

ÉNERGIE MARINE

RÉSUMÉ

Les pays de l'Union européenne se sont engagés à ce que l'ensemble des énergies renouvelables représente en 2020 au moins 20 % de leur consommation énergétique. Dans ce contexte, la mer possède un potentiel énergétique actuellement peu exploité qui se doit de participer à cette ambition. Les principaux types d'énergie marine actuellement développés sont :

- l'énergie houlomotrice fournie par les vagues
- l'énergie des marées qui peut être captée de deux manières différentes :
 - soit en exploitant les variations du niveau de la mer : ce sont les usines marémotrices
 - soit en exploitant les courants de marée par l'utilisation de turbines ou « hydroliennes »
- l'énergie thermique en utilisant le principe de la pompe à chaleur entre la surface et le fond des mers

Ces filières ont des atouts à faire valoir. Cependant, elles n'ont jusqu'à présent jamais vraiment décollé et les techniques développées à ce jour relèvent du domaine de la recherche. Certaines font déjà l'objet d'approches semi-industrielles encourageantes. Leur développement devra se faire dans le respect du milieu marin.

► L'énergie des vagues (Energie houlomotrice)

La puissance des vagues est une forme concentrée de l'énergie du vent, elle-même issue de l'énergie solaire. Des prototypes installés sur les côtes puis en mer ont été testés dans divers pays (Japon, Inde, Portugal, Royaume-Uni, Norvège). On peut citer les programmes LIMPET en Angleterre, le système Pélamis testé au Portugal. Le projet Français SEAREV pourrait être implanté au large de l'île d'Yeu. Ce sont des systèmes lourds et techniquement difficiles à rentabiliser.

► L'énergie des marées

L'usine marémotrice du barrage de la Rance fournit de l'électricité au réseau depuis 1966. Sa puissance moyenne utile est de 60 MW. Peu de nouveaux projets se basent sur cette technique



Le barrage de la Rance (France)



Le Prototype SeaGen de 1,2 MW (Belfast)

En Europe, le Royaume-Uni est particulièrement actif dans le développement de l'énergie houlomotrice : le Centre européen d'énergie marine (EMEC) est installé en Ecosse et le gouvernement britannique a publié en 2010 son plan d'action pour l'énergie marine avec pour objectif d'obtenir 15 à 20 % de l'énergie électrique du pays par les énergies marines (hydroliennes, énergie houlomotrice) d'ici 2050. Plusieurs projets de développement en France (Wawe Roller, SEAREV), ainsi qu'en Australien (Perth Wawe Project). Au total, une cinquantaine de projets sont en cours de développement dans le monde.

► L'énergie thermique des mers ou océanothermie

Dans toute la zone intertropicale la température de l'eau de l'océan reste uniformément proche de 4°C à 1000 m de profondeur alors qu'en surface elle est supérieure à 20°C. Ce phénomène naturel peut être utilisé pour produire de l'énergie suivant le principe des pompes à chaleur. Du fait de leur faible rendement thermodynamique, ces installations doivent brasser des quantités d'eau très importantes de plusieurs m³/s par MW produit pour produire plus qu'elles ne consomment.

1. L'ÉNERGIE MARINE DANS LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS

Selon le Commissariat général au développement durable, la France produit environ 1,3 à 1,4 millions de TWh d'électricité, dont 12% d'hydroélectricité et quelques % à partir d'éoliennes.

C'est au travers du développement d'énergies renouvelables et faiblement productrices de gaz à effet de serre qu'il faut s'orienter pour participer pleinement au projet européen. L'énergie marine se place dans ce bon créneau et il est intéressant d'en esquisser ses potentiels techniques, économiques et environnementaux, bien qu'aujourd'hui elle ne contribue qu'à 0,4 % de la production hydraulique française avec l'usine de la Rance.

L'ordre de grandeur de l'énergie mondialement dissipée annuellement par les seuls courants de marée est évalué à plus de 20 millions de TWh. En ce qui concerne la France, métropole, et territoires sous juridiction française, la surface totale des zones maritimes dépasse largement les 10 millions de km² et représente un potentiel de 3000 MW soit 27 TWh par an. Selon une étude « réaliste » d'EDF, les ressources de la France métropolitaine sont de l'ordre de la dizaine TWh par an.

Au vu de ces chiffres, l'énergie marine ne pourra être que d'un faible apport à la demande, mais elle pourrait apporter des solutions viables dans des conjonctures locales, comme en Bretagne où le rapport consommation/production d'énergie électrique est très déficitaire (la production totale d'électricité représente 8,5 % de sa consommation en 2010).

2. L'ÉNERGIE DES VAGUES (ÉNERGIE HOULOMOTRICE)

2.1 GÉNÉRALITÉS

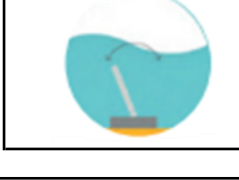
Les projets houlomoteurs sont généralement de petite à moyenne échelle, allant de quelques kW à plusieurs MW. Par exemple, le projet Pelamis en Écosse avait des unités de 750 kW (Figure 1). Encore en phase de développement et de démonstration, ce qui entraîne des coûts élevés, estimés entre 200 et 500 €/MWh, avec des perspectives de baisse significative à mesure que la technologie mûrit.

La puissance des vagues est une forme concentrée de l'énergie du vent, elle-même issue de l'énergie solaire. On chiffre généralement cette puissance en kW par mètre de front de vague (kW/m). Une houle de 7 à 10 s de période ayant une amplitude de 2 m transporte en pleine mer un flux de puissance de 40 à 50 kW/m.

En moyenne annuelle, sur les côtes de l'Atlantique la puissance disponible n'est que de 25 kW/m et de 4 à 11 kW/m en Méditerranée. Plusieurs modules peuvent être regroupés en unités de production sur de grandes surfaces avec un objectif raisonnable de l'ordre de 30 MW/km².

2.2. TECHNOLOGIES DISPONIBLES

Il existe 8 technologies pour récupérer l'énergie des vagues (voir tableau 1) :

	Chaîne flottante articulée (aussi appelé serpent de mer) Le système de la chaîne flottante articulée est constitué de flotteurs perpendiculaires aux vagues et alignés dans le sens du vent. Ils sont ancrés au fond marin et oscillent au gré des vagues et de la houle. Cette oscillation comprime, via un piston, un fluide hydraulique qui entraîne une turbine, et l'énergie motrice est convertie en électricité via un générateur.
	Colonne à oscillation verticale Ce système est basé sur une force centrifuge activée grâce à une structure flottante installée à la surface de la mer, composée de masselottes qui se servent des mouvements de la mer pour activer une pompe qui servira ensuite à mettre de la pression sur un fluide hydraulique et à faire tourner une turbine qui produira de l'électricité
	La colonne d'eau La colonne d'eau est une structure flottante en acier ou en béton, ouverte à la base afin de laisser l'eau rentrer. Le mouvement provoqué par les vagues fait monter et descendre le niveau d'eau dans la colonne, ce qui comprime l'air situé dans la partie supérieure et active une turbine qui produit de l'électricité.
	La paroi oscillante immergée Le mécanisme consiste en une structure entièrement immergée et composée d'une paroi carrée fixée sur une tige centrale. La paroi oscille en fonction du mouvement des fonds marins et actionne, grâce à son mouvement, une turbine qui fait tourner un alternateur.

	Capteur de pression immergé Ce concept permet de capter, grâce à un dispositif ancré sur le fond marin, le mouvement orbital des vagues en comprimant par une logique de montées-descentes, un fluide hydraulique qui créera de l'énergie. Le turbinage est effectué à terre via un réseau de capteurs connectés entre eux.
	Plateforme à déferlement Aussi appelées absorbeurs à déferlement, ce système piège l'eau de la crête des vagues afin de créer une surpression dans un réservoir d'eau qui recueille l'eau des vagues entrant en contact avec un plan incliné et la renvoie à la mer après un passage par une turbine.
	Système à masses rotatives Le système consiste en un dispositif creux avec un gyroscope lesté. Sous l'effet des vagues, le poids tourne et produit de l'électricité.
	Système à flotteur Il s'agit d'un dispositif flexible semi-submergé qui ne dépend que du déferlement, car il est placé parallèlement aux vagues. La vague traverse le système et produit de l'électricité lors de ses mouvements verticaux.

Tableau 1 : Familles de technologies liées à l'énergie houlomotrice

2.3. EXEMPLES DE RÉALISATIONS

Parmi les exemples les plus marqués on peut noter les dispositifs suivants :

Structure Pelamis (chaîne flottante articulée) (Figure 1), initialement testée au Portugal, d'une puissance de 750 kW. Elle est composée de 5 flotteurs articulés, pèse 1 350 tonnes et a une longueur globale de 180 mètres pour un diamètre de 4 mètres. La puissance moyenne annuelle est d'environ 0,3 MW.

Prototypes Oyster (colonne à oscillation verticale) développés par Aquamarine Power et testés en Écosse (Oyster 1 d'une puissance de près de 300 kW testé dès 2009, Oyster 2 en projet d'une puissance de 2,4 MW).

Système Wavebob (paroi oscillante immergée), développé depuis 1999 et testé depuis 2006 en Irlande.

Prototype CETO (Capteur de pression immergé), développé par Carnergie en Australie (unité CETO III en phase de commercialisation depuis 2009 avec projets à l'international, un prototype de ce type est actuellement immergé par EDF dans les eaux de l'île de La Réunion).

Prototype Oceanlinx (Colonne d'eau) développé en Australie, d'une puissance de 1 MW (Figure 2).



Figure 1 : Structure Pelamis (Portugal)



Figure 2 : Système Oceanlinx (Australie)

Autres projets

Différents systèmes sont en cours d'évaluation sur divers sites d'essais, dont l'EMEC (European Marine Energy Center), situé en Écosse à Billia Croo, sans que l'on puisse aujourd'hui anticiper quelle sera la filière technologique la plus intéressante.

Installation Wavegem, réalisée par le consortium IHES piloté par Gaps Techno, sur le site SEM-REV (Figure 3), qui dispose d'une puissance totale de 150 kW (80 % houlomoteur, 20 % solaire). Un dispositif de stockage, composé « de supercondensateurs » pour le stockage court terme et de batteries pour le stockage moyen terme », est intégré au prototype (avec une capacité de stockage de 300 kWh).

Le projet français (S3) est en cours de tests à l'École Centrale de Nantes qui utilise des longs tubes immergés (10 tubes creux de 300 m de long et de 2,5 m de diamètre), incluant des polymères électroactifs qui se déforment sous l'action de la houle en convertissant directement l'énergie des vagues en électricité sans pièces mécaniques intermédiaires. La puissance visée est de l'ordre de 400 kW. La zone de test est à Monaco.

La société britannique Sea Wave Energy Limited (SWEL) est à l'origine d'une technologie de conversion innovante: le Waveline Magnet (WLM). Le dispositif se compose d'un ensemble de flexibles raccordés entre eux au moyen d'un système d'alimentation, celui-ci jouant le rôle de colonne vertébrale. Le WLM flotte à la surface de l'eau (ligne d'onde) et utilise l'énergie des vagues pour fonctionner (Figure 4).



Figure 3 : Plateforme Wavegem (Croisic)



Figure 4 : Le système SWEL (Royaume-Uni)

Le potentiel énergétique disponible, en fonction des types de technologies liées à l'énergie houlomotrice, est présenté sur la figure 5. L'annexe 1 présente les différents sites en exploitation et en cours de projet en Europe

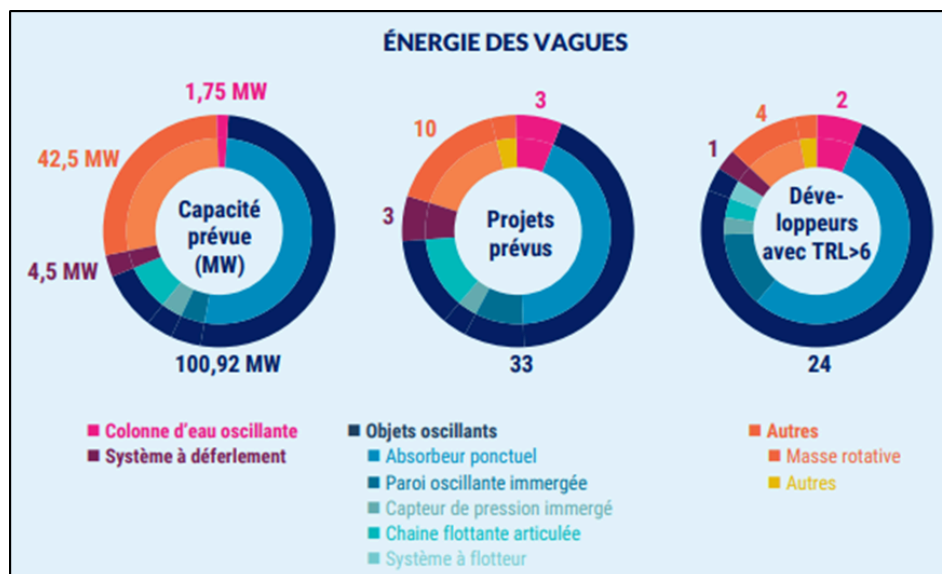


Figure 5 : Capacité projetée et nombre de développeurs de projets par technologie d'ici 2025

2.4. EXEMPLES DE RÉALISATIONS

L'énergie houlomotrice provient d'une **source inépuisable**, ce qui présente un grand avantage pour la planète. Elle dispose aussi de nombreux autres **atouts** :

- Une énergie prévisible et non-intermittente : les vagues sont prévisibles plus d'une semaine à l'avance, contrairement à d'autres ressources renouvelables intermittentes.
- Une large surface d'exploitation : la quantité d'énergie générée par les vagues est peu importante, mais est compensée par la surface d'exploitation très vaste (71 % de la surface de la terre).
- Une énergie plus fiable au niveau des saisons : la puissance des vagues dépend de la saison, avec une puissance plus importante en hiver. Les vagues sont également plus puissantes le soir - ce qui coïncide avec les périodes de forte demande énergétique.

- Une énergie propre : l'énergie houlomotrice est une énergie renouvelable. De plus, son exploitation implique un impact environnemental minime.
- Une surface d'exploitation moins à risque : dans le contexte d'une augmentation prévisible de la population mondiale dans les années à venir, cette source d'énergie pourra offrir les espaces suffisants des possibilités pour installer de nouveaux sites de production d'énergies renouvelables.

Les contraintes et **inconvénients** liés à l'énergie houlomotrice sont :

- Une énergie prévisible et non-intermittente : les vagues sont prévisibles plus d'une semaine à l'avance, contrairement à d'autres ressources renouvelables intermittentes.
- Une exploitation peu maîtrisée : à ce jour, la plupart des systèmes produisant de l'énergie houlomotrice peinent à s'adapter aux conditions météorologiques défavorables. En effet, ces technologies sont peu résistantes aux conditions les plus extrêmes, comme les tempêtes par exemple.
- Un coût élevé : du fait de son exploitation encore peu maîtrisée, le coût d'exploitation de l'énergie houlomotrice est élevé. Les structures nécessitent des installations lourdes, pour peu de puissance. Il faut donc un investissement important, difficile à rentabiliser avec une production peu importante.
- Une rentabilité difficile à évaluer : beaucoup de critères sont encore inconnus, ce qui rend difficile d'évaluer la rentabilité des centrales houlomotrices. Il faut considérer de nombreux éléments, comme le coût du raccordement électrique pour un système situé en pleine mer et loin du réseau de distribution, les coûts d'accessibilité et de transport lors de l'implantation en mer, les coûts d'entretien des équipements dans un milieu aussi hostile que les océans.
- En dépit de son caractère propre, la création d'usines houlomotrices pourrait entraîner une potentielle pollution visuelle et impacter la faune et la flore.

2.5. RENDEMENTS DE L'ÉNERGIE HOULOMOTRICE

Le rendement de l'énergie houlomotrice fluctue suivant le type de système. Les batteurs oscillants ont les meilleurs rendements (facteurs de charge équivalents à 40 %), suivis des flotteurs oscillants (jusqu'à 20 %). Les systèmes à franchissement et les colonnes d'eau oscillantes ont un rendement inférieur, avoisinant 10 %.

3. L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE DANS LES ESTUAIRES

L'énergie marémotrice consiste à utiliser le marnage dans des zones littorales pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage, selon la marée haute et la marée basse se succédant. Le potentiel de l'énergie marémotrice dans le monde est estimé à près de 380 TWh/an, soit 1,5 % à 2 % de la production électrique mondiale annuelle.

C'est une énergie intermittente, mais très prédictible : le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil. A chaque marée, on stocke le flux de la marée en fermant un barrage établi au travers d'une baie ou d'un estuaire pour utiliser l'énergie potentielle créée par le marnage, comme dans un barrage classique. Les turbines fonctionnent au flux et au reflux. En conjuguant turbinage et pompage, une centrale marémotrice peut constituer un moyen de stockage

L'énergie marémotrice a été utilisée depuis fort longtemps (Figure 6). Les premiers « moulins à marée » ont été construits au Moyen-Âge dans la région de Londres. Les sites adaptés à cette technique sont peu nombreux ; ils se concentrent dans les régions où, du fait notamment des conditions hydrodynamiques, l'onde de marée (inférieure au mètre loin des côtes) est amplifiée avec un marnage (différence de hauteur d'eau mesurée entre les niveaux de pleine mer et de basse mer consécutives) de 7 à 10 mètres. C'est notamment le cas dans l'estuaire de la Rance.

Les travaux du barrage de la Rance, dans la Baie du Mont St Michel, ont démarré en 1961, et le chantier de l'usine fut définitivement achevé en 1966. Depuis son raccordement au réseau en 1967, l'usine de la Rance dispose de 24 « groupes bulbes » possédant chacun un alternateur de 10 MW, soit une puissance de crête de 240 MW (la puissance moyenne utile est de 60 MW, soit un taux de disponibilité de 25 %).

L'exploitation optimale de l'énergie marémotrice nécessite des infrastructures importantes, qui peuvent modifier notablement les équilibres écologiques dans des zones généralement fragiles. Les coûts de maintenance sont aussi relativement élevés.

L'usine marémotrice de la Rance est la principale source d'électricité de la Bretagne (Figure 7). C'est un des premiers programmes d'énergie marine mené à son terme, ce qui permet de faire un bilan sérieux de son fonctionnement. Le taux de disponibilité de l'installation est d'environ 25 %, taux qui est lié à la périodicité et à l'amplitude des marées. L'usine produit 0,5 à 0,6 TWh par an, pour une durée de fonctionnement nominal de 2000 à 2500 heures par an. Son coût de production est de l'ordre de 100 à 150 € le MWh.



Figure 6 : Le moulin à marée de l'Île Bréhat



Figure 7 : Le barrage de la Rance (EDF)

Les usines marémotrices présentes dans le monde, en dehors du complexe de La Rance

La Corée du Sud et le Royaume-Uni sont les principaux pays envisageant actuellement un développement significatif de l'énergie marémotrice. Le Royaume-Uni dispose de nombreux sites propices à l'implantation de centrales marémotrices. Leur potentiel en puissance est estimé à 6 000 MW, soit 25 fois la capacité installée de la centrale de la Rance. Des réalisations modestes ont ensuite été lancées en Russie (Kislaya Guba d'une puissance de 1,7 MW, mise en service en 1968), en Chine (Jiangxia d'une puissance de 3,2 MW, 1980) et au Canada (Annapolis Royal d'une puissance de 20 MW, 1985).

Depuis 2000, 2 centrales marémotrices ont été mises en service en Corée du Sud (dont celle de Sihwa en 2011) et une autre au Royaume-Uni. Inaugurée en 2012, l'usine marémotrice sud-coréenne de Sihwa présente une puissance installée du même ordre de grandeur que la Rance (puissance 254 MW pour une production estimée à 550 GWh/an). La construction d'une centrale marémotrice plus grande encore (d'une capacité de l'ordre de 1 000 MW) avait démarré à Incheon, mais ce projet a été abandonné. Un autre projet coréen est enfin à l'étude dans la baie de Garorim.

Le Royaume-Uni procède pour sa part à des études de faisabilité mais l'acceptabilité de tels projets reste problématique. En mars 2015, le gouvernement britannique a annoncé vouloir construire un lagon artificiel pour installer une centrale marémotrice dans la baie de Swansea (côte du Pays de Galles). La Russie a également des projets à l'étude. Au Canada, la centrale marémotrice d'Annapolis Royal (Nouvelle Ecosse), d'une puissance de 20 MW, est en exploitation depuis 1984.

Au-delà de ceux déjà cités, d'autres pays présentant des conditions environnementales appropriées et pourraient développer des projets marémoteurs à moyen terme : l'Argentine, l'Australie, le Canada, la Chine et l'Inde. Très peu exploité à ce jour, le potentiel de l'énergie marémotrice dans le monde est estimé à près de 380 TWh/an, soit 1,5 % à 2 % de la production électrique mondiale annuelle.

4. L'ÉNERGIE DES COURANTS DE MARÉE : LES HYDROLIENNES

4.1 GÉNÉRALITÉS

Les hydroliennes transforment l'énergie des courants marins en électricité, comme les éoliennes avec le vent. Des turbines sont implantées sur une structure fixée au sol sous-marin et totalement immergées. Elles récupèrent l'énergie cinétique des courants sous-marins et la transforment en énergie électrique. Leur puissance est proportionnelle à la masse volumique du fluide et au cube de la vitesse de ce fluide au travers des pales.

Ainsi une hydrolienne de 10 m de diamètre produira en sortie d'alternateur 125 kW avec un courant de 2 m/s et plus de 450 kW avec un courant de 3 m/s, en tenant compte de pertes additionnelles. Les zones propices sont celles où la vitesse des courants est supérieure à 1 m/s et la profondeur d'eau est typiquement d'au moins 20 m pour que la machine puisse avoir une puissance suffisante. Une production pouvant dépasser dans les meilleurs sites 100 MW au km² est envisageable.

4.2. PRINCIPES TECHNIQUES

De nombreux concepts d'hydrolienne ont été expérimentés, mais aucun ne s'est vraiment imposé, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Quelques-uns ont donné lieu à des démonstrateurs ou à des réalisations expérimentales mais peu ont donné lieu à une production industrielle. Le Centre européen de l'énergie marine reconnaît six principaux types de convertisseurs d'énergie marémotrice (voir tableau 2).

	Turbine à axe horizontal Les turbines sont équipées d'un rotor unique à pales fixes. Elles comportent de deux à une dizaine de pales suivant la taille. Suivant les modèles, la turbine peut être orientée ou non dans le sens de la renverse de marée. Dans le cas d'une turbine fixe tirant sa production de courants réversibles, le profil des pales est symétrique pour s'adapter au double sens du courant.
	Turbine à axe horizontal Nommées par analogie avec les éoliennes, ces turbines ont un axe perpendiculaire au sens du courant. Les pales sont constituées de foils au tracé hélicoïdal. Les courants traversent des pales parallèles à un arbre en rotation. Ils produisent ainsi de l'électricité, quelle que soit la direction du flux, comme pour les éoliennes verticales.
	Cerf volant marin Le dispositif, fixé au fond de la mer ou à une plate-forme flottante, se déplace dans le courant de marée selon une trajectoire en sablier ou linéaire. Cela augmente la vitesse relative et donc la production d'électricité. Il utilise le courant marin pour maintenir en « vol sous-marin » un grand cerf-volant fixé par un câble au fond. Il est doté d'une turbine produisant de l'électricité
	Dispositif à effet Venturi Le flux d'eau est guidé dans une gaine ou un conduit dont la section se rétrécit en entrée du générateur, ce qui produit une accélération du flux et une puissance disponible plus importante. À l'extrémité du conduit se trouve une turbine qui produit de l'énergie.
	Hydroptère oscillant Le flux d'eau soulève un hydroptère oscillant attaché à un bras. L'aile de l'hydroptère oscille face aux courants marins. Ce mouvement entraîne un vérin hydraulique qui envoie le fluide haute pression vers une turbine pour produire de l'électricité.
	Vis d'Archimède Ces hydroliennes reprennent le mécanisme de la vis sans fin. Le flux passe à travers la spirale d'une roue de forme hélicoïdale. L'appareil se met à tourner et ce mouvement est converti en énergie. Ces dispositifs sont principalement utilisés sur les rivières pour exploiter les petites chutes d'eau et bénéficier de la force de l'eau pour produire de l'électricité.

Tableau 2 : Familles de technologies liées aux hydroliennes

4.3 EXEMPLES DE RÉALISATIONS

En France

La PME bretonne Sabella a immergé en juin 2015 une hydrolienne au large de l'île d'Ouessant (Finistère) qui est la seule à produire de l'électricité en France à l'heure actuelle. Cette réalisation est constituée d'un ensemble de 5 turbines de 10 m de diamètre générant une puissance maxi de 1,5 à 2,5 MW chacune (Figure 8).

Un appel à manifestations d'intérêt pour les fermes pilotes hydroliennes a été lancé fin 2013 (pour des parcs de 4 à 10 machines produisant un minimum de 2 500 MWh par an et par machine. Les deux projets sélectionnés seront implantés au large de Cherbourg :

- 4 hydroliennes de 5,6 MW de puissance cumulée par Engie et Alstom ;
- 7 hydroliennes de 14 MW de puissance cumulée par EDF et Naval Energies. Ces acteurs ont par ailleurs immergé en mai 2016 une deuxième hydrolienne sur leur parc pilote de Paimpol-Bréhat.

À noter également le projet Sabella (SABELLA D10) porté par la société Hydrohélix. Il consiste en un démonstrateur hydrolien pré-industriel. La machine de 10 mètres de diamètre et d'une puissance de 1 MW a été immergée dans le passage du Fromveur, au large de l'île d'Ouessant, en 2016 (Figure 10).

Ferme hydrolienne du Parc de Paimpol-Bréhat

Il constitue l'aboutissement d'un projet mené par EDF initié en 2008. La technologie choisie est celle qui a été développée par la société irlandaise OpenHydro, rachetée par DCNS. Le premier prototype, baptisé « *Arcouest* », assemblé à Brest en Bretagne par les équipes de DCNS, a été immergé le 22 octobre 2011 (Figure 9). La version industrielle finale consiste en deux hydroliennes comprenant chacune quatre turbines d'une puissance unitaire de 0,5 MW crête. Ces hydroliennes sont raccordées au réseau depuis 2016.



Figure 8 : Hydrolienne Sabella



Figure 9 : Hydrolienne l'Arcouest au large de Paimpol

Flowatt est une ferme pilote hydrolienne pilote de 17,5 MW située dans le Raz-Blanchard, Manche, avec sept turbines conçues par Hydroquest et construites par CMN à Cherbourg, prévue pour une mise en service en 2026 et une exploitation de 20 ans.

Poseide (Golfe du Morbihan) : En avril 2018, l'entreprise brestoise Guinard Energies a déployé sur un ancien moulin à marée dans le golfe du Morbihan, la première hydrolienne de sa gamme Poseide 66. Le but est de mener une expérimentation destinée à étudier l'impact environnemental de cette turbine sur la faune pélagique.

Parc d'hydroliennes dans le lit du Rhône à Caluire-et-Cuire : Ce parc constitué de quatre hydroliennes est installé dans le lit du Rhône sur la commune de Caluire-et-Cuire. C'est le premier parc d'hydroliennes fluviales au monde. Les hydroliennes ont été conçues par la société HydroQuest et sont par Hydrowatt. Les quatre hydroliennes, disposées environ tous les cent mètres, développent une puissance unitaire de 320 kW (Figure 10).



Figure 10 : Parc d'hydroliennes fluviales de Caluire



Figure 11 : Le projet Sabella 10

À l'étranger

Le Royaume-Uni est le pays européen le plus avancé du domaine. On relève les installations suivantes :

- Projet Seaflow qui utilise deux turbines jumelles montées sur des piles de 3 à 4 m de diamètres et supportant chacune deux hélices de 8 m de diamètre qui produisent une puissance de 300 kW avec un courant de 2,5 m/s
- Installation test SeaGen, de Stangford Lough en Irlande du Nord (Figure 12). Elle développe une puissance de 1,2 MW pour des courants de 2,4 m/s avec une durée de fonctionnement qui dépasse les 20 heures par jour. Jusqu'à présent ce prototype a livré plus de 800 MWh au réseau électrique Irlandais.
- Ferme hydrolienne d'Orkley-Islands a été installée dans un bras de mer traversé par de forts courants entre la pointe nord-est de l'Écosse et l'île de Stroma, par l'entreprise Meygen. Elle comprend quatre hydroliennes développant une puissance de 1,5 MW chacune.
- Deux projets sont en cours de lancement, le premier comporte un ensemble de 7 machines de 1,5 MW, chacune sera implantée dans l'île galloise de Anglesey et sera opérationnelle en 2011. Le second sera un ensemble de 66 éléments sur une surface de 4,3 km² et sera implanté près des îles Orkney en 2017. Cet ensemble devrait générer une puissance moyenne de 100 MW.
- Projet Delta Streem développé par la société Tidal Energy (Pays de Galle). La turbine, du type à axe horizontal et dotée de trois hélices, développe une puissance de 400 kW. Mise en place en 2015, au large du comté de Pembroke, au sud-ouest du Pays de Galles, le prototype y séjournera pour une période de test (Figure 13).

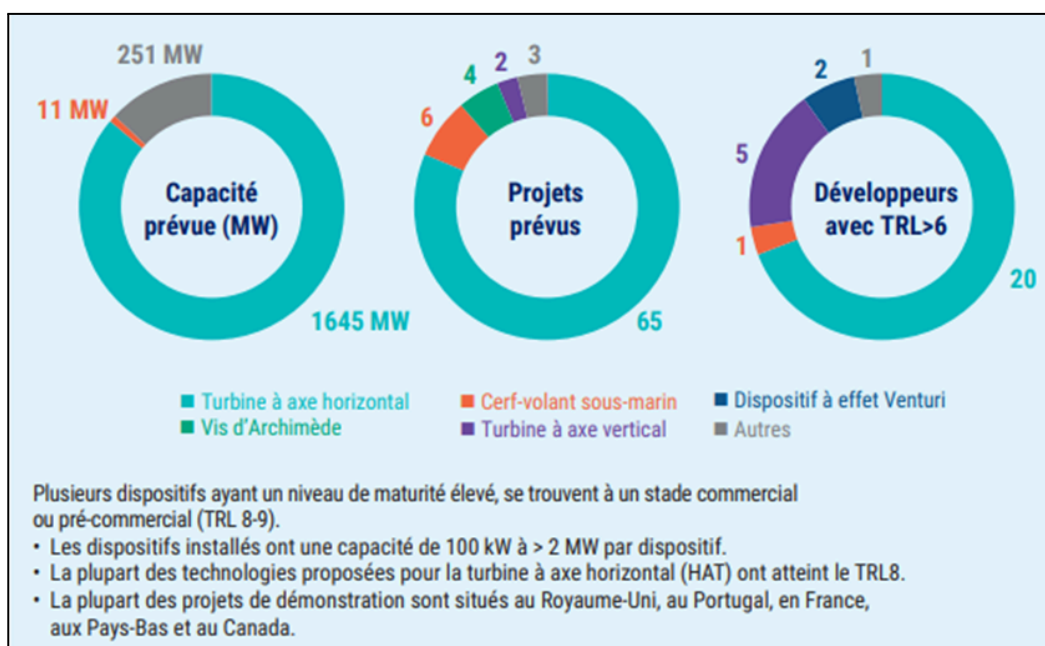


Figure 12 : Le projet SeaGen



Figure 13 : Projet Delta Stream

Le potentiel énergétique disponible, en fonction des types de technologies liées à l'énergie des marées (Hydroliennes), est présenté sur la figure 14. L'annexe 2 présente les différents sites en exploitation et en cours de projet en Europe.



© 2021 IRENA

Figure 14 : Capacité projetée et nombre de développeurs de projets par technologie d'ici 2025

4.4. ATOUTS ET CONTRAINTES DES HYDROLIENNES

Les réalisations et projets précédents font apparaître des avantages certains :

- le potentiel des courants marins est relativement important, actuellement seuls des espaces restreints à des courants de marée élevés sont aménagés ;
- les hydroliennes utilisent une énergie renouvelable, ne polluent pas et ne génèrent pas de déchets (dans leur phase d'exploitation tout au moins) ;
- du fait de la masse volumique importante de l'eau (800 fois supérieure à celle de l'air), les hydroliennes, à puissance équivalente, sont beaucoup plus petites que les éoliennes. Elles ont un impact visuel limité et ne nécessitent pas d'ouvrages de génie civil complexes contrairement aux barrages hydrauliques ;
- ancrées dans des zones à très fort courants, les champs d'hydroliennes sont implantés hors des zones de pêche en haute mer. Ils ne devraient pas être une gêne pour les professionnels.

Ces mêmes projets révèlent aussi un certain nombre d'inconvénients :

- les hydroliennes créent des turbulences, qui peuvent modifier la sédimentation et avoir des effets sur la flore et faune ;
- des poissons ou mammifères marins peuvent heurter les hélices. Ces dernières peuvent être conçues pour tourner très lentement et minimiser ces effets ;

- pour éviter le développement des algues et le dépôt d'organismes, il faut utiliser un antifongique comme sur les bateaux. Ce produit doit être appliqué régulièrement, ce qui induit un coût d'entretien important et de la pollution ;
- dans les eaux turbides du fait de la présence de sable en suspension (Pas de Calais, par exemple), l'érosion par le sable des pales d'hélice est très forte. L'entretien doit être fréquent et il est très sensiblement plus compliqué qu'à l'air. Pour cette raison, certaines hydroliennes ont leurs structures mobiles émergeant de l'eau ;
- il faut penser à acheminer le courant électrique du fond des mers jusqu'à la terre. Cela représente un surcoût non négligeable suivant les sites envisagés (comme pour les éoliennes au large).

4.5. COÛTS

Actuellement, les coûts de production électrique avoisinent les 200 €/MWh, soit environ le double des coûts de production d'une éolienne maritime (voir [fiche argumentaire GAENA "Coût de production de l'électricité en France"](#)). La volonté de la filière serait de parvenir à une centaine d'€/MWh pour les premiers appels d'offres commerciaux à horizon 2030, grâce à l'amélioration continue des technologies et l'augmentation des volumes industriels. En moyenne, le coût d'installation d'une hydrolienne est de 3,8 M€/MW_{installé}, à comparer au 2,8 M€ pour une éolienne. Ce coût élevé d'investissement, associé à un tarif d'achat de l'électricité qui pourrait à terme n'être plus subventionné, peut pour l'instant faire reculer les investisseurs

5. L'ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS OU OCÉANOGRAPHIQUES

5.1 PRINCIPE

Dans toute la zone intertropicale la température de l'eau de l'océan reste uniformément proche de 4°C à 1.000 mètres de profondeur alors qu'en surface elle est supérieure à 20° C.

On utilise cette différence de température pour produire de l'électricité, mais également de l'eau douce, du froid pour la climatisation (SWAC) et des produits dérivés pour l'aquaculture suivant le type de processus (cycle ouvert ou le fluide de travail est l'eau de mer, cycle fermé ou le fluide de travail est un fluide caloporteur spécifique ou cycle hybride).

Cycle ouvert : L'eau de mer chaude de surface produit de la vapeur qui sert de fluide de fonctionnement pour actionner les turbines, qui entraînent à leur tour un générateur produisant de l'électricité. L'eau de mer froide est utilisée pour condenser la vapeur, afin que la différence de pression de la vapeur entraîne la turbine. Elle peut être recyclée pour d'autres utilisations de refroidissement ou pour l'aquaculture. Ce procédé sert également au dessalement de l'eau (Figure 15).

Cycle fermé : L'eau de mer chaude de surface sert à faire évaporer l'ammoniac dans l'échangeur de chaleur. Un générateur est alimenté par la vapeur, qui est ensuite condensée par l'eau froide et renvoyée dans le système fermé. Permet également la climatisation par l'eau de mer.

Cycle hybride : Il combine à la fois des cycles fermés et des cycles ouverts. L'électricité est produite dans un cycle fermé. Puis l'eau de mer chaude qui en ressort passe par un cycle ouvert et produit à la fois de l'électricité et de l'eau douce (Figure 16). Ce principe est également utilisé en thalasso-thermie (voir [fiche argumentaire GAENA "Géothermie"](#)).

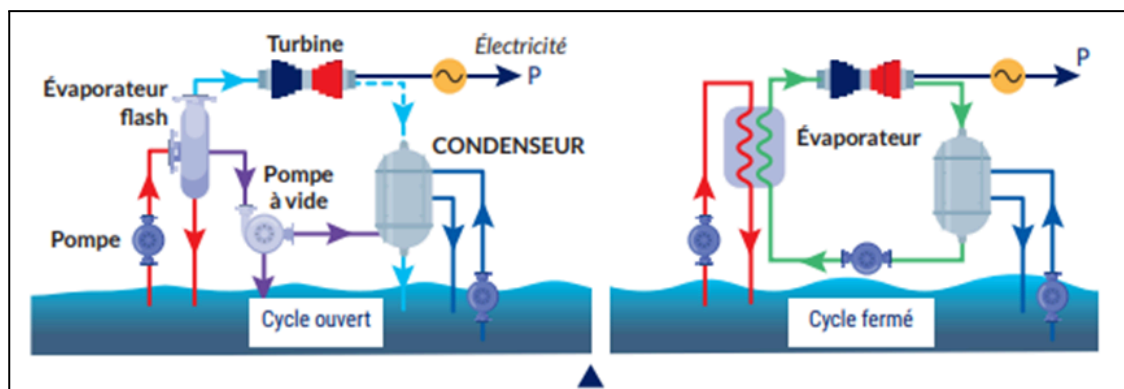


Figure 15 : Principe de fonctionnement d'un système OTEC (cycles ouvert – cycle fermé)

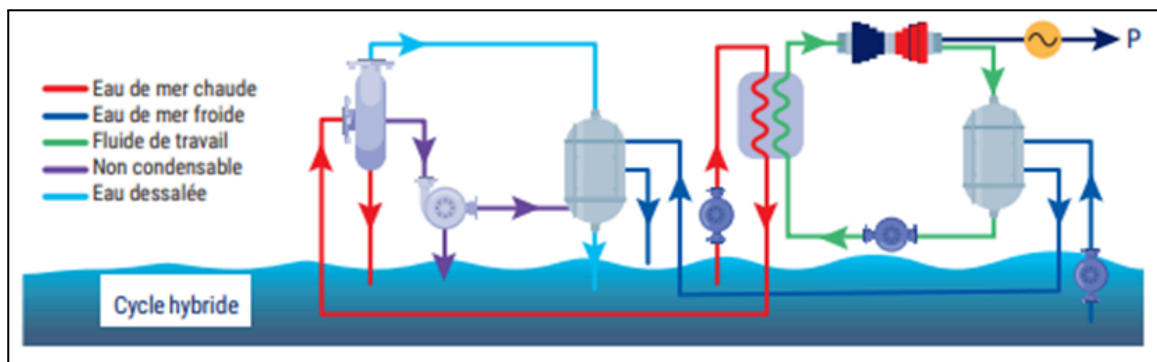


Figure 16 : Principe de fonctionnement d'un système OTEC (cycle hybride)

5.2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Un écart de température d'au moins 20 degrés est nécessaire pour faire fonctionner les applications OTEC, ce qui signifie une température de surface d'environ 25°C ou plus.

Si on prend en compte les masses d'eau mises en jeu, le potentiel énergétique est énorme. Néanmoins, du fait de la faible différence de température entre les sources chaudes et froides, le rendement thermodynamique est très faible (3 à 4 %). Pour produire plus qu'elles ne consomment, ces installations doivent donc brasser des quantités d'eau très importantes de plusieurs m³/s par MW produit.

Elles devront aussi résister aux tempêtes tropicales. De plus, plusieurs challenges technologiques devront être résolus (tuyau d'eau froide, résistance aux bio-salissures, rejets importants en eaux profondes, ...). Les USA sont actuellement les leaders dans cette branche. Il est difficile d'avancer des coûts compte tenu du faible degré d'avancement de cette filière. Les coûts d'investissement objectifs vont de 4.500 à 6.000 € par kW installé.

Projets d'installations OPEC

Au fil des ans, l'OTEC a fait l'objet d'un certain nombre de développements au niveau international, avec une capacité croissante :

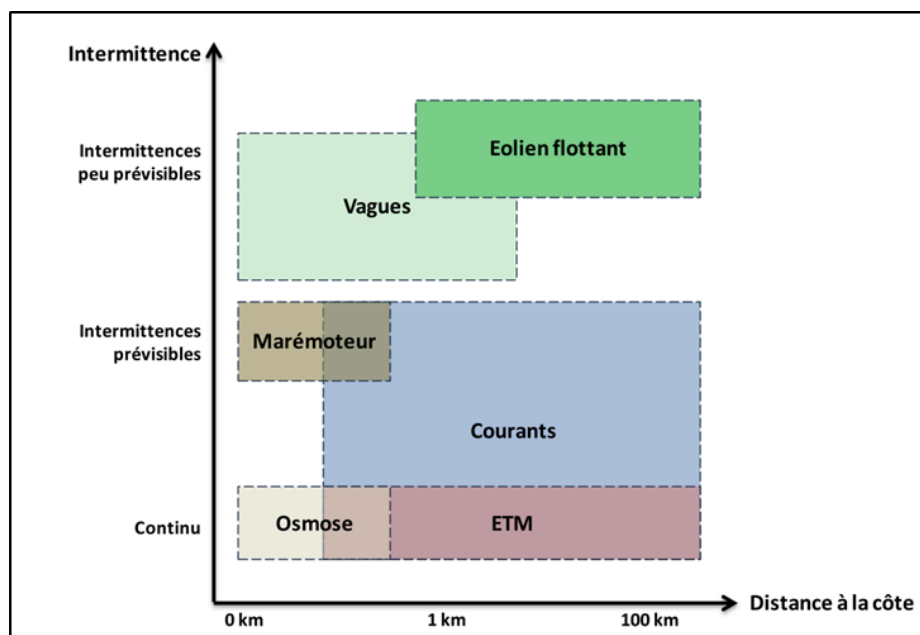
- Hawaï Centrale OTEC 1970
- Japon Installation OTEC de démonstration de 100 kW 2013
- République de Kiribati Centrale OTEC de 1 MW 2019 São
- Tomé et Príncipe Plate-forme OTEC flottante offshore de 1,5 MW 2024 Adap

6. CONCLUSION

La présente fiche résume les différentes possibilités dans l'exploitation énergétique des océans. Avec un potentiel énergétique relativement modeste, les filières présentées ont des atouts à faire valoir.

La figure 17 ci-contre présente un diagramme des types d'énergies marines selon leur intermittence et leur distance à la côte.

Figure 17 : Cartographie des énergies marines selon leur intermittence et leur distance à la côte ►



Le tableau 3 ci-après résume les caractéristiques des différents types d'énergies marines.

Technologie	Marée motrice	Hydrolienne	Houlomotrice	Thermique
Ressource mondiale (TWh/an)	300	800	80 000	10 000
Prospectives de production selon les scénarii ADME en 2030	0,6 à 1,5 TWh/an	0,3 à 0,6 TWh/an	0,3 à 0,6 TWh/an	0,2 à 0,7 TWh/an (DOM-TOM) 1,6 à 16 TWh/an (SWAC)
Stade de développement	- Industriel pour le marées-moteur classique - Précoces pour les lagons offshores	Avancé	Préindustriel Nombreux projets de technologies différentes	Très précoce
Avantages	- Technologie éprouvée	- Espace nécessaire réduit - Peu ou pas de structures apparentes - Fonctionnement prévisible	- Pas de fondations - Entretien aisé	- Production continue - Production d'eau douce et d'air conditionné
Inconvénients	- Fonctionnement intermittent - Problèmes environnementaux - Faible potentiel mondial	- Fonctionnement intermittent - Entretien compliqué - Zones exploitables restreintes - Peut gêner les activités marines	- Fonctionnement intermittent et aléatoire - Peut gêner les activités marines	- Investissement conséquent - Réservé aux zones tropicales - Complexité technique

Tableau 3 : Comparatif des différentes énergies marines

Avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables non émettrices de GES, la demande évolue. Le développement de la filière marine semble suivre, avec un certain décalage, la même évolution que l'éolien avec une problématique identique (rentabilité, pérennité à moyen et long terme, ...), avec un certain nombre d'atouts que n'a pas sa cousine. Des projets, certes de puissance modeste, en partenariat avec de grands groupes industriels, sont sérieusement envisagés présageant des réalisations semi-industrielles dans les années à venir.

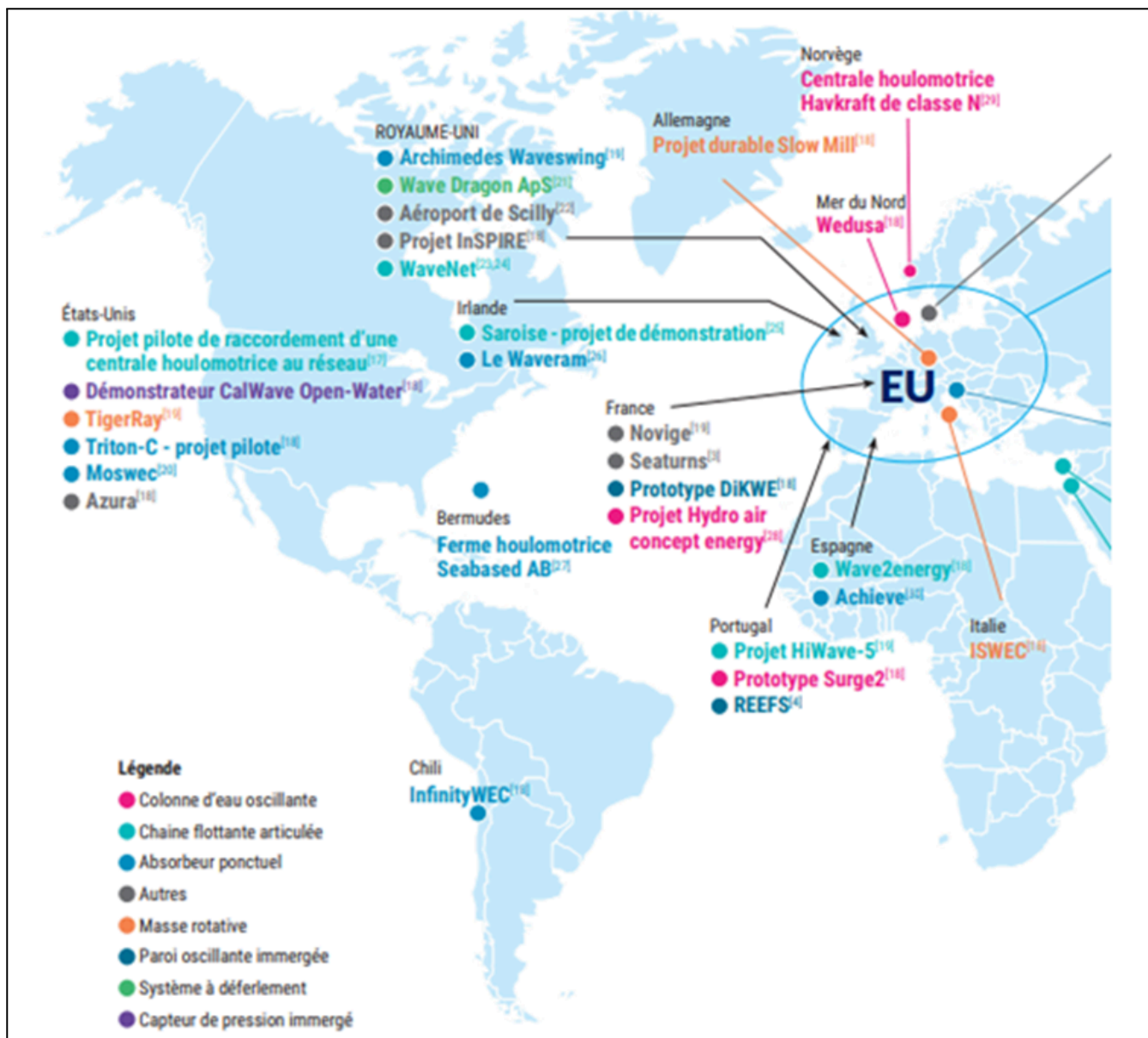
Il paraît évident qu'elle ne peut prétendre à devenir une énergie primaire majeure comme l'est le nucléaire, mais par un développement raisonné, elle pourrait constituer localement (par exemple en Bretagne) un apport dans la constitution du mix énergétique du futur. Pour être accepté, le développement de ces filières devra se faire dans le respect du milieu marin et en y intégrant ses différents acteurs.

7. RÉFÉRENCES

- [Réf. 1] : Énergie marine. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org>
[Réf. 2] : Énergie marine : les différentes sources renouvelables en mer. Connaissance des Énergies <https://connaissancedesenergies.org>
[Réf. 3] : Énergie marémotrice. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org>
[Réf. 4] : Énergie houlomotrice (ou énergie des vagues), Connaissance des Énergies
[Réf. 5] : Énergies marémotrice : définition, fonctionnement, schémas..., Connaissance des Énergies
[Réf. 6] : Hydroliennes en mer : fonctionnement, rendement, Connaissance des Énergies
[Réf. 7] : Principes de fonctionnement de l'hydrolienne. TotalEnergies <https://totalenergies.fr>
[Réf. 8] : Des énergies renouvelables aux énergies marines. Engie. <https://www.engie.com>
[Réf. 9] : [Fiche argumentaire GAENA "Coût de production de l'électricité en France"](#)
[Réf. 10] : [Fiche argumentaire GAENA "Géothermie"](#)

Annexe 1

L'énergie houlomotrice est principalement une industrie Européenne : Environ 80 % des développeurs se situent en Europe



Annexe 2

Technologie hydrolienne : Un secteur essentiellement européen puisque environ 65% des développeurs se situent en Europe

