu d'évolution	E2 Crise et opportunité	E3 Sauts technologiques et partenariats multiples	

Contexte : montée des tensions et protectionnisme, sécurité. Besoin en eau douce au nord. Biocarburants rentables (arrêt défiscalisation entre 2015 et 2020).
Soutien public : recherche et soutien décentralisé des technologies (appel d'offre).
Décentralisation réseau et développement des technologies : selon localisation.
Recherche : technologies (opportunités locales) et régulation du réseau électrique. Prise de risque technologique pour démonstrateurs en développement local.
Risque du scénario : acceptabilité sociale des expérimentations.
Impacts sur les technologies : marché de niches (effet d'échelle seulement au niveau mondial).

Courants (H1) : faible développement ; niches hors France.
Marée (H3) : sites naturellement favorables, visée électrique uniquement ; pas ou peu de développement.
Vagues (H1 + H3) : proche des côtes. Développement moyen à faible.
Biomasse (H4) production limitée à des produits high tech en intensif, à terre ; apparition d'OGM multi-applications.
Éolien (H2 régions cibles ; H1 ailleurs). développement moyen. Éoliennes flottantes (Bretagne et Languedoc Roussillon) + éoliennes classiques ailleurs.
Thermique (H3) fort développement ; climatisation au Nord + froid – électricité - eau (tropiques), synergie avec aquaculture.
Osmotique (H1) : un projet pilote de microcentrale.
Hybrides (H1) : développement indépendant des technologies, synergies à l'opportunité.

ANNEXE 7 : ÉVALUATION CHIFFRÉE DES SCÉNARIOS POSSIBLES ET DU SCÉNARIO NORMATIF

Technologie	Scénario 1 - Crise et urgence			Scénario 2 - Coopération			Scénario 3 - Chacun pour soi			Scénario 4 - Local autonome			Scénario normatif		
	Puissance installée [MW]	Production électrique [TWh/an]	Production énergétique [MTep/an]	Puissance installée [MW]	Production électrique [TWh/an]	Production énergétique [MTep/an]	Puissance installée [MW]	Production électrique [TWh/an]	Production énergétique [MTep/an]	Puissance installée [MW]	Production électrique [TWh/an]	Production énergétique [MTep/an]	Puissance installée [MW]	Production électrique [TWh/an]	Production énergétique [MTep/an]
Éolien	4000	12,0	1,03	10000	30,0	2,58	2000	6,0	0,52	4000	12,0	1,03	4000	12,0	1,03
ETM clim. métropole MWf	400	0,7	0,06	800	1,5	0,12	200	0,4	0,03	800	1,5	0,12	15	0,1	0,01
ETM élec. tropiques	50	0,4	0,03	115	0,7	0,06	25	0,2	0,02	115	0,7	0,06	200	1,4	0,12
ETM clim. tropiques MWf	400	0,7	0,06	2000	3,6	0,31	200	0,4	0,03	2000	3,6	0,31	40	0,3	0,02
ETM eau tropiques	1,7 Mm³/an			3,3 Mm³/an			0,8 Mm³/an			3,3 Mm³/an			0,8 Mm³/an		
Courants	100	0,3	0,03	1000	3	0,26	200	0,6	0,05	50	0,2	0,01	400	1,4	0,12
Marémoteur	400	1,0	0,09	600	1,5	0,13	240	0,6	0,05	240	0,6	0,05	500	1,3	0,11
Vagues	100	0,3	0,03	2000	6	0,52	100	0,3	0,03	150	0,5	0,04	200	0,8	0,07
Biomasse	1 site soit 2000 ha [Guyane ou Nlle Calédonie]			10 sites soit 20000 ha			Autre usage			5 sites soit 10 000ha			2000 ha		
Osmotique	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
BILAN	1,38 MTep/an			6,48 MTep/an			0,73 MTep/an			2,87 MTep/an			1,53 MTep/an		
Électricité	4650	14,0	1,21	13715	41,2	3,55	2565	7,7	0,67	4555	14,0	1,19	5300	16,9	1,45
Climatisation	800	1,4	0,12	2800	5,1	0,43	400	0,8	0,06	2800	5,1	0,43	55	0,4	0,03
Carburant			0,05			2,50			négligeable			1,25			0,05
Eau	1,7 Mm³/an			3,3 Mm³/an			0,8 Mm³/an			3,3 Mm³/an			0,8 Mm³/an		

Crédits photos

Couverture

En fond : © Ifremer / G. Véron

Parc éolien offshore de Nysted (Danemark)

4^e de couverture

Vignettes, de gauche à droite :

- *Usine marémotrice de La Rance (France)*
© EDF
- *Maquette du Système Autonome Électrique de Récupération de l'Énergie des Vagues (SEAREV)*
© École Centrale de Nantes
- *Mise à l'eau du prototype d'hydrolienne Sabella dans l'estuaire finistérien de Bénodet (France)*
© E. Donfut / Balao
- *Hydrolienne Seagen installée à Strangford Narrows (Irlande du Nord)*
© Marine Current Turbines Ltd



Pages intérieures

Page 6 © Pelamis Wave Power Ltd

Le Pelamis, système de récupération de l'énergie des vagues, en test à l'EMEC (European Marine Energy Center) en Écosse

Page 7 © Marine Current Turbines Ltd

Installation de l'hydrolienne Seagen sur le site de Strangford Narrows (Irlande du Nord) par la barge-grue Rambiz

Page 8 © Pelamis Wave Power Ltd

- *Le Pelamis, système de récupération de l'énergie des vagues, en test à l'EMEC (European Marine Energy Center) en Écosse*
- *Vue d'artiste d'un parc de Pelamis*

Page 15 © Ifremer

Vue d'artiste d'un projet d'énergie thermique des mers à Tahiti

Page 28 © E. Donfut / Balao

Mise à l'eau du prototype d'hydrolienne Sabella dans l'estuaire finistérien de Bénodet (France)

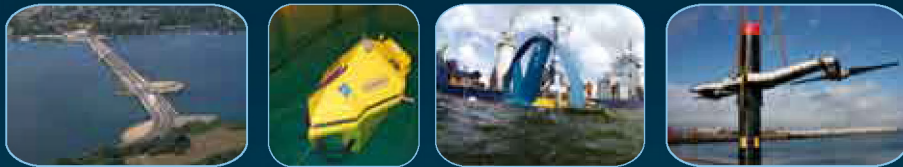
Page 31 © EDF

Vitesse maximale du courant de marée en vive-eau moyenne (données issues du modèle Télémac EDF/DRD)

Page 35 © EDF

Usine marémotrice de La Rance (France)

Dans le cadre de son projet interne éco-responsable, l'Ifremer a confié l'impression de cette brochure à l'imprimerie Caractère, entreprise certifiée ISO 14001. Ce document est imprimé avec des encres à bases d'huile végétale sur du papier issu de forêts gérées durablement PEFC.



Bien que peu cité dans la liste des énergies renouvelables, l'océan en est un immense réservoir : énergie des courants, des marées et des vagues, énergie éolienne en mer, énergie thermique, pression osmotique, biomasse marine... L'étendue de l'ensemble de ses façades maritimes permet à la France de disposer d'un potentiel très important de développement de ces énergies, notamment outre-mer. Elle a d'ailleurs été pionnière en la matière en construisant dans les années 60 l'usine marémotrice de La Rance, toujours en activité.

Conscient de ces enjeux, le Président de l'Ifremer a lancé en mars 2007 un travail de réflexion prospective sur les énergies renouvelables marines à l'horizon 2030. Appuyés par le bureau d'étude Futuribles, une vingtaine de partenaires français représentant les principaux acteurs du secteur ont participé à ce travail : ministères, industriels, instituts de recherche, agences spécialisées. L'objectif était d'apporter des éléments de réponse aux trois questions suivantes :

- Quelles sont les technologies au service de la production d'énergie 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 sur l'environnement ?

Le travail conduit a permis de décrire un éventail de futurs possibles en mettant en exergue les plus contrastés.

L'un des scénarios s'appuie sur l'objectif du Grenelle de l'Environnement d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables en 2020 dans la consommation finale d'énergie, en indiquant ce que pourraient représenter, par filière, 7.7 % d'énergies marines (5.2 % d'éolien offshore et 2.5 % d'autres énergies marines) de cet objectif. Les efforts à mettre en place sont conséquents : renforcement des compétences françaises dans le domaine par un soutien à la recherche, meilleur soutien aux technologies en développement, mise en place de premiers démonstrateurs en mer, etc. Dans ce marché tout juste émergent, il est encore temps pour la France de s'approprier ces technologies et d'en faire des atouts compétitifs de long terme.

Ifremer

155, rue Jean-Jacques Rousseau
92138 Issy-les-Moulineaux Cedex
Tél : (33) 01 46 48 21 00
Fax : (33) 01 46 48 21 21
www.ifremer.fr