



SEMAINE 5 : LES ÉNERGIES MARINES

Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Installation et maintenance des technologies » de la semaine 5 du MOOC « Energies 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.

Installation des éoliennes offshore : généralités

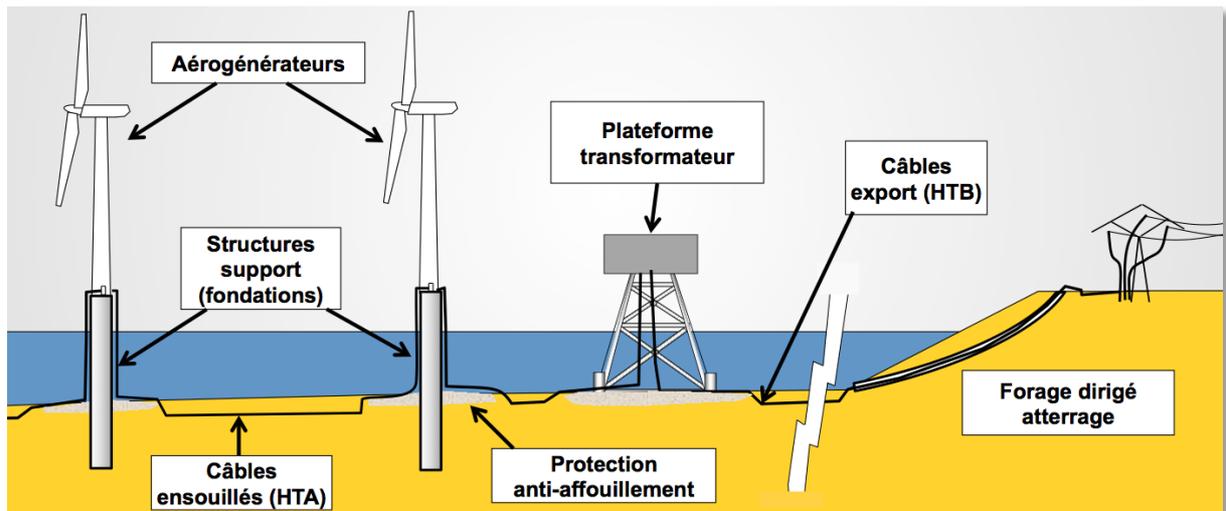
Jacques RUER

Directeur adjoint développement des technologies – SAIPEM

L'exploitation des énergies marines nécessite l'installation en mer de nombreuses infrastructures et équipements. De manière générale, il s'agit d'équipements relativement lourds qui sont bien sûr fabriqués à terre et qui doivent être transférés en mer - d'abord au port - avant d'être transportés et installés sur le site.

- ⇒ Toutes ces infrastructures doivent résister aux environnements les pires qu'on puisse imaginer pendant toute la durée du projet, que ce soient les vagues, les courants, les tempêtes etc.
- ⇒ Ce sont également des machines électriques qui nécessitent bien sûr d'être câblées par un réseau de câbles sous-marins et de là jusqu'à la côte.
- ⇒ Et enfin, la maintenance doit être assurée également en mer.

Dans les minutes qui suivent, on va se concentrer sur l'éolien posé et cette figure montre les différentes infrastructures que l'on trouve sur une ferme éolienne offshore.



- Les éoliennes proprement dites, encore appelées aérogénérateurs, sont finalement assez semblables aux éoliennes que l'on peut trouver à terre. Sauf qu'ici, elles sont installées sur des structures supports qui s'étendent donc verticalement entre la bride de l'aérogénérateur, à travers toute la colonne d'eau et qui se prolongent dans le sol par les fondations.
- Ces structures supports doivent être protégées contre l'affouillement qui pourrait survenir suite à l'action de la houle et des courants qui peuvent déchausser la fondation au fil des mois et des années.
 - ⇒ Pour éviter cela, on déverse autour de ces structures supports une couche de grosses pierres qui resteront en place et qui éviteront ce déchaussement, encore appelé affouillement.
- Les éoliennes sont reliées entre elles par des câbles électriques, en moyenne tension, dit encore HTA (par exemple 33 - 36 kV), et pour des raisons légales, il est obligatoire d'ensouiller ces câbles autant que possible sous la surface du sol.
- L'énergie électrique ne pourrait pas être exportée à terre sous forme de moyenne tension, on est donc obligés de l'élever en haute tension et cela se réalise sur une plate-forme transformateur intégrée à la ferme éolienne offshore où cette tension passe de 36 kV à 100 ou 400 kV.
 - ⇒ On parle de réseau HTB.
- Les câbles électriques haute tension vont alors de la plate-forme transformateur jusqu'à la côte et elles doivent d'ailleurs traverser le trait de côte - ce qui est un problème différent selon qu'on a à faire à une plage, une falaise, une côte rocheuse -, avant enfin, finalement de monter sur le réseau électrique continental.

- Pour fixer les idées, une éolienne offshore moderne a une puissance de 5 à 8 MW, ce qui correspond à une masse en tête, nacelle plus rotors de 300 à 400 tonnes, tout cela à plus de 100 mètres au-dessus de la surface de l'eau.
- Le mas ou la nacelle ou la partie aérienne de l'aérogénérateur fait encore 200 à 300 tonnes et il faut ajouter à cela la structure support qui est donc la partie marine, qui va être de 500 à 700 tonnes et encore, les ancrages pour maintenir cette structure support dans le sol, qui est variable selon la nature du sol.
- ⇒ Car les structures support dépendent foncièrement de la profondeur d'eau, de la taille de l'éolienne mais aussi et presque surtout du type de sol.
- On voit à gauche un monopieu qui est réalisé avec un assemblage de tôle roulée soudée, qui convient bien pour des profondeurs d'eau de 10 à 20 ou 30 mètres maximum, que l'on installe classiquement par battage dans des sols par exemple sableux.
- Si la profondeur d'eau est plus grande, ce monopieu aurait une flexibilité trop importante et pour augmenter la rigidité, on lui ajoute des jambes latérales pour former par exemple un tripode.
- Pour des sols durs, il serait difficile d'installer des fondations profondes donc on est obligés de recourir à des embases gravitaires, dites encore fondations superficielles qui sont donc essentiellement des embases en béton qui maintiennent l'éolienne en place par son poids propre.
- Et enfin, pour les grandes profondeurs d'eau, on va trouver des structures Jacket qui sont des trées soudées qui ressemblent aux plates-formes pétrolières offshore et ces Jacket conviennent pour des profondeurs d'eaux qui vont jusqu'à 50 mètres.

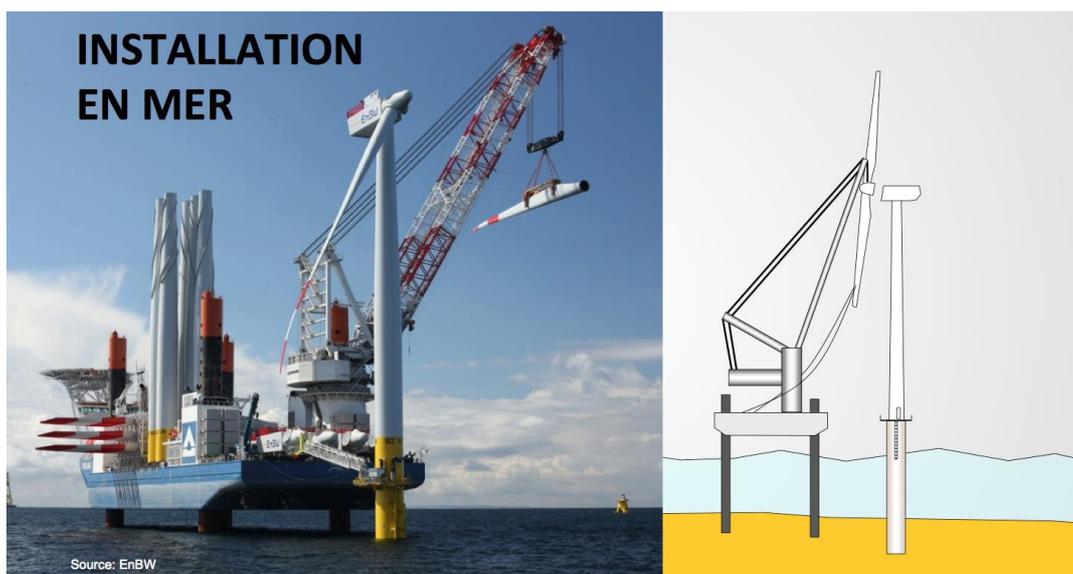
Voici quelques illustrations de ces différents éléments :



- On voit à gauche un monopieu qui est en train d'être installé dans un sol sableux par un marteau hydraulique que l'on voit au-dessus.
- La deuxième image est un prototype de tripode, celui-là était installé à terre bien sûr mais si vous agrandissez l'image, vous verrez dessous, au centre du tripode, un homme qui vous donnera une idée de la taille.
- La troisième image est la fondation gravitaire en béton qui est donc un cône réalisé en béton armé et précontraint et une fois posée sur le site, cette embase est ballastée par un lestage avec du sable.
- Enfin, la dernière image représente une rangée d'éoliennes installées sur des structures Jacket.

Tous ces éléments sont fabriqués à terre, doivent être chargés au port sur une barge flottante, ce qui est en soi un problème assez délicat, avant d'être transportés sur le site et d'être posés.

- ⇒ Là, pour la pose, bien sûr on a besoin en mer d'une grue qui va être capable de soulever la structure de la poser à sa place précisément.
- Une fois la structure en place, on vient monter dessus l'éolienne. Et là, on a un problème un peu particulier, parce que l'éolienne elle-même est fixe par rapport au sol et on ne pourrait pas prendre une grue sur une barge flottante, qui bougerait donc sur les vagues.
- On est obligés de rendre la grue fixe par rapport au sol et pour cela on utilise des navires très particuliers, qui se hissent sur des jambes au-dessus de l'eau, qui se soustraient donc à l'action des vagues : on appelle ça des navires Jackup.



- ⇒ On voit un exemple ici.

➤ À partir du moment où le navire s'est soulevé au-dessus de l'eau, il est fixe par rapport au sol et on peut donc installer l'éolienne comme on le ferait à terre. Sauf s'il y a beaucoup de vent bien sûr.

⇒ On ne peut pas non plus d'ailleurs installer des éoliennes à terre quand il y a beaucoup de vent pour le même problème de stabilité de la grue.

Mais ici en mer, avec les vagues, se posent des problèmes particuliers, en cas de tempête on est incapables de travailler, en tout cas pour des raisons de sécurité, il est très important de ne pas faire de travail en mer pendant les mauvais temps et pour ces problèmes-là, on s'interdit de réaliser les travaux de construction en mer pendant la mauvaise saison.

⇒ On concentre tous ces travaux pendant la belle saison qui s'étend disons de début avril à début octobre.

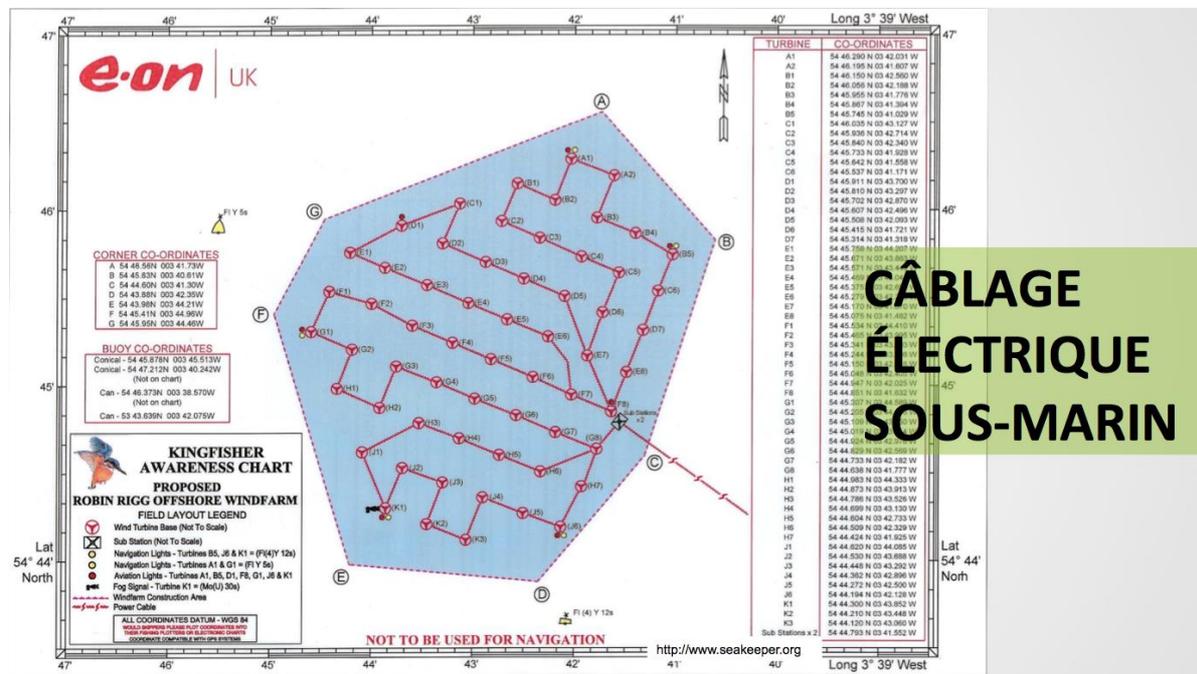


Eolien flottant et hydroliennes : câblage électrique et maintenance

Jacques RUER

Directeur adjoint développement des technologies – SAIPEM

La puissance électrique est véhiculée par tout un ensemble de câbles électriques sous-marins. On trouve des câbles qui vont d'une éolienne à l'autre et qui se terminent sur une plate-forme de transformation. Ces câbles électriques inter-éoliennes sont réalisés en moyenne tension (par exemple 36 kV), on parle de réseaux HTA.



CÂBLAGE ÉLECTRIQUE SOUS-MARIN

De la plate-forme de transformation, repart la puissance par un ou plusieurs câbles exports qui sont donc en haute tension (HTB), par exemple de 150 000 à 400 000 V.

Les câbles électriques sous-marins sont des éléments très particuliers qui sont fabriqués à la demande, qui comportent les conducteurs en cuivre ou en aluminium, qui sont isolés par une couche par exemple de polyéthylène réticulée haute densité, on parle d'isolation XLPE.



- On profite de ces câbles pour véhiculer sur le même chemin les signaux de contrôle commandes à travers un réseau de fibre optique et ces câbles électriques sous-marins se distinguent des câbles électriques souterrains parce qu'ils doivent légalement être protégés mécaniquement par une, voire plusieurs nappes de fil d'acier.
- Pour poser ces câbles, on a besoin bien entendu de navires spécifiques sur lesquels les câbles sont lovés et qui les déroulent progressivement sur le fond de la mer et comme on doit les ensouiller sous la surface de sol, on a recours à une charrue par exemple (on en voit une en bas à droite), qui va créer une tranchée dans laquelle le câble est descendu.



La plate-forme de transformation peut être un élément très lourd, (on voit ici une plate-forme de 500 MW qui pèse quand même 12 000 tonnes), et il faut signaler que pour exporter une grande puissance à une grande distance par des câbles électriques sous-marins, cela pourrait ne pas être très efficace si la puissance est trop grande et les distances très importantes.

- C'est pour ça qu'on voit se développer une technologie qui consiste à réaliser cette transformation en courant continu haute tension.

⇒ On parle à ce moment-là d'export sous forme de HVDC (*high voltage direct current*). C'est une tendance absolument générale pour les grandes fermes éoliennes offshore par exemple en Allemagne.

⇒ La plate-forme que l'on voit, réalise cet export sous forme de courant continu.

Concernant la maintenance, on peut faire deux distinctions :

➤ De manière classique, on a la maintenance préventive qui consiste à réaliser l'entretien périodique, systématiquement en été, autant que faire se peut.

➤ La maintenance conditionnelle qui va consister à intervenir après avoir reçu une télé alarme à travers ce réseau de fibre optique de surveillance ;

➤ Et bien entendu, la maintenance curative qui consiste à faire une réparation après une panne.

⇒ Mais il faut aussi distinguer entre la maintenance légère en mer par du personnel ou des moyens de manutention relativement légers, avec des petits navires, et la maintenance lourde qui va nécessiter d'amener sur place des navires grues du type Jackup tout à fait similaires à ceux qui ont servis pendant la construction de la ferme.

Il est très important de voir que pour réaliser la maintenance en mer, il faut pouvoir accéder aux éoliennes et pouvoir accéder aux éoliennes en toute sécurité. Et cela devient très difficile à partir de petits navires dès que la mer a des vagues qui dépassent 1,5 mètre à 2 mètres de hauteur.

➤ Pour améliorer la situation, on voit donc apparaître des passerelles spéciales qui connectent mécaniquement le navire qui bouge à l'éolienne qui ne bouge pas mais qui permet le transfert du personnel en toute sécurité.

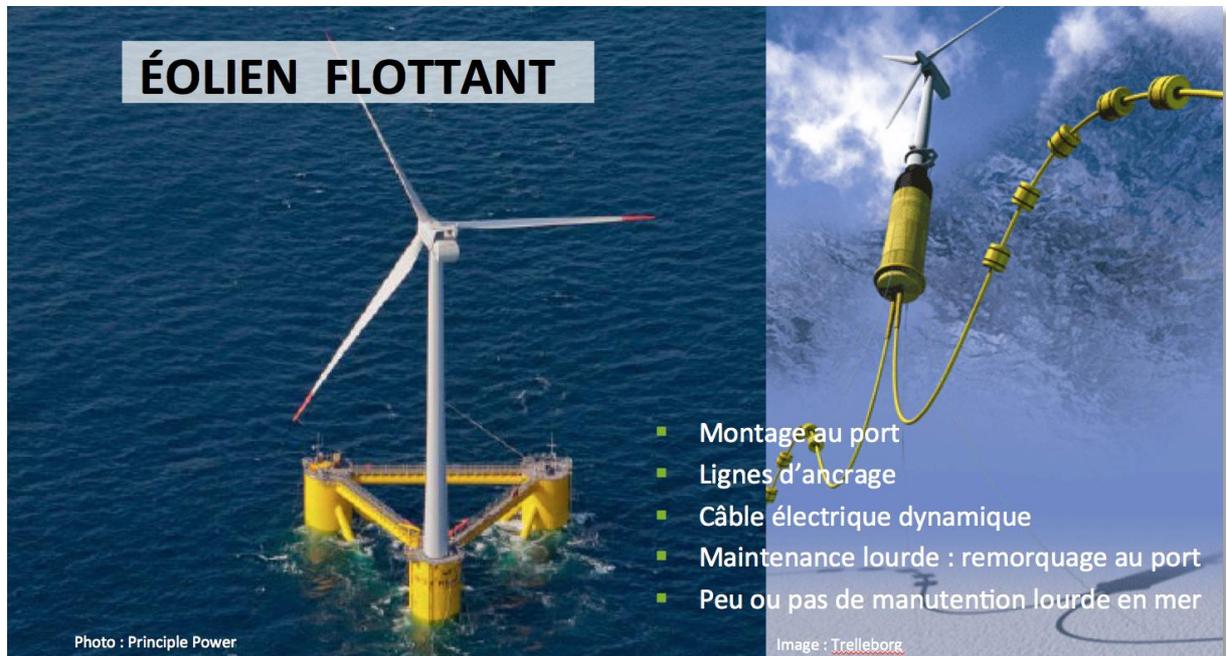
⇒ Un problème malgré tout avec ces navires, c'est que le temps de trajet jusqu'aux éoliennes peut prendre pas mal de temps et manger une grande partie du temps de travail journalier.

⇒ Donc pour améliorer la situation, on a de plus en plus recours à de l'hélicoptère : le personnel est apporté par hélicoptère au sommet, hélicoptère au sommet de la nacelle.

⇒ Un hélicoptère coûte plus cher qu'un bateau bien sûr mais l'accès est facilité : même si la mer a des vagues de plus de deux mètres, on peut encore accéder en hélicoptère et aussi, comme le temps de trajet est plus court, la même équipe de techniciens va pouvoir visiter éventuellement plusieurs éoliennes dans la même journée de travail.

Si l'on considère maintenant l'éolien flottant, on constate que le montage peut être réalisé complètement au port, c'est quand même plus simple que de réaliser le montage en mer.

- Par compte, comme l'éolienne doit rester fixe à la surface de la mer, on va avoir des lignes d'ancrage, donc des ancres qui sont bien sûr très différentes selon le type de sol qu'il y a sous l'éolienne.



Également, le câble électrique qui descend de l'éolienne jusque sur le sol, doit traverser toute la colonne d'eau.

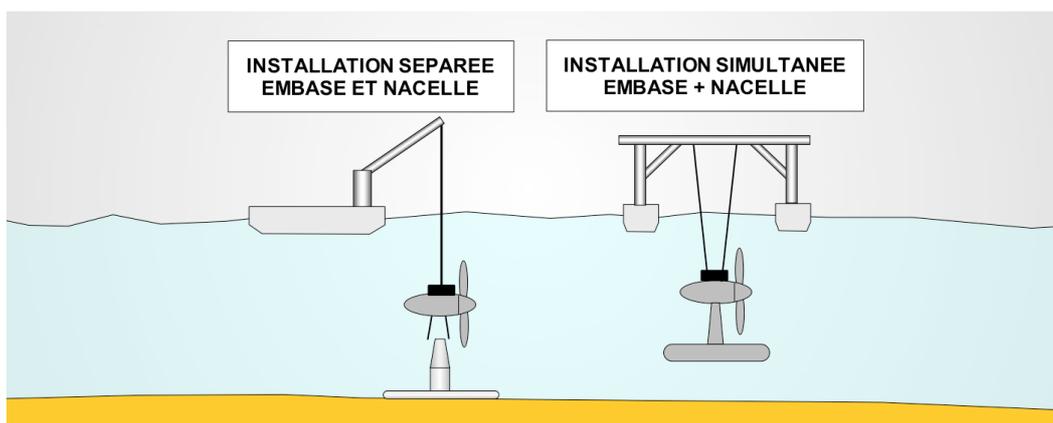
- ⇒ Il est donc soumis à l'action des vagues et des courants et ce câble électrique, dit dynamique doit être étudié donc en conséquence.

S'il y a un besoin de maintenance lourde, le plus simple consiste certainement à déconnecter l'éolienne et à la ramener au port. Si bien que l'on peut dire que dans le cas de l'éolien flottant, on a probablement peu voire pas besoin de maintenance lourde, de levage lourd en tout cas, en mer.

Si on parle maintenant des hydroliennes, ce sont des machines sous-marines qui ont une puissance plus faible que celle des éoliennes pour l'instant (de 100 kW à 1 MW) mais qui sont soumises à des efforts hydrodynamiques très importants à cause bien entendu des forts courants sur les sites considérés.

- Sur ces sites, il serait difficile d'amener des navires Jackup parce qu'il y a du courant et parce que la profondeur d'eau est toujours relativement grande (40 mètres à 50 mètres) donc on est obligés de recourir à des moyens navals spécifiques qui sont capables de se maintenir à la surface de la mer dans une position très précise malgré la présence des courants et des vents.
- ⇒ Toujours pour des raisons de sécurité, il est tout à fait déconseillé de recourir à des plongeurs sur des sites hydroliens.

- On ne pourrait pas entretenir une hydrolienne au fond de l'eau donc pour l'entretien, cela suppose tout d'abord le relèvement de la machine hors de l'eau avant la remise en place après réparation.
- Par compte, les câbles doivent résister également aux efforts du courant.
- ⇒ Donc durant la construction de ces câbles pour hydroliennes, on améliore, on alourdit le câble volontairement par un lestage supplémentaire.
- ⇒ Par compte la distance à la côte est relativement faible, si bien que l'on peut exporter la puissance des hydroliennes à la côte en moyenne tension.
- Signalons aussi que si on a un réseau de câbles reliant beaucoup d'hydroliennes entre elles sur un même site, on peut avoir besoin de connecteurs électriques sous-marins qui sont des éléments très spécifiques qui nécessitent beaucoup d'attention.
- Pour l'installation et la maintenance des hydroliennes, on voit apparaître deux philosophies générales.
 - La première consiste à installer tout d'abord l'embase, comme pour une éolienne posée classique sur laquelle on vient poser et connecter l'hydrolienne proprement dite. Avec un navire donc capable de se maintenir très précisément en un point voulu pour déposer l'hydrolienne à l'endroit précis.
 - Cette opération est assez délicate bien entendu, si bien qu'il existe aussi une autre philosophie qui consiste à installer simultanément l'hydrolienne sur son embase, le tout en même temps.



- ⇒ Dans ce cas-là, bien sûr, sur le colis est beaucoup plus lourd et le navire de pose doit être beaucoup plus puissant.

Ces deux images présentent deux maquettes qui illustrent ces deux philosophies :

- On voit à gauche une embase (en jaune) qui a été installée préalablement sur le fond de la mer sur laquelle on vient connecter l'hydrolienne proprement dite (en blanc) avec son rotor.
- À droite, une hydrolienne de type OpenHydro dans laquelle la génératrice est intégrée à l'ensemble de structure support et donc dans ce cas-là, on installe tout ensemble : l'hydrolienne et son embase.

