

Les fondations d'éoliennes « offshore »

Torsten Fisher¹.

Panorama des types de fondations

Les fondations classiques pour éoliennes *offshore* englobent les massifs poids, les fondations avec pieu unique, dites monopieu, comportant ou non des équipements de liaison, les trépieds ou structures à support, et les fondations par succion.

La technologie de fabrication et d'installation des massifs poids est bien connue. Ces fondations sont principalement utilisées en eau peu profonde car leur coût augmente considérablement avec la profondeur. En outre, leur construction implique un grand espace, chantier naval par exemple. C'est aussi le cas pour les trépieds et structures à support, considérées comme compétitives pour des profondeurs d'eau dépassant 40 m. Toutefois, à ce jour, aucune fondation d'éolienne de ce type n'a été mise en place, car elles sont pénalisées aussi par une autre contrainte, le coût des soudures de joints.

La **fondation la plus courante** aujourd'hui est le pieu, dont un des principaux avantages est d'être facile à fabriquer et à transporter car elle ne requiert que peu d'espace. L'inconvénient est qu'elle implique l'usage d'un dispositif d'installation spécifique.



Photo 1. Collier pré-soudé installé à Scroby Sands (cliché Vestas).

1. *Offshore Support and Engineering*. Vestas Northern Europe A/S, Heerninvej 5-7, 6920 Videbaek, Denmark. Courriel : tfj@vestas.dk



Photo 2. Les éoliennes de North Hoyle (cliché Vestas).

Dans le cas où le fond marin est constitué de sable ou de sédiments, l'installation des pieux dans le sol se fait à l'aide de marteaux hydrauliques ou à vibration. Les dommages, produits sur le pieu par l'emploi des marteaux hydrauliques, doivent être pris en compte dans l'usure liée à la durée de vie du pieu. La fixation de la tour au sommet de la fondation se fait couramment au moyen d'une pièce de transition ou collier de raccordement, habituellement mise en place par injection. Certaines parties de la structure en acier (accotement pour bateaux, tubes J, etc.) peuvent être présoudées à la pièce de transition. Pour ces types de fonds marins, il est également possible d'installer un collier présoudé, à condition de concevoir ce collier avec un soin particulier. Cette technique a été utilisée avec succès dans le projet de Scroby Sands (30 éoliennes Vestas V80 de 2 MW) (Photo 1). Cette méthode présente l'avantage de ne pas impliquer la pièce de transition coûteuse, ni de nécessiter d'opération d'injection de longue durée.

Dans le cas de fonds rocheux, les fondations par pieux sont couramment installées dans des massifs de roche renforcés par des injections. Il est alors possible de présouder le collier de raccordement ainsi que la structure secondaire en acier (accotement pour bateaux, tubes J, etc.) au pieu. En présence de grès ou d'agrégats recouverts par une épaisse couche d'altération, de sable ou de sédiments divers, il peut s'avérer risqué d'installer le pieu



Photo 3. Les éoliennes de North Hoyle (cliché Vestas).



Photo 4. Les éoliennes de North Hoyle (cliché Vestas).

dans la couche de roche dure. On utilise alors une méthode mixte : le pieu est descendu aussi loin que possible, puis on procède au sondage et au forage du massif rocheux, le pieu étant ensuite mis en place dans sa position finale. Cette méthode a été utilisée avec succès dans le projet de North Hoyle (30 éoliennes Vestas V80 de 2 MW) (Photos 2 à 4).

Dans toutes ces méthodes qui impliquent l'enfoncement de pieux, la présence de gros blocs rocheux constitue un handicap. À noter que les opérations d'enfoncement de pieu ou de sondage d'un massif rocheux doivent être réalisées à partir d'un navire stabilisé, comportant une plate-forme surélevée.

La **fondation à piston** constitue un nouveau type de fondation, utilisable sur fond marin de sables ou sédiments divers. Les premiers tests se sont avérés positifs et le premier prototype a été installé à Frederikshavn au Danemark. Ce type de fondation se présente sous la forme d'un puits cylindrique comportant, au sommet, un collier de raccordement à la tour de l'éolienne et, à la base, un tube cylindrique ou piston de succion. Cette fondation est placée sur le fond marin, puis implantée par succion en son sein. La fondation à piston constitue ainsi un type spécial de fondation gravitaire offrant des possibilités nouvelles sur le plan de la construction et de la manutention.

Importance des reconnaissances de site pour la conception de la fondation et la méthode de mise en place

La sélection du type de fondation et de la méthode de mise en place dépend des conditions spécifiques du site, climatiques et géologiques : profondeur d'eau, conditions de houle et de climat, hauteur des marées, caractéristiques de sol et de courant. Dans les zones arctiques ou subarctiques, les glaces à la dérive doivent également être prises en compte.

Le choix de paramètres réalistes constitue la clef d'une conception économique et efficace de la structure support et de la méthode de mise en place de celle-ci. Il importe que ces paramètres soient bien définis dans le document de conception de base et que les reconnaissances de sols se fassent à un stade précoce du projet. Les éoliennes offshore impliquent un investissement élevé. Ceci vaut pour les reconnaissances qui peuvent être longues et difficiles selon les conditions de site. De ce fait, il est important de collecter et d'exploiter préalablement toute l'information disponible afin de planifier au mieux les reconnaissances nécessaires. Cette information est tirée des études de structures importantes existant sur le littoral marin et côtier (phares, jetées, câbles et pipelines sous marins), des données fournies par les services géologiques, les offices météorologiques ou les autorités portuaires, ou de pêche, des tables de marées, cartes marines, bases de données, etc.

La **première phase** des travaux correspond à des

études en bureau et à des entretiens avec les habitants. L'information collectée à ce stade peut suffire pour élaborer la conception primaire du champ d'éoliennes. La connaissance en amont du type de fondation la mieux adaptée au site et de l'implantation géographique du champ d'éoliennes, aide à planifier les reconnaissances, et à maîtriser l'étude de conception liée à la complexité du site.

Dans **un second temps**, on effectue une reconnaissance sismique du secteur afin de déterminer la séquence des sédiments de surface ou la surface apparente du socle rocheux. Si possible, la reconnaissance devra être étendue à des sites voisins où les profils de sols ainsi que les caractéristiques sont connus. La reconnaissance sismique est conduite selon des profils couvrant l'ensemble des trajets des câbles reliant le champ éolien au débouché terrestre, ainsi que le secteur du champ éolien lui-même et les zones périphériques. Il convient aussi d'effectuer des prélèvements de sédiments du fond et de délimiter les zones respectives d'affleurements de roche dure et de sédiments. En cas d'érection d'un mât météorologique sur le site, avec enfoncement d'un pieu, l'enregistrement des données d'enfoncement sera très utile pour déterminer la résistance des sols. Il importe également que la prospection sismique soit combinée à une reconnaissance bathymétrique, les deux pouvant être réalisées à partir d'un bateau de petit gabarit.

Après les caractéristiques des sols, ce sont les données météorologiques et océaniques qui sont requises pour concevoir les fondations d'éoliennes. Au cas où les informations existantes ne suffisent pas, il est recommandé d'installer, sur le site, un mât météorologique pour effectuer des mesures de vent, et une jauge de marée. Les données correspondantes doivent être recueillies sur un an au minimum. À ce stade, des simulations de courants et de vagues peuvent fournir les données hydrodynamiques, les mesures à long terme sur des sites voisins pouvant être utilisées pour calibrer les simulations.

La **troisième phase** est celle des sondages pour prélever et identifier les sols et tester leur résistance. La conception de la fondation permet de déterminer la profondeur des forages à réaliser, dont le nombre est fonction des connaissances acquises au cours des phases 1 et 2 et de la plus ou moins grande uniformité du site. Les forages doivent être complétés par des tests au pénétromètre (« Cone Penetration Tests » ou CPT) destinés à évaluer la résistance des sols en profondeur. Ces tests ne permettent pas de recueillir des échantillons de sol et ne peuvent se faire qu'en contexte de sédiments.

Pour les sites dans lesquels le niveau supérieur du fond correspond à des sables, les vagues et le courant



Photo 5. Les éoliennes de Horns Rev, Danemark, en construction (cliché Vestas).

peuvent induire des changements dans la profondeur d'eau suite à des mouvements des sédiments du fond (dunes ou rides sableuses à large échelle) ou à l'érosion de ces derniers. Dans ce cas, il est recommandé de concevoir la fondation en s'appuyant sur un minimum de deux reconnaissances bathymétriques récentes, séparées d'au moins un an, afin d'estimer la baisse maximale du fond durant la durée de vie de l'éolienne. Une information complémentaire sur ces mouvements du fond marin peut être obtenue à partir des anciennes cartes marines.

À l'issue de cette troisième phase, la conception de la fondation peut être finalisée, selon les meilleures conditions de coût.

Le rôle central de la conception de la fondation

La conception porte sur la structure de support principale et sur la structure secondaire en acier : accotement pour bateaux, plate-forme d'accès et tubes J pour les câbles. La conception de la structure principale est influencée essentiellement par des paramètres d'environnement que toutes les reconnaissances réalisées précédemment permettent de définir avec précision. Sont également à

considérer les contraintes de manutention durant la fabrication et le transport des fondations.

La conception de la structure secondaire en acier est conditionnée essentiellement par les méthodes de mise en place de la fondation, les connexions de câble, les protections d'entretien et l'éolienne elle-même. Il faut également prendre en compte les services à assurer et l'accessibilité de l'éolienne.

Dans la phase d'ingénierie d'une éolienne *offshore*, l'enjeu est d'optimiser non seulement la conception de la fondation, mais également tous les interfaces : fabrication de la fondation, méthodes pour assurer l'installation et les services, conception de la tour et de l'éolienne (Photos 5 et 6).



Photo 6. Éolienne de Horns Rev, Danemark (cliché Vestas).

Énergie issue des courants marins : l'hydrolienne

Alain Laumondais¹.

L'énergie disponible existe sous diverses formes :

- fossile (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) ;
- sous-produit de l'activité humaine (exploitation des déchets, biocarburants, etc.) ;
- vive, donc à maîtriser (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique). L'énergie de type hydraulique est :
 - soit terrestre (cours et chutes d'eau naturels ou artificiels) ;
 - soit marine, avec la houle, les courants de marées et les grands courants océaniques tel que le Gulf Stream. C'est la maîtrise de ces derniers que nous allons considérer ci-après car ils sont pérennes.

La houle

Plusieurs tentatives eurent lieu avec des résultats plus ou moins heureux mais avec des rendements énergétiques très faibles et aucun de ces projets n'a vu économiquement le jour. Signalons toutefois :

- le moteur à vagues de l'Abbé Le Dantec en 1886 (énergie produite par le déplacement vertical d'un flotteur le long d'une tige dentelée) ;
- l'énergie provenant de la compression et décompression de l'air provoquées par la houle dans un espace clos ;
- l'hydrolienne de Paroldi en 1973. Ce projet, qui ambitionnait d'alimenter individuellement, en électricité, chaque balise lumineuse, fut poussé jusqu'au prototype. L'engin était constitué d'un rotor à 4 pales articulées autour d'un axe et entraînées par la houle. Ce prototype, dont le rotor couvrait 7 m², fut expérimenté en 1979 dans le port de Doélan par une houle de 80 cm et produisit 3 kW. Le coût d'une telle installation s'avérant 30 fois plus onéreuse que toute autre, il ne fut pas donné suite au projet.

Les courants marins

Ils représentent une quantité énorme d'énergie et ont l'avantage d'être prévisibles quant à leur vitesse et à leur cyclicité, permettant d'équiper les sites pour avoir une production continue d'énergie. Ils sont de deux types : courants de marées (cycliques) et grands courants océaniques (continus).

À titre d'exemple, signalons :

- parmi les courants de marées, en Manche, le courant au large du cap Fréhel, celui de la Chaussée de Sein, celui de Fromveur à Ouessant et celui du Raz Blanchard qui attei-



Photo 1. Image virtuelle de ce que serait une implantation dans le cours de l'Étel (source : Hydroelix Énergies).

gnent respectivement 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s et 5 m/s ;

- parmi les courants océaniques, le Gulf Stream, qui atteint au large de la Floride une vitesse constante de 8 km/h (2,2 m/s), avec un débit de 14 000 m³/s.

Les courants de marées se rencontrent en mer libre et dans les estuaires où le flux est canalisé. Le type d'installation possible dépend du site retenu ; ainsi, dans l'estuaire de la Rance on a pu, en 1966, installer une usine marémotrice (fleuron d'EDF) qui n'est rien d'autre qu'un barrage forçant le flux alternatif à transiter à travers les turbines-bulbes. Il s'est avéré que ce type d'installation est d'un entretien très coûteux. Il a provoqué des transformations écologiques importantes (contribution à l'envasement de la baie du Mont Saint Michel). La tendance actuelle est d'équiper les sites en laissant le flux marin libre à la manière des éoliennes, en surface, vis-à-vis du vent, d'où le nom d'**hydroliennes** (photo 1).

Par comparaison avec leurs sœurs aériennes, les hydroliennes :

- ont un rendement très largement supérieur (environ 820 fois) car ce rendement est proportionnel à la densité du flux transitant (air : 1,235 kg/m³, eau : 1 024 kg/m³) ;

1. Courriel. a.laumondais@libertysurf.fr

- n'ont pas d'impact esthétique sur l'environnement (étant totalement immergées) ;
- ne présentent pas de risque pour la faune, leur vitesse de rotation n'excédant pas 20 tours/mn.

Cependant, elles sont mécaniquement plus fragiles, sujettes à la corrosion et doivent être placées suffisamment profondément pour ne pas gêner la navigation et hors des zones de pêche pour ne pas endommager les filets.

Plusieurs pays ont entrepris de maîtriser cette énergie et ont lancé des projets avec réalisation d'équipements adaptés. Dans un premier temps, ils se sont cantonnés aux courants les plus puissants, ceux ayant des vitesses supérieures à 1 m/s. Certains de ces projets furent menés à terme avec succès, d'autres avortèrent et d'autres sont encore en gestation.

Projets menés à terme

En Angleterre

Dans le cadre du projet *Seaflow*, l'entreprise Marine Current Turbines (MCT avec pour partenaire London Power devenu EDF Energy par rachat par EDF) a, en mai 2003, immergé à un kilomètre de Foreland Point – au large de Lynmouth (Devon) - une hydrolienne constituée d'un rotor de 11 m de diamètre, fixé à un mât. La puissance engendrée attendue était de 300 kW. L'énergie récupérée fut de 25% supérieure à ce qui avait été escompté et un nouveau programme (*SeaGen*) a été lancé prévoyant, pour fin 2005 - courant 2006, la mise en place d'une hydrolienne à turbines jumelles de 500 kW chacune.

En Norvège

Le 17 septembre 2003, dans le cadre du *Blue Concept*, une hydrolienne à rotor à 3 pales de 20 m de diamètre fut immergée par l'Hammerfest Stroem SA dans les courants de marée, au large d'Hammerfest et par 45 m de fond. La puissance générée par cette hydrolienne est de 300 kW, directement affectée à l'alimentation électrique de la ville.

Projets avortés

Aux États-Unis

Le projet Coriolis de Floridahydro, initié par Herbert Williams, prévoyait, dans un premier temps, d'immerger dans le flux du Gulf Stream 242 rotors plats (de 91 m de diamètre) amarrés par des câbles. Après réalisation de deux maquettes et test de celles-ci, le projet, piloté par l'US Navy, a été récemment abandonné car les problèmes liés aux contraintes mécaniques exercées sur les pales, dans ce milieu et à cette pression, étaient difficiles à

résoudre et aussi car les risques d'impact sur le courant du Gulf Stream lui-même n'étaient pas négligeables.

En Italie

Une étude a été envisagée pour le détroit de Messine mais est actuellement sans suite.

Projets en cours

En Angleterre : poursuite du projet *SeaGen*.

Aux États-Unis : un projet est à l'étude au large de New York.

En France, trois organismes ont entrepris d'étudier ce sujet :

- HydroHelix Energies (Quimper), créé en 2000 par Hervé Majastre et Jean-François Daviau, et qui réalisa dès 1990 un prototype de rotor à 4 pales et 70 cm de diamètre, testé alors avec succès dans le courant de l'Odet. L'IFP et l'ADEME apportent leur soutien à cette entreprise
- EDF, avec pour chef de projet Cyrille Arbonnel.
- L'INP de Grenoble avec le LEGI (Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels) dans le cadre du projet *Harvest* (Hydrolienne à axe de rotation vertical stabilisé) mené par Jean-Luc Achard. Ce Laboratoire travaille avec l'IFREMER qui avait déjà, dès 1974, étudié les courants de la Manche

Situation actuelle des travaux

La mise en œuvre d'une expérimentation en grandeur nature de tels projets requiert d'une part le choix du site et, d'autre part celui de l'équipement.

Choix du site

HydroHelix Energies a retenu trois sites possibles :

- la Chaussée de Sein en Bretagne ;
- le Fromveur, également en Bretagne ;
- le Raz Blanchard en Normandie.

EDF est également intéressée par ces sites et a entrepris, en janvier 2005, des études sur les courants au large de la Normandie avec la pose de courantomètres au large de Barfleur. Elle poursuit ses travaux, en 2005, par l'étude des courants au large de la Bretagne car elle voudrait passer au stade expérimental dès 2007-2008. En effet, si les résultats sont positifs, elle voudrait d'une part alimenter les îles de façon autonome et d'autre part exporter cette technicité dans un marché qui pourrait être prometteur.

Choix de l'équipement

HydroHelix Energies propose des batteries d'hydroliennes de 16 m de diamètre situées dans des ossatures de 20 m de côté, ajourées et ancrées dans les courants directement sur le fond marin, laissant passer le flux sans contrainte évitant ainsi les risques de sédimentation anormale. L'INP Grenoble, par le biais de l'entreprise Sofresid Engineering, étudie des turbines Achard à axe vertical.

En conclusion

Cette technologie, qui en est à ses balbutiements, est très prometteuse car, dans un contexte de pétrole cher, son coût de mise en œuvre n'est plus un obstacle majeur. Cela pourra être une énergie d'appoint importante comme l'est sa sœur aérienne, mais ayant l'avantage sur cette dernière d'être constante et permanente.