



## SEMAINE 5 : LES ÉNERGIES MARINES

*Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Diversité des technologies » de la semaine 5 du MOOC « Énergies renouvelables ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.*

### *Contexte technologique des énergies marines renouvelables*

**Jean-Yves PRADILLON**

*Responsable du mastère sur les énergies renouvelables marines  
ENSTA BRETAGNE*

Le domaine des énergies marines renouvelables est un secteur industriel assez récent mais un certain nombre de définitions qu'on applique déjà dans le secteur de l'énergie sont tout à fait pertinentes pour les énergies marines renouvelables.

Alors, j'aimerais introduire quelques notions, en particulier le potentiel théorique.

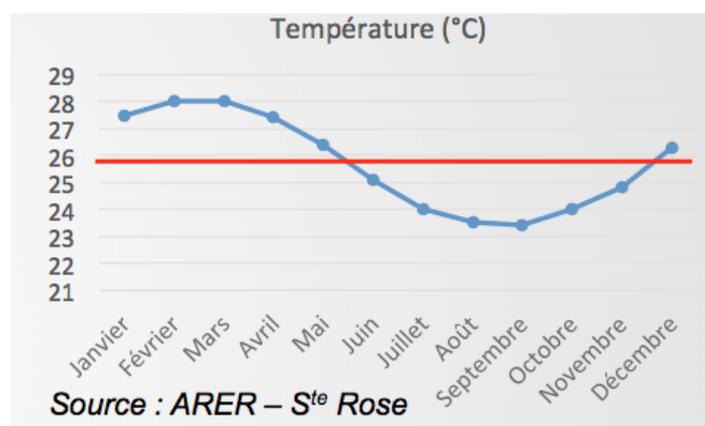
- Le potentiel théorique, c'est quelque chose que l'on peut retrouver facilement avec des formules physiques et qui nous donne la puissance et l'énergie que l'on peut retirer d'une certaine ressource.
- ⇒ Ces chiffres sont en général très élevés et on fait une distinction avec ce qu'on appelle plutôt le potentiel techniquement exploitable.
- Le potentiel techniquement exploitable, c'est cette partie d'énergie sur l'ensemble théorique que l'on peut effectivement capter avec les moyens dont on dispose aujourd'hui.

Enfin, une autre définition importante pour bien comprendre les différentes machines, être capable de les situer, c'est ce qu'on appelle le facteur de charge.

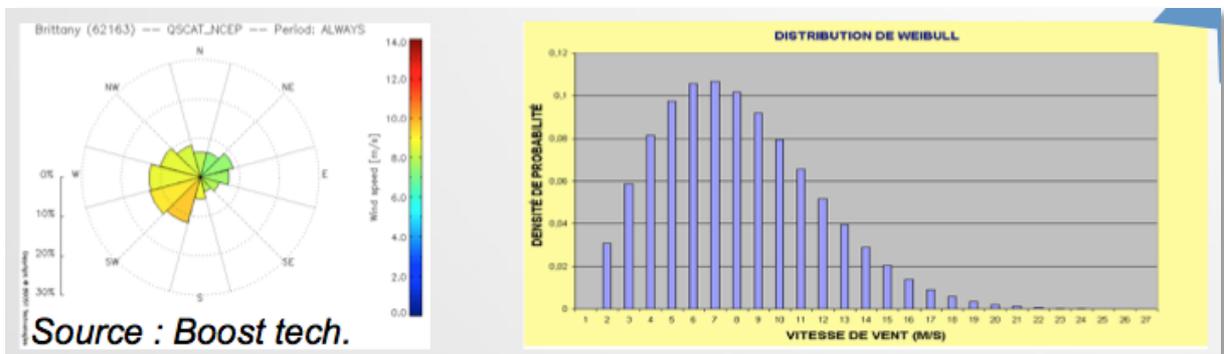
- Le facteur de charge représente la quantité d'énergie que l'on va effectivement retirer d'un système, rapportée à la quantité d'énergie potentiellement retirable de ce système s'il tournait en permanence à plein régime.
- Ce facteur de charge est une donnée qui est variable au sein d'une même journée, qui est variable géographiquement, donc c'est une variabilité spatio-temporelle mais aussi on s'aperçoit que des systèmes peuvent être en sous-régime pendant que d'autres sont en régime nominal voire en surrégime, et donc en fait, le facteur de charge est aussi quelque chose que l'on peut exprimer de manière moyenne sur une période donnée et en général on utilise beaucoup le terme de facteur de charge sur une année, c'est-à-dire la production moyenne d'une machine sur une année.

Alors, j'aimerais parler des différentes caractéristiques des ressources que l'on peut exploiter en énergies marines renouvelables.

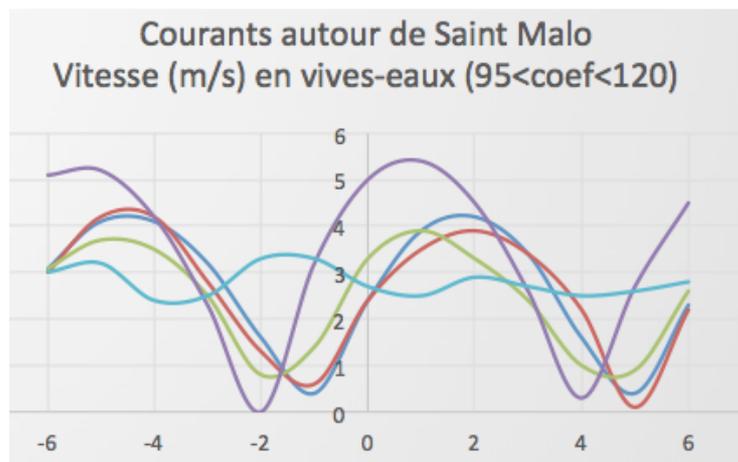
- Je vais commencer par l'énergie thermique des mers qui se base sur le gradient de température, c'est-à-dire sur la différence de température que nous avons entre les eaux de surface et les eaux profondes.
  - Cette différence de température permet de faire fonctionner des machines thermodynamiques et on voit bien que sur le graphique (qui se trouve en haut à droite sur ce transparent), on voit bien que cette notion de température, en particulier sur les eaux de surface est quelque chose qui peut varier d'un moment de l'année à un autre, même dans la ceinture intertropicale où sont particulièrement efficaces les systèmes d'énergie thermique des mers et bien il y a des saisons et donc des variabilités de température.
- ⇒ Donc on voit bien le trait rouge sur ce transparent, par exemple la température moyenne et on voit la variation sur l'année autour de cette température moyenne.



- Le facteur de charge pour celle-ci est de 30 %.
- La deuxième ressource que j'aimerais présenter, c'est les vents et les courants. Alors ce n'est pas tout à fait la même chose, le vent, le fluide c'est l'air, le courant, le fluide c'est l'eau mais le principe de fonctionnement des machines que l'on met dans ces deux types de ressources-là sont assez identiques donc on a l'habitude de souvent les associer.
- Alors, là aussi on a une variation spatio-temporelle et alors on s'aperçoit que (en bas à gauche du transparent), on voit une répartition de la force et de la direction des vents pour une éolienne.
- Dans la figure en bas au milieu, on voit la répartition des courants ;



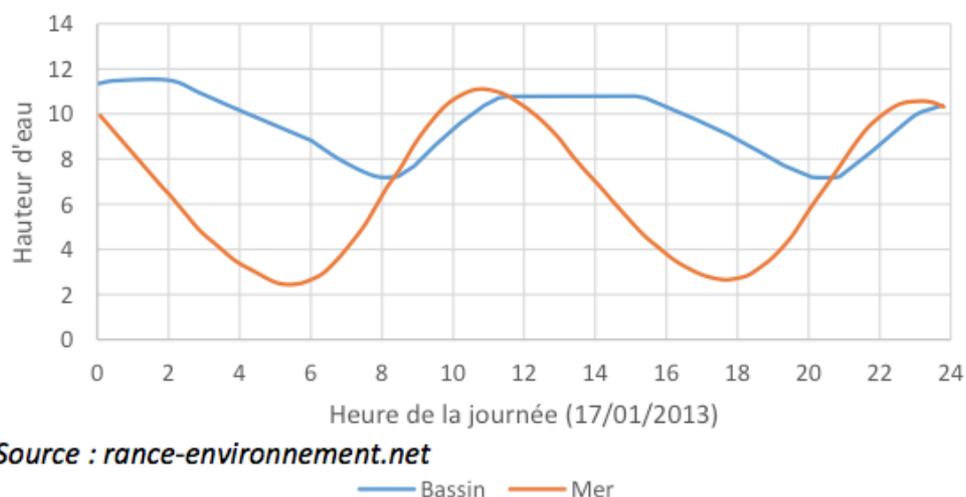
- Et sur le transparent en bas à droite, on voit la quantité d'énergie, la vitesse de courant sur (ici on est au large de Saint-Malo) à différents points autour de Saint-Malo, c'est-à-dire qu'on est vraiment sur un espace qui n'est pas très étendu mais on s'aperçoit que la valeur des fonds, la bathymétrie fait que l'on peut trouver une énergie qui est variable dans une zone particulière.



- ⇒ Ce qui voudra dire que lorsqu'on fera un système d'énergie thermique des mers et bien, on fera très attention à l'endroit où on va installer la machine pour obtenir le meilleur de l'énergie.

- Une autre énergie qu'il est possible de capter en mer, c'est les vagues ou la houle.
  - Et en général, on a l'impression que - quand on regarde ça de loin -, que c'est un mouvement sinusoïdal et que les molécules d'eau montent et descendent et c'est tout ce qu'elles font, mais c'est bien loin de ça et on voit sur cette animation (en haut à droite) que les molécules d'eau se déplacent, en plus de se déplacer verticalement en montée et descente, elles se déplacent aussi dans le sens de la houle et donc les machines doivent tenir compte de ce type de fonctionnement de la ressource.
  - En plus, la ressource est variable en hauteur, on a de grands mouvements en surface, plus on va vers le fond et moins les mouvements sont importants mais ils existent toujours, ce qui autorise de mettre des machines en surface ou dans la veine d'eau.
  - Le facteur de charge pour les vagues c'est de l'ordre de 30 à 50 %.
  - Enfin, je terminerai avec les marées où là on va jouer sur la différence de hauteur, ce que l'on appelle le marnage, entre les parties les plus basses et les plus hautes d'une marée.
- ⇒ Dans les sites les plus énergétiques au monde, on peut aller de 10 à 20 mètres, sachant par exemple que le record étant la baie de Fundy, au Canada mais on a aussi l'estuaire de la Severn au Royaume-Uni mais aussi l'estuaire de la Rance en France qui sont des lieux particulièrement énergétiques.
- Le dessin qui se trouve sur la droite du transparent en bas vous montre la différence de hauteur sur une journée complète - donc sur 24 heures -, vous avez la différence de hauteur entre en rouge, la marée et en bleu, le réservoir derrière le barrage de l'usine de la Rance et on voit d'ailleurs, c'est assez amusant, que sur la plage 12 - 16, le réservoir va être à une hauteur légèrement inférieure à la hauteur de la mer, alors qu'au contraire, sur la plage précédente, entre 0 et 2h du matin, là, on aura surchargé le réservoir.

Hauteurs d'eau du barrage de la Rance



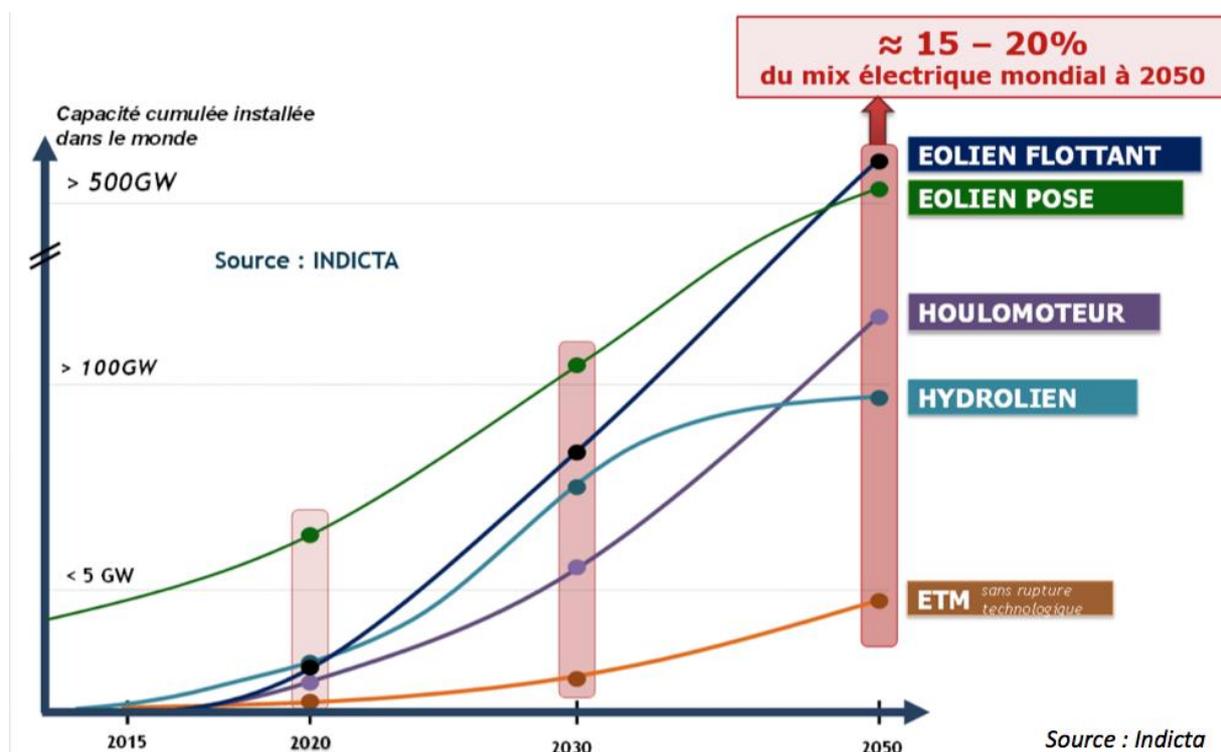
- Le facteur de charge est de 30 %.

Et puisque je viens de parler de ces facteurs de charge, j'aimerais juste rapidement montrer comment on obtient ces valeurs-là.

- Typiquement, l'usine de la Rance est dimensionnée avec une valeur pic de 240 MW, c'est-à-dire qu'elle a 24 turbines de 10 MW chacune et on sait que l'usine de la Rance par expérience, depuis le milieu des années 60, produit en moyenne 550 GWh par an.
- Donc si on ramène ça au nombre d'heures possibles dans l'année, potentiellement, on va obtenir 240 multiplié par le nombre d'heures possibles dans l'année, on va obtenir un chiffre et si on divise 550 par ce chiffre, on obtient 26 %.

⇒ Donc c'est le rendement usuel d'une usine marémotrice.

Avant de rentrer dans le détail des différents systèmes, ici je présente une vue prospective des différentes sources d'énergies marines renouvelables où on voit la progression de ces énergies.



Alors, évidemment, on est optimistes, on croit qu'elles vont croître d'une manière importante mais on s'aperçoit quand même de certaines choses :

Alors, sur ce graphique, il y a deux énergies qui ont une inflexion : c'est l'éolien posé et l'hydrolien.

- Les éoliennes posées ont commencé bien plus tôt que toutes les autres technologies, on le voit en début de la courbe.
- On commence déjà en 2012 à avoir un certain nombre de machines posées et on s'aperçoit que les éoliennes flottantes qui ont démarré beaucoup plus tard puisqu'on est en plein démarrage de ces technologies-là, vont l'estimer vers 2050 passer au-dessus des éoliennes posées. Pourquoi ?
- ⇒ Tout simplement parce que les sites potentiels d'installation d'éolien posé sont limités en nombre et donc par voie de conséquence, tous les sites vont être appareillés au bout d'un moment et le seul potentiel de développement qu'on aura ce sera sur l'éolien flottant.
- Et l'hydrolien, on est dans une situation à peu près identique, lorsque l'on aura installé les sites, ce sera absolument terminé.

L'ETM ne représente pas beaucoup de sites mais il représente une véritable chance pour des zones géographiques très particulières comme par exemple les îles de la ceinture intertropicale.

Les estimations, pas forcément les plus optimistes, peuvent nous amener à penser que de l'ordre de 15 à 20 % du mix énergétique électrique mondial sera assuré par les énergies marines renouvelables à l'horizon 2050.

# *Eoliennes marines et énergie thermique des mers*

**Jean-Yves PRADILLON**

*Responsable du mastère sur les énergies renouvelables marines*

*ENSTA BRETAGNE*

Parmi les énergies marines renouvelables, celle que l'on peut voir déjà, qui existe depuis longtemps dans les pays du nord de l'Europe en particulier, qui sont les plus connues du grand public, ce sont les éoliennes.

Alors en fait il y a deux types d'éoliennes :

- Celles qui sont connues ce sont les éoliennes dites posées, c'est-à-dire dont les fondations reposent sur le fond de la mer.
- Et puis on a aussi des éoliennes flottantes.

Donc, ces deux types d'éoliennes ont quand même un certain nombre de points communs mêmes si on va les distinguer par leurs fondations.

- La première chose, c'est qu'on constate, et ça l'expérience des pays du Nord peut nous le prouver, c'est que la ressource en termes de vent que voit une éolienne en mer, est meilleure que la ressource telle qu'on la trouve à terre.

Alors d'abord qu'est-ce que ça veut dire meilleure ?

- ⇒ Et bien meilleure, ça veut dire l'intensité, la force du vent et aussi, l'altitude à laquelle on peut commencer à trouver un vent de bonne qualité.
- Alors sur le graphique, en haut à droite de ce transparent, et bien on s'aperçoit que (vous voyez les formes de ces trois dessins sont assez typiques), pour aller chercher un vent d'une intensité suffisante, on est obligés de monter bien plus haut à terre que dans une zone très dégagée comme un désert ou la mer et la raison, elle est simple, c'est qu'à terre on va trouver des obstacles, que ce soient des obstacles humains, des immeubles, des constructions, ou bien des forêts, des collines qui vont influencer sur la qualité de la ressource.
- Alors malheureusement en mer, on a à payer ça sous une autre forme, c'est que l'environnement est bien plus sévère.

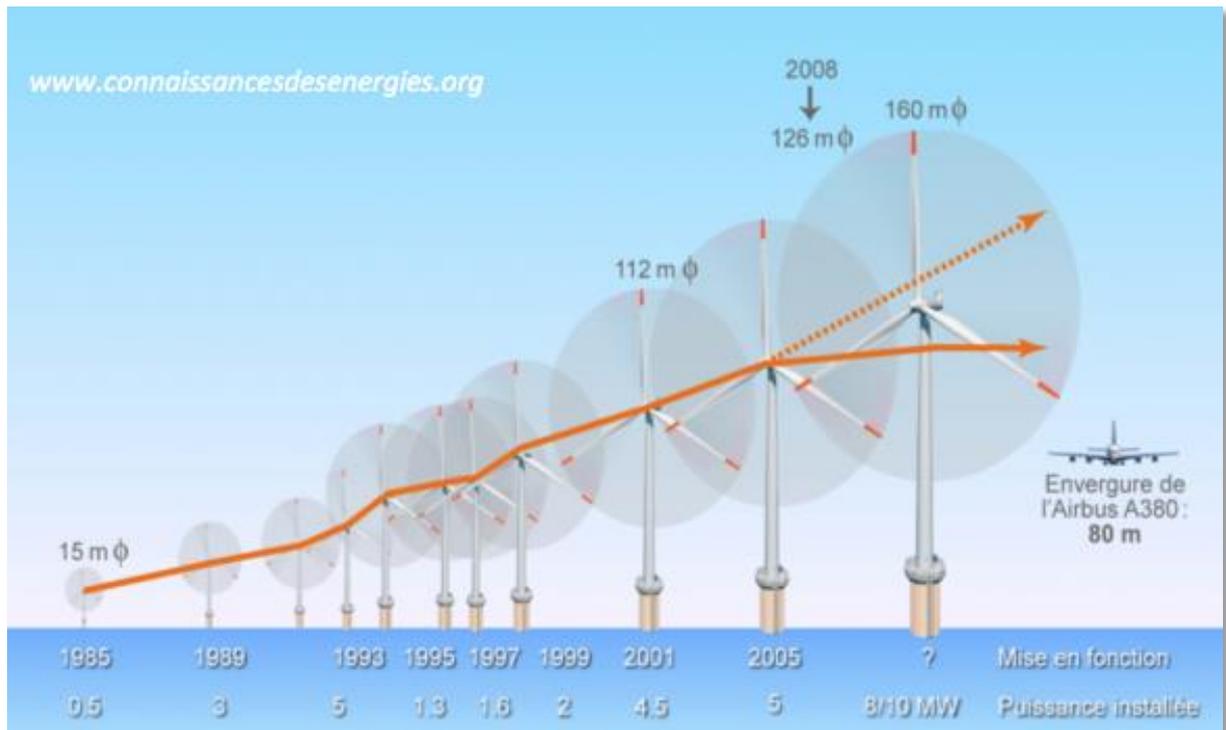
- Alors on le représente sur le dessin de droite, on voit que l'éolienne va avoir à subir des efforts dus au vent (et encore heureux puisque c'est ça qu'on va chercher dans une éolienne, à maximiser la pression du vent sur les hélices qui constituent les pales de l'éolienne), mais on va aussi avoir des chargements qui sont causés par l'environnement marin, donc les vagues, la houle, des vagues déferlantes, etc. Ça c'est la première chose que l'on peut constater.
- Mais il faut savoir que l'environnement est très sévère sur des choses peut-être moins évidentes comme par exemple le fait que l'air marin ait un niveau d'hygrométrie bien supérieur à l'air terrestre et qu'aussi c'est un air salin.
- ⇒ Donc cette présence de sel et d'humidité va être très néfaste à toute la machinerie, en particulier électrique et donc il faudra faire attention et protéger les machines plus particulièrement en mer par rapport à ce qui se fait à terre.
- On va aussi avoir des conditions d'entretien et d'installation qui seront bien différentes qu'à terre puisqu'il faudra pouvoir accéder aux machines et on sait que la mer ne laisse pas forcément toujours la possibilité d'accéder.
- ⇒ Lorsque la mer est trop forte et que des bateaux ne peuvent pas naviguer.

Alors, aujourd'hui, toutes ces contraintes nous amènent à concevoir des machines qui sont légèrement différentes des machines que l'on trouve à terre.

Les deux grandes familles de turbines que l'on va installer sur ces machines, donc les turbines qui sont chargées de produire l'électricité sous l'effet de la rotation des pales d'hélices sont :

- Soit des turbines à multiplicateur, c'est-à-dire avec une boîte de vitesses pour faire simple ;
- Soit des turbines à entraînement direct.
- Alors, les turbines à entraînement direct, ce qu'elles vont avoir comme effet c'est qu'elles vont tourner plus lentement et donc ça génère des sortes de turbines qui, d'un point de vue électrique, sont particulières.

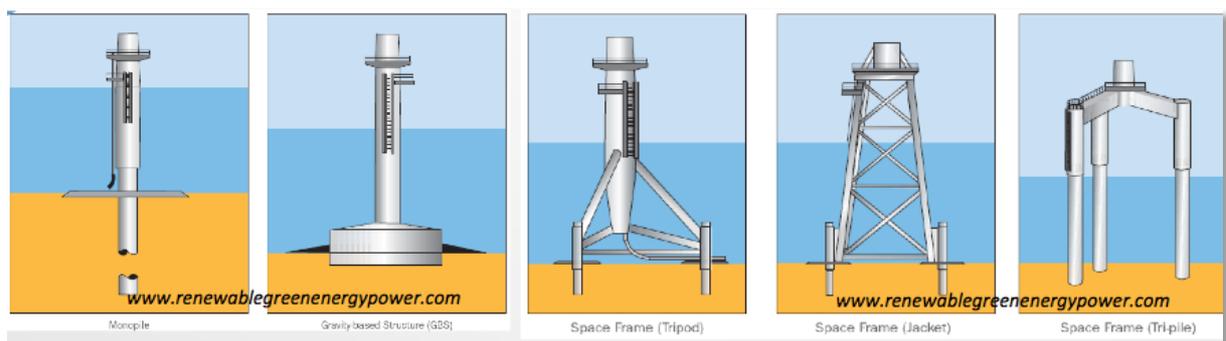
Quelles sont les dimensions aujourd'hui des éoliennes ? Et bien, on trouve dans les cartons des laboratoires de recherche les dernières machines qui sont en train d'être conçues qui sont alentours de 160 mètres de diamètre.



⇒ A titre de comparaison, l'envergure, toute l'envergure de l'Airbus A380 est aux alentours d'une cinquantaine de mètres et donc là on a des pales de 80 mètres, donc qui sont plus longues que l'envergure totale de l'Airbus A380.

⇒ La vitesse de rotation est de l'ordre de 12 à 20 tr/m.

Alors, ces éoliennes se trouvent soit posées, c'est-à-dire que leur fondation va descendre et va s'appuyer au fond de la mer.



➤ Alors, on a quelques exemples ici : des monopiles, des plates-formes gravitaires qui vont tenir simplement par l'effet du poids de leur socle, des mâts tripodes avec pieux battus, des mâts Jacket qui ressemblent beaucoup à ce qu'étaient les plates-formes offshore du début de l'extraction pétrolière en mer.

➤ Dont différents types de technologies. Le point commun c'est qu'on va aller jusqu'au fond de la mer avec des pièces rigides.

- ⇒ Ça, ça suppose de ne pas dépasser 50 à 60 mètres de fond, parce qu'au-delà, la conception de la machine on sait faire, mais on atteindra des prix qui feront que la machine n'est pas rentable.
- Toutes ces fondations sont très largement inspirées du monde du parapétrolier, donc de l'offshore oil and gas comme on dit en anglais, c'est-à-dire de l'extraction du pétrole et du gaz en mer.
- Sur les éoliennes posées, un certain nombre d'experts s'accordent pour dire que le potentiel techniquement exploitable au niveau mondial est de l'ordre de 1000 GW installés.

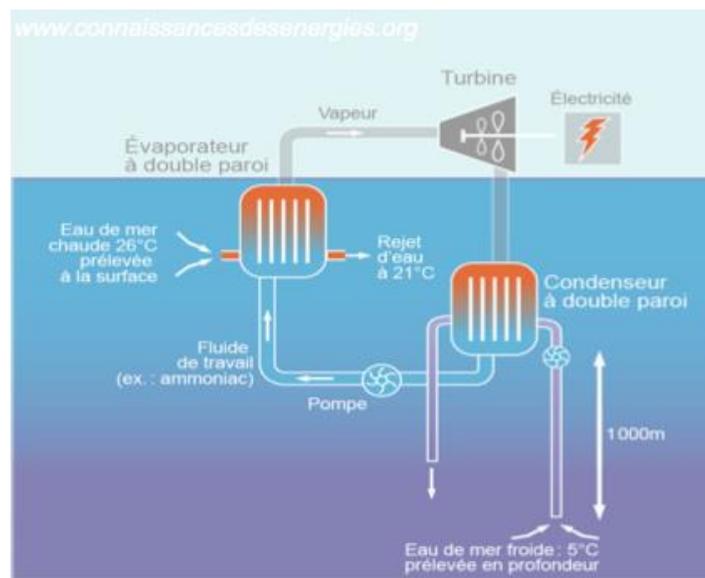
Les autres Éoliennes que l'on trouve en mer, sont des éoliennes flottantes. Alors là, l'idée est à peu près la même, sauf que la fondation, au lieu de rejoindre le fond de l'océan, va flotter entre deux eaux et elle sera ancrée au sol simplement ancrée, la liaison entre la plate-forme et le fond se fera uniquement par des ancrages.



- Alors, cette technologie nous ouvre un champ des possibles bien plus important, c'est-à-dire que le PTE de l'éolien flottant est de 3500 GW au lieu des 1000 GW précédemment cités.
- Par contre, c'est plus loin des côtes, c'est donc avec des techniques d'installation qui seront plus coûteuses et là aussi, on va s'inspirer des expériences du parapétrolier pour déterminer la forme et le fonctionnement des fondations flottantes.
- Alors, les risques sont plus faibles sur les machines flottantes parce qu'il y aura moins de conflits d'usage et donc plus de facilités de trouver des sites où seule l'exploitation de l'énergie en mer sera cohérente.

Je voudrais terminer cette petite présentation par l'introduction de l'énergie thermique des mers.

- Ce sont des machines thermodynamiques qui jouent, comme on peut le savoir, sur la différence de température entre les eaux de surface et les eaux de fond.
- Pour qu'une machine de type énergie thermique des mers puisse fonctionner, il faut que la différence de température entre les eaux de fond et les eaux de surface soient de l'ordre de 22°C minimum de différence de température.
- Alors ça se veut dire quoi ? Ça veut dire que pour avoir des telles différences, on est obligés de se rendre dans des eaux de la ceinture intertropicale de manière à avoir des eaux de surface entre, on va dire, 23 - 24 et 30°C de surface et il va falloir donc aller chercher de l'eau qui sera 22°C moins chaude que ça et ça, ça nous oblige à aller pomper de l'eau froide dans les profondeurs, à des profondeurs de 600 à 1000 mètres de fond.



- Sinon, le principe de fonctionnement sur un cycle fermé, dit cycle de Rankine est assez simple : on a un circuit primaire qui, au lieu d'être fait à base d'eau comme c'est le cas dans une centrale nucléaire par exemple, est fait à base d'ammoniac, on va vaporiser l'ammoniac avec la température des eaux de surface et on va refroidir l'ammoniac pour le rendre de nouveau à l'état liquide donc dans un condenseur, qui lui fonctionne à partir de l'eau de fond qui est aux alentours de 4 - 5°C.
  - La puissance qu'on peut attendre des plus grosses stations ETM est de l'ordre de 10 à 30 MW par station et on a aujourd'hui un certain nombre de projets dans le monde.
- ⇒ Il n'y en a pas beaucoup, donc là on va citer les deux principaux :

- En France, DCLS a un projet à l'île de la Martinique et à l'île de la Réunion sur des plates-formes qui seront de l'ordre de 16 MW.
- ⇒ Aujourd'hui DCLS annonce la possibilité de pouvoir donner l'indépendance énergétique de l'île de la Réunion avec deux plates-formes de types ETM.
- Et on a le plus ancien mais peut-être le moins actif, Hawaï, aux Etats-Unis, où des essais sont faits par le NELA, qui est le laboratoire de recherche hawaïen sur les énergies nouvelles.
- Le potentiel techniquement exploitable de l'ETM est de 150 GW parce que le nombre de zones où on peut l'installer est assez réduit.
  - En revanche, le facteur de charge des machines ETM est assez intéressant et c'est certainement le système de production d'énergie en mer qui est le plus fiable au point de vue durabilité de production puisque les machines tournent 24/24h, on a simplement à les mettre à l'abri lors d'arrivée de cyclones et aussi, on peut les mettre à l'abri lorsqu'il faut faire des maintenances et des réparations sur les machines.

Le point commun entre les différentes techniques que je viens de présenter, que ce soit l'éolien ou l'énergie thermique des mers, c'est que ce sont des machines qui sont très sollicitées par l'environnement et en particulier le critère de dimensionnement principal de ces machines est ce que l'on appelle la fatigue, c'est-à-dire la capacité de la machine à endurer des charges cycliques pendant une longue période et c'est le point qui est le plus délicat à traiter par les ingénieurs qui conçoivent ces machines.

# L'énergie marémotrice

**Jean-Frédéric CHARPENTIER**

*Maître de Conférences – Ecole Navale*

Nous allons parler ici de l'énergie marémotrice, il s'agit de l'énergie qui est associée au mouvement des masses d'eau provoqué par les marées.

- Donc le potentiel techniquement exploitable pour l'énergie marémotrice est plus faible que celui correspondant aux autres énergies renouvelables marines.
- ⇒ Il est d'environ de 75 GW qui pourraient être installés.
- Ceci est dû au nombre de sites limité sur lesquels on peut installer les systèmes.
- ⇒ En effet, les sites techniquement exploitables correspondent à des marnages importants, c'est-à-dire à des grandes différences de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse, ou bien à des niveaux de courants de marée très élevés.

Donc, les marées sont par nature un phénomène intermittent, cette intermittence est liée au cycle de marée lui-même, c'est-à-dire par exemple on a deux cycles de marée par jour et aussi au cycle des grandes marées et des marées de faible coefficient dont la période est d'environ deux semaines.

- ⇒ Cette intermittence fait que le facteur de charge d'un système marémoteur est relativement faible et du même ordre que celui d'un système éolien, aux alentours de 30%.

Un des avantages du marémoteur est que la production d'énergie est prédictible puisqu'il s'agit d'un phénomène astronomique qui peut être prévu des mois voire des années en avance.

- ⇒ Donc ceci donne un caractère favorable à l'intégration de ces énergies au niveau du réseau électrique.

Deux principes principaux peuvent être utilisés pour extraire l'énergie marémotrice :

- Le premier est d'utiliser une usine marémotrice de type barrage ;
- Et le deuxième est d'utiliser une hydrolienne.
- Si l'on considère les usines marémotrices de type barrage, le principe est relativement simple, on va considérer un bassin naturel comme par exemple un estuaire ou une baie et on va le barrer avec un ouvrage d'art.



- On va ainsi constituer un bassin de rétention d'eau, on va remplir ce bassin lors de la montée de la marée, on va retenir l'eau et puis on va vidanger ce bassin à marée basse.
- On va effectuer des opérations de turbinage lors du remplissage et de la vidange de ce bassin.

On a trois critères pour installer un tel système :

- Tout d'abord il faut que le site se prête à l'installation d'un bassin naturel, donc avoir comme je l'ai dit précédemment un estuaire ou une baie ;
- La puissance que peut extraire un tel dispositif est directement liée à la hauteur d'eau et au débit traversant les turbines, donc il faut qu'on ait une différence de hauteur d'eau, donc un marnage significatif entre la mer et le bassin ;

- Et il faut également qu'on ait un débit très important.

➤ Un des problèmes de l'installation d'un tel système c'est qu'on installe un barrage par exemple sur un estuaire, donc il y a des impacts très importants sur l'écosystème et sur les usages humains.

⇒ Un des ouvrages les plus importants au monde est situé en France, il barre l'estuaire de la Rance, en Bretagne et donc, il a été installé dans les années 60 et inauguré en 1966.

⇒ Le site se prête particulièrement bien à l'installation d'un tel ouvrage : le marnage y est supérieur à 13 mètres lors des marées de fort coefficient et le débit maximal qui est turbiné est de plus de 6000 m<sup>3</sup> par seconde ce qui correspond environ à quatre fois le débit moyen du Rhône.

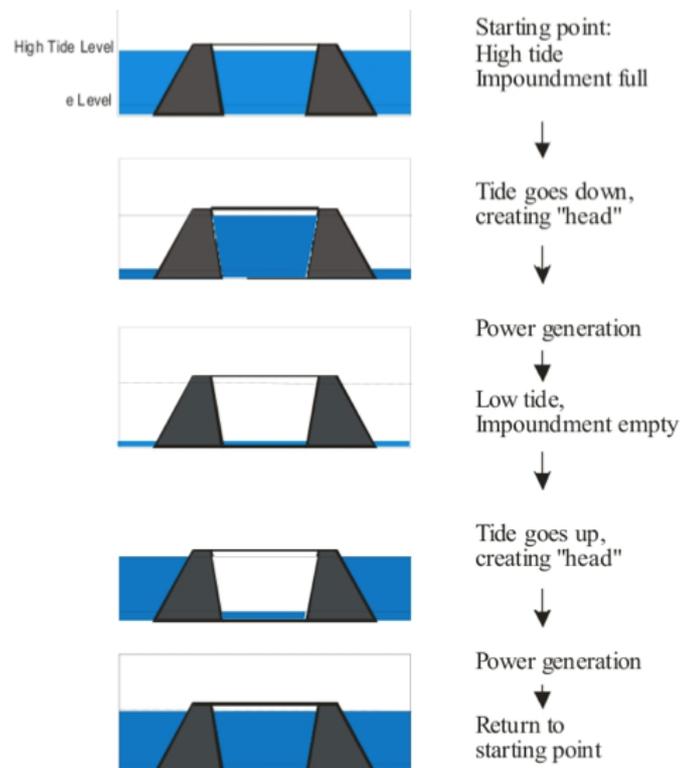
⇒ La puissance installée au niveau de ce barrage est de 240 MW et il produit 500 GWh d'électricité par an, ce qui correspond à peu près au millième de la production d'énergie électrique en France.

➤ Même si de nouveaux projets de ce type-là ne sont pas d'actualité en France, il y a des projets qui sont en cours à l'étranger.

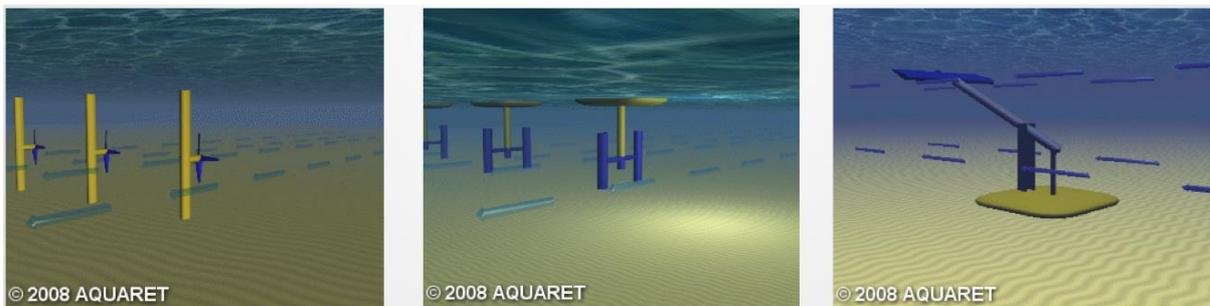
⇒ Par exemple en 2011 a été inauguré en Corée du Sud, sur le site de Sihwa, un barrage marémoteur d'une puissance comparable à celui de la Rance.

➤ Il existe également une deuxième génération de barrages qui sont dans les cartons des ingénieurs. Il s'agit par exemple de constituer un lagon artificiel par la création d'une digue fermée. Donc ce lagon artificiel peut être situé au large ou appuyé sur une côte et donc on va faire fonctionner ce système de la même manière que précédemment, c'est-à-dire que l'on va effectuer des opérations de turbinage lors du remplissage et de la vidange du bassin ainsi constitué.

⇒ On voit un exemple de ce type de dispositif au niveau de l'illustration, il s'agit d'un projet sur la baie de Swansea, dans le pays de Galles et qui a pour objectif de construire un tel ouvrage avec une puissance comparable à l'usine de la Rance à l'horizon 2017.



- Un autre moyen d'extraire l'énergie marémotrice, c'est d'utiliser ce qu'on appelle une hydrolienne.
- On va donc immerger dans une zone où se produisent de très forts courants de marée, - donc ce sont des zones très localisées puisqu'en définitive, ce sont des effets géographiques de concentration qui vont créer des courants très élevés dans des zones particulières, par exemple au niveau des pointes ou au niveau d'un isthme -, donc on va immerger une turbine dans cette zone et on va pouvoir ainsi extraire une partie de l'énergie cinétique du courant selon un principe qui est grossièrement similaire à celui d'une éolienne.
- La densité d'énergie est, sur ces sites, plus forte que la densité moyenne que l'on peut trouver sur un site éolien.
- ⇒ Donc les machines sont à priori plus compactes pour une même puissance.
- La machine est en eau libre donc on a une influence limitée sur les usages et sur l'écosystème environnant.
- On peut utiliser différents types de technologies, par exemple on peut utiliser des turbines à axe horizontal (à gauche), des turbines à axe vertical (au milieu), ou des turbines qu'on appelle oscillo-battantes qui se comportent un petit peu, c'est-à-dire qu'on a une pale qui va osciller dans le fluide et qui va reproduire grossièrement le mouvement de la nageoire caudale d'un cétacé.



- On voit qu'il y a un grand nombre de projets différents, un grand nombre de principes différents, cependant, la majorité des projets les plus avancés vont utiliser des turbines à axe horizontal qui ressemblent, grossièrement, aux éoliennes de grande puissance que l'on peut trouver à terre.
- Si on regarde un petit peu ces différents projets parmi les plus avancés, on voit que l'on a des consortiums industriels qui testent ou ont testé récemment des machines de l'ordre du mégawatt sur des sites dédiés.

- ⇒ Alors il y a un certain nombre de sites dédiés. Il y en a au Canada, il y en a au Royaume-Uni et il y en a en France.
- Alors, si on regarde un petit peu plus en détails les technologies qui sont liées à ces hydroliennes, on voit que l'on a deux grandes tendances.
  - La première tendance est d'essayer d'utiliser des options technologiques et qui ont déjà été utilisées pour l'éolien de grande puissance de manière à accélérer la maturité commerciale et à bénéficier du retour d'expérience du secteur éolien.
- ⇒ Donc on va, par exemple, utiliser des multiplicateurs qui vont permettre d'utiliser des génératrices rapides, compactes et relativement standards.
- ⇒ On va utiliser des systèmes de contrôle de pas où on va faire varier l'angle de la pale par rapport au moyeu, de manière à effectuer des opérations de limitation de puissance et de mise en sécurité lors des courants extrêmes ;
- ⇒ Ou on va, par exemple, utiliser des systèmes d'orientation de la turbine face aux fluides.
- Alors ce sont des systèmes mécaniques relativement complexes, donc ils nécessitent des niveaux de maintenance relativement élevés et donc ça veut dire que si on choisit ce type d'option, on va être obligés d'imaginer un système pour pouvoir accéder de manière régulière - tous les quelques mois -, à la machine.
- Ça veut dire que, par exemple, il faut imaginer des systèmes de relèvement.
- ⇒ Alors on voit un exemple de ces systèmes de relèvement dans l'illustration en haut à droite, sur la turbine SeaGen où les turbines en définitive sont disposées sur une pile avec une sorte d'élévateur qui permet d'extraire les turbines hors de l'eau pour pouvoir y accéder pour la maintenance.
  - Une deuxième tendance, un petit peu antinomique est d'imaginer de nouvelles solutions, des solutions originales qui sont dédiées aux systèmes hydrolien.
- ⇒ On va vouloir minimiser les opérations de maintenance et on va ainsi éliminer tous ces systèmes mécaniques dont j'ai parlé tout à l'heure : le multiplicateur, le système de contrôle de pas, le système d'orientation de la turbine face aux fluides.
- Mais ça veut dire qu'il faut repenser totalement la conception de la turbine, tant au niveau de sa conception globale qu'au niveau de son contrôle commandes.
- ⇒ Un exemple de ce type de tendance est donné par l'illustration qui est en bas à gauche : la turbine OpenHydro / DCNS où une génératrice à entraînement direct, donc une

génératrice sans multiplicateur est afféree en périphérie des pales de la turbine et localisée dans la tuyère qui entoure la turbine.

⇒ Alors on voit qu'on a plusieurs solutions technologiques, la solution technologique de référence reste encore pour l'instant à déterminer, on peut d'ailleurs imaginer que selon la nature du site, plusieurs solutions technologiques relativement différentes puissent s'imposer.



# L'énergie houlomotrice

**Jean-Frédéric CHARPENTIER**

*Maître de Conférences – Ecole Navale*

Je vais parler ici de l'énergie houlomotrice ou l'énergie des vagues.

- Alors, il s'agit ici d'extraire de l'énergie du mouvement de la surface de la mer qui est créé en général par des conditions ou par des phénomènes météorologiques, en général le vent.
- Et donc, finalement, c'est un mouvement qui est complexe, qui est alternatif et complexe donc extraire l'énergie de ce mouvement et la transformer en énergie mécanique qui est susceptible d'être transformée en électricité n'est pas une chose particulièrement évidente.
- L'imagination des ingénieurs a été particulièrement fertile au sujet de l'énergie houlomotrice et si on regarde par exemple en 2006, on comptabilisait plus de 1000 brevets qui proposaient des systèmes pour extraire l'énergie de la houle.

Donc, je n'ai pas la prétention de décrire ces 1000 systèmes mais je vais me concentrer sur quelques-uns de manière à vous montrer un petit peu quelques principes pour extraire cette énergie.

- Une première famille de solutions consiste à être capable de turbiner un fluide qui peut être de l'eau ou de l'air, qui est mis en mouvement de manière directe ou indirecte par les vagues.
- ⇒ On a ainsi des systèmes qui sont dits à déferlement : donc on va construire sur une plage artificielle, sur cette plage artificielle les vagues vont déferler et vont remplir un bassin dont le niveau d'eau va être supérieur au niveau moyen de la mer.
- ⇒ On va vidanger ce bassin et effectuer une opération de turbinage lors de cette vidange et ainsi récupérer l'énergie électrique.
- Alors, ce type de système à déferlement peut être installé au niveau de la côte, on en voit un exemple en haut à droite avec le système SSG.



- ⇒ C'est un système danois qui est constitué de plusieurs plages superposées, avec plusieurs bassins superposés, donc l'eau va progressivement descendre à travers le dispositif en étant turbinée à chaque fois.
- On peut également installer ces dispositifs en mer, donc les ancrer.
- ⇒ On voit un exemple de ce type de dispositif en mer avec le projet qu'on appelle Wave Dragon. Donc c'est également projet danois. Et on voit les plages de déferlement en rouge et le bassin au centre.
- Une deuxième possibilité est de par exemple fabriquer ce que l'on appelle une colonne d'eau oscillante.
- ⇒ On va fabriquer une cavité qui est semi immergée, donc le mouvement de la surface de la mer va créer une variation du niveau d'eau à l'intérieur de la cavité, une variation dynamique du niveau d'eau et ça va expulser et admettre de l'air à l'intérieur de la cavité à travers une turbine qui se trouve en général au sommet de la cavité.
- Alors là aussi, on peut avoir une installation à la côte.
- ⇒ On voit le projet LIMPET, par exemple, qui est un des premiers projets houlomoteurs construits. Donc on voit la cavité qui est constituée en béton et on voit le tube qui est à droite de la cavité et donc dans ce tube, sont situés la turbine et le générateur.
- On peut également placer ces colonnes d'eau oscillantes en mer.
- ⇒ Donc on les ancre de manière fixe.
- ⇒ C'est le cas du projet Oceanlinx par exemple. On voit ici la cavité et au-dessus l'emplacement de la turbine.



- Alors, bien entendu les systèmes qui sont à la côte sont plus faciles à connecter au réseau électrique.
- Il est également plus facile d'intervenir dessus, on se trouve dans une situation qui assez proche par exemple de l'éolien terrestre.
- ⇒ Mais bien entendu, ils sont sujets à plus de conflits puisqu'il y a beaucoup plus d'utilisateurs sur la côte qu'en mer. Ils sont sujets à beaucoup plus de conflits que les systèmes en mer.
- ⇒ Pour les systèmes en mer, bien entendu se pose le problème du raccordement et de l'ancrage.
- Alors, on peut également imaginer d'autres systèmes pour récupérer l'énergie de la houle. Dans cette deuxième famille de systèmes, le mouvement de la surface de la mer va mettre en mouvement des corps solides et on va exploiter les mouvements relatifs de ces corps solides.



- On a par exemple des systèmes de type atténuateurs qui sont constitués de plusieurs flotteurs articulés.

- Donc le mouvement de la mer va mettre en mouvement les flotteurs et on va récupérer l'énergie aux articulations, soit par le biais d'un générateur direct dédié qui est très spécifique dans ce cas-là, soit par le biais d'un système hydraulique ou pneumatique, par exemple on va avoir une pompe qui va pressuriser un fluide que l'on va turbiner.
- Donc un exemple de ce type d'atténuateur un des projets houlomoteur les plus connus que l'on appelle le PELAMIS qui est un projet anglais. Donc que l'on voit en illustration en haut.
- ⇒ Il s'agit d'une sorte de serpent de mer constitué de plusieurs flotteurs et donc ce serpent va onduler en définitive à la surface de la mer avec les vagues.
- On peut également avoir des systèmes que l'on appelle pompes ou absorbeurs.
- ⇒ Donc dans ce cas, on va avoir un flotteur qui est soit à la surface de la mer, soit partiellement immergé et ce flotteur va osciller avec le mouvement des vagues.
- ⇒ Il va transmettre cette oscillation à la base du dispositif et donc, on va récupérer un petit peu de la même manière que pour les atténuateurs, ce mouvement et on va le transformer en énergie soit de manière directe soit de manière indirecte par un système hydraulique automatique.
- ⇒ Un exemple de ce type de dispositif est le projet CETO par exemple, proposé par une compagnie australienne et qu'une compagnie française qui s'appelle DCNS a également choisi, qui propose ainsi un flotteur semi immergé qui oscille avec le mouvement des vagues.
- Une troisième solution est d'utiliser par exemple des systèmes de volets oscillants.
- La houle va pousser le volet de manière alternative et on va récupérer de l'énergie à la jonction avec la partie fixe, donc quelque part à la charnière du volet, si j'ose dire, de la même manière que pour une pompe ou un atténuateur.

Donc, si on regarde ces différents systèmes, ce qu'il faut comprendre c'est que l'énergie houlomotrice est relativement diffuse, les systèmes proposés ont des rendements relativement faibles, donc pour obtenir des puissances significatives, on va avoir des systèmes qui sont particulièrement importants en termes de volume et de taille.

⇒ À titre d'exemple, le Pelamis (qui est illustré en haut) a une longueur de plus de 150 mètres et un déplacement de plus de 1000 tonnes.

Lors des conditions de mer extrêmes, par exemple lors des tempêtes, les vagues vont exercer des forces très importantes sur ces structures, donc la robustesse des structures elles-mêmes et de leur ancrage est un véritable défi en termes d'ingénierie.

Ces difficultés d'implantation et d'opération, cet environnement hostile, font que pour l'instant aucun des multiples systèmes proposés n'a atteint un niveau de maturité suffisant pour être développé à grande échelle à un stade commercial.