

LES GRANDES ÉOLIENNES EN MER

Dominique Vignon

Membre de l'Académie des technologies

Séance du 8 février 2023

Résumé

En France, la part des éoliennes marines est encore marginale par rapport à celle des éoliennes terrestres, mais elle devrait connaître une forte progression, car les éoliennes marines, implantées par définition loin des zones d'habitation, bénéficient d'une meilleure acceptabilité et peuvent être de bien plus grande taille, ce qui accroît leur puissance et leur rentabilité. C'est d'autant plus vrai pour les éoliennes flottantes, qui peuvent être très éloignées des côtes, alors que les éoliennes fixes ne peuvent être posées qu'à une profondeur maximale de 60 mètres, ce qui les rend généralement visibles depuis le rivage. Compte tenu du gigantisme croissant des projets, leur installation par des opérateurs tels que TotalEnergies, Engie ou EDF, et leur raccordement par RTE posent de redoutables défis techniques et logistiques. En revanche, leur plus grande acceptabilité par rapport aux éoliennes terrestres, mais également le fait que les débats publics sont désormais organisés en amont de l'attribution des appels d'offres, tendent à apaiser les controverses, même si des inquiétudes demeurent sur l'impact environnemental des parcs éoliens, pour lequel peu de retour d'expérience est encore disponible.

Intervenants

Grégoire de Saivre

Responsable du département « Offshore wind » chez TotalEnergies - Division Power

Mathieu Hochet

Spécialiste « Offshore wind » chez TotalEnergies - Division Électricité

Régis Boigegrain

Directeur exécutif de RTE et directeur des affaires maritimes RTE

Julie Dumont

Garante de la concertation « Grand Aquitaine » au CNDP

Sommaire

Des éoliennes marines posées aux éoliennes flottantes	2
Architecture et équipements électriques pour l'éolien marin	3
L'évacuation d'énergie vers le réseau	4
Les enseignements de la concertation sur les projets de parcs éoliens en mer	6
Débats	7

Introduction par Dominique Vignon

Entre 2012 et 2021, la part des éoliennes marines est restée marginale par rapport à celle des éoliennes terrestres, et l'écart entre les deux n'a cessé de se creuser. En 2021, seuls les Pays-Bas, le Danemark et surtout la Grande-Bretagne ont installé de nouvelles éoliennes marines. Cette situation est cependant amenée à évoluer, si l'on en croit le discours tenu par Emmanuel Macron le 10 février 2022 à Belfort. Selon la stratégie annoncée par le Président de la République, la puissance installée de l'éolien en mer devrait rattraper celle de l'éolien terrestre à partir de 2047, avec une quarantaine de GW, tandis que celle du solaire devrait, à la même date, atteindre une centaine de GW. Grâce à la différence de rendement entre le solaire (15 %), l'éolien terrestre (23 %) et l'éolien marin (50 %), la production d'énergie par l'éolien marin devrait, dès 2032, égaler celle de l'éolien terrestre, avec environ 50 TWh, puis égaler celle du solaire à partir de 2040, avec environ 100 TWh.

Ces prévisions sont confirmées par l'AIE (Agence internationale de l'énergie), selon laquelle l'éolien marin, à partir de 2040 et dans le monde entier, deviendra la principale source d'électricité, devant l'éolien terrestre, le nucléaire, la bioénergie ou encore le solaire. Étant par définition implantées loin des zones d'habitation, les éoliennes marines bénéficient d'une meilleure acceptabilité et peuvent être de bien plus grande taille, ce qui accroît leur puissance mais aussi leur rentabilité. Ce sont ces prévisions qui ont motivé l'organisation de la séance d'aujourd'hui, même si le déploiement de l'éolien marin ne fait que commencer.

par l'immense potentiel que représentent les façades maritimes à travers le monde, avec des zones d'une profondeur inférieure à 60 mètres, qui permettent d'implanter des éoliennes posées, et des zones où peuvent être installées des éoliennes flottantes. Les premières représentent actuellement une puissance installée de 30 GW, tandis que les projets pilotes d'éolien flottant ne correspondent encore qu'à une centaine de MW mais, selon nos projections, les capacités de l'éolien flottant devraient atteindre 1 GW en 2025, 5 GW en 2030 et 20 GW en 2035.

Le portefeuille de TotalEnergies

Les projets d'éolien marin de TotalEnergies en cours de développement représentent un peu plus de 10 GW et se répartissent sur trois zones. Aux Etats-Unis, nous déployons un parc éolien de 3 GW face à New York et un de 1 GW face à la Caroline du nord. En Europe, la majorité de nos parcs se situent en Grande-Bretagne. Le projet écossais Seagreen (1 GW) est en fin de construction et trois autres sont en cours d'étude. En France, le projet EolMed, situé au large de Port-La-Nouvelle, dans l'Aude, est constitué d'une éolienne flottante. Notre troisième zone d'activité est l'Asie, avec notamment un projet coréen qui a la particularité d'être situé dans une zone de plus de 100 mètres de profondeur, pour une puissance de 2 GW.

Les axes de recherche

Nos cinq axes de recherche portent sur l'éolien flottant (réalisation de projets pilotes, industrialisation, réduction des coûts, etc.); l'amélioration du rendement, en sachant que des variations même faibles de la production ont un impact économique important ; la possibilité de poser des éoliennes à des profondeurs supérieures à 60 mètres ; l'optimisation de la logistique des projets export ; l'acceptabilité environnementale et sociale des projets éoliens et le traitement des équipements en fin de vie.

Les études sur le productible

En ce qui concerne les recherches liées au productible, c'est-à-dire au vent, nous ne nous occupons pas, en interne, de ce qui concerne le climat à long terme ou la météorologie. Nous nous concentrons sur les questions de sillage (selon la façon dont les éoliennes sont implantées les unes par rapport aux autres, l'effet de sillage peut leur faire perdre jusqu'à 20 % de rendement) et d'aérodynamique. Dans ce domaine, nous travaillons avec Dassault System afin d'utiliser au mieux les nouveaux supercalculateurs pour la modélisation des pales et leur adaptation à l'évolution du climat.



Des éoliennes marines posées aux éoliennes flottantes

Grégoire de Saivre

Grégoire de Saivre est responsable du département « Offshore wind » chez TotalEnergies - Division Power.

L'engagement Les perspectives de développement évoquées par Dominique Vignon sont rendues possibles

Les recherches en logistique

Notre projet écossais Seagreen donne une idée du gigantisme des nouvelles éoliennes marines. Le parc comprend 114 éoliennes d'une puissance de 10 MW chacune. Les mâts mesurent 100 mètres de haut et leurs fondations pèsent 2 000 tonnes. Quant à la sous-station électrique qui collecte la production des grappes d'éoliennes, son poids (5 000 tonnes) est proche de celui de la Tour Eiffel. Leur installation ainsi que celle des quadripodes qui les supportent, de poids équivalent, a été réalisée à l'aide du plus gros bateau-grue du monde. Celui-ci a eu un accident qui l'a rendu indisponible pendant quelques mois ; or les fondations continuaient à être livrées depuis l'Asie. Heureusement, le port de Nigg est doté d'une zone d'entreposage d'une taille colossale, dotée de grues géantes, qui a permis de stocker une cinquantaine de fondations d'éoliennes en attendant leur pose.

Nous nous préparons désormais à une nouvelle génération de turbines, d'une capacité de 20 MW, ce qui représente un énorme défi technologique mais également logistique. Nous travaillons sur ces questions en partenariat avec les infrastructures portuaires de Brest, Saint-Nazaire ou encore Cherbourg, ainsi que des entreprises de construction tels que Subsea 7 ou Technip.

Les défis de l'éolien flottant

Il n'existe pas, pour le moment, de bateaux dotés de « pattes » permettant de poser des éoliennes marines au-delà de 60 mètres de profondeur. On ne sait pas non plus installer des éoliennes fixes depuis des supports flottants, d'où le recours à des éoliennes flottantes. La technologie la plus classique en la matière est celle des plateformes semi-submersibles. Les tripodes utilisés pour les éoliennes flottantes offrent un empattement de 80 mètres, ce qui laisse imaginer le défi que représente l'installation d'une trentaine de ces équipements pour le projet AO5 en Bretagne sud. La difficulté est multipliée par rapport à l'installation d'éoliennes posées.

Les différents éléments constituant une éolienne flottante (flotteurs, plateforme, mât, turbine, pales, systèmes d'ancrage, câbles) doivent être fabriqués selon un planning cohérent afin de ne pas perturber la chaîne d'approvisionnement et de stockage et de ne pas accroître les coûts. Ils doivent ensuite être préassemblés sur les chantiers navals puis livrés, installés et enfin connectés avec les sous-stations électriques en mer.

Le couplage entre les flotteurs et les mâts pose un problème particulier. Les flotteurs sont soumis au mouvement de la houle selon une période propre, et le passage des pâles devant le mât crée une perturbation qui fait vibrer les pales selon une fréquence

malheureusement très proche de la fréquence propre du système flotteur et mât. Il faut impérativement éviter que les deux coïncident, sans quoi le système risque non pas de casser mais de s'user en quelques années, alors qu'il est conçu pour durer trente ans. Or, les turbines et les flotteurs sont fabriqués par deux fournisseurs différents, qui communiquent seulement par notre intermédiaire. Ce problème, qui a l'air simple à résoudre, est en réalité d'une redoutable complexité. Nous jouons sur les paramètres de dimensionnement des flotteurs pour essayer de conserver une marge de 10 % entre les deux fréquences.



Architecture et équipements électriques pour l'éolien marin

Mathieu Hochet

Mathieu Hochet est spécialiste « Offshore wind » chez TotalEnergies - Division Électricité.

Sur le plan électrique, chaque éolienne comprend un alternateur, un convertisseur et un transformateur, ce dernier étant relié à un tableau électrique qui permet de connecter les éoliennes entre elles. En cas de panne d'une éolienne, un disjoncteur permet au courant de continuer à passer jusqu'à l'éolienne suivante. Toutes les éoliennes d'un même parc, qu'il soit posé ou flottant, sont raccordées entre elles et à une sous-station marine, laquelle est reliée à une sous-station terrestre connectée à la sous-station du réseau électrique.

En France et en Europe, nous n'assurons que le raccordement à la sous-station marine, qui est fournie par le gestionnaire de réseau (RTE en France). Ailleurs, nous devons développer et construire nous-mêmes la sous-station marine, le câble export, la sous-station terrestre et assurer la connexion jusqu'à la sous-station du réseau électrique. Dans le cas du parc éolien de New York, les câbles s'étendront sur 150 kilomètres et, compte tenu de l'urbanisation de New York, nous avons eu beaucoup de mal à trouver un emplacement pour une sous-station terrestre capable d'accueillir les 1,5 GWh du parc éolien.

La puissance des turbines de première génération, dites de type 1 et 2, produites dans les années 1980 et 1990 et installées surtout au Danemark, précurseur en la matière, ne dépassait pas 500 kW ou 1 MW, et elles étaient difficiles à connecter au réseau. Les turbines de type 3, apparues dans les années 2000, ont une puissance maximale de 3 MW. Elles continuent à être utilisées en terrestre mais plus du tout en marin, où l'on recourt désormais aux turbines de type 4, dont la puissance atteint 10 MW, en attendant des turbines de 20 MW. Ces nouvelles turbines, généralement constituées d'un moteur synchrone à aimant permanent, sont très faciles à connecter au réseau, notamment parce qu'elles sont autonomes en énergie. Lorsqu'il n'y a plus de vent et que la production s'arrête, l'éolienne a en effet besoin de disposer d'électricité pour se mettre face à vent lorsque celui-ci reprendra, pour actionner les pompes de lubrification, ou encore pour faire fonctionner le contrôle commandes. Par le passé, nous devions équiper chaque éolienne d'un moteur diesel. Désormais, il n'y en a plus besoin.

Quatre défis

Le premier des quatre grands défis qui nous attendent est l'augmentation de la tension des parcs d'éoliennes. Il y a dix ans, celle-ci était de 33 kV. Elle est passée à 66 kV et, d'ici 2030, elle devrait atteindre 132 kV. L'objectif est d'augmenter le nombre et la puissance des éoliennes par grappe (or, avec 66 kV, on ne pourrait connecter que 4 turbines de 20 MW), mais aussi de réduire le volume de câbles et les pertes d'électricité. Ceci suppose que les turbiniers aussi bien que les fournisseurs de câbles adaptent leurs produits à cette nouvelle tension.

Le deuxième défi vient du fait que, sur un tableau électrique en 66 kV, pour éviter les courts-circuits, les trois phases doivent être distantes de 63 centimètres et que, en 132 kV, cet écartement doit être de 1,30 mètres. Pour gagner de la place, on recourt à des tableaux électriques appelés GIS (*Gas Insulated Switchgear*), dans lesquels un gaz spécial, le SF₆ (hexafluorure de soufre, au fort pouvoir isolant) permet de raccourcir fortement ces distances. Or, le SF₆ est le plus puissant gaz à effet de serre et son utilisation va être interdite à partir de 2030. Trouver une solution alternative constitue un défi majeur, non seulement pour l'éolien, mais, plus généralement, pour toute l'industrie électrique.

Une troisième difficulté concerne les câbles reliant les éoliennes flottantes entre elles. Avec la houle, les câbles bougent en permanence et, s'ils sont posés sur le fond marin, tout l'effort porte sur la tête accrochée au flotteur, ce qui entraîne une usure précoce. Pour l'éviter, nous recourons à une solution déjà mise en œuvre pour l'exploitation de pétrole en deep-offshore : une *lazy wave* constituée d'un câble plus rigide et donc

moins mobile permet de réduire l'effort portant sur la tête du câble. Ce dispositif existe déjà pour les câbles de 66 kV mais doit être adapté aux futurs câbles de 132 kV. Par ailleurs, si certaines stations sont distantes de plus de 100 km des côtes, la connexion devra se faire en courant continu (HVDC) et, pour le moment, il n'existe pas encore de câble dynamique (c'est-à-dire apte au mouvement) en courant continu. Nous allons donc devoir les développer avec nos fournisseurs.

Le quatrième défi porte sur l'interconnexion à terre. En France, l'atterrissage est géré par RTE et le réseau a été correctement dimensionné et maintenu de sorte qu'il pourra sans difficulté accueillir les futurs parcs éoliens. Dans d'autres pays et notamment en Grande-Bretagne, où l'éolien marin a été déployé très rapidement, c'est beaucoup plus compliqué. Lorsque les énergies renouvelables, généralement intermittentes, représenteront plus de 50 % du mix électrique, il sera particulièrement délicat de rétablir la tension sur le réseau en cas de black-out.



L'évacuation d'énergie vers le réseau

Régis Boigegrain

Régis Boigegrain est directeur exécutif de RTE et directeur des affaires maritimes RTE.

Pour un gestionnaire de réseaux comme RTE, le raccordement des parcs éoliens en mer représente trois grands enjeux.

Prospective et vision à long terme

Le premier consiste à disposer d'une vision politico-institutionnelle à long terme. Sachant qu'un projet de construction et de raccordement de parc éolien dure dix ans, c'est indispensable pour nous permettre de nous préparer ainsi que nos fournisseurs.

De notre côté, nous avons réalisé un important travail de prospective, publié en octobre 2021 sous le titre *Futurs énergétiques 2050*. Cette étude propose six scénarios de mix électriques garantissant la sécurité d'approvisionnement.

ment tout en permettant à la France d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Dans le scénario de référence, la France doit réduire de 40 % sa consommation d'énergie globale, ce qui est ambitieux, et renoncer à l'énergie fossile, qui représente encore 60 % de la consommation globale, au profit des énergies renouvelables et du nucléaire. En fonction du scénario choisi, la France devrait se doter de 20 à 60 GW de puissance installée en éolien marin d'ici 2050. A titre de comparaison, une centrale nucléaire représente 1,5 GW, et 60 GW correspondent à l'ensemble du parc nucléaire français.

Dans le cadre d'un pacte avec la filière de l'éolien marin, les pouvoirs publics ont fixé l'objectif de 18 GW de capacité installée en service à l'horizon 2035, ce qui nécessite de multiplier par 6 la capacité de mise en service entre 2025 et 2035, mais aussi de diviser par 4 le temps d'attribution des 9 prochains GW d'éolien en mer, et de faire passer de 9 à 7 ans le délai entre la désignation du lauréat et la mise en service effective.

Il reste aussi à préciser la localisation des parcs sur les différentes façades maritimes de notre pays, leur nombre et leur puissance, ce qui nous permettra d'anticiper les renforcements du réseau terrestre nécessaires.

Parmi les six scénarios avancés par RTE, celui qui se rapproche le plus du discours prononcé à Belfort par le Président de la République prévoit 40 GW d'éolien marin d'ici 2050 (dont entre 12 et 16 GW en Manche et Mer du nord ; entre 8 et 12 GW en Bretagne et Nord Atlantique ; entre 8 et 12 GW en Méditerranée). Sur ces 40 GW, la moitié environ devra provenir d'éolien flottant, ce qui constitue un défi en soi.

Optimiser le raccordement

En tant qu'acteur exerçant un monopole sur le réseau public de transport d'électricité, notre deuxième grand enjeu consiste à optimiser les infrastructures de raccordement en termes de coûts, de délais mais aussi d'impact environnemental. Cette optimisation passe, par exemple, par la mutualisation du raccordement entre plusieurs parcs. En France, les premiers raccordements de parcs éoliens ont été réalisés selon un modèle radial : à chaque parc correspondait un ouvrage de raccordement. Grâce à la programmation pluriannuelle de l'énergie, nous avons commencé à mettre en place des structures en marguerite destinées à desservir plusieurs parcs.

Nous nous orientons désormais vers des réseaux hybrides, combinant le raccordement de parcs et des interconnexions entre pays, afin de mieux garantir la continuité d'évacuation de l'électricité produite. Des réseaux de ce type ont déjà été mis en place par les pays de la Mer du Nord, essentiellement sur des parcs éoliens

posés. Il faut maintenant développer ce dispositif pour les parcs éoliens flottants, sachant que le posé ne représente que 20 % du gisement mondial d'électricité éolienne en mer.

Un autre levier d'optimisation consiste à bien identifier les ressources rares que sont, notamment, les zones d'atterrage, c'est-à-dire les zones favorables au raccordement entre la terre et la mer. En Normandie, par exemple, la présence des falaises rend ces sites particulièrement rares. Il est important de ne pas « gâcher » la capacité d'un atterrage en ne prévoyant, par exemple, qu'une puissance de 500 MW alors qu'il pourrait supporter jusqu'à 2 ou 3 GW.

On peut aussi chercher à adapter la puissance du parc éolien à la puissance cible du raccordement. Par exemple, à un parc de 900 MW correspondra une plateforme recevant trois câbles de 300 MW chacun. Pour un parc de 1 200 MW, on prévoira deux plateformes de 600 MW. En revanche, pour un parc de 1 050 MW, on va « gâcher » non seulement de la puissance industrielle mais de l'impact environnemental.

Un autre levier, laissé à l'appréciation des producteurs, consiste à surdimensionner la puissance d'injection, c'est-à-dire à prévoir davantage de capacité installée que nous ne pouvons garantir d'évacuation, ce qui permet d'optimiser la maintenance. Ce dispositif est prévu dans les prochains appels d'offres du Sud Bretagne.

Enfin, l'optimisation passe aussi par le fait de profiter de l'opération de raccordement pour apporter d'autres services à la collectivité ou au territoire. Nous pouvons, par exemple, prévoir des petites bouées permettant de capter des données sur l'environnement marin et de les transférer aux organismes de recherche, ou encore aménager des pistes cyclables sur le tracé de nos câbles terrestres.

Les défis technologiques

En tant qu'opérateur industriel, nous sommes également confrontés à des enjeux technologiques. Pour les six premiers parcs éoliens, les plateformes étaient la propriété des producteurs et nous nous limitions à la fourniture des câbles sous-marins. Pour les parcs suivants, nous avons obtenu de gérer nous-mêmes les plateformes, dans une logique d'optimisation et de mutualisation.

L'augmentation de la puissance des parcs éoliens, destinée à accroître leur rentabilité, se traduit par leur éloignement croissant des côtes, non seulement pour des raisons d'acceptabilité sociale mais de régularité des vents, ce qui nous pose de nouveaux défis technologiques. A partir de 100 ou 120 kilomètres de câbles, il est plus économique de passer du courant

alternatif au courant continu (HVDC). Ce sera le cas pour trois projets que nous préparons actuellement, d'une puissance unitaire de 1,2 GW.

Compte tenu du développement des éoliennes flottantes, nous devons également travailler sur l'environnement vibratoire de nos équipements électrotechniques, car ceux-ci sont sensibles aux vibrations et nous devons nous assurer que cela n'entraînera pas un vieillissement précoce. Ceci va nécessiter tout un travail de modélisation des comportements de houle et de gîte, ainsi que la réalisation de prototypes avant d'installer nos équipements sur des plateformes en mer.

Une difficulté supplémentaire tient au fait que l'éolien marin est en train de se développer à grande vitesse dans tous les pays européens, ce qui nous oblige à être attractifs vis-à-vis de nos fournisseurs et, pour cela, à standardiser nos spécifications avec nos homologues européens.

Enfin, nous avons à cœur de participer à l'amélioration de la connaissance de la biodiversité marine et nous finançons dix-sept projets de R&D sur ces sujets.

(tous les arguments, pour ou contre, doivent être pris en compte, quelle que soit leur représentativité), d'inclusion de tous les publics.

Le budget de la CNDP est de dix millions d'euros par an, dont un pour son fonctionnement. Un débat public dure entre quatre et six mois. Il est organisé par une Commission particulière du débat public (CPDP) constituée pour l'occasion.

Le projet Éoliennes en mer Nouvelle Aquitaine

Le projet de parcs éoliens d'Oléron, renommé Éoliennes en mer Nouvelle Aquitaine, comprenait un premier parc de 0,5 GW à 1 GW, comportant 70 éoliennes, et un éventuel second parc de 1 GW, avec deux options de raccordement, au nord et au sud. La CPDP était présidée par Francis Beausire et composée de cinq autres membres issus d'horizons variés (ancien professeur de géographie, chercheur spécialiste des questions énergétiques et de mobilité, ancien maître d'ouvrage de SNCF Réseau, fonctionnaire de l'Agence nationale de la cohésion des territoires, spécialiste de l'ingénierie de participation). Au cours de la concertation, la zone préférentielle d'implantation, d'une surface de 300 km², a été étendue à 743 km². Elle avait la particularité d'être incluse dans le périmètre d'un parc naturel marin et d'une zone Natura 2000.

Les débats se sont déroulés entre septembre 2021 et février 2022, avec un pré-débat à l'été 2021 afin d'informer les estivants, sous la forme d'un stand qui était déplacé de plage en plage. Le débat a compris 68 rencontres, dont une quinzaine en ligne, 14 réunions thématiques, 9 réunions publiques, 8 ateliers scénarios, 8 ateliers lycéens et étudiants, 4 séances de théâtre forum, 18 points de contact, 1 festival de deux jours qui a reçu 1 300 visiteurs en présentiel et 10 500 en ligne, avec plus de 40 000 visionnages en rediffusion. L'information a également été relayée par des sites de youtubeurs, ce qui a permis une diffusion auprès de 500 000 internautes. Nous avons également créé un jeu vidéo pour la circonstance. Ces chiffres sont assez inédits pour la CNDP et la participation a incontestablement été importante.

Parmi les thèmes principalement mis en exergue lors des rencontres, viennent en tête la localisation du parc et le souhait de l'éloigner de la côte, souhait partagé par l'ensemble des participants à l'exception de la filière industrielle, qui mettait en avant le renchérissement du projet et l'allongement des délais. A l'appui de cette demande ont été invoqués la protection de la biodiversité et l'absence d'étude sur les impacts environnementaux, notamment les effets sur la biodiversité marine et les risques de collision pour les oiseaux, l'incompréhension de voir un parc éolien construit au cœur du Parc naturel marin et de la zone Natura 2000, des interrogations sur la doctrine ERC



Les enseignements de la concertation sur les projets de parcs éoliens en mer

Julie Dumont

Julie Dumont est garante de la concertation « Grand Aquitaine » au CNDP.

La CNDP (Commission nationale du débat public) est une autorité administrative indépendante qui encadre les débats publics sur les très grands projets et certains plans et programmes de niveau national, grâce à 250 garants déployés sur l'ensemble du territoire. Je suis l'une d'entre eux et j'exerce, par ailleurs, une activité professionnelle de conseil en concertation.

Les garants signent une charte de déontologie par laquelle ils s'engagent à respecter des valeurs d'indépendance, de neutralité, de transparence, d'égalité de traitement (qu'ils aient affaire à des élus ou à de simples citoyens, par exemple), d'argumentation

(éviter, réduire, compenser) en milieu marin, mais aussi la covisibilité des éoliennes avec le phare de Cordouan, le risque d'impact de l'effet paysager sur le tourisme et sur les prix de l'immobilier, et enfin la limite réglementaire de pêche pour les bateaux de moins de 12 mètres, qui constituent 80 % de la flottille locale et ne peuvent aller au-delà des 20 miles marins, d'où leur souhait de pouvoir pêcher à l'intérieur des parcs éoliens.

D'autres thèmes ont mobilisé le public, notamment en matière d'opportunité du projet : l'indépendance énergétique de la France, son mix énergétique, les politiques énergétiques au niveau national et régional ; le choix des énergies renouvelables, les gisements de vent, la bathymétrie avantageuse ou non des côtes, le fait que l'énergie éolienne est intermittente, la rentabilité des projets (par comparaison, notamment, avec le nucléaire, en référence à la centrale de Blaye). L'impact économique a également été abordé, avec les éventuelles retombées pour les filières locales (études, maintenance, opérations portuaires et logistiques) ou encore la possibilité d'intégrer la production d'hydrogène au parc éolien.

Le compte rendu des débats a été publié en avril 2022 et la réponse du maître d'ouvrage a été annoncée en juillet 2022. À l'issue du débat public, le projet a été retiré du Parc naturel marin et de la zone Natura 2000 et déplacé au-delà de la zone initialement prévue.

La concertation post-débat a commencé en septembre 2022. Julie Dumont en est la co-garante avec Francis Beausire. Elle portera notamment sur la PPE (programmation pluriannuelle de l'énergie) et sur la planification (document stratégique de façade), sur le raccordement de la plateforme en mer ou encore sur la création d'un observatoire de l'éolien en mer. Des groupes de travail vont être constitués sur les usages, l'environnement, l'économie et la pêche. Une étude complémentaire a été confiée au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) sur les pratiques de pêche dans les parcs éoliens en Europe.

Les autres débats publics sur les éoliennes

Au total, au cours des onze dernières années, quatorze projets de parcs éoliens ont fait l'objet de débats publics en France. Comme dans le cas du projet Nouvelle Aquitaine, les arguments exposés par le public concernent essentiellement l'opportunité de tels projets, notamment du point de vue de leur rentabilité, les objectifs, la planification, l'intégration économique et sociale, les enjeux environnementaux et paysagers. Avant la loi ESSOC (loi pour un État au service d'une société de confiance), adoptée en 2018, les débats publics avaient lieu une fois que l'appel d'offre avait été attribué, ce qui limitait considérablement leur portée. Ils sont désormais organisés avant l'attribution, ce qui

laisse des marges de discussions beaucoup plus étendues et apaise les débats.



La poussée du vent

Comment gérez-vous la poussée du vent, qui doit faire perdre de la verticalité à l'éolienne et, par conséquent, réduire son rendement ?

Grégoire de Saivre : Certains flotteurs sont dotés de systèmes de ballast (eau ou air) qui peuvent être transférés de l'un à l'autre, mais nous essayons de nous affranchir de ces dispositifs mécaniques, car ils supposent une maintenance toujours complexe à réaliser en pleine mer. Sachant que les empattements mesurent 80 mètres de large, l'inclinaison est relativement faible, sauf par tempête, or, en cas de vents de plus de 100 km/h, la production est interrompue.

Certaines publications montrent que, globalement, le vent faiblit en Europe, en particulier sur les zones maritimes. Qu'en est-il ?

Grégoire de Saivre : Les modèles du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) annoncent effectivement une diminution de 1 à 2 % du productible à l'horizon 2100, ce qui représentera une perte économique non négligeable, si cela se confirme.

La performance aérodynamique des hélices

La performance aérodynamique des hélices a-t-elle atteint l'asymptote ou peut-on encore espérer des gains de rendement ?

Grégoire de Saivre : C'est une question qu'il faudrait poser aux fabricants de pales. En tant qu'opérateur, nous travaillons plutôt sur les contrôleurs, afin de nous assurer de perdre le moins possible d'énergie.

Dominique Vignon : Nous avons envisagé d'inviter des palistes à ce débat, mais ils ne souhaitent pas répondre aux questions. Manifestement, il s'agit d'une technologie très confidentielle.

Un intervenant ajoute : Le fait qu'Airbus Helicopters continue à réaliser des progrès sensibles sur ses hélices alors qu'il en fabrique depuis cinquante ans laisse supposer que la modélisation permet d'améliorer, encore aujourd'hui, leur rendement.

La maintenance

Une fois les éoliennes installées en mer, j'imagine qu'elles ne peuvent plus être ramenées à terre. Comment assurez-vous leur maintenance ?

Grégoire de Saivre : Nous évitons à tout prix de ramener l'éolienne au port mais, en cas de nécessité, cela peut se faire. Cela a été le cas pour l'une des cinq éoliennes installées en face d'Aberdeen. Son transfert a coûté 5 millions d'euros, l'équivalent du prix de la turbine, ce qui est une catastrophe économique.

Produire de l'hydrogène au pied des éoliennes ?

Le raccordement électrique des éoliennes paraît complexe à assurer et à maintenir. Serait-il envisageable de produire de l'hydrogène sur place pour éviter d'avoir à opérer ce raccordement ?

Grégoire de Saivre : Sur de longues distances, il est moins coûteux de transporter du gaz que de l'électricité, c'est pourquoi il existe des projets pilotes avec des îles artificielles sur lesquelles est produit de l'hydrogène à partir d'une grappe d'éoliennes. Le problème, que nous connaissons bien chez Total, est celui de la maintenance des équipements en pleine mer, qui est coûteuse et accidentogène.

Régis Boigegrain : Cette option pourrait cependant présenter un intérêt économique en mer du nord, car cette zone est déjà équipée de gazoducs dont certains pourraient être rétrofités afin de transporter de l'hydrogène.

Dominique Vignon : L'électricité produite par les éoliennes est gratuite mais non permanente, et le facteur de charge d'un équipement de production d'hydrogène risque d'être trop faible pour que cela présente un intérêt. Il faudrait alors compléter son alimentation par de l'électricité issue du réseau, à condition que celle-ci soit abondante, or, rien n'est moins sûr. La réduction de 40 % de la consommation globale prévue dans le scénario de référence de RTE est très ambitieuse...

Les coûts respectifs de l'éolien marin et de l'éolien terrestre

Les éoliennes marines sont plus hautes que les terrestres, ce qui est favorable à leur rentabilité, mais leur éloignement est un facteur économique défavorable. Quels sont les coûts respectifs des kWh produits en mer et sur terre ?

Grégoire de Saivre : Le grand projet écossais dont j'ai parlé permettra de produire de l'électricité à moins de 40 livres par MWh (prix livré au réseau), ce qui est très compétitif. Il faut préciser que cette zone est balayée par des vents à 10 mètres par seconde en moyenne, beaucoup plus réguliers qu'en Bretagne, par exemple.

Le rôle de la Commission de régulation de l'énergie

Le monopole de RTE lui donne-t-il une obligation de service public, au sens où, dès qu'un opérateur crée un parc éolien, RTE a l'obligation de le raccorder, ou procède-t-il à ses propres évaluations économiques ?

Régis Boigegrain : L'actionnariat de RTE est composé essentiellement d'EDF et aussi de Caisse des Dépôts, mais ce ne sont pas eux qui valident notre programme d'investissement. Celui-ci est soumis à l'approbation de la CRE (Commission de régulation de l'énergie), qui réalise un audit spécifique sur chacun de nos projets. Ensuite, les projets d'éolien marin ont ceci de particulier que ce sont les seuls pour lesquels RTE est soumis à une obligation de résultat, au sens où chaque jour de retard par rapport à la date contractuelle de mise à disposition du raccordement se traduit par une pénalité de 100 000 à 300 000 euros, en fonction de la puissance du parc. Ceci nous incite à être très attentifs au coût du projet mais aussi au pilotage de son exécution.

La perception de l'éolien par le public s'améliore

D'un débat public à l'autre, observe-t-on une amélioration dans la perception des éoliennes par la population ?

Julie Dumont : J'ai travaillé essentiellement sur le projet d'Oléron, mais Francis Beausire, qui a été mobilisé auparavant par celui de Dieppe Le Tréport, témoigne que les discussions étaient beaucoup plus tendues il y a quelques années. A la suite de la crise ukrainienne, l'éolien bénéficie d'une prise de conscience sur la nécessité de trouver de nouvelles sources d'énergie. Le discours présidentiel autour des énergies renouvelables a également contribué à mettre

une partie de la population en confiance. Enfin et surtout, l'éolien en mer génère beaucoup moins d'oppositions que l'éolien terrestre et, parmi les éoliennes marines, les éoliennes flottantes, susceptibles d'être positionnées très loin des côtes, suscitent beaucoup moins de réticences que les éoliennes posées, souvent visibles depuis le rivage.

Avec l'éloignement des côtes, les questions concernant l'atterrissage risquent de devenir le principal sujet de débat.

Julie Dumont : Au cours des débats auxquels j'ai assisté, les participants ne se préoccupaient pas vraiment du raccordement, car les câbles sont enfouis et ne se voient pas. Cette question va cependant venir au premier plan lors de la concertation qui va s'ouvrir prochainement.

La faiblesse des connaissances sur les conséquences environnementales

Quelle solution pourrait être trouvée pour réduire les collisions avec les oiseaux ?

Grégoire de Saivre : Le problème se pose surtout lorsque des dizaines ou des centaines d'éoliennes sont alignées, ce qui constitue un écran difficile à franchir pour les oiseaux. Il est donc primordial de positionner les éoliennes à l'écart des routes migratoires. Une autre piste consiste à augmenter la taille des mâts, car la plupart des oiseaux volent relativement bas.

Dominique Vignon : Le document de quelques pages faisant le bilan des 14 débats publics et concertation sur les projets de parcs éoliens en mer organisés depuis 11

ans mentionne l'incompréhension du public par rapport à la faiblesse des connaissances sur les conséquences environnementales des éoliennes marines. Celles-ci sont peu nombreuses en France, mais sont présentes depuis longtemps dans d'autres pays. Comment expliquer cette lacune ?

Régis Boigegrain : C'est un sujet de préoccupation pour RTE également, car toutes nos interventions doivent obtenir l'aval de l'Autorité environnementale, qui est assez exigeante sur les mesures d'évitement, de réduction et de compensation. Or, on constate effectivement un manque de connaissance sur les impacts des éoliennes sur la biodiversité, et notamment sur des aspects jusqu'ici très peu étudiés, comme l'impact du bruit.

En tant qu'opérateur public, nous disposons d'un budget pour mener des études, et le gouvernement a, par ailleurs, alloué 50 millions d'euros à l'IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) pour travailler sur ces questions.

Cela dit, ces études prennent du temps, or le réchauffement climatique et l'acidification des océans font que nous n'avons pas forcément le loisir d'attendre les résultats d'études de longue durée pour avancer dans le champ des énergies renouvelables...

Julie Dumont : Une des difficultés du débat public est qu'il doit s'accommoder d'un certain nombre d'incertitudes. Or, le public n'aime pas l'incertitude, mais il n'aime pas non plus que tout soit ficelé. Notre rôle est d'accompagner les maîtres d'ouvrage pour garantir qu'il existe un espace de dialogue mais aussi pour faire comprendre au public qu'il existe des incertitudes sur la plupart des projets de ce type.

Mots clés : atterrissage, éoliennes flottantes, éoliennes posées, hydrogène, impact environnemental, logistique, parcs éoliens en mer, raccordement

Citation : Dominique Vignon, Grégoire de Saivre, Mathieu Hochet, Régis Boigegrain & Julie Dumont. (2023). *Les grandes éoliennes en mer*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. N°ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.