

L'ÉOLIEN EN MER



un défi pour la transition énergétique

L'Éolien en mer

Un défi pour la transition énergétique

Lavoisier
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Directeur éditorial : Jean-Marc Bocabeille
Édition : Concept Éditions
Crédits photos de la couverture : ©CBeyssier Photography
©Tim Fox, ©SBM Ofshore
Composition : Nord Compo
Impression : La Manufacture Imprimeur

© 2022, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2659-2

Liste des auteurs

Erika Beauregard a réalisé une thèse en écologie au Centre d'Études Biologiques de Chizé (CEBC-CNRS), durant laquelle elle a étudié les effets de l'urbanisation sur les oiseaux. Particulièrement intéressée par la question de l'impact des activités anthropiques sur les vertébrés, c'est tout naturellement qu'elle s'est tournée vers l'étude de la faune volante (oiseaux et chauves-souris) en contexte éolien. Elle a ainsi rejoint en 2021 le Laboratoire National Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF Lab Chatou pour travailler sur le sujet. Ses travaux s'inscrivent dans le cadre du projet R&D REES (REnewables and Environmental Sustainability) qui traite des impacts des énergies renouvelables (éolien et solaire) sur l'environnement et la biodiversité.

Etienne Bérille a rejoint en 2019 EDF Renouvelables en tant que Coordinateur environnement à la Direction du Développement Durable, après avoir exercé en start-up et en bureau d'études en environnement. En janvier 2022, il devient Chef de projet environnement à la Direction Environnement Maritime où il vient en appui sur les projets en zone méditerranéenne. Il anime le déploiement du Système de Management Environnemental (SME) à l'offshore et accompagne les besoins des différents projets sur les questions spécifiques du carbone et du cycle de vie.

Nassif Berrabah est ingénieur diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech et de l'université d'Akron aux États-Unis. Il est également docteur en Traitement du signal et Télécommunications. Il travaille depuis 2014 au sein de la direction Recherche et Développement d'EDF sur divers sujets liés à

l'analyse de données pour le contrôle non destructif, la maintenance prévisionnelle et la gestion d'actifs. En 2021, il a rejoint le centre de recherche d'EDF au Royaume-Uni où il pilote les activités de R&D portant sur la maintenance d'éoliennes en mer.

Marie Berthelot est responsable du département Renouvelables au sein de la R&D d'EDF au Royaume-Uni et pilote le projet de recherche dédié à l'éolien offshore pour l'ensemble du groupe EDF depuis 2018. Après un doctorat en physique appliqué aux problématiques climatiques et une expérience en start-up sur la sensibilité des entreprises aux aléas climatiques, Marie a rejoint la R&D d'EDF dans le domaine des énergies renouvelables et de leur intégration dans les systèmes énergétiques. Elle a occupé les fonctions de chef de projet sur les ressources et prévisions éoliennes et solaires, puis de manager d'une équipe chargée d'étudier l'impact de l'environnement atmosphérique sur l'ensemble des activités de production d'EDF.

Jacob Burrows est ingénieur de recherche à la R&D d'EDF au Royaume-Uni depuis 2018. Il a obtenu un MSc en systèmes énergétiques et analyse de données au cours des deux premières années à EDF. Son expertise en matière d'éolien offshore couvre les domaines suivants : conditions météorologiques et océaniques, opérations et maintenance, construction, installation et opérations maritimes. Au cours des 4 dernières années, il a travaillé avec des institutions universitaires et des partenaires industriels sur des projets axés sur la technologie lidar et son utilisation dans des applications d'énergie éolienne.

Matteo Capaldo est ingénieur aérospatial de la « Scuola politecnica e delle scienze di base » de l'Université Federico II de Naples. Après un master portant sur la mécanique des structures et l'interaction fluide-structure, il obtient une bourse pour une thèse de doctorat à l'École Normale Supérieure de Cachan. Il a étudié les techniques de réduction de modèles pour la mécanique des solides, publiant une méthode d'hyper-réduction sous la direction du Prof. Pierre Ladevèze. Depuis 2015, il travaille comme ingénieur de recherche pour l'énergie éolienne traitant de la conception des éoliennes, de l'interaction fluide-structure, de la mécanique, et de la fatigue des structures. Il a co-encadré des doctorants sur des sujets tels que la corrélation d'images numériques, le jumeau numérique pour les structures offshore

et les approches probabilistes dans la conception de structures offshore. En 2020 et 2021, il a été en charge des activités d'EDF dans le projet européen Hiperwind (Grant No. 101006689).

Sébastien Cornet est ingénieur diplômé de l'école Supélec et titulaire d'un master en génie électrique de l'Université Paris Jussieu en 1994. Il a une grande expérience dans les technologies des réseaux électriques. Il a commencé en tant que dispatcher chez RTE, le GRT français, et a rejoint la R&D d'EDF en 2002 en tant qu'ingénieur d'essais dans les laboratoires d'essais électriques des Renardières avant de prendre, en 2008, la tête des laboratoires d'essais haute tension des Renardières. En 2017, il devient Chef de Projet Senior à la R&D d'EDF dans le domaine des réseaux électriques du futur (HVAC/HVDC, offshore et technologies pour les énergies renouvelables). Il est impliqué dans SuperGrid Institute, France Energie Marine et différents projets collaboratifs.

Valentin Costan est docteur en génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse depuis 2007. Il a intégré la Direction R&D d'EDF en 2009 en tant qu'ingénieur chercheur. Il est aujourd'hui expert dans le fonctionnement dynamique des systèmes électriques comportant des machines synchrones et des dispositifs à base d'électronique de puissance.

Maxime Duchet est ingénieur du génie maritime, diplômé de l'ENSTA Paris et de l'Institut Polytechnique de Paris. Il est titulaire d'un master en sciences de l'environnement et des énergies renouvelables, porté par l'Ecole Polytechnique et Paris Sorbonne Université. Il rejoint le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement de la R&D d'EDF en 2019. Il y occupe aujourd'hui la position d'ingénieur chercheur en hydrodynamique pour l'éolien flottant, après une expérience de deux ans au département R&D UK Centre d'EDF Energy, où il pilote techniquement les activités de R&D sur la construction et l'installation des éoliennes en mer.

Eve Dufossé, diplômée de Supélec en France et de la Technische Universität Darmstadt en Allemagne, a rejoint les équipes de la R&D d'EDF en 2010, après une première expérience dans l'industrie automobile en Allemagne. Elle a travaillé 6 ans sur l'exploitation et la maintenance des parcs de production (nucléaire, hydraulique, ENR). Ses activités ont évolué : ingénieur

chercheur, chef de projet, chef de groupe. En 2018, elle prend le poste de responsable programme Énergies Renouvelables. En 2022, elle rejoint les équipes d'EDF Renouvelables sur l'éolien offshore. Depuis 2020, elle est administratrice de l'ITE France Énergies Marines.

Eric Dupont. Titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble et d'un doctorat en sciences de l'atmosphère, Eric Dupont est ingénieur-chercheur expert à la R&D d'EDF et membre du CERECA (Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique, laboratoire commun entre l'École des Ponts ParisTech et la R&D d'EDF). Il a coordonné ou a été impliqué dans différents projets de R&D concernant la caractérisation expérimentale et la modélisation numérique des écoulements atmosphériques, appliquées notamment à l'estimation du productible éolien et à la dispersion atmosphérique de polluants. Il contribue actuellement en tant qu'expert à différents projets portant sur ces mêmes thématiques.

Maud Franchet est ingénieur Chercheur à la R&D d'EDF depuis 2012 au sein de l'équipe câbles, accessoires de liaisons et compatibilité électromagnétique, après une thèse au CEA sur le développement d'une méthode de diagnostic de câbles. Elle est impliquée depuis plusieurs années dans des recherches, projets pour l'éolien en mer sur les aspects dimensionnement, qualification, durée de vie, diagnostic et monitoring des câbles sous-marins, en particulier dynamiques, et de leurs accessoires. Elle a également été impliquée dans plusieurs groupes de travail Cigré sur les câbles sous-marins. Elle réalise aussi des simulations électromagnétiques pour d'autres d'applications.

Emma Gouze a obtenu une thèse en biogéochimie marine au Centre d'Océanologie de Marseille, puis a travaillé 12 ans à la R&D d'EDF pour évaluer et réduire les impacts de la production électrique (hydraulique et nucléaire) sur les milieux aquatiques. Elle intègre EDF Renouvelables et l'équipe « Provence Grand Large » en 2020 pour prendre en charge le volet environnemental d'un des tout premiers projets éoliens offshore flottants.

Anne Grau est ingénieur civil et docteur en énergétique de Mines ParisTech, et ingénieur-chercheur à la R&D d'EDF depuis 1999. Elle a travaillé sur différents projets de recherche en lien avec l'efficacité énergétique dans les bâtiments et l'industrie.

Elle a rejoint l'équipe ACV d'EDF R&D en 2016 et s'est spécialisée dans l'ACV des énergies renouvelables (éolien, PV, hydraulique).

Antoine Joly a rejoint la R&D d'EDF en France en 2012. Il a commencé sa carrière sur les aspects hydrodynamiques côtiers, aussi bien pour le risque par rapport aux centrales nucléaires que pour les hydroliennes. Depuis 2018, il a rejoint le centre de R&D d'EDF au Royaume-Uni pour s'occuper des aspects liés à la maintenance des éoliennes offshore ainsi que l'utilisation de données opérationnelles, météorologiques et océaniques.

Nicolas Kell, ingénieur de recherche en modélisation des investissements dans l'éolien offshore à la R&D d'EDF UK depuis 2020. Il est actuellement dans sa dernière année de doctorat en ingénierie en partenariat avec les universités d'Edimbourg, Strathclyde et Exeter. Son travail consiste à développer des outils et une méthodologie (en utilisant la théorie des jeux et des techniques de Monte-Carlo) pour simuler des stratégies d'enchères pour les subventions aux énergies renouvelables, mais également modéliser des coûts, comme la fourniture d'évaluations technico-économiques pour l'éolien offshore fixe et flottant afin de soutenir les investissements et la prise de décision stratégique au sein d'EDF.

Vincent de Laleu, diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble (INP Grenoble), a rejoint EDF en 1986. Il a travaillé 12 ans dans la maintenance génie-civil d'ouvrages hydroélectriques (ingénierie, stratégie de maintenance, expertises techniques, analyses de risques...) dans différentes Unités Hydrauliques d'EDF en France (Marseille, Mulhouse, Bordeaux). Après avoir intégré le siège de la Production Hydraulique d'EDF à Saint Denis (1999-2008), ses activités ont évolué vers le pilotage de projets nationaux sur l'évolution des politiques et stratégies de maintenance du parc hydroélectrique, l'évaluation du potentiel de développement de nouveaux sites en France et le lancement du projet de démonstration hydrolien de Paimpol-Bréhat. Entre 2008 et 2010, il a été détaché en tant que conseiller technique auprès du Ministère anglais de l'Énergie et du Changement Climatique (DECC) dans l'équipe gouvernementale en charge du pilotage des études de faisabilité de projets marémoteurs et hydroliens (plusieurs scénarios de 300 MW à 8400 MW) dans l'estuaire

de la Severn, confiées à un consortium de bureaux d'études. Avec la création du R&D UK Centre rattaché à la filiale anglaise EDF Energy en 2010, il a rejoint l'équipe en charge du nouveau projet R&D sur l'éolien en mer (pilotage de projets technico-économiques, développement de partenariats...). De retour en France en 2014, il a rejoint le centre de R&D d'EDF Lab Chatou, pour assurer la veille technico-économique de l'ensemble des filières renouvelables et le pilotage de diverses études et analyses sur ces filières EnR en France et à l'étranger. Il anime des formations internes à EDF sur les énergies renouvelables et assure des vacations d'enseignement dans différentes écoles d'ingénieurs ou universités (éolien en mer, énergies des océans...).

Franck Latraube a travaillé durant plus de 15 ans comme « Ornithologue » au sein de différents organismes, puis a souhaité mettre à profit ces connaissances de terrain au profit des énergies marines renouvelables. Passionné par les oiseaux depuis son plus jeune âge, il a débuté par le monde de la recherche au sein du CNRS de Chizé en lien avec le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. Ses premières missions furent consacrées à l'étude des oiseaux migrateurs en lien avec leur espaces protégés. Il participe toujours activement et bénévolement à des programmes de recherches sur l'avifaune. Recruté en 2021, il met à disposition son savoir au profit du pôle environnement d'EDF-Renouvelables offshore et plus spécifiquement sur le parc éolien en mer de Courseulles situé dans le Calvados.

Anaïs Lovera est diplômée de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Elle réalise sa thèse sur le dimensionnement au chargement latéral et cyclique des monopieux d'éoliennes en mer installés dans la roche tendre. Cette thèse a été réalisée en collaboration avec la R&D d'EDF, le laboratoire Navier de l'ENPC et Centre for Offshore Foundation Systems de l'University of Western Australie. En 2019, elle rejoint la R&D d'EDF en tant qu'ingénieure de recherche et travaille sur le dimensionnement des fondations d'éoliennes en mer.

Amandine Martin de Bazelaire a rejoint la R&D d'EDF au Royaume-Uni en septembre 2021 après un diplôme d'ingénieur à l'école des Mines de Nancy et un master de génie maritime à l'Université de Southampton. Elle travaille sur les sujets de Construction & Installation pour l'éolien en mer, avec notamment

des simulations hydrodynamiques. Elle pilote également des projets d'inspections sous-marines automatisées de fondations offshore pour les besoins d'Opération & Maintenance.

Etienne Monnot est diplômé de l'École National Supérieure d'Ingénieurs Electricien de Grenoble (ENSIEG). Il a rejoint EDF en 1991 où il a débuté sa carrière au Centre National des Mouvements d'Énergie (CNME) jusqu'en 1999 pour travailler sur le maintien en conditions opérationnel des outils de conduite. Il a ensuite travaillé au Centre National d'Équipement Nucléaire (CNEN) pendant cinq ans sur la distribution électrique des paliers N4 et EPR avant de rejoindre la Direction Recherche et Développement d'EDF en octobre 2004 pour mener différents projets de recherche. Il est ingénieur expert sur le fonctionnement des systèmes électriques en particulier dans les domaines des réglages de tension, de fréquence et de stabilité des alternateurs.

Géraldine Nogaro est titulaire depuis 2007 d'un Doctorat en Écologie Fonctionnelle de l'Université Lyon 1. Chercheur en post-doctorats au Cemagref (INRAE) de Lyon en 2007-2008 puis aux États-Unis (Wright State University, 2009-2011 et Grand Valley State University, 2011-2014) sur les relations entre organismes benthiques, communautés microbiennes et recyclage des nutriments dans les écosystèmes aquatiques. Elle travaille en tant qu'ingénieur-chercheur en Hydroécologie et Biodiversité depuis 2014 au sein du Laboratoire National Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF Lab Chatou. Elle est cheffe du projet R&D REES (REnewables and Environmental Sustainability) au LNHE depuis 2021 ; projet qui traite des impacts des énergies renouvelables (éolien et solaire) sur l'environnement et la biodiversité.

Jean-Philippe Pagot est biologiste marin et plongeur professionnel. Il débute sa carrière aux côtés du commandant Cousteau puis en bureau d'études en environnement marin où il a passé près de 10 ans. Il rejoint les projets d'énergies marines renouvelables pour le compte d'EDF Renouvelables en 2010 en qualité de directeur environnement maritime, à ce titre il anime, avec ses équipes, les expertises environnementales, de sécurité maritime et de système d'informations géographiques (SIG). Il est également président de l'Institut pour la Transition Énergétique France Énergies Marines et administrateur de l'association 7^e Continent.

Raphaël Pérony est ingénieur en mécanique diplômé de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Dans un premier poste au sein de l'Unité Technique Opérationnelle d'EDF, il réalise des analyses de nocivité en mécanique de la rupture visant à justifier la tenue des équipements du parc nucléaire. En 2009, il rejoint la R&D d'EDF en tant qu'ingénieur de recherche pour réaliser des analyses thermomécaniques et vibratoires traitant du comportement et de la durée de vie des machines tournantes du parc nucléaire et hydraulique. En 2021, son activité à la R&D d'EDF évolue vers le dimensionnement et les études de fatigue des fondations, tours et pales d'éoliennes terrestres et en mer.

Christophe Peyrard est diplômé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Il intègre la R&D d'EDF en 2005 en tant qu'ingénieur-chercheur en dynamique des structures. En 2011 il rejoint le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement et travaille sur la problématique des hydrolennes et les modèles de propagation des vagues en zone côtière. À partir de 2012, il est impliqué dans l'éolien flottant via les projets VERTIWIND puis Provence Grand Large. Il contribue à la création d'outils de modélisation dédiés aux éoliennes flottantes. Nommé chercheur expert en 2016, il est actuellement en charge des aspects fondations flottantes à la R&D d'EDF.

Caroline Piguet est titulaire d'une maîtrise de biologie marine et d'un Master 2 en aménagement et gestion du littoral. Elle a dans un premier temps travaillé 8 ans en bureau d'études en environnement spécialisé dans le domaine marin puis au sein de différents porteurs de projets en énergies marines renouvelables. Elle intègre EDF Renouvelables et l'équipe du projet éolien en mer de Dunkerque en 2019 pour prendre en charge le volet environnemental du projet.

Aymeric Régnier est ingénieur de recherche en éolien offshore. Après avoir complété son Master en génie aéronautique à l'Imperial College de Londres, il a rejoint la R&D au UK Centre en 2021. Ses activités se portent sur l'utilisation de données de surveillance des turbines pour le développement d'outils de support à l'Opération et la Maintenance des parcs offshore.

Ernesto Santibanez a passé deux ans en tant qu'ingénieur de planification dans une mine de cuivre exploitée par BHP au

Chile. Il a ensuite effectué un MSc et un Phd à l'Imperial College à Londres avec pour objectif d'optimiser les impacts environnementaux des hydrocarbures. Depuis octobre 2020, il travaille au sein de la R&D d'EDF au Royaume-Uni sur la modélisation des coûts des parcs éoliens offshore en soutenant les appels d'offres en cours, les projets de R&D et la prévision des coûts à long terme.

Camille Senn a obtenu un Master en Océanographie Environnements Marins à l'Université Pierre et Marie Curie et un Mastère spécialisé en Gestion Environnementale aux Mines ParisTech, elle intègre l'équipe Environnement Maritime d'EDF Renouvelables en 2020 pour prendre en charge le volet environnemental d'un des tous premiers projets éoliens en mer français.

Craig Smith a rejoint la R&D d'EDF au Royaume-Uni en janvier 2022. Il pilote l'ensemble des activités de Construction & Installation pour l'éolien offshore. Après un master en génie civil, Craig a travaillé pendant 6 ans dans un bureau d'études en tant qu'ingénieur structurel soutenant et dirigeant la conception des fondations de divers parcs éoliens au large des côtes anglaises, écossaises et françaises.

Florimond Soriano est ingénieur en électrotechnique, diplômé de l'École Nationale Supérieure de l'Énergie, l'Eau et l'Environnement du groupe Grenoble INP en 2018. Il entre en 2020 dans le groupe EDF, sur le site des Renardières de la R&D. Il prend en charge des études sur les appareillages HTA et les transformateurs puis rejoint rapidement les projets de R&D sur l'éolien flottant, pour apporter son expertise sur les matériels électriques équipant les sous-stations flottantes.

Pierre Stephan est ingénieur en matériaux de l'école SUPMECA Paris et docteur en mécanique de l'École Polytechnique. Après quelques années au Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) en tant qu'ingénieur de recherche en tribologie et usure des pièces mécaniques, il intègre la R&D d'EDF en 2009 pour travailler sur la surveillance des machines et des structures de génie civil des parcs de production d'EDF (nucléaire, hydraulique, éolien et photovoltaïque). Il se spécialise ensuite sur l'optimisation de la production et de la maintenance des parcs éoliens, et sur les sujets d'études liées aux pales d'éoliennes (recyclage, inspections et jumeaux numériques).

Nathalie Tertre travaille depuis près de 20 ans sur les interactions entre les activités humaines et le milieu littoral et marin. Après plusieurs années consacrées aux évaluations environnementales et études d'impact en bureaux d'étude, elle a rejoint EDF Renouvelables pour contribuer au développement de la filière des énergies marines renouvelables. Elle a ainsi participé à la construction du parc éolien en mer de St Nazaire, premier parc éolien en mer de France, en mettant en place les mesures environnementales associées à ce projet.

Philippe Veyan est pionnier des renouvelables depuis 1988, d'abord dans les systèmes photovoltaïques pour les pays en développement puis en France avec le lancement des premiers projets connectés au réseau et enfin dans le cadre d'un projet de production de silicium solaire et d'une startup spécialisée dans le solaire en toitures, aujourd'hui EDF ENR. Il rejoint EDF Renouvelables en 2009 pour des projets d'innovation dans les énergies marines avec les Normandie Hydro, une ferme hydrolienne dans le Raz Blanchard et Provence Grand Large, le premier projet de parc éolien flottant initié en France. Il est actuellement directeur de l'action territoriale et des autorisations à la direction des énergies marines.

Darius Vizireanu est diplômé de L'Université Polytechnique de Bucarest, Faculté d'Électrotechnique, Département Entraînements Électriques en 1997. Il travaille jusqu'en 2002 comme ingénieur de recherche dans le domaine des convertisseurs de puissance pour ICPE SAERP SA. En 2007, il reçoit le titre de docteur de la part de l'École Centrale de Lille. Depuis 2006, il travaille pour la R&D d'EDF comme ingénieur chercheur expert dans le domaine des systèmes de conversion d'énergie dédiés aux énergies renouvelables.

Louise Yeow est titulaire d'un master en génie chimique de l'université de Bath, en Angleterre. Passionnée par le développement durable, elle travaille aujourd'hui comme ingénieure de recherche en modélisation des investissements dans l'éolien offshore à la R&D d'EDF au Royaume-Uni. Son travail se concentre sur le développement d'outils de modélisation des coûts pour les parcs éoliens fixes et flottants afin de fournir des estimations de coûts et de soutenir les parties prenantes à un niveau stratégique. Dans le cadre de ses fonctions, elle effectue également des études de marché et une veille technologique pour se tenir informée des dernières tendances.

Sommaire

Liste des auteurs	III
Abréviations	XVII
Introduction	1
1. État des lieux des marchés et scénarios de développement	5
1.1. Le développement de l'éolien en mer dans le monde à fin 2021 – Chiffres clés	5
1.2. L'évolution du développement de l'éolien en mer depuis 30 ans.....	10
1.2.1. <i>1991-2001 : naissance de la filière – les premiers parcs</i>	10
1.2.2. <i>2002-2011 : la filière s'industrialise – les parcs grandissent</i>	11
1.2.3. <i>2012-2017 : maturité et baisse des coûts</i>	12
1.2.4. <i>Depuis 2018... : éoliennes et parcs géants – l'éolien flottant s'industrialise</i>	13
1.3. Les perspectives de développement de l'éolien en mer posé et flottant (2030-2050).....	13
1.3.1. <i>États-Unis</i>	14
1.3.2. <i>Chine</i>	14
1.3.3. <i>Autres pays d'Asie du Sud-Est</i>	14
1.3.4. <i>Inde</i>	14
1.3.5. <i>Europe</i>	15
1.3.6. <i>France</i>	18
1.3.7. <i>Éolien flottant</i>	20
1.4. Les acteurs du développement de l'éolien en mer en Europe	22

2. État de l'art et perspectives des composants	27
2.1. Les turbines éoliennes ou aérogénérateurs	27
2.1.1. <i>Principes de la conversion d'énergie</i>	29
2.1.2. <i>Les génératrices et chaînes de conversion</i>	32
2.1.3. <i>Le rotor – Les pales</i>	36
2.2. Les mâts	39
2.3. Les fondations fixes	39
2.4. Les fondations flottantes	43
2.4.1. <i>Les contraintes de dimensionnement des flotteurs</i>	44
2.4.2. <i>Trois grands principes de stabilité</i>	45
2.4.3. <i>Les différents types d'ancrage</i>	48
2.4.4. <i>Les différents types d'ancres</i>	48
2.4.5. <i>Les innovations technologiques</i>	49
2.4.6. <i>Les défis pour l'éolien flottant</i>	51
2.5. Infrastructure électrique interne à la ferme	52
2.5.1. <i>Topologies</i>	52
2.5.2. <i>L'appareillage électrique</i>	53
2.5.3. <i>Systèmes de câbles</i>	53
3. L'évaluation du productible des fermes éoliennes	59
3.1. Caractérisation du site	59
3.1.1. <i>Anémomètres à coupelles et girouettes</i>	59
3.1.2. <i>Lidars</i>	60
3.2. Estimation de la ressource brute en vent	65
3.3. Estimation des pertes	67
3.4. Prise en compte des incertitudes	71
3.5. Impact du changement climatique	72
4. Les phases de vie d'un projet	75
4.1. Ingénierie du design	75
4.1.1. <i>Environnement</i>	75
4.1.2. <i>Contraintes de dimensionnement</i>	78
4.1.3. <i>Défis de l'ingénierie de design</i>	82
4.2. Les défis de l'installation et de la construction	84
4.2.1. <i>Les fondations éoliennes en mer posées ou fixées sur le fond marin</i>	84
4.2.2. <i>Les spécificités de la logistique pour l'éolien flottant</i> ..	89
4.3. Opérations, exploitation et maintenance	93
4.3.1. <i>Gestion et exploitation d'une ferme d'éoliennes offshore</i>	93
4.3.2. <i>Durée de vie des installations et de leurs composants/Modes d'avaries</i>	96

4.3.3. Maintenance de routine.....	99
4.3.4. Maintenance lourde.....	102
5. Coûts de l'éolien en mer et mécanismes de soutien.....	109
5.1. Les coûts de l'éolien en mer et évolutions.....	109
5.1.1. Les coûts de l'éolien en mer posé.....	114
5.1.2. Les coûts de l'éolien flottant.....	117
5.2. Les mécanismes de soutien.....	120
5.3. Appels d'offres et enchères.....	124
5.4. Les contrats d'achat d'électricité (Corporate Power Purchase Agreement).....	128
5.5. Taxes.....	129
6. Raccordement au réseau et intégration au système électrique.....	131
6.1. Infrastructures électriques d'export et de raccordement ...	131
6.1.1. Infrastructures sans sous-station offshore.....	133
6.1.2. Infrastructures avec sous-station offshore HVAC.....	133
6.1.3. Infrastructures d'export avec sous-station HVDC.....	136
6.2. Ruptures technologiques et verrous.....	137
6.2.1. Infrastructure interne à la ferme.....	138
6.2.2. Infrastructure d'export et de raccordement.....	140
6.2.3. Grandes infrastructures mutualisées.....	142
6.3. Intégration massive de l'éolien offshore dans le système électrique.....	144
6.3.1. Congestions.....	145
6.3.2. Inertie du système électrique.....	145
6.3.3. Équilibrage du système électrique.....	147
6.3.4. Grid-forming.....	148
6.3.5. Futures exigences réseau : le black-start.....	152
7. L'éolien en mer : environnement et concertation.....	157
7.1. Réglementation en France.....	157
7.1.1. Réglementation des appels d'offres.....	157
7.1.2. Impulsion de la filière pour faire évoluer la réglementation en faveur de l'environnement.....	160
7.2. Prise en compte des enjeux environnementaux sur la filière et les projets.....	160
7.2.1. Connaissance environnementale du milieu.....	160
7.2.2. Dialogue et concertation.....	161
7.2.3. Prise en compte des enjeux locaux.....	162

7.2.4. Particularité de l'offshore : appel d'offres avec choix de la zone décidée et portée par l'État qui organise le débat public	162
7.3. Évaluation et maîtrise des enjeux environnementaux de l'éolien en mer	163
7.3.1. Méthodologie pour les études d'impact.....	163
7.3.2. Améliorer les connaissances, objectiver les effets et apporter des solutions pour réduire les impacts	167
7.4. Externalités et analyse de cycle de vie	175
7.4.1. Durée de vie et recyclage	175
7.4.2. Analyse du cycle de vie (ACV) et indicateurs d'impacts environnementaux.....	177
7.5. Intégration des projets éolien en mer	180
7.5.1. Concertation	180
7.5.2. Complémentarité des usages : enjeux environnementaux et sociétaux	182
Conclusion	187

Abréviations

AC/DC	Courant alternatif/courant continu (alternative current/direct current)
ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Aérogénérateur	Turbine éolienne
AO	Appel d'offres
BOEM	Bureau of Ocean Energy Management
CAPEX	Coûts d'investissement (Capital Expenditure)
CEFE	Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive
CEN	Conservatoire d'Espaces Naturels
CfD	Contract for difference
CFD	Mécanique des fluides numérique (Computational Fluids Dynamics)
CNDP	Commission nationale du débat public
CO ₂	Dioxyde de carbone
CRBPO	Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux
CRE	Commission de Régulation de l'Énergie
CRM	Collision Risk Model
CSM	Condition Monitoring System
CTV	Crew Transfer Vessels
DAS	Distributed Acoustic Sensing

DLC	Design Load Cases
DP	Puissance instantanée
Drill & grout	Forage et injection de coulis
DSS	Distributed Strain Sensing
DTS	Distributed Temperature Sensing
Due Diligence	Phase de dimensionnement du projet
EMF	Éolien Maritime France
EP	Électronique de puissance
EPR	Isolant synthétique de câbles
ESSOC	Loi pour un État au service d'une société de confiance
GES	Gaz à effet de serre
Feed-in Tariff	Tarifs d'achat garantis
Feed-in Premium	Dispositif de complément de rémunération
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais : IPCC)
GW	Gigawatt
GWEC	Global World Energy Council
HFCT	High Frequency Current transformer
HTA	Haute tension A (tension comprise entre 1 kV et 50 kV)
HTB	Haute tension B (tension supérieure à 50 kV)
HV-AC	Haute tension et courant alternatif
HV-DC	Haute tension et courant continu
IEA	Agence Internationale de l'Énergie
Jack-up (navire)	Navire semi-submersible
kV	Symbole du kilovolt, unité de mesure de la tension électrique
LCoE	Levelized Cost of Electricity, coût complet de l'électricité
LES	Large Eddy Simulation
MBL	Minimum Breaking Load
MVDC	Medium Voltage Direct Current

MWh	Mégawatt-heure
OCC	Onshore Control Center
O&M	Opération et maintenance
OPEX	Coûts d'exploitation (Operational expenditure)
OREC	Offshore Renewable Energy certificate
PFC	Power Flow Controller
Pile refusal	Refus du pieu
Pitch	Angle de calage des pales
PIF	Pile installation frame (cadre d'installation de pieu)
PNEC	Plans Nationaux Énergie-Climat
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PSEM	Postes sous enveloppe métallique
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RNA	Rotor Nacelle Assembly
ROC	Renewable Obligation Certificate
ROV	Remotely operated underwater vehicle, robot sous-marin téléguidé
ROCOF	Vitesse de la chute de fréquence en régime transitoire
RTE	Réseau de transport d'électricité
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SAR	Synthetic Aperture Radar
Sealed-bid auctions	Enchères à soumission cachetée
Slacking	Perte de tension dans la ligne ou une partie de la ligne
Slipforming	Coffrage glissant
SHM	Structural Health Monitoring
SOV	Service Operation vessel
SPAR	Single Point Anchor Reservoir
SPMT	Self-Propelled Modular Transporter
STATCOM	STATic COMPensator
Step-up transformer	Transformateur élévateur de tension

Strike price	Prix d'exercice d'une option
String	Topologie simple de connexion d'éoliennes en série
TLP	Tension Leg Platform
UPS	Uninterruptible power supply
XLPE	Isolant synthétique de câbles
Yaw control	Système de contrôle en lacet de la turbine
ZEE	Zone économique exclusive

Introduction

Depuis le premier parc éolien en mer de Vindeby (5 MW – 11 éoliennes de 450 kW de Bonus Energy) installé à 2 km au large du Danemark en 1991 (et déconstruit par Dong Energy, maintenant Ørsted, en 2017), la filière renouvelable de l'éolien en mer a gagné en maturité et en compétitivité et se développe non seulement en Europe mais également en Asie (Chine, Taïwan, Japon, Vietnam...) et aux États-Unis.

À fin 2021, plus de 56 GW de parcs éoliens en mer sont en exploitation dans le monde dont 28,3 GW en Europe et 27 GW en Chine qui est devenu le leader du développement (16,9 GW pour la seule année 2021).

Bénéficiant de vents plus réguliers et plus forts au large des côtes, un parc éolien en mer comporte désormais plusieurs dizaines d'éoliennes adaptées à l'environnement marin, d'une puissance unitaire de 6 à 10 MW et reposant sur une fondation adaptée à la profondeur et aux caractéristiques des fonds marins (éolien en mer dit « posé »).

Ces éoliennes sont reliées entre elles par des câbles électriques sous-marins, raccordées à un poste électrique en mer qui élève alors le niveau de tension pour réduire les pertes et pour transporter l'électricité produite par ce parc vers la côte et le réseau électrique terrestre au moyen de câbles électriques sous-marins Haute Tension.

Quand la profondeur d'eau dépasse 70 m environ, l'éolien en mer est dit « flottant », l'éolienne repose alors sur une plateforme flottante ancrée aux fonds marins au moyen de lignes de

mouillage ; cette filière plus récente mais prometteuse, est encore en phase expérimentale avec des prototypes et sites pilotes (130 MW en exploitation dont 113 MW en Europe à fin 2021).

L'implantation des parcs éolien en mer se fait, soit dans les eaux territoriales (jusqu'à 12 milles nautiques des côtes), soit dans les zones exclusives économiques (ZEE), jusqu'à 200 milles nautiques.

En 20 ans, grâce aux nombreuses innovations techniques (taille et puissance des turbines...), aux progrès considérables pour la logistique en mer (navires d'installation spécifiques...) et aux améliorations des performances des parcs, les coûts ont fortement baissé et ils vont continuer à décroître.

Les vastes perspectives de développement dans le monde et la compétitivité de cette filière attirent désormais de nouveaux investisseurs (après les grands électriciens européens) : fonds de pension, acteurs financiers et surtout les principaux pétro-gaziers européens.

L'éolien en mer devient, pour de nombreux pays (en particulier en Europe), la filière privilégiée de la transition énergétique, en particulier pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. L'Union européenne a confirmé son objectif de 60 GW d'éolien en mer en 2030 et de 300 GW en 2050, tandis que le Royaume-Uni a annoncé respectivement 40 GW puis 80 GW.

Cette filière doit toutefois affronter de nouveaux défis avec les futures éoliennes géantes de 14-16 MW (220-240 m de diamètre du rotor) attendues vers 2023-2024 (voire 20 MW d'ici 2030), avec la construction de parcs de plus en plus grands (2-3 GW, voire plus) et éloignés des côtes. La logistique doit être repensée : de nouveaux navires d'installation, pouvant lever des charges de 3 000 tonnes (fondations), sont nécessaires et les infrastructures portuaires doivent s'adapter... De même, ce « gigantisme » nécessite de mieux comprendre les phénomènes de fatigue et de vieillissement (ex. les pales) afin d'anticiper et d'optimiser les coûts d'exploitation et maintenance.

L'éolien flottant qui va passer très prochainement en phase de développement industriel (ex. les prochains appels d'offres en France pour des parcs de 250 MW), nécessite aussi dès

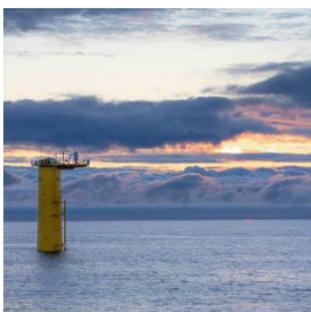
à présent de lever quelques verrous technologiques (ex. les câbles électriques sous-marins Haute Tension « dynamiques ») et d'étudier le comportement de ces futures fermes flottantes.

Enfin, l'intégration de ces grands parcs en mer dans le réseau électrique, leurs impacts sur l'environnement marin et la concertation avec les usagers de la mer ou riverains sont également des sujets à aborder et à anticiper.

Remerciements à l'ensemble des contributeurs :

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collaboratif et collectif de 36 ingénieurs et chercheurs d'EDF spécialistes dont les profils ont été présentés au début de l'ouvrage.

Sa rédaction a été coordonnée par Marie Berthelot, Etienne Brière, Jean-Paul Chabard, Vincent De Laleu, Eve Dufossé, Sandrine Dyèvre et Bernard Salha.



L'éolien en mer, sujet particulièrement au cœur de la transition énergétique, est le thème du sixième ouvrage, après le stockage de l'électricité, la flexibilité des systèmes électriques, l'hydrogène décarboné, la préservation de la biodiversité, les défis scientifiques du nucléaire pour la production d'électricité. Ce livre se veut pédagogique, l'ensemble des questions y ont été abordées : de la structuration de la filière à la question de l'environnement et de la concertation avec les usagers en passant par le fonctionnement d'une éolienne en mer, l'analyse des techniques actuelles et à venir de cette industrie, le raccordement aux réseaux terrestres, la question de l'intermittence, la problématique de la maintenance des parcs et du démantèlement ultérieur des sites, et les perspectives économiques de croissance des marchés.

