

L'éolien en mer

Vincent GUÉNARD

Ingénieur « éolien en mer »

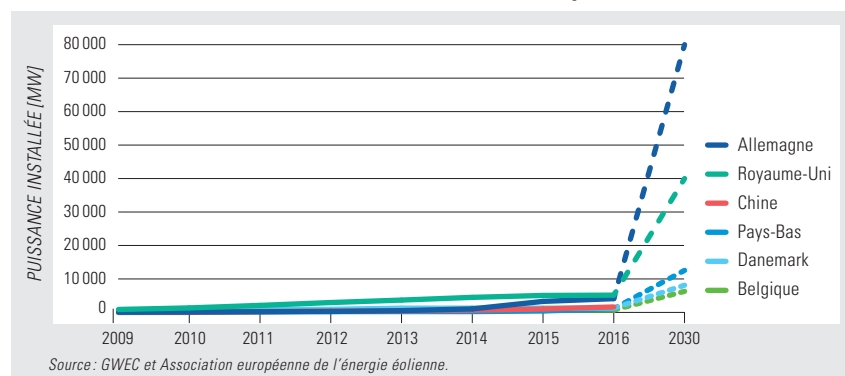
Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) couvertes par le protocole de Kyoto ont atteint près de 49 milliards de tonnes équivalent CO₂ en 2010 selon les dernières données du GIEC¹. Elles ont augmenté de 80 % entre 1970 et 2010, principalement en raison du doublement de la consommation d'énergie dans le monde dont la grande majorité est liée à la combustion d'énergies fossiles.

L'Union européenne a pris conscience de l'impact de la production énergétique sur les émissions de GES dès 2008 en adoptant le plan climat-énergie qui consiste à diminuer de 20 % les émissions de GES, à réduire de 20 % la consommation d'énergie et à atteindre 20 % d'énergies renouvelables (EnR) dans le bouquet énergétique d'ici à 2020².

Dans le cadre de cette directive, la France s'est engagée à porter la part des énergies renouvelables de sa consommation énergétique finale d'à peine 10 % en 2005 à 23 % en 2020, objectif qui se déclinait en 27 % d'EnR électriques. La France s'est par ailleurs fixé des objectifs ambitieux de développement des EnR à 2030 dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte qui prévoit une part de 32 % d'EnR dans la consommation d'énergie finale en 2030, dont 40 % pour la part d'EnR dans la production.

État du marché mondial de l'éolien en mer et scénario moyen à l'horizon 2030



L'éolien en mer revêt dans cette perspective une importance nouvelle. Il connaît en effet un fort développement en Europe et en Chine avec un taux de croissance annuel sur la période 2010-2015 de plus de 30 %. Ce taux est de 20 % sur l'année 2016 avec

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
2. Directive n°2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009.

2,2 GW supplémentaires installés, dont un quart vient de Pékin. Dans ce contexte, le Royaume-Uni reste le *leader* mondial avec plus de 5 GW installés (soit 36 % du parc total mondial), suivi par l'Allemagne (4,1 GW, 28 % du parc total) et la Chine (1,6 GW, 11 % du parc total).

L'éolien en mer en France

Avec plusieurs milliers de kilomètres de côtes répartis sur quatre façades maritimes en métropole - mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée – et en Outre-mer, la France bénéficie d'un potentiel de développement des énergies marines renouvelables parmi les plus importants d'Europe. Par ailleurs, notre expertise en matière énergétique et maritime est reconnue dans le monde entier et nous disposons de zones portuaires particulièrement adaptées à la construction d'infrastructures dédiées à cette activité.

Pour répondre aux objectifs fixés dans le cadre communautaire et valoriser les ressources énergétiques en énergies marines comme ses savoir-faire industriels et scientifiques, la France s'était fixé l'objectif ambitieux de porter la capacité installée de l'éolien en mer à 6000 MW en 2020. Cet objectif a donné lieu au lancement de deux appels d'offres; le premier a désigné quatre projets lauréats en 2012: Saint-Nazaire (EDF-EN, 480 MW), Saint-Brieuc (IBERDROLA, 496 MW), Courseulles-sur-Mer (EDF-EN, 450 MW) et Fécamp (EDF-EN, 498 MW). Le deuxième a abouti à deux lauréats en 2014: les îles d'Yeu et de Noirmoutier (ENGIE/EDR, 496 MW) et Dieppe-Le Tréport (ENGIE/EDPR, 496 MW).

Le ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer a souhaité poursuivre le développement de l'éolien en mer en lançant en 2016 une troisième procédure de mise en concurrence concernant deux zones au large de Dunkerque et de l'île d'Oléron. Ces appels d'offres vont contribuer à atteindre les objectifs fixés par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de porter la capacité installée de l'éolien en mer à 3000 MW en 2023.

Dans l'étude de l'ADEME publiée en 2015 «Vers un mix électrique 100 % renouvelable en 2050», une estimation des gisements permet de mettre en évidence que l'éolien flottant (destiné à des profondeurs supérieures à 50 m) est beaucoup plus prometteur que l'éolien en mer posé. Le gisement exploitable est de 46 GW pour l'éolien flottant et de 20 GW pour l'éolien posé, soit respectivement 195,5 TWh/an et 80,3 TWh/an productibles. L'éloignement des côtes à des distances supérieures à 15 km fait baisser la pression des contraintes sur les autres activités (notamment la pêche professionnelle)

ce qui rend les projets potentiellement plus acceptables. L'intérêt du flottant réside aussi dans l'installation des éoliennes puisque la plupart des solutions de flotteur permettent un montage de la turbine à quai et une installation en une seule phase limitant les travaux et opérations en mer. L'éolien flottant est aussi moins dépendant des conditions de sol, conditions qui sont assez hétérogènes au large des côtes françaises et nécessitent des études spécifiques pouvant remettre en cause certaines options technologiques.

Analyse coûts / avantages de l'éolien en mer

Impacts énergétiques

Les bénéfices énergétiques de l'éolien en mer sont très importants puisque ce mode de production est déployé à grande échelle dans des zones à fortes ressources éoliennes. La part de la production électrique espérée des six projets lauréats des deux premiers appels d'offres se situera ainsi entre 6 et 9 % de la consommation régionale, ce qui permet de confirmer que l'éolien en mer peut contribuer significativement à l'indépendance énergétique du pays. Au niveau national, l'ensemble de ces six parcs peut subvenir à 2,5 % de la consommation d'électricité.

Part de production des projets

Région	Parc éolien	Puissance [MW]	Productible [TWh/an]	Consommation d'électricité (2006-2015) [TWh/an]	Part de l'éolien dans cette consommation [%]
Normandie	Fécamp	498	1,8	26,3	6,8
	Courseulles-sur-Mer	450	1,5		5,7
	Dieppe – Le Tréport	496	2,0		7,6
Pays de la Loire	Saint-Nazaire	480	1,7	24,1	7,0
	Les 2 Îles	496	1,9		7,9
Bretagne	Saint-Brieuc	496	1,9	20,3	9,4
France		2 916	10,8	439,4	2,5

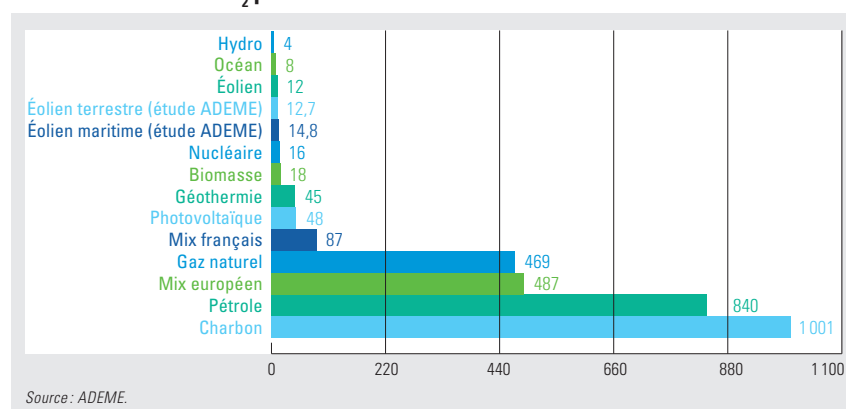
Source : ADEME.

Impacts environnementaux

Les études d'analyse du cycle de vie (ACV) de l'éolien en mer français conduites par l'ADEME en 2016 montrent que la moyenne des émissions des six parcs lauréats a été estimée à 14,8 g eqCO₂/kWh ce qui place cette filière parmi les plus prometteuses pour réduire les émissions de GES des moyens de production d'électricité et lutter contre le changement climatique.

La phase de construction d'un parc éolien en mer peut certes avoir des impacts potentiellement négatifs sur l'environnement, notamment sur les mammifères (cétacés, phoques) et les poissons. Mais grâce aux mesures d'atténuation mises en place suite aux études d'impacts, ceux-ci sont restés très limités lors de la construction des parcs au Danemark ou au Royaume-Uni. La composante littorale des travaux est également conçue pour minimiser les impacts.

Taux d'émissions de CO₂ par kWh



En fonctionnement, les éoliennes peuvent avoir un impact sur les mammifères marins et les poissons à cause des vibrations générées, des émissions électromagnétiques dans les câbles d'export d'électricité ainsi qu'un impact sur l'avifaune du fait des risques de collisions et du phénomène d'évitement des parcs. Les études de suivi des parcs en mer existants, effectuées sur plusieurs années, ont conclu que ces effets ont été négligeables jusqu'à présent.

En outre, un effet de type « récif artificiel » associé aux fondations des éoliennes a été très nettement observé au sein des parcs déjà construits, et ce, après un an seulement. Selon ces observations, l'implantation de parcs éoliens en mer semble favoriser l'augmentation locale de biomasse et de biodiversité marines, ce qui pourrait avoir un effet positif sur les communautés de poissons.

Impacts sur l'emploi

Comme tout nouveau secteur d'activité arrivant sur des territoires disposant de leur propre équilibre économique et social, l'éolien en mer est susceptible de perturber les

activités économiques existantes, ce qui est de nature à soulever des conflits. Ceux-ci se révèlent lors des différentes instances de concertation mises en place tout au long du développement des projets (planification maritime et identification des zones propices, débat public, enquête publique de l'octroi des autorisations administratives pour le parc éolien et son raccordement).

Les principales sources d'opposition viennent des populations résidentes préoccupées par la modification des paysages et ses conséquences sur l'activité touristique des territoires concernés. Sur ces derniers points, des études menées en mer du Nord pourraient tempérer les inquiétudes. Elles montrent en effet tout le potentiel touristique non-exploité à travers notamment le succès de « balades en mer » autour de ces champs.

Le plus grand impact identifié en France concerne la pêche professionnelle, car le parc éolien prive les pêcheurs d'une partie de leur espace de travail, même si l'effet de récif artificiel mentionné plus haut peut nuancer cet aspect dans un contexte de changement climatique et de raréfaction de la ressource halieutique. De plus, les parcs éoliens sont susceptibles de priver la pêche professionnelle de leurs ressources humaines et logistiques car ils ont eux aussi besoin de personnel qualifié et expérimenté, notamment dans leur phase d'exploitation. Pour accompagner l'arrivée de cette nouvelle activité, une taxe éolienne a été mise en place d'un montant d'environ 15 000 €/MW dont 35 % reviendront au Comité national des pêches, 50 % aux communes situées à moins de 12 milles nautiques du parc et 15 % aux projets de développement durable.

L'essor de cette nouvelle filière apparaît comme une formidable opportunité de développement industriel, tant pour le marché français que pour l'exportation, ce qui permet d'envisager une traduction rapide en matière de croissance et d'emplois. On estime à 8 000 le nombre d'emplois directs en France pour la réalisation des six parcs lauréats des deux premiers appels d'offres.

Nombre d'emplois directs et indirects par parc éolien

Région	Parc éolien	Nombre d'emplois directs (indirects)
Normandie	Fécamp	1 000 (4 000)
	Courseulles-sur-Mer	1 000 (4 000)
	Dieppe – Le Tréport	1 500 (4 500)
Pays de la Loire	Saint-Nazaire	1 000 (4 000)
	Les 2 Îles	1 500 (4 500)
Bretagne	Saint-Brieuc	2 000

Source : EDF-EN et ENGIE.

Impacts économiques

En France, les investissements générés, qui s'élèveront à environ 2 à 2,5 milliards d'euros par parc, permettront également de dynamiser l'implantation industrielle sur le territoire, à l'exemple des usines de *General Electric* (ex-ALSTOM) à Saint-Nazaire et à Cherbourg qui construisent des composants d'éoliennes *offshore*, ou des usines d'ADWEN (ex-AREVA) au Havre. Des investissements portuaires pour l'accueil, l'assemblage et la maintenance des éoliennes sont également à prévoir à Brest, Dunkerque ou Port-la-Nouvelle.

Coûts de production actuels et prospectifs

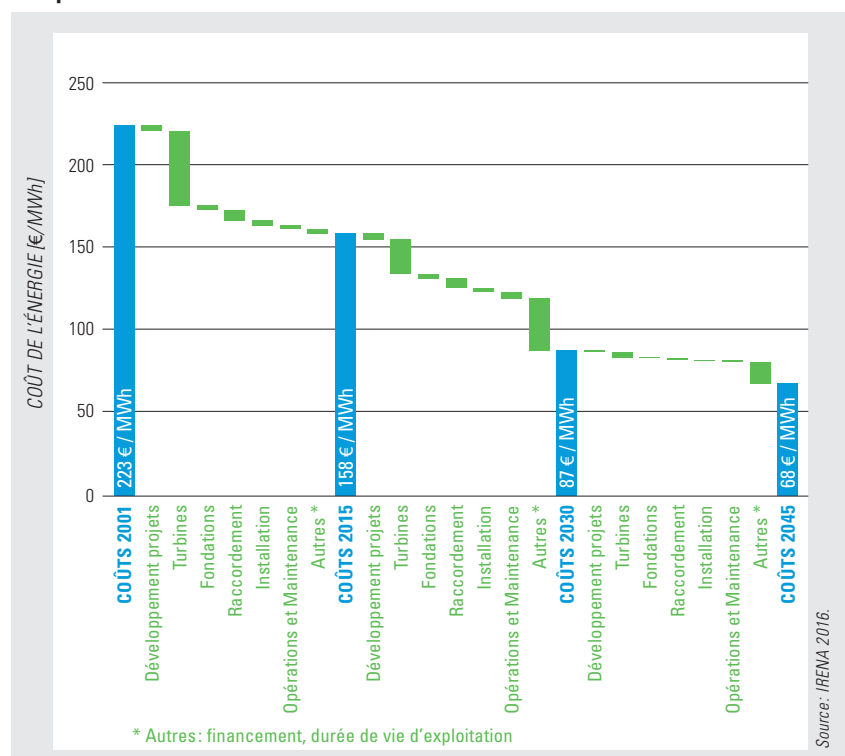
L'ADEME a publié en 2017 une analyse des coûts de production des différentes filières EnR dont l'éolien en mer. L'analyse est basée sur des projets éoliens posés mis en service en Europe au cours de la période 2014-2015, des projets en cours de construction et des projets financés qui seront réalisés à partir de 2019. Les coûts de production sont sensibles aux coûts d'investissement (CAPEX), aux coûts d'exploitation (OPEX), à la performance des parcs éoliens (facteur de charge) et au taux d'actualisation (coût moyen pondéré du capital). En faisant jouer ces deux derniers paramètres, la fourchette des coûts de production se situe entre 130 et 190 €/MWh en Europe. Ces chiffres sont en ligne avec des travaux conduits au Royaume-Uni qui montrent par ailleurs une diminution de 30 % des coûts entre 2010 et 2015 (OFWB 2017).

On en voit l'effet à travers les lauréats (Dong et EnBW) du dernier appel d'offre allemand de mars 2017 qui annoncent ne pas avoir besoin d'un tarif d'achat : l'électricité produite par les trois parcs sera vendue directement sur le marché de gros de l'électricité, soit à des prix inférieurs à 44 €/MWh (hors raccordement). Un quatrième projet a été attribué à Dong au tarif de 60 €/MWh (hors raccordement). Le dérisquage des projets, la mise en place d'un industriel qui sera pleinement mature lors de la construction des quatre projets, la montée en puissance des machines de 10 à 15 MW attendue pour 2025 permettant de réduire leur nombre et donc le nombre d'opérations marines, de bonnes conditions de vent (vitesse moyenne supérieure à 10 m/s) et une durée des autorisations étendue à 30 ans suffisent à expliquer cette réduction potentielle des coûts.

Une analyse de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) a identifié les perspectives de réduction des coûts de l'éolien en mer d'une situation de référence en 2001 jusqu'à l'horizon 2045 sur tous les éléments constituant la chaîne de valeur de l'éolien. Cette étude montre que les réductions de coûts sur les

turbines (augmentation des performances, augmentation de la taille et la puissance des machines, industrialisation) sont le moteur de la baisse des coûts globaux. La maturité de la filière fait diminuer les coûts de financement à partir de l'année 2015. Ainsi, l'étude montre une diminution des coûts de 30% de 2001 à 2015 (158 €/MWh), 45% de 2015 à 2030 (87 €/MWh) et 22% de 2030 à 2045 (68 €/MWh).

Perspective de réduction des coûts de l'éolien en mer



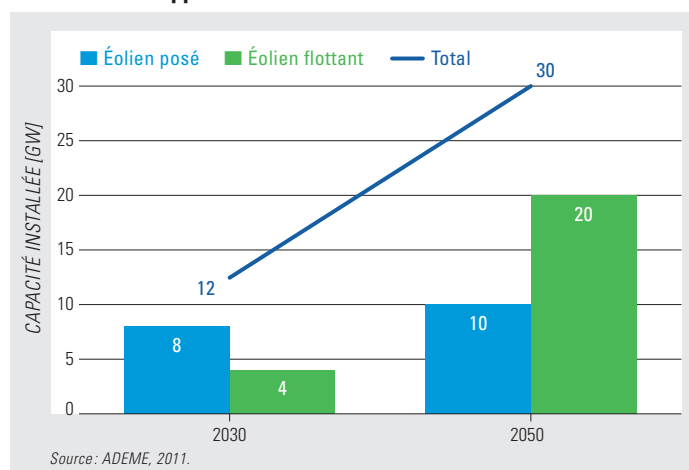
Prospective de développement de l'éolien en mer en 2030

L'Association européenne de l'énergie éolienne Wind-Europe a réalisé un travail prospectif sur l'année 2015 qui montre que les perspectives de marché sont très importantes au Royaume-Uni (23 GW), en Allemagne (17,5 GW) et en France (9 GW).

À des horizons plus lointains que 2025, il est probable que l'éolien en mer posé doive faire face à des conflits d'usage majeurs (notamment en France) du fait de zones propices limitées qui donnent l'opportunité de développer l'éolien flottant.

Aux horizons 2030 et 2050, les travaux prospectifs réalisés par l'ADEME en 2012 ont abouti à des valeurs un peu plus élevées avec 12 GW en 2030 et 30 GW en 2050 se répartissant selon le tableau suivant :

Vision du développement de l'éolien en mer en 2030 et 2050



Conclusion

L'éolien en mer est en fort développement en Europe. Même si les coûts de production sont encore élevés, ils sont en nette diminution grâce notamment au retour d'expérience positif de cette industrie en mer du Nord qui a permis de nouer des partenariats de confiance avec ses investisseurs privés et bancaires. Ce secteur est en constante évolution avec la montée en puissance des machines (de 3 MW en 2010 à 6 MW en 2015 et bientôt 8 MW en 2018 puis de 10 à 20 MW avant 2030) qui a aussi contribué à la réduction des coûts. Cette réduction doit encore s'accroître par des travaux de recherche et développement sur les briques technologiques (turbines, fondations posées et flottantes, méthodes d'installation, méthodes d'industrialisation...) et d'acquisition de connaissances nouvelles sur les aspects non technologiques (impacts environnementaux, impacts sociétaux, etc.)

pour que cette filière prenne son essor partout dans le monde où les conditions sont propices. Ce moyen de production d'électricité contribue à l'indépendance énergétique, à la diminution des émissions de GES et à une lutte efficace contre le changement climatique. L'éolien en mer donne aussi l'opportunité de créer de l'activité dans des territoires qui ont beaucoup souffert de la désindustrialisation. Le développement de cette activité réconcilie environnement, économie et emplois, piliers du développement durable.