

Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières

Mai 2017

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *BVG Associates, GS Consulting et INNOSEA*

N° de contrat : 16MAR000993

Coordination technique : Robert BELLINI – ADEME – Direction Productions et Energies Durables

Service Réseaux et Energies Renouvelables



RAPPORT FINAL

AUTEURS

BVG Associates : Giles HUNDELBY, Margaux DELAHAIE, Kate FREEMAN

GS Consulting : Guillaume SIMON

REMERCIEMENTS

Comité de pilotage :

ADEME :

Robert BELLINI

Yolène BERROU

Vincent GUENARD

David MARCHAL

Guilain CALS

Maxime JEANNIN

Jean-Michel PARROUFFE

Raphaël GERSON

Direction générale de l'énergie et du climat : Louis ORTA

Energies Normandie : Marc RAPIN

Entretiens :

Frédéric CHINO (DCNS), Alexis CRAMA (LM Blades), Steven CURET (GE Renewables), Christine DE JOUETTE (Adwen), Raphaël DE ROCCA (GE Renewables), Christian DERRIEN (GE Energy Connection), Raphaël GENIN (Engie), Frédéric PETIT (Siemens), Jean-Philippe SALOME (EDF EN), Samir SOUCHANE (Vestas), Benoît TAVERNIER (STX), Cédric TURNACO (Adwen), Pierre WARLOP (WPD), Nicolas WOLFF (Vestas).

Avec le précieux soutien de Marion LETTRY et Paul DUCLOS (SER), de Matthieu MONNIER (FEE), et de nombreuses personnes qu'il n'est pas possible de citer exhaustivement.

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais :

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

TABLE DES MATIERES

1. SYNTHESE	5
2. INTRODUCTION.....	10
2.1. Contexte	10
2.2. Périmètre.....	10
2.3. Démarche.....	10
3. METHODOLOGIE.....	11
3.1. Nomenclature des innovations.....	11
3.2. Modélisation des innovations technologiques	12
3.3. Entretiens et enquête	15
3.4. Evaluation des « Effets sur l'écosystème industriel »	15
4. EVALUATION INITIALE DES COUTS (LCOE) POUR CHAQUE SITE DE REFERENCE.....	16
4.1. Les hypothèses principales.....	16
4.2. Décomposition des coûts de production	17
5. LES INNOVATIONS ET LEUR EFFET DE REDUCTION SUR LES COUTS DE PRODUCTION DE L'ENERGIE	19
5.1. Revue des innovations.....	19
5.2. L'impact combiné des innovations principales.....	19
5.3. Les innovations de développement	26
5.4. Les innovations de rotor.....	29
5.5. Les innovations concernant la nacelle de l'éolienne.....	33
5.6. Les innovations concernant les fondations	38
5.7. Les innovations concernant le raccordement électrique.....	42
5.8. Les innovations concernant l'installation.....	44
5.9. Les innovations concernant l'exploitation et la maintenance.....	47
6. SYNTHESE DES EFFETS DES DOMAINES D'INNOVATION SUR LE COUT LCOE PAR FILIERE .	51
6.1. Synthèse de la réduction des coûts LCOE par filière à horizon 2030	51
6.2. L'impact des innovations appliquées au retrofit.....	52
6.3. L'impact des innovations appliquées au repowering.	53
6.4. Les hypothèses spécifiques aux DROM-COM	53
7. SYNTHESE DES RESULTATS, SENSIBILITE DES FILIERES AUX EFFETS DE MARCHÉ ET DE MATURITE TECNICO-COMMERCIALE.....	55
7.1. Synthèse des évolutions de coûts par site de référence	55
7.2. Sensibilité des filières aux effets de marché et de maturité technico-commerciale	56
7.3. Les taux d'apprentissage des différentes filières éoliennes	58
8. CAPACITE D'INNOVATION DE LA CHAINE D'APPROVISIONNEMENT FRANÇAISE.....	59
8.1. Les acteurs français innovants	59
8.2. Vue d'ensemble des innovations et l'intérêt des acteurs français	76
9. STRATEGIE D'INNOVATION.....	81
9.1. Identification des opportunités d'innovations	81
9.2. Synthèse de la stratégie d'innovation	83

ANNEXE A : METHODOLOGIE LCOE	86
A.1 Définition et contexte	86
A.2 Définition des termes.....	86
A.3 Hypothèses de sites types.....	90
ANNEXE B : LES TABLEAUX DE SYNTHESE.....	96
ANNEXE C : LES SOURCES	103
C.1 Consultations d'experts	103
C.2 Sources académiques.....	104
ANNEXE D : SIGLES ET ACRONYMES	106

1. Synthèse

Cette étude sur l'innovation a pour objectif de dresser les perspectives des évolutions technologiques, de coûts et d'opportunités industrielles dans l'éolien. Elle concerne à la fois l'éolien à terre, en mer posé et flottant. Après recensement, soixante-quatre innovations technologiques ont été répertoriées. Leur potentiel de réduction des coûts a été évalué aux horizons 2020, 2025 et 2030 en prenant en compte les spécificités du contexte français.

La première conclusion de l'étude est que les innovations sont nombreuses et conduisent, sur un site type donné, à des réductions de coûts importantes non seulement dans l'éolien en mer posé et flottant, qui sont des filières récentes, mais aussi dans l'éolien terrestre qui bénéficie d'un plus long retour d'expérience.

L'impact le plus important résulte des innovations permettant la croissance de la puissance et du productible des turbines, qui concernent principalement rotors et nacelles, et qui apportent des économies d'échelle très significatives, particulièrement en mer où les principales limites sont les capacités techniques. D'autres innovations importantes verront le jour sur les segments suivants :

- le développement des projets : optimisation multicritère des implantations des parcs éoliens, amélioration de la caractérisation et de la modélisation des ressources ;
- le rotor : aérodynamisme et aéroélasticité des pales, optimisation de la commande des pales, amélioration des matériaux et progrès des tests de vérification des nacelles en atelier ;
- la nacelle : progrès des stratégies de contrôle-commande de l'éolienne, des technologies d'entraînement direct ;
- les fondations en mer : optimisation de la conception et de la fabrication des fondations (éolien posé) et progrès des flotteurs et de leurs amarres (éolien flottant) ;
- le raccordement électrique : réduction de poids des plateformes de transformation en mer, progrès des transmissions à courant continu ;
- l'installation : réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques et aux états de mer agités et amélioration des conditions du transport de personnel vers les éoliennes en mer ;
- l'exploitation et la maintenance : intégration des systèmes de commande des éoliennes à l'échelle du parc éolien, développement de la maintenance conditionnelle et amélioration de la prise en compte des opérations de maintenance dès la conception.

Les innovations dépendant spécifiquement du site (par exemple : introduction des pales furtives, système de cohabitation avec la biodiversité) n'ont pas été modélisées. Elles conduisent généralement à une augmentation limitée du coût. D'autres innovations, liées au recyclage ou à l'utilisation de matières premières renouvelables, n'ont pas d'effet significatif sur les coûts et ne sont pas détaillées, mais peuvent concourir à une meilleure performance environnementale et une plus grande durabilité. Enfin, l'allongement de la durée de vie des éoliennes est un facteur de diminution du coût de l'électricité (voir Figure 1) : il résulte d'un processus d'innovation dans la conception dont l'impact est majeur.

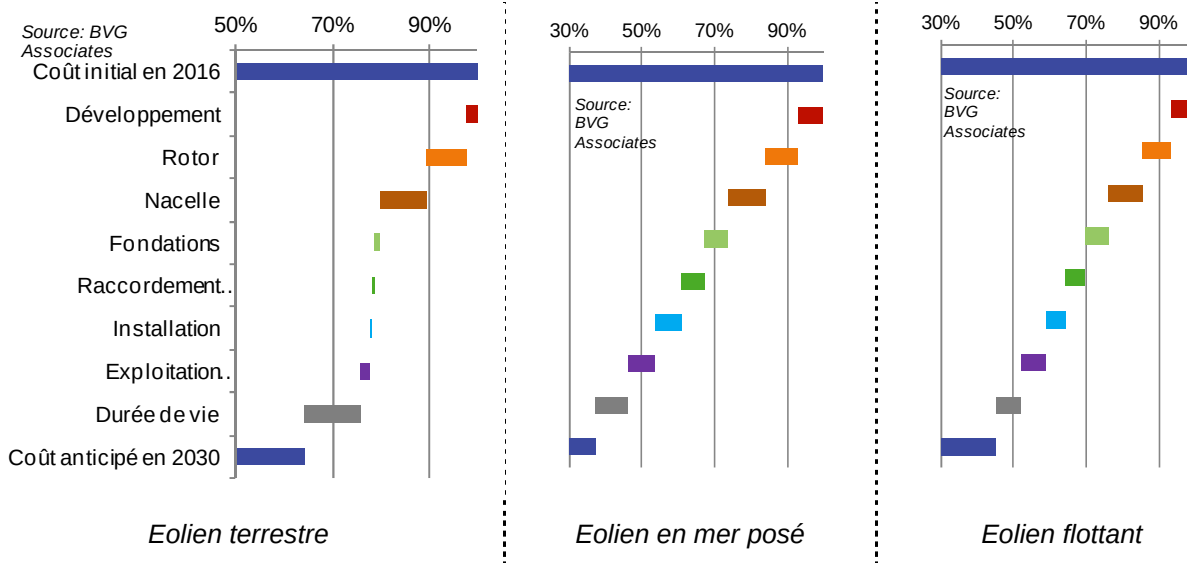


Figure 1 : Décomposition du potentiel de réduction des coûts des filières éolien incluant l'optimisation industrielle et logistique par domaine d'innovation en France à l'horizon 2030

Sous les hypothèses de ces innovations technologiques, d'un allongement de la durée de vie des installations (à 25 ans en 2020 et 30 ans en 2030) ainsi que d'un coût pondéré moyen du capital stable pour l'éolien terrestre mais en diminution jusqu'à 7% et 7,5% pour l'éolien en mer posé et flottant, respectivement, et en prenant en compte une fourchette de coûts pour les filières maritimes, les coûts des trois filières diminuent fortement, à des niveaux qui pourront être compétitifs sans mécanisme de soutien (voir Figure 2). La maturité technologique et commerciale des différentes innovations est évaluée, elle est globalement assez avancée pour une mise en œuvre avant 2030 : il s'agit plus de travailler à leur mise en œuvre que de porter leur développement très en amont.

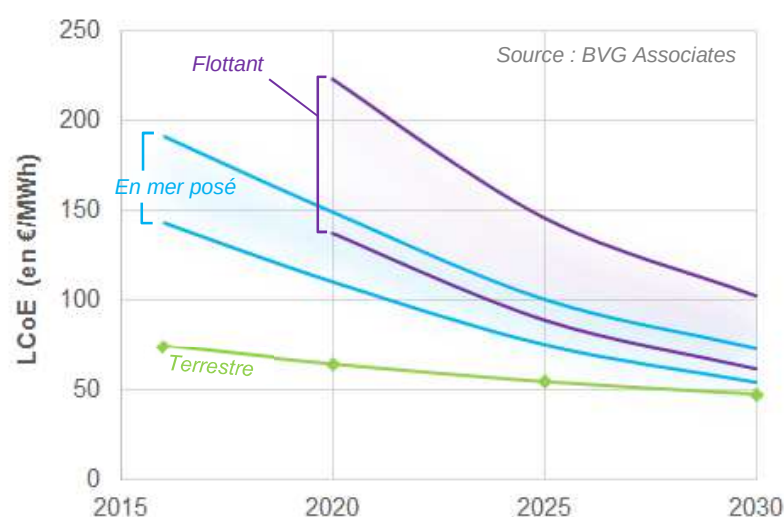


Figure 2 : Graphique de comparaison du coût actualisé de l'énergie par filière

Une analyse des acteurs innovants de la filière française permet d'identifier les innovations à soutenir en priorité pour aider au développement industriel de la filière, en tenant compte des spécificités françaises, à

Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières

savoir : une filière terrestre sans grand ensemblier français, mais des développeurs et fournisseurs dynamiques, de grands projets industriels pour l'éolien en mer posé et des technologies prometteuses bientôt en démonstration dans l'éolien flottant. Ainsi, l'accompagnement de l'écosystème innovant peut être réalisé via plusieurs leviers :

- le financement : soutien aux projets de démonstration (mécanismes de financement de l'innovation et partage des risques du développement de l'innovation) ;
- la coopération : partenariats de recherche collaborative sur les innovations, coopérations et transferts de technologie avec d'autres industries de pointe, tutorat de PME par de grandes entreprises de secteurs connexes, préparation des moyens d'essais, développement des synergies possibles entre filières, accès partagé à la propriété intellectuelle ;
- une organisation et une réglementation améliorées : anticipation du développement des zones en mer grâce à la planification spatiale maritime afin de réduire le temps et les risques entre l'appel d'offres et la réalisation effective des parcs en France; possibilité pour les fournisseurs de proposer des alternatives innovantes lors des appels d'offres ; réservation pour les projets innovants de quelques emplacements dans le développement des grands parcs en mer ; poursuite de l'amélioration de la réglementation en travaillant avec les acteurs de la profession ; stratégie claire en matière de normes ; et enfin signaux de visibilité à long terme envers les marchés.

En conclusion, les innovations sont non seulement un moyen de poursuivre la baisse des coûts mais aussi de positionner ou renforcer la filière française lors d'une phase qui apparaît déterminante pour son avenir.

Abstract

This study on wind power innovation aims at characterizing the technological and cost evolutions, and the related industrial opportunities. It looks across three types of wind power: onshore wind, bottom-fixed offshore wind and floating offshore wind. The study highlights sixty-four innovations that reduce cost of energy and evaluates their impact in 2020, 2025 and 2030, in a French context.

The first conclusion is that overall cost of energy reductions are significant in the case of onshore wind and even more so in offshore wind.

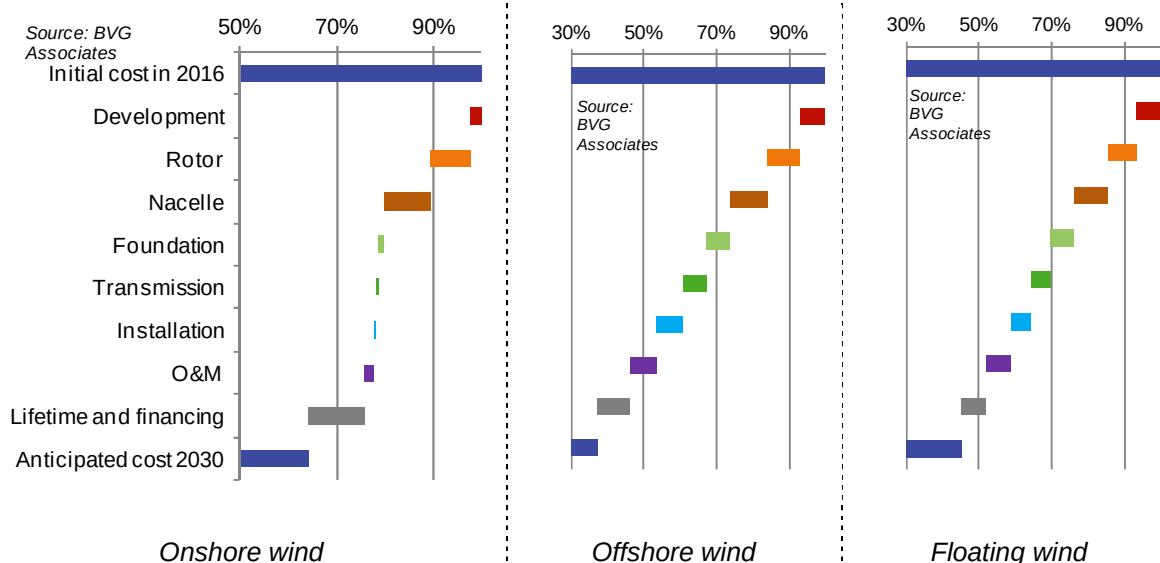
The most important impact comes from innovations facilitating the increase of turbine rating and rotor size. These will bring significant economies of scale, especially in offshore wind where the main limitations are technical (as opposed to human impact).

Other significant innovations include:

- during the project development phase: the multi-variable optimisation of array layouts and the improvements in resource characterisation and modelling;
- for the rotor: blade aerodynamics and aeroelasticity, optimization of the blade pitch control, improvement of blade materials and the progress of workshop verification testing;
- for the nacelle: the progress of the wind turbine controller design and direct-drive trains;
- for the foundations: the optimization of the design and manufacture of fixed foundations and the progress of the floating turbine foundations and moorings;
- for the electrical connection: the weight reduction of offshore substations, the progress of high voltage direct current (HVDC) transmissions;
- during the installation phase : reducing sensitivity to meteorological conditions and rough sea conditions and improving conditions for the transport of personnel to offshore wind turbines;
- during the operation and maintenance phase: the integration of wind farm wide control strategies on a wind farm scale, the development of conditional maintenance and the improvement of the maintenance strategy.

Finally, extending the lifetime of wind turbines is also major cost reduction factor: it results from a process of innovation in design that has a major impact.

Figure 3 : Potential cost reduction breakdown including the supply chain effect by innovation group for wind technologies by 2030



Under the hypothesis of technological innovations, lifetime extension and WACC (stable for onshore wind, decreasing to 7% and 7.5% for fixed offshore and floating offshore wind respectively), as well as uncertainty in the initial offshore CAPEX and OPEX, the study shows that the costs of the three sectors are approaching cost levels that can be competitive without a support mechanism by 2030.

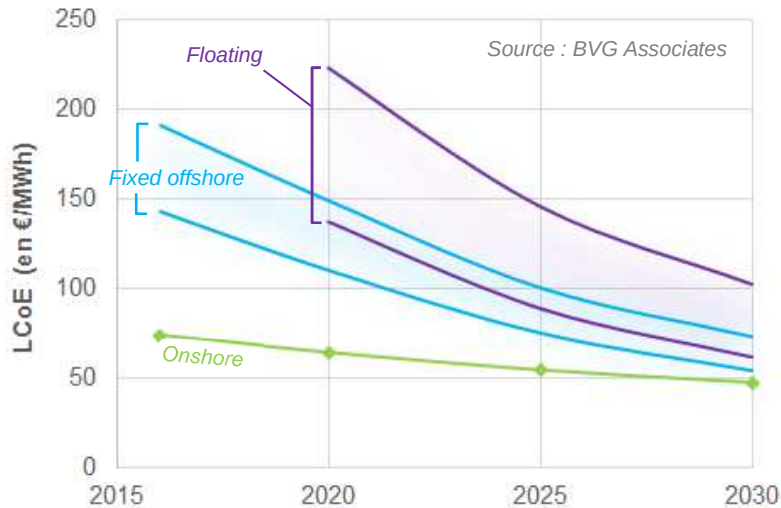


Figure 4 : Comparison of LCOE by technology

The study includes an analysis of the innovators in the French wind sector to prioritize the innovations, which support the industrial development of the sector. This analysis takes into account the special features of the French situation: a country without major wind turbine original equipment manufacturer (OEM), but with local developers and a dynamic supply chain, large industrial projects for offshore wind and some pre-commercial floating wind projects in development.

The industry will benefit from the competitive advantages given by these prioritised innovations if their development is successful, which may require support. This support includes financial and other types of actions by public authorities and private actors.

The key actions for development of industry in France are identified as:

- funding demonstration projects,
- promoting collaborative research partnerships in innovation, fostering cooperation and technology transfer with other technical industries, encouraging large companies to partner with SMEs, facilitating the preparation of test sites, encouraging shared access to intellectual property,
- improving the national organization: enabling suppliers to participate with innovative alternatives when tendering, facilitating the development of sea areas for new projects so that the latest technology can be implemented in France, dedicating specific areas to innovative projects in the development of large offshore wind farms, improving innovation financing mechanisms and risk sharing of innovation development by developing synergies between networks, improving regulation, defining a clear strategy for standards, finally giving long-term visibility to the industry.

Thus armed, the French wind sector could successfully shape itself for a strong future of reducing cost of energy and increasing value-added activity in France itself.

2. Introduction

2.1. Contexte

L'éolien est un secteur en considérable évolution technologique et industrielle. Les trois filières éoliennes sont à un moment charnière en France : l'éolien terrestre a atteint un seuil important de capacité installée (plus de 12 GW), il place la France dans les pays européens qui comptent et poursuit une croissance consolidée par un encadrement réglementaire stabilisé. En mer, la filière française d'éolien posé est à un stade de préparation de sa phase de déploiement industriel, tandis que la filière flottante, plus récente, prépare l'installation rapide de ses premiers prototypes et fermes pré-commerciales.

Dans le contexte de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), l'éolien consolide sa place significative dans le mix électrique français, et rend manifeste le besoin d'évaluer les opportunités et les risques pour le développement des filières industrielles, en fournissant des éléments précis sur lesquels étayer les stratégies pour le développement des acteurs et de l'emploi.

Et comment orienter le soutien à l'innovation dans les filières, améliorer la planification de l'industrialisation de l'éolien en France et structurer la coordination R&D, si l'on ne mesure pas les enjeux des différentes innovations, et leurs maturités techniques, économiques et commerciales ?

2.2. Périmètre

L'étude porte sur le grand éolien (turbines de puissance supérieure à 250 kW), sur terre, en mer posé ou flottant, en France métropolitaine et DOM-COM. Les innovations sont limitées aux champs techniques, technologiques, logistiques et industriels. Les innovations portant sur le financement, la gouvernance ou la réglementation, par exemple, sont en dehors du périmètre de l'étude.

Le contexte français est pris en compte pour le chiffrage des innovations, à travers des sites de référence représentatifs du contexte français. Les évaluations des coûts tiennent compte d'une industrialisation locale au démarrage, se rapprochant des conditions du marché européen par la suite.

2.3. Démarche

La présente étude brosse un panorama des innovations dans l'éolien, et évalue l'impact de ces innovations en termes de réduction de coût et de développement industriel de la filière française, en éolien terrestre, en mer posé et flottant.

Pour cela, plusieurs sources d'information ont été compilées :

- Les précédentes études de BVG Associates et d'INNOSEA sur le sujet
- Les diverses publications et informations dans le domaine de l'éolien
- Des entretiens auprès d'une dizaine de grands acteurs du secteur (listés dans le Tableau 14), dont les contributions ont été de grande qualité
- Un questionnaire auprès des acteurs d'une cinquantaine d'acteurs innovants de la filière française.

L'objectif est de fournir les bases pour cibler les priorités, autour d'une notion d'impact sur le coût de l'énergie, et pour que les acteurs publics aussi bien que privés puissent consolider leurs stratégies de développement économique et industriel.

Pour cela, l'étude présentera les innovations en cours dans la filière, et évaluera les réductions de coûts attendues. Les acteurs français innovants du secteur seront identifiés pour faire ressortir quelles innovations pourraient être les plus porteuses en termes de développement industriel. La démarche permettra ainsi de dégager des propositions de stratégies de soutien à l'innovation.

3. Méthodologie

3.1. Nomenclature des innovations

3.1.1. Identification et choix des innovations

Les innovations sont identifiées sur la base de l'état de l'art (annexe C.2) et des entretiens avec les acteurs de la filière (voir section 3.3). Elles sont réparties dans une liste de 64 innovations individuelles ou groupements d'innovation. Les 18 principales ayant le plus grand potentiel de réduction des coûts actualisés de l'énergie (LCOE) font l'objet d'un focus spécifique.

Les innovations sont regroupées en sept grands domaines d'innovation que sont :

- le développement
- le rotor
- la nacelle
- les fondations
- le raccordement électrique
- l'installation
- l'exploitation et la maintenance

Chaque domaine d'innovation est composé de 9 éléments en moyenne. Toutes les innovations seront décrites succinctement dans le tableau de revue (**Tableau 3 : Revue des innovations**). De plus, les innovations majeures de chaque domaine seront détaillées et analysées individuellement et le reste des innovations du groupe d'innovation sera analysé collectivement.

3.1.2. Technology Readiness Level (TRL) et Commercial Readiness Index (CRI)

L'indice de niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level* –TRL) est un outil d'analyse comparative globalement accepté pour suivre le progrès de développement d'une technologie spécifique lors des stades précoces de la chaîne d'innovation. Une fois qu'une technologie a dépassé le stade de démonstration, d'autres critères servent à établir la maturité commerciale de la technologie (tels que le *Commercial Readiness Index* – CRI, développée par l'ARENA (Australian Renewable Energy Agency) pour mesurer la maturité globale d'une technologie dans les énergies renouvelables).

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons l'échelle combinée de TRL et de CRI ; l'échelle détaillée est présentée sous forme de graphique en Figure 5.

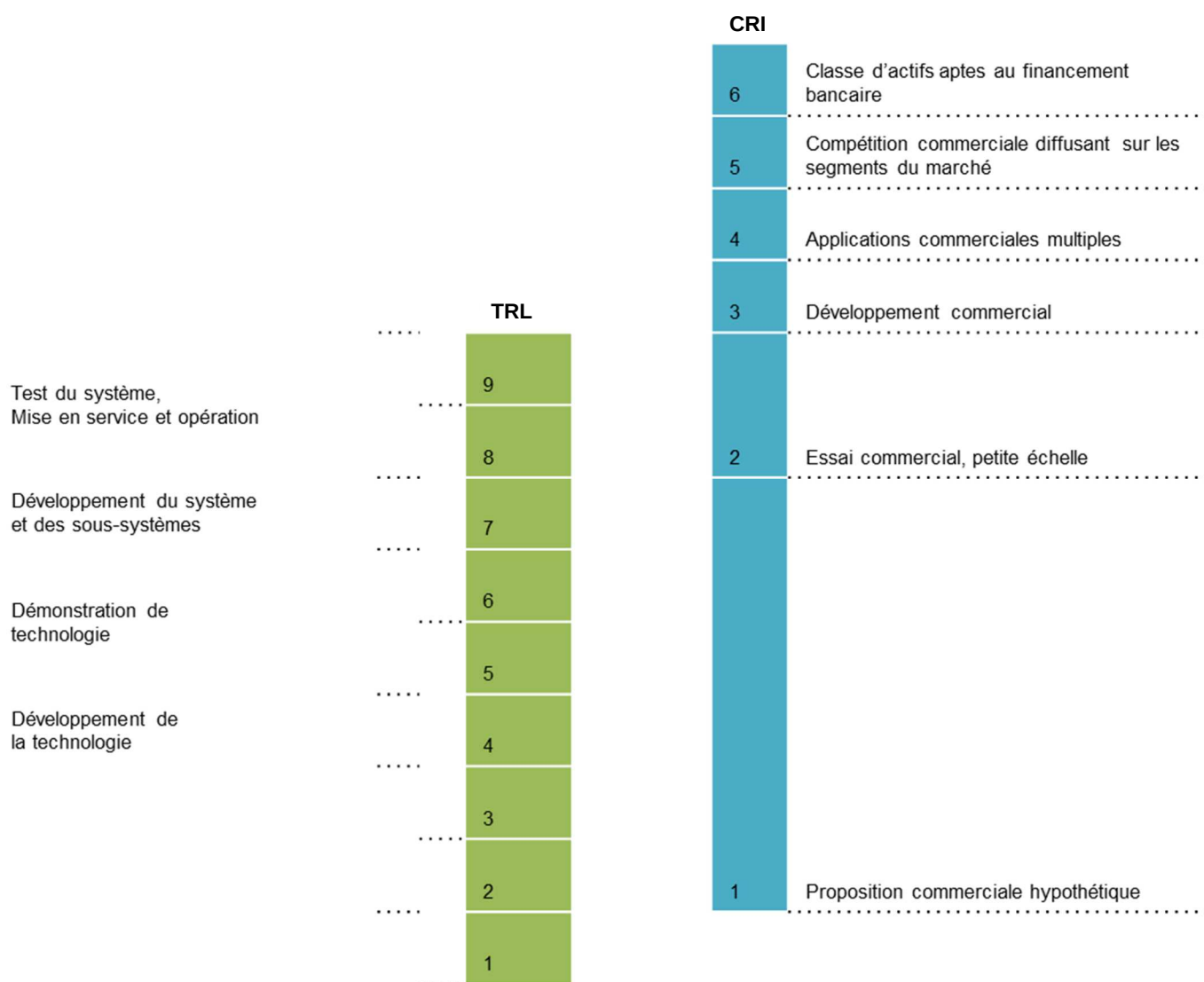


Figure 5 : Schéma synthétique de la méthodologie ARENA de TRL et CRI

3.2. Modélisation des innovations technologiques

Cette section décrit le processus conduisant à quantifier économiquement les effets des innovations technologiques. Le modèle évalue l'impact des innovations sur chacun des éléments de coût des projets (DEVEX, CAPEX, OPEX, DECEX et productible) et pour chacun des sites de référence. Il permet des comparaisons de coûts sur un périmètre constant, qui est celui d'un site donné. Les innovations technologiques améliorant la faisabilité (par exemple les pales furtives pour les contraintes radar) ou limitant les impacts (réduction des impacts acoustiques, etc.) peuvent conduire à une augmentation du coût de l'électricité par rapport à un site sans contrainte mais sortent du périmètre du modèle : elles sont donc uniquement traitées de manière qualitative dans cette étude et ne sont pas prises en compte dans les courbes d'évolution des coûts.

Par convention dans ce rapport : lorsqu'on caractérise l'impact d'une innovation sur les coûts (« LCOE », voir la définition en Annexe A), on parle de « réduction » ou d'« économie » et l'impact est quantifié en nombres positifs. Lorsque ces réductions sont représentées graphiquement ou dans des tableaux, les réductions sont

exprimées sous forme de nombres négatifs puisqu'elles sont associées à des tendances à la baisse. Une augmentation du productible brut entraîne une baisse du LCOE, de sorte qu'un nombre positif est utilisé pour montrer l'effet d'une innovation qui augmente le productible brut. Les variations sont exprimées de manière relative (pourcentage). Par exemple, si les pertes de production sont réduites de 10% à 9,5%, il y a une réduction de 5% des pertes de production.

Le processus de modélisation est représenté en Figure 6 : l'impact potentiel maximal (défini en section 3.2.1) est modulée en fonction de la maturité commerciale (section 3.2.2) puis de la part de marché estimée (section 3.2.3).

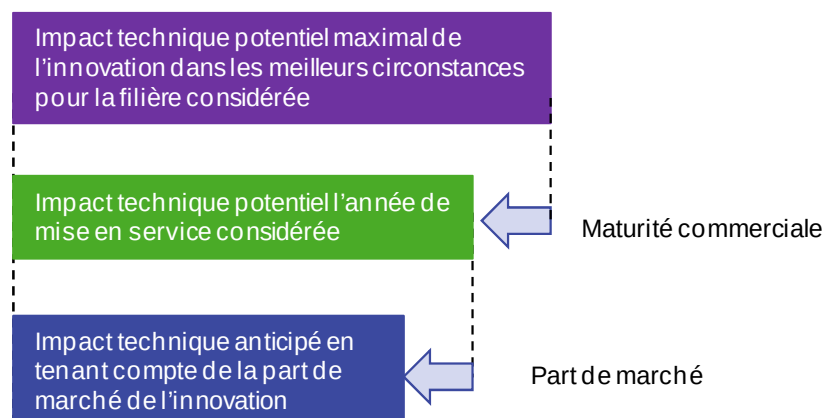


Figure 6 : Processus de modélisation en trois étapes, appliqué à l'impact technique maximal potentiel d'une innovation pour obtenir l'impact prévu sur le LCOE

Les données de base sont tirées de l'expérience de l'industrie, de la connaissance des coûts et des conditions particulières des sites français. Les estimations sont une combinaison : d'une part des ordres de coût établis dans les publications sur le LCOE et sur le bilan énergétique, et d'autre part du point de vue des experts de l'industrie, et ce pour chaque élément de coût. Les coûts sont des valeurs moyennes d'un projet type ; les variations de coût peuvent s'appliquer globalement à l'ensemble des parcs, même s'il existe une variabilité significative des coûts entre les projets, en raison de la chaîne d'approvisionnement et des effets de la technologie, y compris dans le portefeuille d'un développeur de parc éolien donné.

3.2.1. Impact technique potentiel maximal

Chaque innovation peut avoir une incidence sur un éventail de coûts différents (DEVEX, CAPEX, OPEX, et DECEX), et / ou sur le productible brut (calculé à partir de la courbe de puissance) et sur la production nette du parc éolien comme montré dans le **Tableau 1**. L'impact technique potentiel maximal est l'impact théorique maximal **attendu en 2030** par filière.

Tableau 1 Informations enregistrées pour chaque innovation

Impact (en %) sur le coût de :		Impact (%) sur :
• Développement de projet (DEVEX) • Rotor • Nacelle • Mât • Fondations • Raccordement électrique interne • Raccordement au réseau • Installation • Couverture du risque (contingence) • Démantèlement (DECEX)	}	CAPEX
• Exploitation et maintenance préventive • Maintenance corrective • Maintenance du raccordement • Autres coûts d'exploitation		
		• La production brute • Les pertes de production • La production nette

Dans certains cas, il est possible qu'une innovation donnée arrive sur le marché au-delà de 2030. Cela peut être dû à plusieurs raisons :

- une longue période de recherche et de développement est nécessaire pour une innovation qui ne sera pas entièrement prête à être utilisée sur un projet mis en service en 2030,
- le potentiel technique ne peut être atteint qu'à travers une évolution progressive du design grâce aux itérations lors de la fabrication du système et de son exploitation à l'échelle commerciale, ou
- l'impact technique potentiel d'une innovation est diminué par l'introduction ultérieure d'une autre innovation.

Toutefois, pour cette étude, sur l'ensemble des innovations le potentiel technique a été défini comme étant atteignable en 2030 (voir section 3.2.2. Maturité commerciale).

3.2.2. Maturité commerciale

La maturité commerciale est définie comme la part théorique du potentiel technique de l'innovation pouvant être disponible pour les projets mis en service à un horizon donné (2020, 2025, 2030). La maturité commerciale est croissante avec le temps. Pour cette étude, sur l'ensemble des innovations identifiées, la maturité commerciale en 2030 est fixée à 100% (hypothèse a posteriori réaliste, au regard des innovations identifiées).

3.2.3. Part de marché

La part de marché est définie comme la part du potentiel technique de l'innovation qui peut être commercialement atteinte pour l'innovation considérée. Tous les potentiels des innovations ne peuvent pas s'additionner. Par exemple, les innovations concernant les monopieux ou les jackets ne sont pas cumulables.

Pour les innovations qui ne sont pas cumulables avec d'autres, la part de marché doit être évaluée dans cette optique. Par exemple, une part de marché est attribuée à chacune des options de technologie de fondation, pour chaque horizon. Pour chaque innovation qui dépend d'une option de fondation particulière, sa part du marché dans cette option de fondation est combinée à la part de cette option du marché total pour donner une part de marché globale pour l'innovation.

Dans le rapport, l'impact d'une innovation est toujours pris en compte de façon distincte sur chaque élément de coûts opérationnels et sur la production énergétique, tel qu'indiqués dans l'annexe B. Par exemple, l'impact d'une optimisation de la production des monopieux ne fera pas varier les coûts sur la part du marché qui utilise des jackets.

3.2.4. Impact pour une seule innovation

Les répercussions de la maturité commerciale et de la part de marché sont ensuite appliquées aux coûts de base et aux paramètres indiqués dans le **Tableau 1** pour calculer l'impact de chaque innovation sur le LCOE pour chaque site de référence et pour l'horizon de maturité.

3.3. Entretiens et enquête

Des entretiens ont été réalisés pour valider la liste des innovations significatives et les potentiels de réduction de coûts auprès d'une dizaine d'interlocuteurs de grands acteurs de l'industrie éolienne présents en France. Pour cela, un document de préparation aux entretiens d'une vingtaine de pages, comprenant les résultats préliminaires de l'impact des innovations principales sur les coûts de l'électricité et les tendances de coût sur l'horizon de l'étude a été transmis pour recueillir les remarques de ces spécialistes et recevoir leur retour d'expérience sur ces résultats dans leurs domaines d'expertise.

La méthodologie utilisée lors de ces entretiens est décrite en annexe C.1.

Certaines citations notées lors de ces entretiens sont intégrées dans le rapport entre guillemets, elles permettent de restituer le côté vivant de ces échanges, très fructueux grâce à la qualité et à l'engagement des interlocuteurs.

Par ailleurs, un questionnaire a été réalisé auprès d'une cinquantaine d'acteurs innovants présents en France pour consolider la liste des innovations et recueillir des indications sur les impacts industriels.

3.4. Evaluation des « Effets sur l'écosystème industriel »

Les principaux acteurs de l'écosystème industriel français, ainsi que leur domaine d'activité, ont été identifiés dans l'étude « Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie »¹. On a pu ainsi déterminer quels acteurs pourraient mettre en œuvre les innovations identifiées pour conforter leurs domaines d'activités.

¹ ADEME, 2017. Disponible sur : <http://www.ademe.fr/etude-filiere-eolienne-francaise-bilan-prospective-strategie>

4. Evaluation initiale des coûts (LCOE) pour chaque site de référence

4.1. Les hypothèses principales

Les hypothèses prises en compte pour les sites de référence sont détaillées en Annexe A.3. Ces caractéristiques ne peuvent en aucune façon couvrir la variété de l'ensemble des projets, mais sont représentatives des caractéristiques moyennes des parcs attribués en France. Par exemple, pour l'éolien en mer, les conditions de sol et les profondeurs renchérissent les projets français par rapport aux conditions moyennes des sites européens.

Eolien terrestre

- La machine de référence correspond à une éolienne moyennement « toilée »² (la puissance spécifique est de 314 m²/kW, soit une surface spécifique de 3,2 m²/kW), installée sur un site dont le gisement correspond en moyenne à ce que l'on observe sur les projets actuels.
- Le coût LCOE calculé en 2016 correspond aux niveaux de coût donnés dans l'étude « Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie » par exemple pour les régions Hauts-de-France ou Centre-Val-de-Loire.

Eolien en mer posé

- Les machines et les parcs correspondent aux gabarits des premiers appels d'offres français pour l'éolien en mer.

Eolien en mer flottant

- Le coût pour l'éolien en mer flottant est simulé à partir de 2020.
- L'hypothèse de puissance nominale des machines est cohérente avec les projets actuels de fermes pilotes.
- L'hypothèse (théorique) de puissance installée des parcs éoliens flottants est choisie comme identiques à celle de fermes commerciales en éolien en mer posé, de manière à pouvoir aisément comparer les effets des innovations.

Tableau 2 : Tableau de comparaison des coûts de référence de l'énergie et du facteur de charge par filière, selon les hypothèses des 3 sites de référence

	Terrestre (2016)	En mer posé (2016)		Flottant (2020)	
		Hypothèse basse	Hypothèse haute	Hypothèse basse	Hypothèse haute
Coûts de référence (€/MWh)	73,5	143	191	137	222
Facteur de charge	27%	42%	39%	42%	39%
Coût moyen pondéré du capital	5,5%	10,0%		12,0%	

² Le toilage exprime le rapport entre la surface balayée par le rotor et la puissance nominale de la machine ; ce rapport est appelé surface spécifique. Le toilage est lié à la productivité de l'éolienne sur un site donné.

Le **Tableau 2** reprend les hypothèses de facteur de charge, de coût moyen pondéré du capital et donne les coûts complets de production pour les 3 filières. Pour l'éolien en mer, étant donné le manque de retour d'expérience en particulier sur les coûts d'installation, d'opération et sur les facteurs de charge, une hypothèse basse et une hypothèse haute ont été formulées, qui traduisent l'incertitude sur les coûts. Les incertitudes sont les plus importantes pour l'éolien flottant, filière la plus récente.

Pour l'éolien posé en mer, les prix de vente constatés sur les premiers appels d'offre français sont plus élevés que le coût du **Tableau 2** : ils reflètent en particulier les risques plus importants rencontrés par les porteurs de projets (risque sur la connaissance des sols et des gisements, risque lié à la lisibilité, la visibilité et la stabilité de la politique d'industrialisation de la filière en France, etc....).

4.2. Décomposition des coûts de production

Sont représentées ici les décompositions des coûts d'investissement selon les principaux postes de dépenses (développement, rotor et nacelle, mât et fondations, raccordement, installation, exploitation et maintenance, etc.) et par type d'investissement (DEVEX, CAPEX, OPEX, DECEX), conformément aux définitions de l'Annexe A (**Tableau 8**) pour un parc éolien de référence, mis en service en 2016 pour l'éolien terrestre et en 2020 pour l'éolien flottant.

Les décompositions de coût ci-dessous prennent en compte le coût de capital.

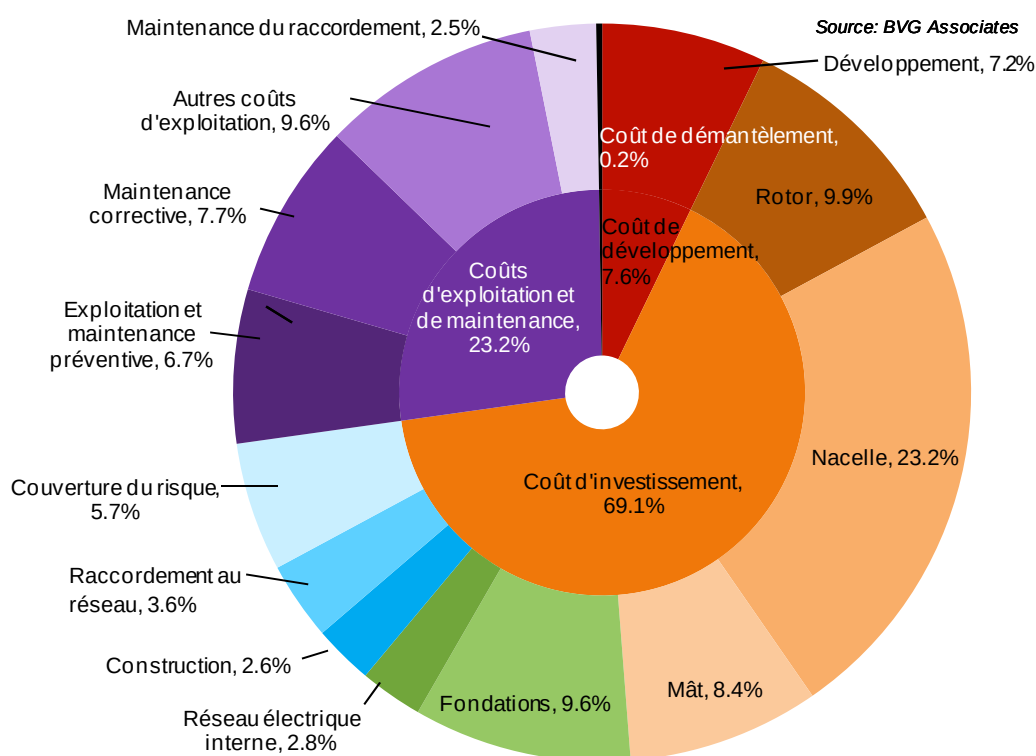


Figure 7 : Décomposition des coûts de production pour la filière de l'éolien terrestre

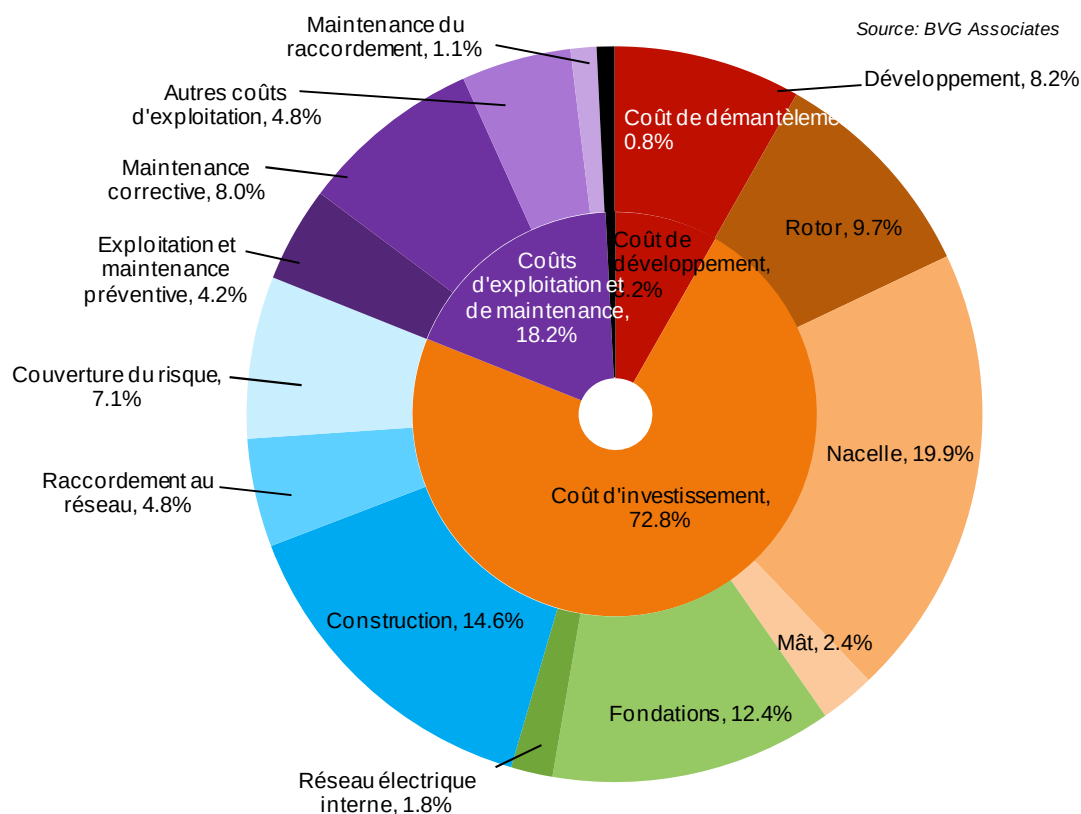


Figure 8 : Décomposition des coûts pour la filière de l'éolien en mer posé

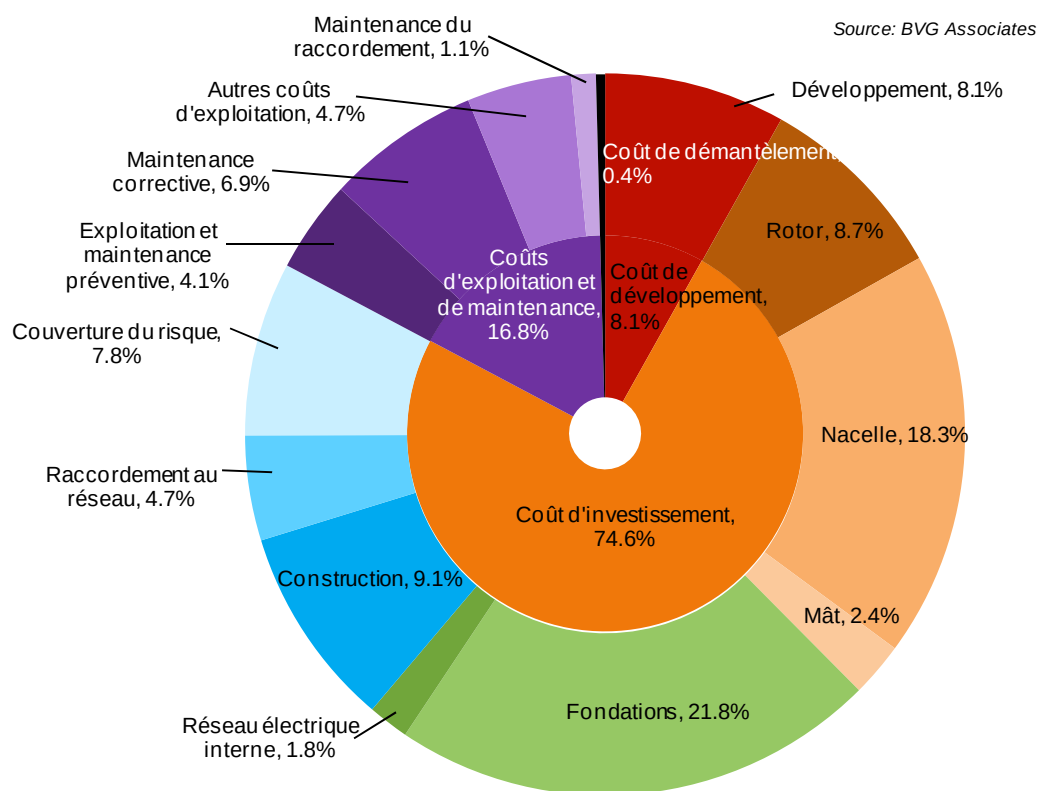


Figure 9 : Décomposition des coûts pour la filière de l'éolien flottant

Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières

5. Les innovations et leur effet de réduction sur les coûts de production de l'énergie

5.1. Revue des innovations

Le **Tableau 3** récapitule les 64 innovations analysées dans cette étude et détaille : le type d'innovation, innovation incrémentale (noté 0) ou de rupture (noté 1) ; l'applicabilité de l'innovation aux filières (terrestre, en mer posé ou flottant : 1 si elle est pertinente ; 0 sinon) ; l'applicabilité des innovations en *retrofit* (1 si applicable, 0 sinon). Les niveaux de TRL et de CRI (définis en **Figure 5**) sont définis selon l'état de l'art de 2016. L'horizon d'application de l'innovation à échelle commerciale correspond à la date anticipée à laquelle l'innovation rentre en application commerciale. Dans le cas des innovations incrémentales, l'horizon d'application de l'innovation à échelle commerciale correspond à la première application commerciale d'une première mise en œuvre (potentiellement partielle) de l'innovation. Enfin le rang correspond au rang de l'innovation par potentiel de réduction du coût LCOE en 2030 (en prenant le potentiel maximum dans les filières pertinentes).

Un nombre réduit d'innovations, dites **innovations principales**, recèlent la plus grosse part du potentiel de réduction de coût (voir Figure 10, graphique de gauche).

5.2. L'impact combiné des innovations principales

18 innovations principales ont été retenues : elles représentent la majorité de la baisse des coûts dans les différentes filières (voir Figure 10, tableau de droite).

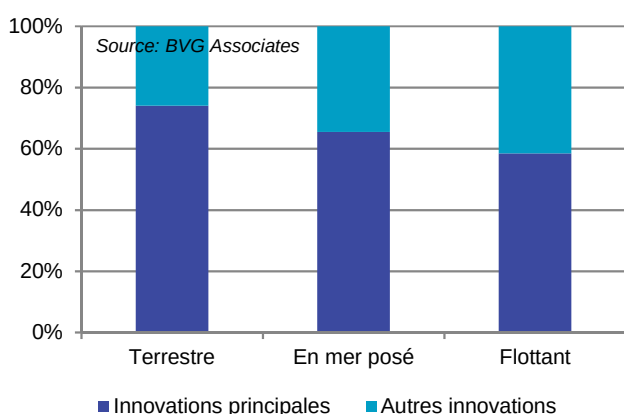


Figure 10 : Part de l'impact des innovations principales sur les coûts totaux (LCOE) par rapport aux autres innovations à horizon 2030

Les 18 innovations principales apparaissent en gras dans le **Tableau 3**.

Nous les décrivons ensuite plus précisément, les autres innovations étant décrites et comptabilisées de manière groupée par domaine d'innovations (section 4.2 à 4.7).

Tableau 3 : Revue des innovations

Les innovations principales sont libellées en gras.

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
1	Développement	Optimisation multicritère des implantations des parcs éoliens	0	1	1	1	0	9	2	2020	8
2	Développement	Amélioration de la caractérisation et de la modélisation des ressources, y compris l'amélioration de la modélisation des terrains complexes et des forêts pour les sites terrestres	0	1	0	0	0	9	2	2020	15
3	Développement	Utilisation croissante et amélioration des stations météorologiques flottantes	0	0	1	1	0	9	2	2025	38
4	Développement	Approfondissement des études géophysiques et géotechniques	0	1	1	1	0	9	3	2020	27
5	Développement	Optimisation pendant l'ingénierie détaillée d'avant-projet	0	1	1	1	0	8	2	2020	11
6	Développement	Réduction de la profondeur d'enfouissement des câbles	0	0	1	1	0	9	2	2025	43
7	Développement	Amélioration de la modélisation des conditions de la mer	0	0	1	1	0	7	1	2025	12
8	Rotor	Amélioration de l'aérodynamique et de l'aéroélasticité des pales	0	0	1	1	1	7	1	2025	2
9	Rotor	Amélioration de la précision de commande de l'orientation des pales	0	1	1	1	1	6	1	2020	3
10	Rotor	Amélioration apportées aux matériaux et à la fabrication des pales (y compris le potentiel d'augmentation de la taille des rotors en résultant)	0	1	1	1	1	7	1	2020	5
11	Rotor	Amélioration de la vitesse de pointe de pale	0	1	1	1	1	5	1	2025	30

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
12	Rotor	Amélioration des normes et processus de conception des pales	0	1	1	1	0	9	2	2020	13
13	Rotor	Mesure directe du vent incident	1	1	1	1	1	8	2	2025	32
14	Rotor	Contrôle aérodynamique actif sur les pales	1	1	1	1	1	5	1	2025	45
15	Rotor	Améliorations des composants (rotor et moyeu)	0	1	1	1	0	9	2	2020	20
16	Rotor	Nouveaux concepts de pale (y compris les pales furtives)	1	1	1	1	0	5	1	2025	57
17	Nacelle	Amélioration des tests de vérification en atelier	0	1	1	1	0	9	2	2020	10
18	Nacelle	Améliorations des composants de la nacelle (à l'exception du système de transmission)	0	1	1	1	0	9	2	2020	29
19	Nacelle	Outils avancés d'optimisation pour les éoliennes	0	1	1	1	0	9	2	2020	41
20	Nacelle	Nouvelles plateformes d'éolienne plus puissantes	1	1	1	1	0	7	1	2025	1
21	Nacelle	Optimisation du contrôle-commande des éoliennes	0	1	1	1	1	9	2	2020	14
22	Nacelle	Améliorations des boîtes de vitesses (à moyenne et à grande vitesse)	0	1	1	1	0	8	1	2020	18
23	Nacelle	Améliorations des systèmes de transmission à entraînement direct	0	1	1	1	0	8	1	2025	6
24	Nacelle	Nouveaux systèmes de transmission et génératrices	1	1	1	1	0	4	1	2025	46

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
25	Nacelle	Amélioration des convertisseurs et des transformateurs	0	1	1	1	0	9	2	2020	17
26	Nacelle	Système de distribution à courant continu (DC) (de l'éolienne au poste de raccordement offshore)	0	0	1	1	0	9	2	2025	33
27	Nacelle	Introduction de nouvelles configurations de turbines : turbines à axe vertical, turbines à deux pales, rotors multiples, éoliennes sous le vent, etc.	1	1	1	1	0	4	1	2030	54
28	Fondations	Amélioration de la fabrication des monopieux	0	0	1	0	0	9	2	2020	61
29	Fondations	Amélioration du flotteur et des amarres des éoliennes flottantes	1	0	0	1	0	6	1	2025	4
30	Fondations	Mâts treillis en acier	1	1	1	0	0	9	3	2025	56
31	Fondations	Amélioration de la conception des fondations et des normes de conception	0	0	1	0	0	9	2	2020	7
32	Fondations	Amélioration des câbles dynamiques	1	0	0	1	1	8	2	2025	40
33	Fondations	Nouveaux matériaux pour les amarrages	1	0	0	1	1	8	1	2025	36
34	Fondations	Design holistique de la structure	0	0	1	1	0	8	1	2020	22
35	Fondations	Nouveaux matériaux pour les tours	1	1	1	1	0	7	1	2025	52
36	Raccordement électrique	Développement de la transmission sur de longues distances	1	0	1	1	0	8	1	2020	61
37	Raccordement électrique	Réduction du poids des postes de transformation en mer	1	0	1	1	0	9	2	2020	37
38	Raccordement électrique	Améliorations des standards de câbles inter-éoliennes et des spécifications des clients	0	1	1	1	0	9	2	2020	44

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
39	Raccordement électrique	Haute tension en sortie des éoliennes jusqu'au poste en mer	0	1	1	1	0	7	1	2020	31
40	Raccordement électrique	Matériau alternatif au cuivre dans les câbles	1	1	1	1	1	5	1	2020	60
41	Raccordement électrique	Sous-stations flottantes / auto-installées	1	0	1	1	0	5	1	2025	50
42	Installation	Amélioration des techniques d'installation des fondations d'éoliennes en mer et amélioration de la flotte de navires spécialisés pour réduire la sensibilité aux aléas météorologiques	0	0	1	0	0	9	2	2020	19
43	Installation	Réduction de la sensibilité aux aléas météorologiques des techniques d'installation des éoliennes	0	1	1	1	0	9	2	2020	21
44	Installation	Amélioration du processus d'installation du monopieu (y compris les performances sonores)	0	0	1	0	0	9	2	2020	61
45	Installation	Fondations gravitaires en béton pouvant être déplacées par flottaison	1	0	1	0	0	9	2	2025	48
46	Installation	Installation par flottaison / remplissage de la turbine et de la fondation, réversible pour le démantèlement	1	0	1	0	0	7	1	2025	51
47	Installation	Amélioration de l'installation des câbles	0	0	1	1	0	9	2	2020	35
48	Installation	Utilisation de bateaux de transport des éléments d'éoliennes permettant de dédier les navires <i>jack-up</i> à l'installation des turbines	0	0	1	0	0	9	2	2020	49

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
49	Installation	Installation en un seul levage d'une turbine montée à terre, potentiellement avec une partie de sa fondation.	1	0	1	0	0	7	1	2025	59
50	Installation	Amélioration de la conception des véhicules de transport pour l'accès au site	0	1	0	0	0	8	1	2020	58
51	Installation	Amélioration de la planification de la construction	0	1	1	1	0	9	2	2020	28
52	Installation	Amélioration de l'installation des postes de transformation en mer	0	1	1	1	0	9	2	2025	47
53	Installation	Amélioration du processus de démantèlement de la turbine	1	1	1	1	0	7	1	2025	55
54	Exploitation Maintenance	Développement de la maintenance conditionnelle et de stratégies de maintenance holistique	0	1	1	1	1	9	3	2020	16
55	Exploitation Maintenance	Système de commande des éoliennes intégré à l'échelle du parc éolien	1	1	1	1	1	8	1	2020	25
56	Exploitation Maintenance	Amélioration des prévisions météorologiques	0	1	1	1	1	9	2	2020	42
57	Exploitation Maintenance	Amélioration de la gestion des stocks	0	1	1	1	1	9	2	2020	39
58	Exploitation Maintenance	Amélioration de la surveillance de l'état des fondations	0	0	1	1	1	8	1	2020	24
59	Exploitation Maintenance	Amélioration de la stratégie d'exploitation et de maintenance pour les parcs éoliens en haute mer	1	0	1	1	1	7	1	2025	61



#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Type d'innovation	Eolien terrestre	Eolien en mer posé	Eolien flottant	Retrofit	TRL	CRI	Application commerciale	Rang
60	Exploitation Maintenance	Amélioration du transfert de personnel de la base à l'emplacement de la turbine et du bateau de transfert à la turbine	0	0	1	1	1	9	2	2020	9
61	Exploitation Maintenance	Solutions d'exploitation et de maintenance à distance et automatisées	1	1	1	1	1	5	1	2025	53
62	Exploitation Maintenance	Optimisation des inspections et des réparations de pales	0	1	1	1	1	8	2	2020	23
63	Exploitation Maintenance	Améliorations de la connexion et de la déconnexion des structures flottantes	0	0	0	1	1	4	1	2025	34
64	Exploitation Maintenance	Facilité d'installation et de remplacement pour les structures flottantes	0	0	0	1	1	4	1	2025	26

5.3. Les innovations de développement

5.3.1. Les innovations principales

Innovation 1	Optimisation multicritère des implantations des parcs éoliens				
Pratique actuelle	Les premiers projets de développement éolien, en particulier en mer, n'ont pas utilisé d'outils d'optimisation multicritère en raison des conditions relativement simples et uniformes dans lesquelles les premiers parcs éoliens ont été déployés, du manque de références exactes de coûts, de données de modélisation énergétique et de définition des contraintes imposées.				
Innovation en détail	L'optimisation multicritère des implantations de parcs éoliens inclut l'utilisation de logiciels d'optimisation qui tiennent compte des contraintes techniques multiples. Les nouvelles configurations optimisent la combinaison des effets de sillage, le coût du réseau de câbles, le coût des structures de support et prennent en compte les contraintes d'autorisation, de construction et les coûts opérationnels. L'avantage de cette innovation est la réduction de coût LCOE par un meilleur choix d'éoliennes, de la conception des fondations, de l'emplacement des éoliennes et des câbles tout en considérant les contraintes de conception, en concevant des boucles itératives en quelques minutes alors qu'elles prennent des semaines aujourd'hui.				
Variantes technologiques de l'innovation	L'introduction de l'optimisation multicritère des configurations de parc comprend l'utilisation d'un logiciel d'optimisation rapide et fiable qui permet la prise en compte des contraintes requises par la diversité des disciplines techniques concernées.				
Type d'innovation	Innovation incrémentale				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Le développement de logiciels plus puissants.				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Les éoliennes, le type de fondations, le réseau interne de câbles.				
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 10\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 70\% \end{array} \right.$ </td> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 25\% \\ 2025 : 65\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$ </td> </tr> </table>	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 10\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 70\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 25\% \\ 2025 : 65\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 10\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 70\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 25\% \\ 2025 : 65\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$				

Innovation 2	Amélioration de la caractérisation et de la modélisation des ressources, y compris l'amélioration de la modélisation des terrains complexes et des forêts pour les sites terrestres
Pratique actuelle	La caractérisation des ressources éoliennes pour les projets en cours d'installation est souvent fondée sur des données provenant d'un mât de mesure de vent unique corrélées à une ou plusieurs sources de données de long terme (méthodes MCP : Mesure-Corrélation-Prédiction).
Innovation en détail	La qualité et le nombre de sources de données augmenteront, permettant une meilleure caractérisation de la variation de vitesses de vent sur un même site. La capacité de modélisation des effets de sillage augmentera aussi. Cela signifie que les parcs éoliens pourront être conçus avec une estimation plus précise de la ressource de vent et des effets inter-turbine, augmentant ainsi le productible. Cela est particulièrement pertinent pour les parcs éoliens terrestres développés sur des terrains à relief. L'objectif est de mieux comprendre les flux de vent afin d'optimiser la disposition du parc éolien et d'optimiser le choix de la hauteur du moyeu. La construction et la maintenance pourront aussi être optimisées avec la caractérisation améliorée des conditions de site.
Variantes technologiques de l'innovation	Cela couvre les techniques de mesure, notamment le LiDAR (en anglais : light detection and ranging), et la simulation des flux de vent, y compris les effets des collines, vallées, bâtiments et des arbres.
Type d'innovation	Innovation incrémentale
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Le développement de logiciels plus puissants, avec une modélisation plus fine des phénomènes aérodynamiques.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Les éoliennes, le type de fondations, le réseau interne de câbles.
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2.
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : Eolien terrestre : $\begin{cases} 2020 : & 25\% \\ 2025 : & 65\% \\ 2030 : & 95\% \end{cases}$

5.3.2. Les autres innovations de développement

Les autres innovations en termes de développement comprennent les nouvelles techniques de mesure de la ressource comme l'utilisation de stations météorologiques flottantes pour l'éolien en mer (innovation 3) et l'amélioration des études d'ingénierie préalables (innovation 4). Cela signifie que les parcs éoliens peuvent être conçus avec une plus grande précision. De plus, l'amélioration de la modélisation des conditions de mer, les optimisations au cours des études détaillées d'avant-projet (innovation 5) permettent d'améliorer la précision des

estimations de coûts de conception de parcs éoliens avec des variables telles que la profondeur de l'eau, les conditions du sol et la vitesse du vent, ce qui permet une meilleure prise de décision. La réduction des profondeurs d'enfouissement (innovation 6) permet une réduction des coûts.

5.3.3. Analyse de la réduction de coût LCOE anticipée à court terme, moyen terme et long terme

L'optimisation multicritère représente un tiers du gain prévu en éolien terrestre ; en mer d'autres innovations spécifiques au contexte marin apporteront des progrès supplémentaires.

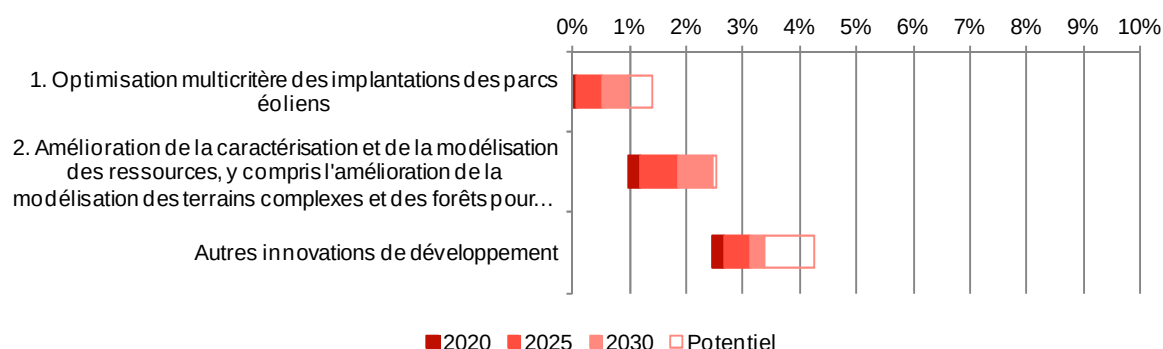


Figure 11: Impact potentiel et anticipé des innovations de développement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

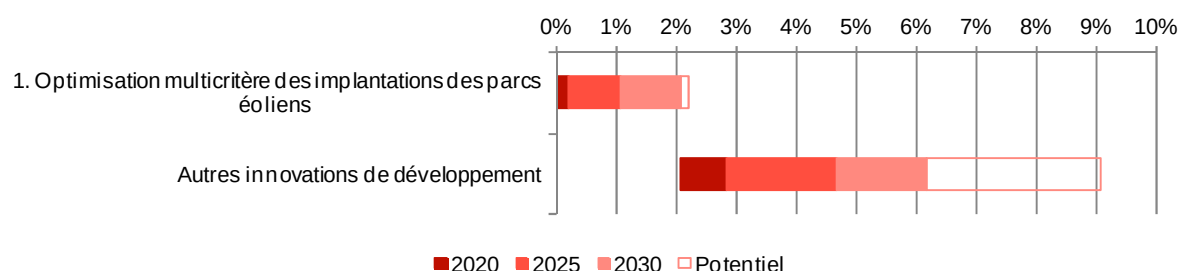


Figure 12: Impact potentiel et anticipé des innovations de développement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

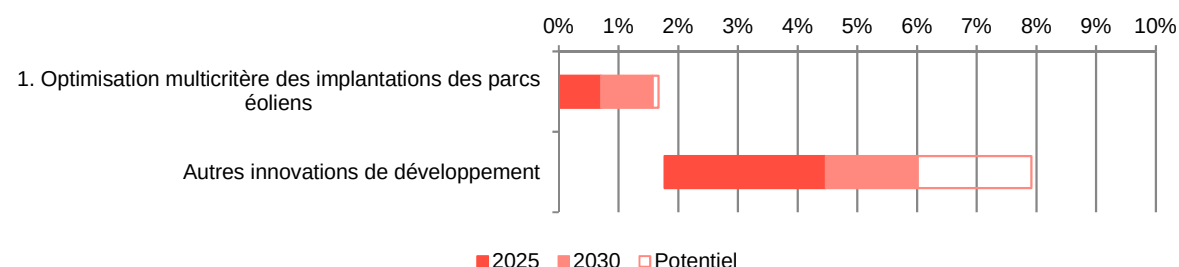


Figure 13: Impact potentiel et anticipé des innovations de développement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.4. Les innovations de rotor

5.4.1. Les innovations principales

Innovation 8	Amélioration de l'aérodynamique et de l'aéroélasticité des pales				
Pratique actuelle	Conception via modélisation informatique des fluides (CFD) puis prototype testé en soufflerie.				
Innovation en détail	Cette innovation couvre de nombreuses améliorations possibles allant des optimisations minutieuses de la conception des pales existantes à des changements radicaux comme des nouveaux concepts de profils aérodynamiques et l'amélioration de l'aérodynamisme passif. L'augmentation du productible est réalisée en contrepartie d'une légère augmentation des CAPEX reflétant des coûts additionnels dans la fabrication du rotor. Les OPEX augmentent aussi légèrement grâce au suivi renforcé des pales. La réduction des charges transmises lors des rafales à la structure permet l'optimisation des structures de l'éolienne résultant en une réduction des coûts.				
Variantes technologiques de l'innovation	L'optimisation de la forme de l'éolienne, dispositifs de réduction des trainées aérodynamiques et l'amélioration des matériaux.				
Type d'innovation	Innovation incrémentale.				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Amélioration de la compréhension des phénomènes physiques et de leur modélisation. L'innovation dépend des efforts continus des turbiniers pour baisser le coût de l'énergie et accroître le productible et l'investissement en recherche de développement dans la modélisation des phénomènes physiques.				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Les pales, le rotor, et indirectement le multiplicateur et l'ensemble de la structure de l'éolienne.				
TRL et CRI	TRL 7, CRI 1.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$ </td> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$ </td> </tr> </table>	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$				

Innovation 9	Optimisation de la commande de l'orientation des pales				
Pratique actuelle	La plupart des éoliennes utilisent le contrôle collectif de l'orientation des pales pour contrôler la vitesse du rotor et les charges, ainsi que les fonctionnalités du convertisseur pour contrôler la chaîne cinématique. Le contrôle individuel des pales est utilisé dans certains cas pour traiter les déséquilibres aérodynamiques entre les pales. Les turbiniéristes commencent à développer des algorithmes plus complexes pour équilibrer les effets de sillage et de turbulence pour améliorer la production d'énergie et réduire les sollicitations sur la structure de l'éolienne et la transmission. L'optimisation ultime sera obtenue avec une anticipation des variations du vent.				
Innovation en détail	Les améliorations continues dans les commandes de l'orientation des pales, tant dans des conditions stables, de turbulence ou affectées par les effets de sillage, ont le potentiel de réduire les charges sur l'ensemble de la chaîne mécanique (jusque 30 % sur l'ensemble de leur durée de vie), et d'augmenter le productible. En conséquence, on anticipe une augmentation d'OPEX liée à la sollicitation plus fréquente de la mécanique d'orientation des pales et à la fréquence accrue des cycles de maintenance en résultant, plus que contrebalancées par des économies sur la structure de l'éolienne (CAPEX et OPEX) et par une augmentation du productible en raison de la meilleure performance aérodynamique. Cette innovation n'inclut pas les stratégies de contrôle à l'échelle du parc éolien.				
Variantes technologiques de l'innovation	N/A				
Type d'innovation	Innovation incrémentale.				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	L'innovation dépend des efforts continus des turbiniéristes pour baisser le coût de l'énergie et accroître le productible et l'investissement en recherche de développement pour améliorer la réactivité des systèmes de commande.				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Système d'orientation et roulement des pales, contrôle-commande				
TRL et CRI	TRL 6, CRI 1.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$ </td> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$ </td> </tr> </table>	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 85\% \\ 2030 : 95\% \end{array} \right.$				

Innovation 10	Améliorations apportées aux matériaux et à la fabrication des pales (y compris le potentiel d'augmentation de la taille des rotors en résultant)				
Pratique actuelle	De gros progrès ont été réalisés jusqu'à présent dans la technologie des fibres de verre. Les turbines de très grandes tailles nécessitent l'utilisation de nouveaux matériaux, notamment la fibre de carbone.				
Innovation en détail	Beaucoup de nouveaux matériaux et procédés de fabrication sont en développement pour produire des pales plus rigides et plus légères tout en baissant le coût et en améliorant la qualité de la production. Cela inclut l'amélioration des performances concernant l'aérodynamisme ainsi que la résistance à la foudre et à l'usure. Ces innovations permettent la production de pales plus longues et plus légères, et donc d'augmenter la taille des rotors et le productible de l'éolienne. En particulier, ces innovations doivent aussi permettre d'améliorer la vitesse en bout de pale (« levier majeur pour la réduction de coût »), aujourd'hui limitée autour de 85 m/s pour éviter une usure prématurée du bord d'attaque (« barrière technologique ») et pour ne pas dépasser les seuils de bruit à terre. Le périmètre de cette innovation est la réduction de coût sur la base d'une plateforme d'éolienne identique. Les augmentations de taille de rotor développées dans le cadre de nouvelles plateformes d'éoliennes font partie du périmètre de l'innovation 20.				
Variantes technologiques de l'innovation	Automatisation de la production de tronçons de pales, permettant la maîtrise de la répétitivité du processus et une forte productivité. Cette technologie permet aussi de simplifier le transport des pales dont les tronçons peuvent être assemblés sur site.				
Type d'innovation	Innovation incrémentale.				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Obtention de raideurs suffisantes sur de grandes dimensions, maîtrise des processus de fabrication et de la mise en œuvre des matériaux nouveaux (nouvelles résines, fibres de carbone, etc.)				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Les pales.				
TRL et CRI	TRL 7, CRI 1.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$ </td> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$ </td> </tr> </table>	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 55\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$				

5.4.2. Les autres innovations concernant le rotor de l'éolienne

Les autres innovations touchant au rotor de l'éolienne concernent l'amélioration de la conception des pales (en dehors de l'aérodynamisme et de l'aéroélasticité), notamment avec l'amélioration des normes (innovation 12), l'accroissement de la vitesse de pointe de la pale, l'introduction de la mesure de vent incident en amont et du contrôle aérodynamique actif sur les pales (innovations 13 et 14), l'amélioration des composants du moyeu (innovation 15), un meilleur contrôle permettant un fonctionnement optimal du rotor (innovation 19), et de nouveaux concepts (innovations 16), dont des pales furtives à signature radar réduite (cette innovation permet de développer des parcs dans des espaces actuellement non compatibles, elle n'est pas intégrée dans le modèle d'évaluation des coûts). L'ensemble de ces innovations impactent directement le productible et/ou permettent la réduction du CAPEX de la turbine à l'exception de l'innovation 16.

5.4.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

Le rotor, qui transforme la puissance issue du vent en un mouvement rotatif apte à générer de l'électricité, est au cœur de la performance de l'éolienne. Trois innovations principales sur cette partie recèlent une partie importante du potentiel de réduction des coûts. Malgré un potentiel de réduction important pour le groupe des autres innovations du rotor, la part de marché est supposée limitée en raison de l'application limitée à certains marchés (terrestre ou en mer par exemple, à terre les contraintes de bruit et de coût sont plus prégnantes).

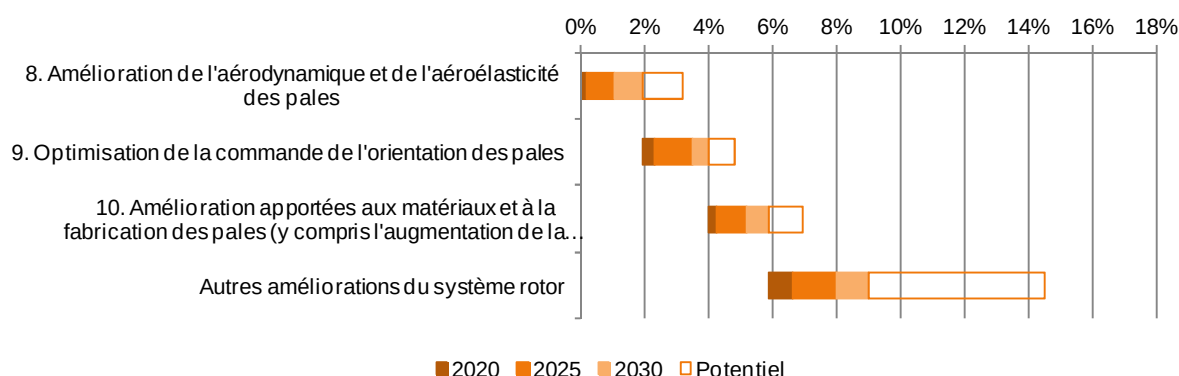


Figure 14 : Impact potentiel et anticipé des innovations de rotor sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

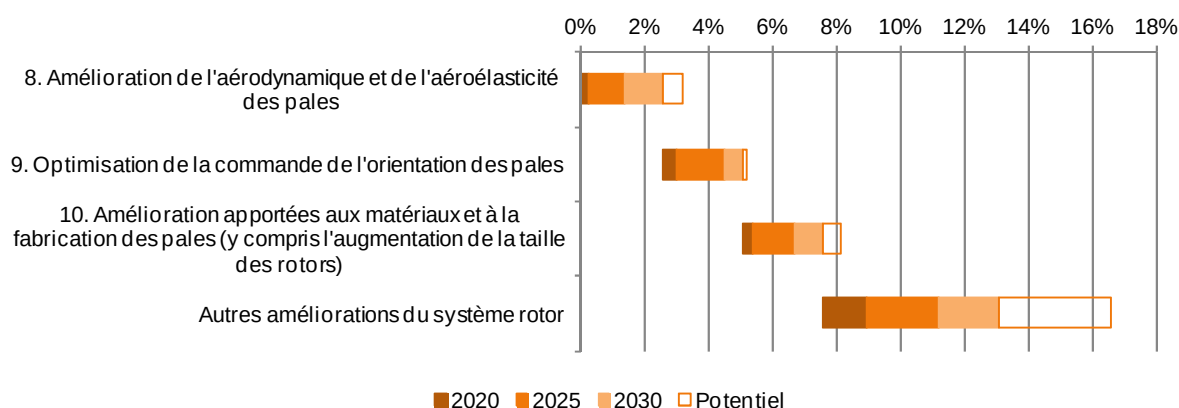


Figure 15 : Impact potentiel et anticipé des innovations de rotor sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

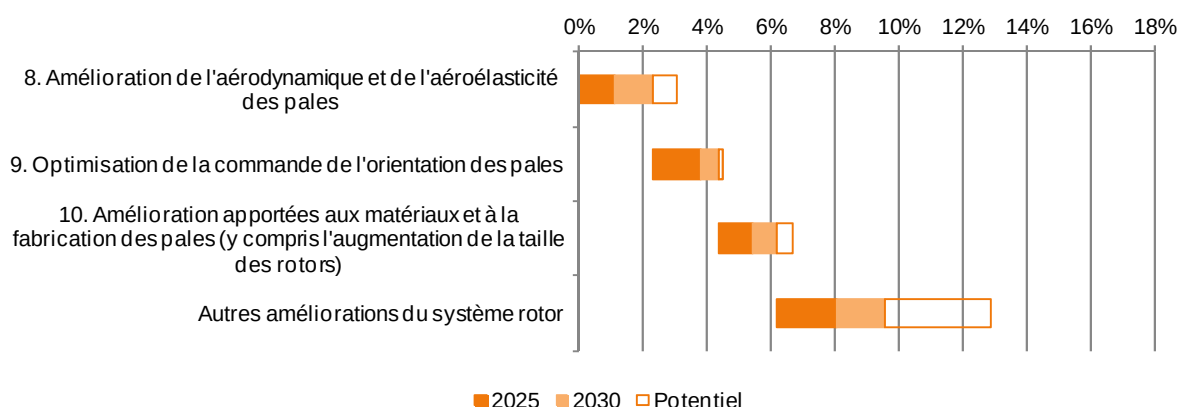


Figure 16 : Impact potentiel et anticipé des innovations de rotor sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.5. Les innovations concernant la nacelle de l'éolienne

5.5.1. Les innovations principales

Innovation 17	Amélioration des tests de vérification des nacelles en atelier
Pratique actuelle	Les essais de vérification des nacelles en atelier existent aujourd'hui mais ne sont pas assez représentatifs ni normalisés pour simuler des changements précis de régime. Des plateformes plus récentes, plus grandes et plus dynamiques sont en cours de mise en service, mais les normes n'existent pas encore.
Innovation en détail	Le développement des tests fonctionnels standardisés hautement accélérés de durée de vie (essais HALT – Highly Accelerated Life Testing) des composants et des systèmes, allant jusqu'aux tests complets du système de transmission sont vus par l'industrie comme un moyen d'améliorer la fiabilité, particulièrement quand ils sont combinés avec le contrôle à distance des éoliennes pendant la mise en service. Cela permet en effet moins d'arrêts machines et donc plus de productible, en particulier sur les premières années d'exploitation du parc éolien.
Variantes technologiques de l'innovation	Les tests peuvent porter sur l'amélioration des performances, la fiabilité, la durée de vie de la fatigue et le contrôle, et l'optimisation du système.
Type d'innovation	Innovation incrémentale.
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Mise en place de normes pour définir les procédures de test.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Toute la chaîne cinématique
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2

Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international :	
	Eolien terrestre : { 2020 : 14% 2025 : 40% 2030 : 60%	Eolien en mer : { 2020 : 20% 2025 : 60% 2030 : 80%

Innovation 20	Nouvelles plateformes d'éolienne plus puissantes
Pratique actuelle	La référence de départ, en cohérence avec le développement du marché français, sont des éoliennes de 6 MW pour l'éolien en mer posé et de 2 à 3 MW pour l'éolien terrestre.
Innovation en détail	Les nouvelles plateformes d'éoliennes ont une puissance nominale plus importante en MW, ce qui permet de diminuer le nombre de turbines pour une puissance totale de parc donnée. Par conséquent, le nombre de câbles, de fondations, le temps de construction et le nombre de visites de service et d'entretien nécessaires sont réduits. L'impact est plus faible à terre qu'en mer, où les coûts (et donc les gains) hors turbine sont relativement limités. Les défis portent notamment sur les pales de très grande longueur avec une rigidité qui doit être accrue, les intensités dans les génératrices, la durabilité des roulements principaux de grande capacité critiques pour l'entraînement direct et la fiabilité des multiplicateurs (hors cas de l'entraînement direct). Les hypothèses d'augmentation de puissance sur les sites de référence sont données en annexes, Tableau 9.
Variantes technologiques de l'innovation	Cette innovation couvre l'introduction de nouvelles plateformes plus puissantes allant jusqu'à 12,5 MW en éolien en mer et 4 MW en éolien terrestre.
Type d'innovation	Innovation de rupture
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Validation des pales de grandes dimensions et adaptation de la chaîne d'approvisionnement pour gérer l'accroissement de taille de l'ensemble des composants
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	L'ensemble de l'éolienne
TRL et CRI	TRL 5, CRI 1
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : Eolien terrestre : { 2020 : 50% 2025 : 80% 2030 : 85% } Eolien en mer : { 2020 : 50% 2025 : 80% 2030 : 85% }

	Le plafonnement des parts de marché reflète des contraintes inévitables (hauteur en bout de pale ou diamètre du rotor) sur certains sites, qui s'orienteront vers des puissances moins élevées que l'état de l'art. <u>En France :</u> Eolien terrestre : $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 50\% \\ 2025 : 70\% \\ 2030 : 75\% \end{array} \right.$	A contrario de l'éolien terrestre, une faible taille des éoliennes paraît à terme éliminatoire pour les projets de parcs en mer. Eolien en mer : $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 0\% \\ 2025 : 80\% \\ 2030 : 100\% \end{array} \right.$
--	---	---

Innovation 21	Optimisation du contrôle-commande des éoliennes
Pratique actuelle	Le fonctionnement des éoliennes suit des règles de commande qui peuvent être optimisées.
Innovation en détail	La mise en œuvre de stratégies de coupure et de redémarrage plus progressives lorsque le vent approche la limite supérieure de fonctionnement de l'éolienne, fondée sur des algorithmes capables de mieux gérer les variations de vent et les charges prévisionnelles, permet d'augmenter le productible tout en préservant mieux l'éolienne, augmentant ainsi sa durée de vie. Une commande optimisée de l'orientation de la nacelle gère un compromis entre la correction de faibles écarts d'orientation et l'usure des moteurs, en fonction du gain de production possible. Le contrôle du convertisseur de puissance sera amélioré pour mieux contrôler la vitesse et les charges de la transmission et réduire la fatigue et les pointes de charge. Il permet aussi de fournir de l'inertie synthétique (fourniture de service au réseau par l'éolienne, qui génère une puissance réactive permettant de stabiliser le réseau électrique). Cette innovation ne comprend ni l'optimisation des stratégies de commande des pales (innovation 9) ni l'optimisation au niveau du parc (innovation 55) pour minimiser les effets de sillage.
Variantes technologiques de l'innovation	Application séparée de différentes modalités d'optimisation
Type d'innovation	Innovation incrémentale
Pertinence par filière	Eolien terrestre, en mer fixe et flottant
Conditions de réalisation de l'innovation	
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Contrôleurs des éoliennes, SCADA

TRL et CRI	TRL 9, CRI 2	
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 4% 2025 : 25% 2030 : 40%	En France : { 2020 : 4% 2025 : 25% 2030 : 40%

Innovation 23	Amélioration des technologies d'entraînement direct	
Pratique actuelle	GE et Siemens ont adopté des technologies d'entraînement direct (sans boîte de vitesses) pour leurs éoliennes en mer, qui sont maintenant en développement commercial. Cette conception est également proposée sur les éoliennes terrestres de 4 MW.	
Innovation en détail	La suppression de la boîte de vitesses réduit les risques de défaillance grave, même si certains pensent que la complexité accrue de la génératrice multi-pôles annule cet avantage. On anticipe un léger surcoût en CAPEX compensé par une réduction des pertes de production et des coûts non planifiés de maintenance, qui sont particulièrement élevés en mer. Les améliorations à venir résident dans : - la réduction des quantités de terres rares utilisées dans les aimants permanents - la réduction des opérations de maintenance nécessitant le transport de la nacelle au port au profit d'une maintenance « en haut de mât » - la réduction du coût et amélioration de la fiabilité des grands roulements	
Variantes technologiques de l'innovation	Application séparée de différentes modalités d'optimisation	
Type d'innovation	Amélioration incrémentale	
Pertinence par filière	Eolien terrestre, en mer fixe et flottant	
Conditions de réalisation de l'innovation		
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Génératrice de l'éolienne	
TRL et CRI	TRL 8, CRI 1	
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 40% 2025 : 38% 2030 : 35%	En France : { 2020 : 65% 2025 : 65% 2030 : 65%

5.5.2. Les autres innovations concernant la nacelle de l'éolienne

Les autres innovations touchant à la nacelle de l'éolienne concernent principalement l'amélioration et le développement de nouveaux systèmes de commande, de transmission et de production d'électricité (innovations 21 à 24). Ces innovations permettent de réduire la masse relative de la boîte de vitesses et du générateur ce qui conduit à une réduction du CAPEX relativement aux autres composants de la turbine. Les améliorations sur le convertisseur réduisent la taille et le nombre des composants de 20 à 30%, ce qui entraîne également des économies de CAPEX. L'optimisation des stratégies de commande permet de mieux tirer profit des phases de coupure et de redémarrage avec une courbe de puissance plus progressive tout en réduisant les charges en cas de rafales, d'optimiser l'orientation du rotor en évitant l'usure des mécanismes d'orientation, d'optimiser le contrôle du convertisseur de puissance (innovation 25) le contrôle de la vitesse et d'apporter de l'inertie synthétique (qui permet de d'apporter une puissance réactive au réseau en cas de problème). A plus long terme, les innovations plus fortes concernent en particulier la chaîne électromécanique (innovation 24) :

- les transmissions à variation continue de la vitesse : elles permettent un meilleur réglage couple-vitesse pour attaquer la génératrice. L'hypothèse modélisée est une entrée sur le marché de cette innovation en 2025 ;
- les génératrices à supraconducteurs sont une innovation de rupture plus radicale, impliquant une augmentation des investissements mais un productible plus important. Nous supposons que cette innovation n'entrera pas sur le marché avant 2030.

Enfin, des configurations alternatives d'éoliennes par rapport aux standards actuels de l'industrie (turbines à axe vertical, turbines à deux pales, rotors multiples et éoliennes sous le vent) pourraient trouver des secteurs d'application (innovation 27).

5.5.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

Globalement la nacelle représente le plus gros potentiel de réduction de coût, avec notamment les nouvelles plateformes plus puissantes (innovation 20) qui permettent de réaliser des économies d'échelle importantes lorsque l'accroissement de la taille des pales n'est plus possible dans le cadre des plateformes existantes (périmètre de l'innovation 10)

En éolien terrestre, on considère une pertinence à la filière de 75% des innovations de nacelles due à la taille plus réduite des éoliennes et au caractère plus disparate du marché. L'introduction de nouvelles plateformes plus puissantes est considérée pertinente seulement à 50% en raison des contraintes locales en termes de gabarit d'éolienne.

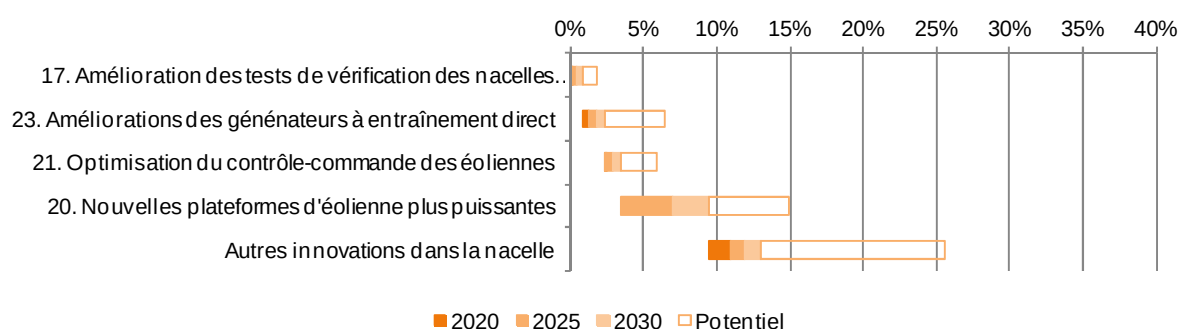


Figure 17 : Impact potentiel et anticipé des innovations de nacelle sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

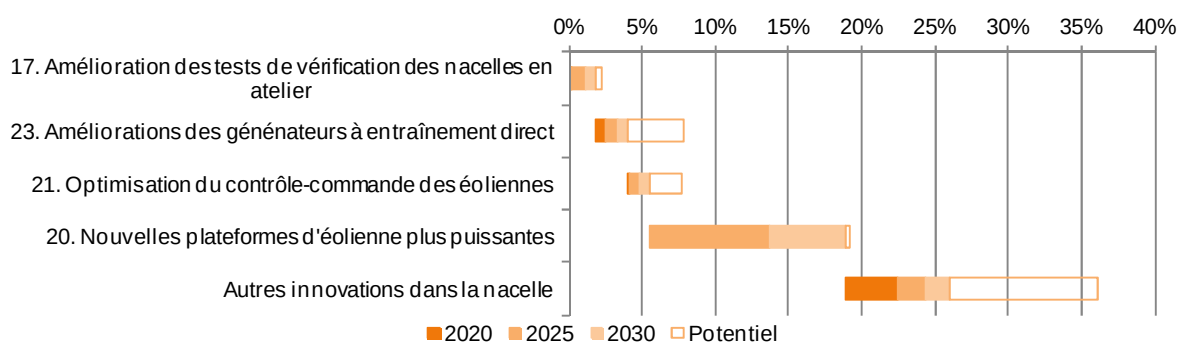


Figure 18 : Impact potentiel et anticipé des innovations de nacelle sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

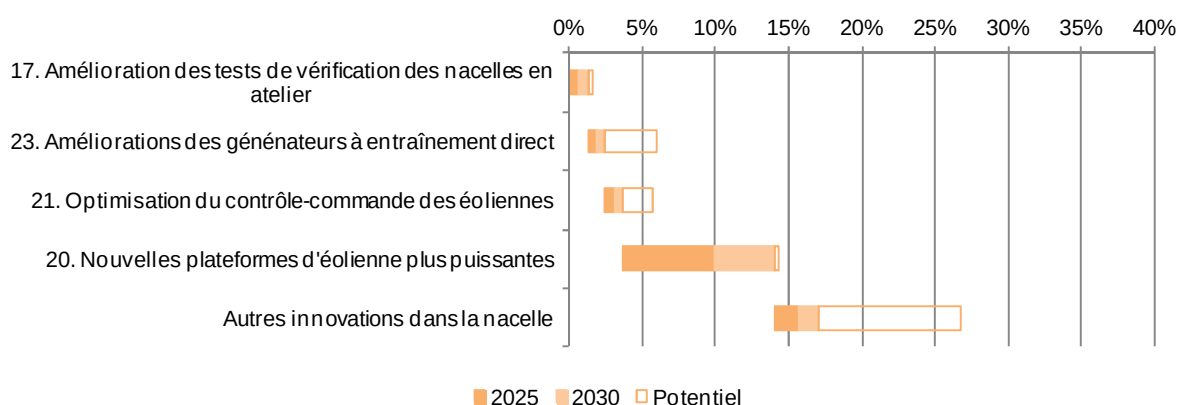


Figure 19 : Impact potentiel et anticipé des innovations de nacelle sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.6. Les innovations concernant les fondations

5.6.1. Les innovations principales

Innovation 29	Amélioration du flotteur et des amarres des éoliennes flottantes
Pratique actuelle	Actuellement, les technologies sont essentiellement issues de l'expérience de l'offshore pétrolier : plateformes semi-submersibles, espar, plateforme à ancrage sous tension.
Innovation en détail	L'éolien flottant représente un marché en émergence (premier démonstrateur en 2009). La réalisation de prototypes et l'expérience tirée de leur installation en mer doit permettre de mieux évaluer les contraintes extrêmes (notamment la prise en compte des efforts non-linéaires dus aux vagues), la modélisation de la fatigue, la modélisation fine des configurations des amarres, et l'influence du biofouling et de la corrosion. On pourra ainsi réduire les marges de sécurité pour réduire les coûts, et aussi améliorer la fabrication de ces équipements en tirant parti des volumes de production.

Variantes technologiques de l'innovation	La partie mobile du câble de raccordement électrique doit aussi faire l'objet d'une optimisation. Les connecteurs électriques assurent une fonction essentielle et devront être facilement mis en œuvre pour la connexion et la déconnexion.
Type d'innovation	Ensemble d'innovations incrémentales.
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien flottant.
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Tests en bassin puis expérimentation en conditions réelles sur des prototypes.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Amarres, systèmes d'ancrage au sol, systèmes d'amarrage sur la plateforme.
TRL et CRI	TRL 6, CRI 1, Horizon 2025.
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 70% 2025 : 80% 2030 : 100% En France : { 2020 : 70% 2025 : 80% 2030 : 100%

Innovation 31	Amélioration de la conception des fondations et des normes de conception
Pratique actuelle	Les méthodes de dimensionnement sont issues de données empiriques de l'industrie offshore, avec une adaptation aux contraintes de l'éolien en mer. Les normes et législations nationales variées ont tendance à être spécifiées dans les cahiers des charges.
Innovation en détail	L'interaction des fondations et du sous-sol dans le contexte de l'éolien en mer doit être mieux comprise et caractérisée pour optimiser le dimensionnement de la fondation, notamment dans le cas de chargements cycliques comme dans l'éolien en mer. L'intégration de la pièce de transition dans le monopieu et la liaison entre la fondation et le mât de l'éolienne représentent également des potentiels importants d'économie. L'objectif pourrait être atteint via l'écriture et la mise en place d'une norme ISO spécifique aux fondations pour l'éolien en mer, optimisée par rapport aux contraintes d'efforts et de fatigue constatés sur les parcs existants.
Variantes technologiques de l'innovation	Monopieu avec ou sans pièce de transition, jacket
Type d'innovation	Innovation incrémentale, avec possibilité de rupture sur la suppression de la pièce de transition
Pertinence par filière	Eolien en mer posé
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Amélioration des connaissances concernant l'interaction entre les fondations et le sol, de la caractérisation des efforts dimensionnants et de la fatigue. Uniformisation

	des réglementations nationales de construction d'éoliennes en mer autour d'une norme internationale. Validation de conceptions alternatives.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Monopieu, pièce de transition, jacket, fixation mât
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 120% 2025 : 45% 2030 : 70% En France : { 2020 : 20% 2025 : 45% 2030 : 70%

Innovation 34	Conception holistique de la structure
Pratique actuelle	Le mât est généralement un élément standard de la turbine, dont la conception fait l'objet d'une certification sur la base d'un cahier des charges général, tandis que la fondation fait l'objet d'une conception individualisée dépendant des conditions locales, notamment la profondeur d'eau et la nature du sous-sol.
Innovation en détail	L'innovation consiste à concevoir dans son ensemble la structure de l'éolienne : fondation et mât, en interaction avec le sous-sol, la mer et le vent, notamment à travers le rotor. On peut ainsi optimiser globalement la structure de chaque éolienne en fonction des contraintes de son environnement et de ses modes propres, notamment avec une stratégie optimale de contrôle-commande du rotor sur-mesure définie de manière à lui permettre un amortissement optimal des efforts.
Variantes technologiques de l'innovation	Pour l'éolien en mer où l'on n'est pas contraint par des gabarits routiers, la réduction du nombre de sections de mât (potentiellement jusqu'à un mât d'un seul tenant) est également un axe de progrès dans l'optimisation du poids et du coût de la structure.
Type d'innovation	Innovation incrémentale
Pertinence par filière	Eolien terrestre, en mer posé et flottant
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Révision du processus de certification, collaboration des équipes de conception de la structure et de contrôle-commande de la turbine.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Mât, fondation

TRL et CRI	TRL 8, CRI 1	
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 30% { 2025 : 40% { 2030 : 55%	En France : { 2020 : 30% { 2025 : 40% { 2030 : 55%

5.6.2. Les autres innovations de fondations

Un ensemble d'améliorations est possible sur la conception des fondations pour l'éolien en mer : optimisation des monopieux et jackets, conception intégrée de l'ensemble fondation et mât permettant l'optimisation des dimensionnements et la réduction du nombre de sections de mât (innovations 31 et 33), amélioration des câbles dynamiques (innovation 32) et introduction de nouveaux matériaux pour les amarres en éolien flottant, introduction de nouveaux matériaux pour les mâts (innovation 35) et introduction de tour treillis en acier (innovation 30)

5.6.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

Dans le domaine des fondations, le potentiel de réduction de coût est réduit en terrestre, mais d'autant plus important en mer que les technologies sont moins matures.

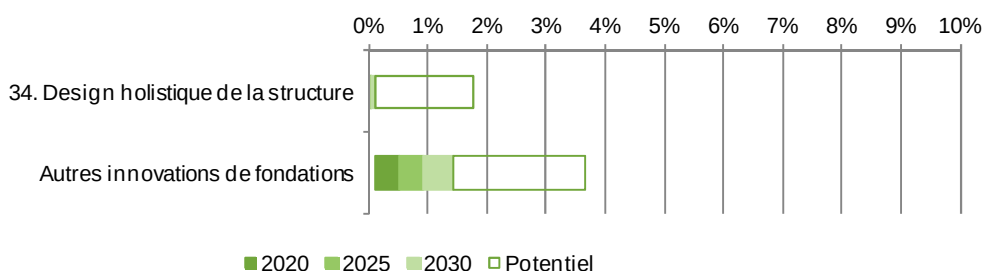


Figure 20 : Impact potentiel et anticipé des innovations de fondation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

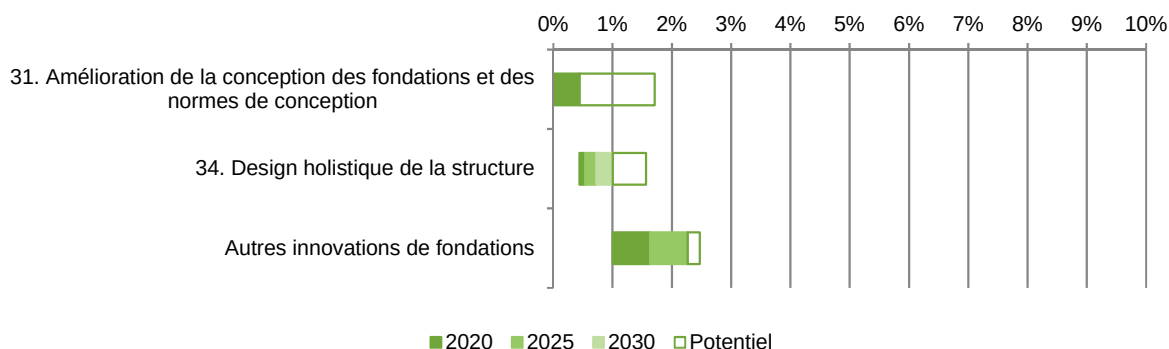


Figure 21 : Impact potentiel et anticipé des innovations de fondation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

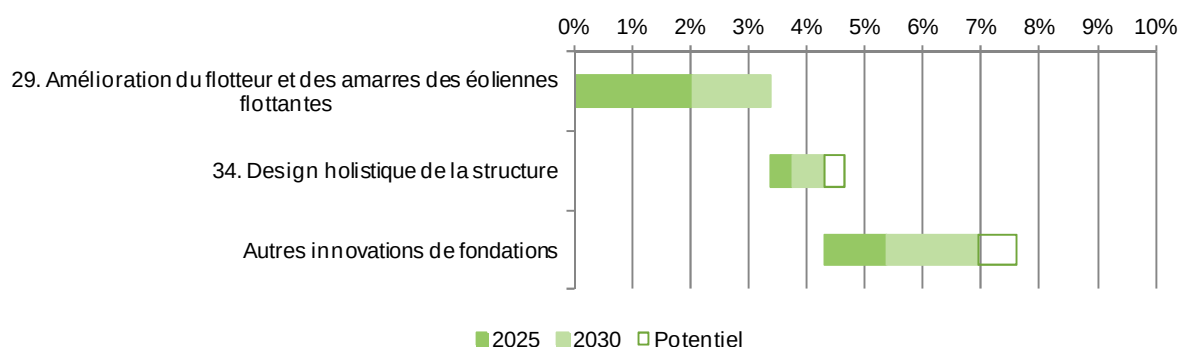


Figure 22 : Impact potentiel et anticipé des innovations de fondation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.7. Les innovations concernant le raccordement électrique

5.7.1. Les innovations principales

Innovation 36	Développement de la transmission en courant continu sur de longues distances
Pratique actuelle	Le transport de l'électricité produite est actuellement en courant alternatif. Pour de grandes distances, typiquement au-delà de 100 km, la transmission en courant alternatif induit un fort niveau de pertes.
Innovation en détail	Le transport de l'électricité en courant continu concerne des liaisons point-à-point (du poste de raccordement en mer au transformateur à terre) ou à plus long terme en réseau. Il existe un potentiel important de réduction de la masse et du coût de cette technologie (très élevés par rapport au courant alternatif). Il faut aussi être en mesure d'en maîtriser la fiabilité. et d'atteindre 98% de disponibilité, alors que diverses lignes HVDC historiques ont pu connaître des niveaux parfois bien inférieurs.
Variantes technologiques de l'innovation	N/A
Type d'innovation	Innovation de rupture.
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien en mer posé et flottant.
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Maîtrise de la technologie dans des conditions de fiabilité adaptées à l'environnement en mer. Amortissement des investissements réseaux
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Poste de raccordement, câbles, commutateurs.
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2, Horizon 2020.

Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international :	En France :
	{ 2020 : 20% { 2025 : 20% { 2030 : 20%	{ 2020 : 0% { 2025 : 0% { 2030 : 10%

Innovation 37	Réduction du poids des postes de transformation en mer
Pratique actuelle	Les postes de transformation en mer sont très lourds et leur installation implique des fondations et moyens de levage dédiés différents de ceux des éoliennes.
Innovation en détail	Cette innovation vise à réduire le poids du poste de transformation en mer, ce qui permettra d'utiliser une fondation standard d'éolienne et les moyens d'installation utilisés pour les éoliennes sans recourir en complément à des barges spécifiques de plus forte capacité de levage. Un design plus léger et plus compact est recherché pour atteindre moins de 1200 tonnes, les équipements de transformation haute tension pourraient éventuellement être installés « en balcon » sur une fondation accueillant aussi une éolienne (mutualisation de la fondation).
Variantes technologiques de l'innovation	Optimisation de la masse des sous-stations de technologie actuelle, ou suppression de toutes les pièces en mouvement et systèmes auxiliaires.
Type d'innovation	Innovation incrémentale ou de rupture selon la variante technologique.
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien en mer posé et flottant.
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Maîtrise de la maintenabilité sur le long terme.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Poste de transformation en mer, fondations des éoliennes.
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2, Horizon 2020.
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 5% { 2025 : 30% { 2030 : 90% En France : { 2020 : 5% { 2025 : 30% { 2030 : 90%

5.7.2. Les autres innovations concernant le raccordement électrique

Diverses sources de progrès sont identifiées : l'amélioration des standards de câbles (innovation 38), le développement de nouveaux matériaux (innovation 40), l'introduction de la tension de 66 kV pour les câbles inter-éoliennes (innovation 39) et le développement des postes de transformation flottants auto-installés (innovation 41).

5.7.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

Ici comme pour les fondations, le potentiel de réduction est plus important pour les parcs en mer où les coûts sont aussi plus importants.

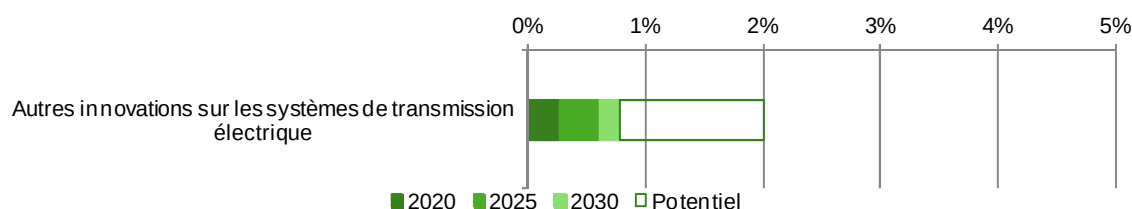


Figure 23 : Impact potentiel et anticipé des innovations de raccordement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

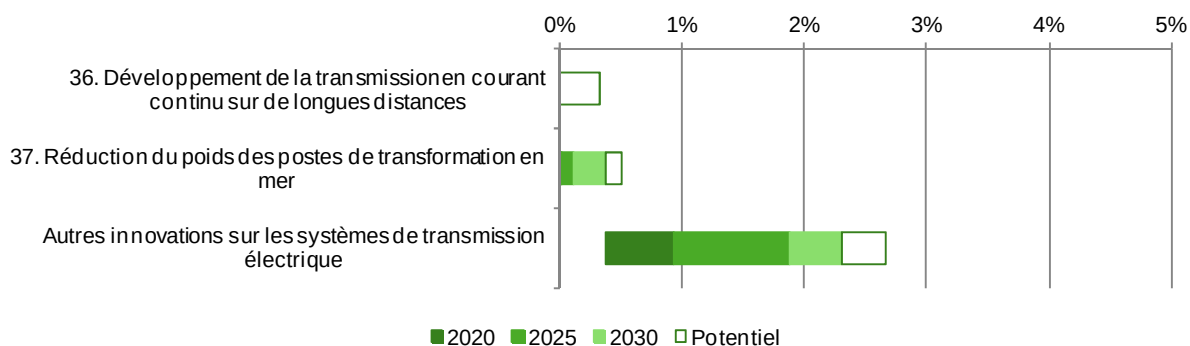


Figure 24 : Impact potentiel et anticipé des innovations de raccordement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

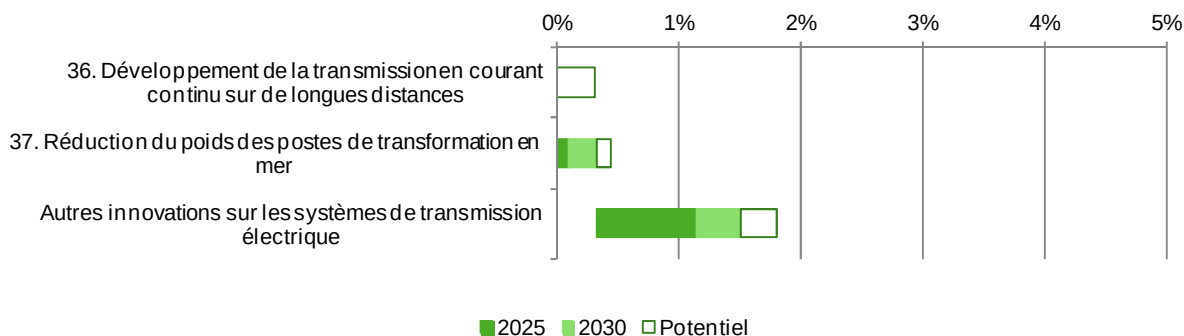


Figure 25 : Impact potentiel et anticipé des innovations de raccordement sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.8. Les innovations concernant l'installation

5.8.1. Les innovations principales

Innovation 42	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques et océaniques pour l'installation des fondations d'éoliennes en mer
Pratique actuelle	Actuellement, au-delà d'une hauteur significative de vagues de 1,4 m, les barges d'installation ne sont plus opérationnelles.
Innovation en détail	De nombreuses améliorations doivent permettre de perfectionner le processus d'installation des fondations et éoliennes en mer pour réduire la sensibilité aux états de mer agités. Elles incluent les progrès dans la conception des barges de transport et d'installation, potentiellement des solutions de positionnement dynamiques s'affranchissant des limitations des navires <i>jack-up</i> , le développement de systèmes flexibles d'attaches sur les barges permettant d'optimiser leur chargement, l'utilisation de navires de transport en complément de barges dédiées à l'installation sur site, pour permettre l'installation dans des conditions de mer jusqu'à une hauteur significative de vagues (Hs) de 2 à 2,5 m au lieu de 1,4 m.
Variantes technologiques de l'innovation	N/A
Type d'innovation	Innovation de rupture.
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien en mer posé.
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	La taille du marché et la visibilité à long terme.
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Pas d'impact sur les composants eux-mêmes.
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2, Horizon 2020.
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	A l'international : { 2020 : 40% 2025 : 45% 2030 : 70% En France : { 2020 : 40% 2025 : 45% 2030 : 70%

Innovation 43	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques des techniques d'installation des éoliennes
Pratique actuelle	Les éoliennes sont montées à l'aide de grues, qui ne peuvent pas travailler dès que le vent dépasse 12 m/s.
Innovation en détail	Cette innovation comprend des améliorations des techniques existantes, à terre ou en mer, permettant de réduire la sensibilité au vent, et de diminuer le nombre de jours d'arrêt des travaux dus aux conditions météorologiques. Elle vise à faire passer les limites de vitesse de vent fixées pour installer des éoliennes en sécurité de 12 à 16 m/s.

Variantes technologiques de l'innovation	Mise en place d'un système de guidage du treuil. En terrestre, installation sans grue en érigeant des mâts en béton qui montent la nacelle et le rotor à la hauteur souhaitée.				
Type d'innovation	Innovation incrémentale				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien en mer posé et pour l'éolien terrestre.				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Validation en conditions opérationnelles.				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Le mât, pour la variante mât béton sans grue.				
TRL et CRI	TRL 9, CRI 2, Horizon 2020.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td><td>Eolien en mer :</td></tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 5\% \\ 2025 : 15\% \\ 2030 : 25\% \end{array} \right.$ </td><td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$ </td></tr> </table> (cette innovation devrait équiper tous les moyens de levage dédiés à l'éolien en mer ; certains moyens polyvalents de l'industrie pétrolière ne le seront pas forcément)	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 5\% \\ 2025 : 15\% \\ 2030 : 25\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 5\% \\ 2025 : 15\% \\ 2030 : 25\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 20\% \\ 2025 : 50\% \\ 2030 : 80\% \end{array} \right.$				

5.8.2. Les autres innovations concernant l'installation

De nombreuses améliorations sont possibles pour optimiser l'installation des éoliennes ainsi que leur démantèlement en fin de vie. En mer sont envisagées des améliorations du processus de martelage des monopieux (incluant la réduction du bruit, innovation 44), le développement de fondations gravitaires flottantes (innovation 45), des concepts radicalement novateurs de transport d'éoliennes montées à quai, et montées d'une pièce sur leurs fondations ou remorquées en mer sur des fondations flottantes ballastées sur site, éventuellement montées sur des mâts télescopiques érigés sur site (innovation 49). Les tests d'éoliennes flottantes permettront certainement de mieux évaluer la résistance des éoliennes aux accélérations supportées dans ces conditions. Des améliorations seront également développées sur la pose des câbles (innovation 47) et l'installation des postes de transformation (innovation 52) et sur le processus de démantèlement (innovation 53).

5.8.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

C'est sur l'éolien en mer posé que les coûts d'installation sont importants, et que des innovations pourront les réduire de manière significative.

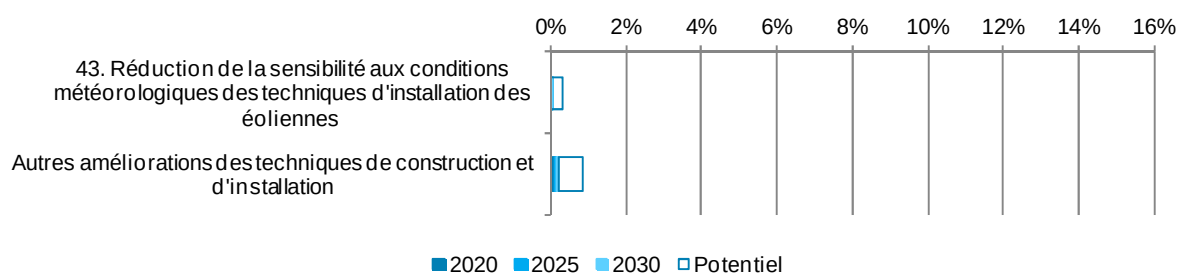


Figure 26 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'installation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

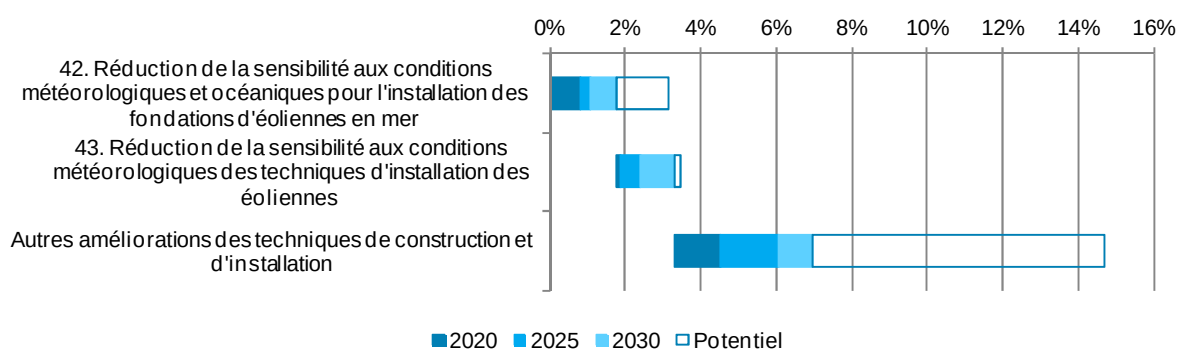


Figure 27 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'installation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

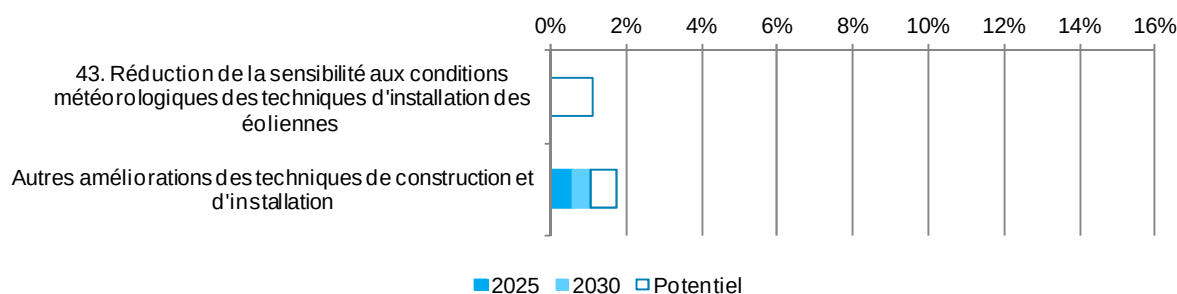


Figure 28 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'installation sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

5.9. Les innovations concernant l'exploitation et la maintenance

5.9.1. Les innovations principales

Innovation 54	Développement de la maintenance conditionnelle et de stratégies de maintenance holistique
Pratique actuelle	Historiquement la maintenance est effectuée en suivant les fréquences préconisées par les fabricants, mais cette prévision n'est pas actualisée en fonction de l'usure réellement subies par l'éolienne et ses composants.

Innovation en détail	La maintenance conditionnelle consiste à mettre en place des outils (en anglais : CMS - <i>Condition Monitoring Systems</i>) permettant d'évaluer la dégradation des composants : capteurs, inspections menées sur les éoliennes, et ainsi d'anticiper les problèmes et les interventions. Elle contribue à l'optimisation des opérations de maintenance à travers des stratégies CBM (<i>Condition-Based Maintenance</i>), en concentrant les efforts dans les secteurs où les besoins sont plus avérés. Avec le déploiement réussi de la maintenance conditionnelle dans d'autres industries et quelques réussites initiales dans l'industrie éolienne, les mises en œuvre de la maintenance conditionnelle devraient être optimisées et plus largement acceptées dès la décision d'investissement finale (en anglais : FID pour <i>Final Investment Decision</i>). L'approche intégrée (holistique) permet d'intégrer et d'optimiser dès la conception de l'éolienne les différentes opérations et modes de défaillances qui pourront se produire sur la durée de vie de l'éolienne, jusqu'à l'extension de durée de vie et au démantèlement.				
Variantes technologiques de l'innovation	N/A				
Type d'innovation	Innovation incrémentale.				
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.				
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Le développement de systèmes SCADA de second niveau permettant l'agrégation des systèmes SCADA des turbiniers et une standardisation des alertes.				
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Système SCADA, systèmes CMS, système de gestion des stocks et cycles de maintenance.				
TRL et CRI	TRL 9, CRI 3.				
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 15\% \\ 2025 : 40\% \\ 2030 : 45\% \end{array} \right.$ </td> <td> $\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 80\% \\ 2030 : 90\% \end{array} \right.$ </td> </tr> </table>	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 15\% \\ 2025 : 40\% \\ 2030 : 45\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 80\% \\ 2030 : 90\% \end{array} \right.$
Eolien terrestre :	Eolien en mer :				
$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 15\% \\ 2025 : 40\% \\ 2030 : 45\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2020 : 30\% \\ 2025 : 80\% \\ 2030 : 90\% \end{array} \right.$				

Innovation 55	Système de commande des éoliennes intégré à l'échelle du parc éolien
Pratique actuelle	A l'heure actuelle, le système de commande de chaque éolienne gère sa performance indépendamment du reste du parc. Les changements de paramètres ne sont possibles qu'à part dans certains cas pour l'effacement de production.
Innovation en détail	L'élaboration de stratégies de contrôle plus sophistiquées, utilisant des systèmes capables de mesurer la durée de vie utile résiduelle et de prendre en compte les facteurs de génération de revenus (par exemple, les prix du marché spot), a le potentiel de fournir un pilotage gérant l'optimisation entre les objectifs multiples des parcs éoliens pour minimiser les coûts et maximiser le revenu. Cette innovation augmentera légèrement le CAPEX de la turbine mais réduira les OPEX

	non planifiés et les pertes de production, et augmentera le productible. On peut aussi traiter de manière optimale la prise en compte des risques liés à la biodiversité et les contraintes d'émergence acoustique sur la base d'une détection précise remplaçant des règles de limitation plus pénalisantes. Cette innovation ne comprend pas les améliorations des stratégies individuelles de contrôle des éoliennes.								
Variantes technologiques de l'innovation	N/A								
Type d'innovation	Innovation de rupture.								
Pertinence par filière	Pertinence pour l'éolien terrestre, en mer posé et flottant.								
Conditions nécessaires de réalisation de l'innovation	Développement de centres de commande intégrant des systèmes de suivi des marchés en temps réel.								
Composants ou systèmes concernés par l'innovation	Systèmes SCADA.								
TRL et CRI	TRL 8, CRI 1.								
Part de marché anticipée de l'innovation en 2020, 2025 et 2030	En France et à l'international : <table> <tr> <td>Eolien terrestre :</td> <td>Eolien en mer :</td> </tr> <tr> <td>{ 2020 : 30%</td> <td>{ 2020 : 30%</td> </tr> <tr> <td>{ 2025 : 80%</td> <td>{ 2025 : 80%</td> </tr> <tr> <td>{ 2030 : 90%</td> <td>{ 2030 : 90%</td> </tr> </table> (pour les parcs de taille significative)	Eolien terrestre :	Eolien en mer :	{ 2020 : 30%	{ 2020 : 30%	{ 2025 : 80%	{ 2025 : 80%	{ 2030 : 90%	{ 2030 : 90%
Eolien terrestre :	Eolien en mer :								
{ 2020 : 30%	{ 2020 : 30%								
{ 2025 : 80%	{ 2025 : 80%								
{ 2030 : 90%	{ 2030 : 90%								

5.9.2. Les autres innovations d'exploitation et de maintenance

De nombreuses améliorations permettront d'améliorer la productivité des parcs et de réduire les coûts OPEX, au-delà des innovations n°21 sur l'optimisation de la gestion de la nacelle : l'amélioration des prévisions météorologiques, la réalisation de davantage d'opérations de maintenance et de service à distance (innovation 61), l'optimisation de l'inspection des pales et de leur maintenance (innovation 62), l'amélioration des systèmes de management des pièces de rechange, l'amélioration des systèmes de transfert de personnel en mer (innovation 60), la maîtrise de l'installation et du remplacement des structures flottantes et de leur connexion et déconnexion (innovations 63 et 64).

5.9.3. Analyse LCOE détaillée à court terme, moyen terme et long terme

Le potentiel de réduction résulte d'un assez grand nombre d'innovations ; il est particulièrement fort pour l'éolien en mer.

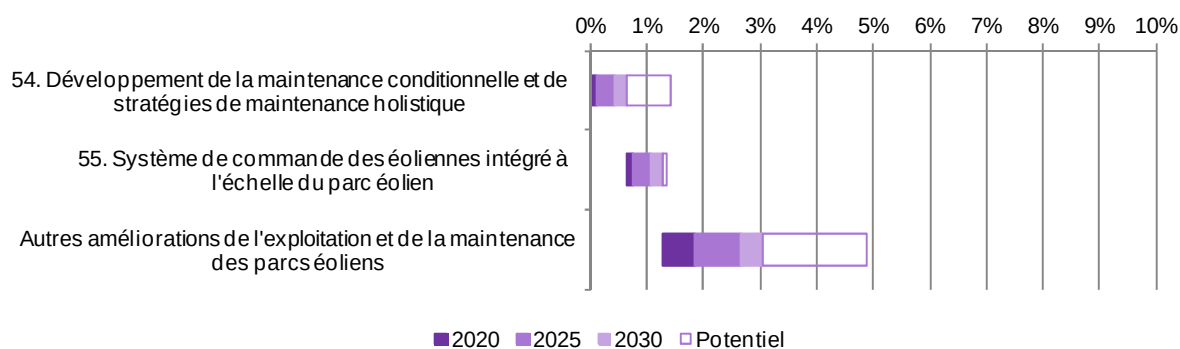


Figure 29 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'exploitation et de maintenance sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien terrestre

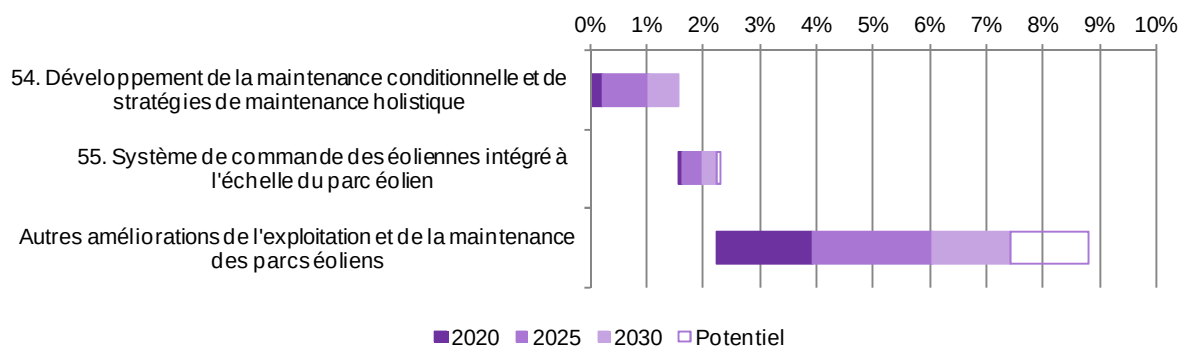


Figure 30 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'exploitation et de maintenance sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien en mer posé

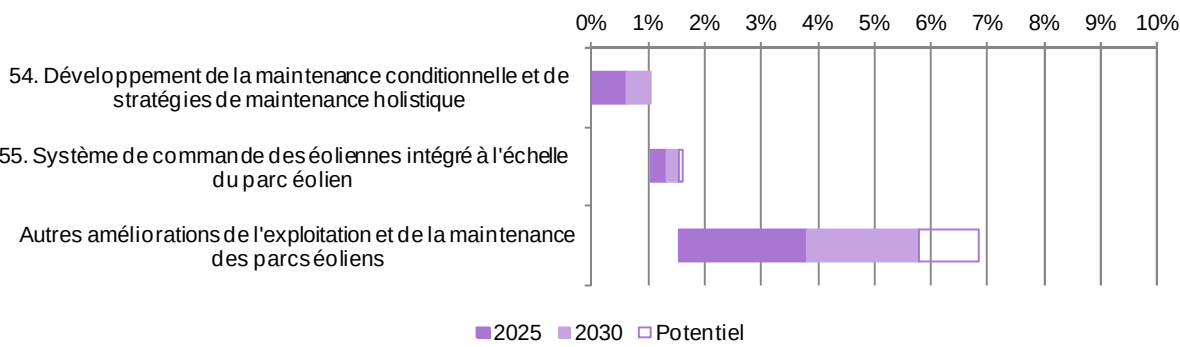


Figure 31 : Impact potentiel et anticipé des innovations d'exploitation et de maintenance sur la réduction de coût LCOE pour l'éolien flottant

6. Synthèse des effets des domaines d'innovation sur le coût LCOE par filière

6.1. Synthèse de la réduction des coûts LCOE par filière à horizon 2030

Les graphiques des Figure 32, Figure 33 et Figure 34 synthétisent l'impact anticipé des groupes d'innovations par filières.

L'éolien terrestre conserve un **potentiel de réduction des coûts importants**. Entre les trois filières, l'éolien en mer posé est la filière avec le potentiel de réduction des coûts le plus important à horizon 2030 avec une réduction des coûts anticipé de 63%. Les réductions de coûts sont particulièrement importantes pour l'éolien en mer en raison :

- de l'évolution importante de la taille des machines ;
- de la maturation de la filière, impliquant notamment une diminution des coûts moyens pondérés du capital ;
- du potentiel de progrès sur l'installation de 6,5%.

En éolien flottant la réduction anticipée est de 55% et pour l'éolien terrestre elle est évaluée à 42%. Toutefois, la réduction de coût pour l'éolien flottant est la plus rapide car elle est calculée à partir d'une base 2020.

Pour les trois filières, l'impact des **innovations de rotor et de nacelle** est le plus important. Ces groupes d'innovations couvrent l'augmentation de la taille des rotors avec l'introduction de nouvelles plateformes. En éolien en mer, l'impact combiné de ces deux groupes d'innovations est égal à 20%, il est légèrement inférieur pour l'éolien terrestre.

Par domaines techniques, on prévoit des réductions importantes des coûts d'installation, de fondations et de raccordement électrique, de 55% pour l'éolien en mer posé et de 36% pour l'éolien flottant, contre 25% pour l'éolien terrestre. Entre les deux technologies, l'éolien en mer posé est la filière qui profite le plus des innovations en termes d'installation (20% contre 10% pour l'éolien flottant). Les innovations de fondations et de raccordement électrique ont un impact bien plus grand dans les filières marines (en moyenne 30% contre 2,3% en terrestre, le site terrestre de référence ne ciblant pas les mâts les plus élevés où l'impact sera un peu plus important).

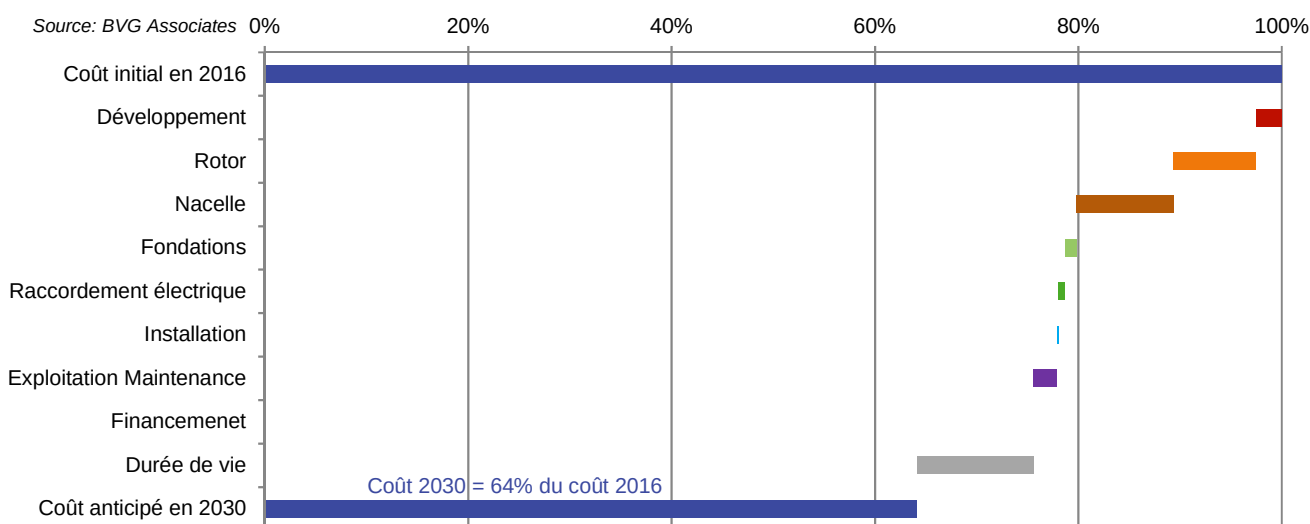


Figure 32 : Décomposition du potentiel de réduction des coûts de la filière de l'éolien terrestre par domaine d'innovation en France à horizon 2030

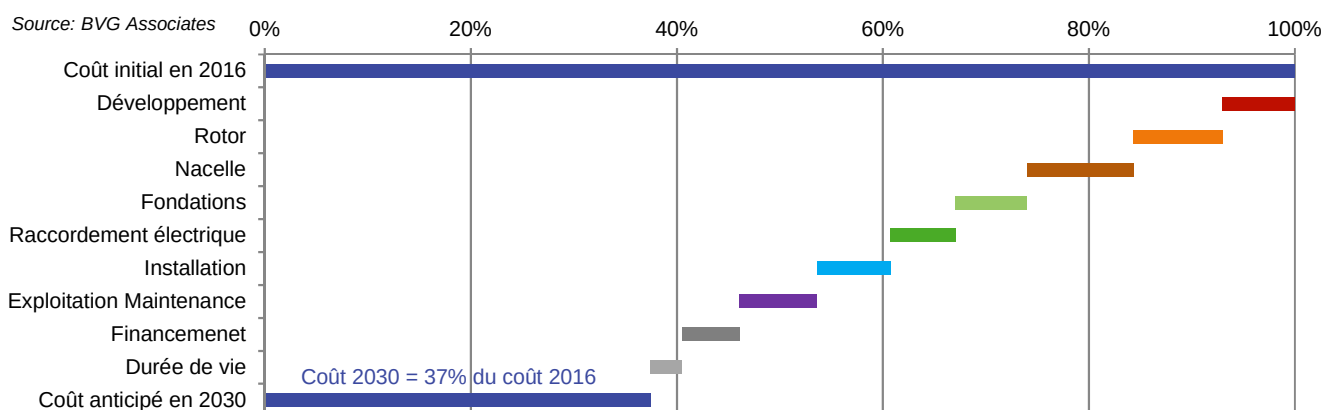


Figure 33 : Décomposition du potentiel de réduction des coûts de la filière de l'éolien en mer posé par domaine d'innovation en France à horizon 2030

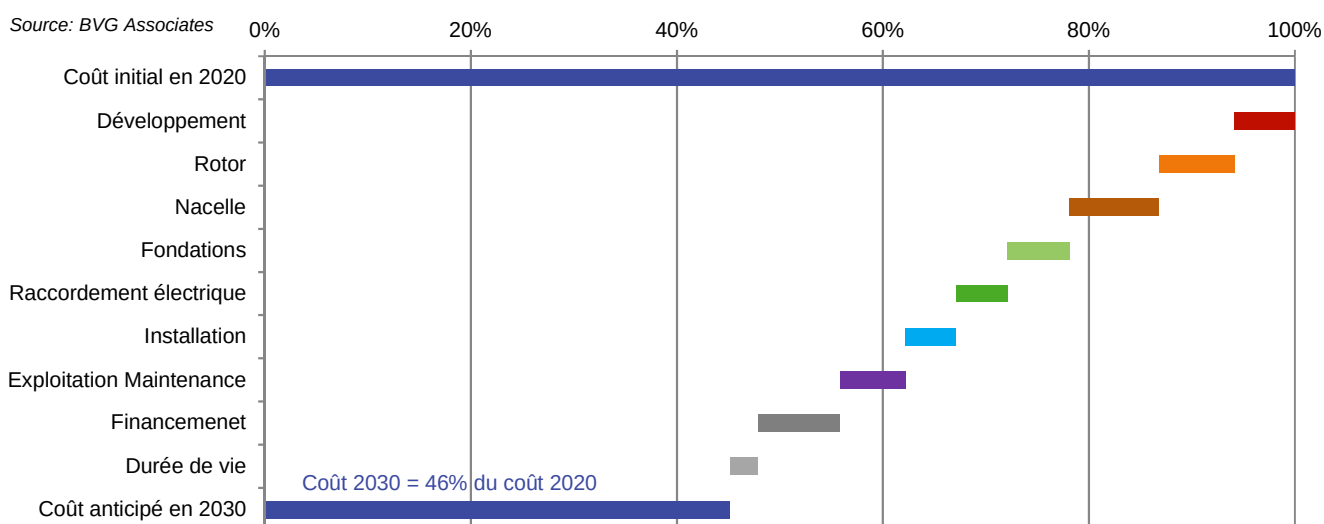


Figure 34 : Décomposition du potentiel de réduction des coûts de la filière de l'éolien flottant par domaine d'innovation en France à horizon 2030

Un potentiel important est lié à l'optimisation industrielle et logistique. Il peut être mis en œuvre quand les acteurs acquièrent de l'expérience, avec des portefeuilles de projets leur permettant de rentabiliser leurs investissements matériels et humains dans la durée avec des plans de charge satisfaisant. La visibilité à long terme est la clé pour atteindre cet objectif. Elle nécessite une anticipation du développement de la filière et des projets très en amont, avec une forte concertation entre tous les acteurs (privés et publics). Elle passe par une planification spatiale maritime prospective, une optimisation des processus d'appel d'offres permettant la levée maximale des risques avant le lancement de l'appel d'offres et la réduction du délai entre l'attribution des zones et la construction des projets.

L'innovation peut aussi se développer dans ces domaines, dans le domaine de l'organisation et du financement des projets, domaines qui sortent du périmètre de cette étude.

6.2. L'impact des innovations appliquées au retrofit

Les longues durées d'exploitation des parcs (15 à 25 ans) et l'émergence de certaines évolutions technologiques invitent à considérer des opérations qui vont au-delà de la simple maintenance, qui optimiseraient les performances

d'une machine par rapport à sa conception initiale. Une opération de retrofit permet d'améliorer les capacités de la machine dans différents domaines : niveau de production électrique, fiabilité, acoustique, etc.

Dans le contexte français on parle ici uniquement d'éolien terrestre, où le parc peut atteindre une quinzaine d'années et plus.

Le retrofit peut consister à faire bénéficier une éolienne en opération d'innovations proposées sur les nouvelles générations de machines ; il peut aussi y avoir développement d'innovations spécifiques dédiées à la réalisation d'un retrofit.

Les principales opérations de retrofit concernent :

- Les dispositifs de maintenance prédictive (CMS) : pose de capteurs, mise en réseau pour contrôle à distance, boîtiers permettant un diagnostic en temps réel de l'état de l'éolienne, etc (innovation 54).
- Le contrôle-commande (automates, SCADA) : améliorations logicielles, prise en compte de nouveaux paramètres, remplacement avec du matériel de nouvelle génération apportant des performances accrues, une meilleure fiabilité, ou évitant l'obsolescence (innovation 21).
- Les pales : ajout de prolongateurs pour plus de puissance, ajouts de dispositifs innovants permettant d'augmenter la production, par exemple en créant des vortex en amont du bord de fuite, ou de réduire le niveau sonore, par exemple par ajout de peignes sur le bord de fuite (innovation 8)
- Eventuellement les fondations : renforcement en cas d'allongement des pales. Une innovation a été développée par un fondeur pour renforcer une fondation existante.

6.3. L'impact des innovations appliquées au repowering.

La durée de vie des éoliennes terrestres est traditionnellement prévue par le constructeur pour 20 ans. La problématique du remplacement des éoliennes commence à se poser pour les premiers parcs français, non qu'ils aient atteint cette limite la plupart du temps, mais plutôt à un stade où une opération de maintenance importante est à prévoir (pales, multiplicateur, etc.). Les tailles de machines ayant fortement évolué entretemps, il peut être rentable de mieux exploiter le potentiel éolien d'un site en remplaçant les machines, dans le cadre d'une nouvelle demande de permis de construire. Le raccordement électrique (câble et poste de raccordement) peut être prolongé, il peut aussi éventuellement y avoir reprise et extension d'une ou plusieurs fondations. On parle alors de travaux de repowering avec la possibilité de pleinement bénéficier des innovations disponibles sur le marché au sein de machines neuves.

Pour l'éolien en mer en France, le repowering est un marché à long terme. Compte tenu de l'évolution continue des tailles d'éoliennes, seul le raccordement électrique pourrait être conservé (câble, poste de raccordement en mer).

6.4. Les hypothèses spécifiques aux DROM-COM

Dans les DROM-COM, les innovations du marché peuvent s'appliquer, dans les limites des conditions logistiques bien plus complexes qu'en métropole.

Certains thèmes sont particulièrement significatifs :

- La résistance aux cyclones et tempêtes tropicales : on connaît les modèles spécifiques rabattables développés par Vergnet et Alizéo. Les constructeurs chinois semblent prendre le pari de mâts non rabattables, notamment avec une hélice bipale qui peut être mise à l'horizontale face au vent pour offrir une prise au vent minimale.
- La logistique : elle dépend des capacités portuaires et du réseau routier, et de la disponibilité locale d'une grue de montage. Dans ce cadre, les innovations concernant les tours sont particulièrement adaptées : mâts en treillis assemblés sur place (innovation 30), éolienne montée sans grue (innovation 43).



Le développement de l'éolien en mer ne peut s'envisager que dans des zones atteignables par les barges d'installation et de maintenance, et dotées d'infrastructures portuaires suffisantes. Il semble que l'éolien flottant soit le plus adapté compte tenu des coûts et délai de déplacement des barges d'installation nécessaires en cas de grosse maintenance, en complément du photovoltaïque et de la biomasse.

7. Synthèse des résultats, sensibilité des filières aux effets de marché et de maturité technico-commerciale

7.1. Synthèse des évolutions de coûts par site de référence

L'application des innovations conduit à une forte baisse du coût de l'énergie pour l'éolien en mer, avec une réduction du coût à hauteur de 62% pour l'éolien en mer posé de 2016 à 2030 et de 54% en flottant de 2020 à 2030. Le site de référence terrestre connaît une baisse de l'ordre de 36% sur la période 2016-2030. Pour comparaison, si l'on retire du périmètre de calcul les impacts de la baisse du coût du capital et de l'allongement de la durée de vie, les potentiels de baisse de coûts purement technologique sont respectivement de 54% pour l'éolien en mer posé, 44% pour le flottant et 24% pour l'éolien terrestre.

La Figure 35 retrace les potentiels d'évolution des coûts complets de production (LCoE), en prenant en compte des hypothèses hautes et basses pour les filières en mer (voir **Tableau 2**). Cette fourchette retranscrit une incertitude sur les coûts initiaux à 2016, étant donné le manque de retour d'expérience en particulier sur les coûts d'installation, d'opération et sur les facteurs de charge pour les installations en mer au large des côtes françaises. A 2030, le coût de l'éolien flottant devrait se rapprocher de celui de l'éolien en mer posé.

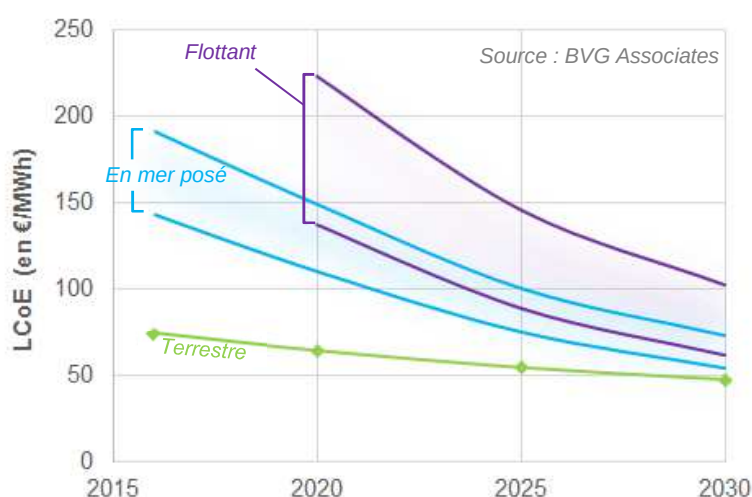


Figure 35 : Evolution du coût de l'énergie prévue pour les sites de référence

Pour l'éolien posé, les prix de vente constatés sur les premiers appels d'offres français qui seront installés à partir de 2020 sont plus élevés que le coût évalué pour 2020 : ils reflètent les risques plus importants rencontrés par les porteurs de projets au moment des appels d'offres en 2011 (risque sur la connaissance des sols et des gisements, risques liés à des plateformes nouvelles et au démarrage d'une industrialisation en France, avec les incertitudes sur le développement ultérieur de la filière en France...). Le taux d'actualisation pour couvrir ces risques est supposé plus élevé, de l'ordre de 13 %.

Les innovations ont des effets à la fois en termes de facteur de charge et de coût global de l'électricité. L'évolution de la taille des éoliennes est importante et conduit à de fortes économies d'échelle, qui devraient se manifester dans les appels d'offres : « actuellement le marché est drivé par la taille », « il n'y a pas le choix » que d'aller vers des plateformes toujours plus puissantes, les économies générées sur le coût de l'énergie levant les réticences à commander des modèles non encore éprouvés.

Pour l'éolien terrestre, les coûts de référence 2016 (CAPEX et OPEX) sont cohérents avec ceux relevés par l'étude « Etude de la filière éolienne en France : bilan, perspectives et stratégie », dont la première partie a été publiée en janvier 2017 par l'ADEME.

Pour les deux filières maritimes, les baisses des coûts d'investissement (CAPEX) sont similaires, les coûts pour l'éolien flottant restant en moyenne 15% supérieurs à l'éolien en mer posé. Les CAPEX du site de référence terrestre baissent quant à eux de 11% (Figure 36).

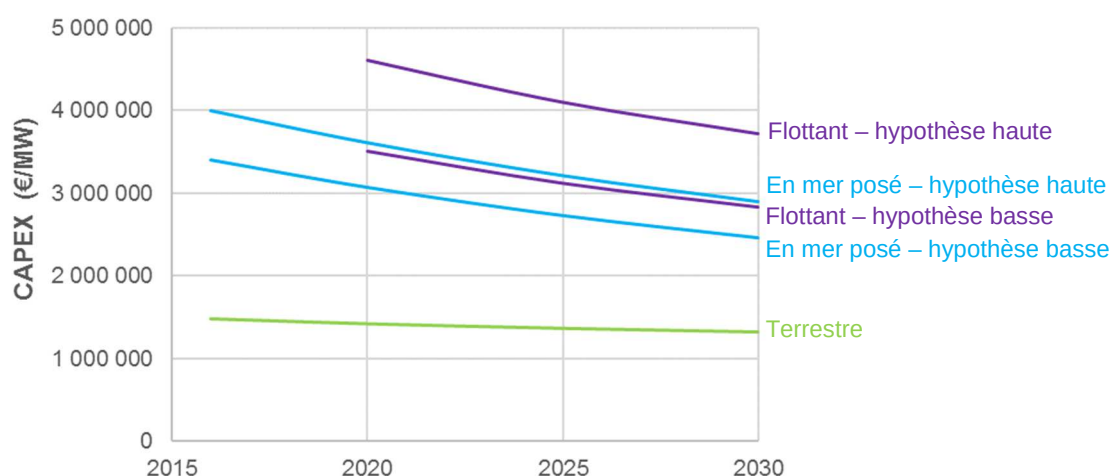


Figure 36 : Evolution des coûts CAPEX pour les sites de références

La baisse des coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) est quasiment identique entre les filières pour les deux filières en mer ; elle reste significative (17%) pour le site terrestre (Figure 37). On constate également que les OPEX présentent des taux d'apprentissage plus importants que les CAPEX.

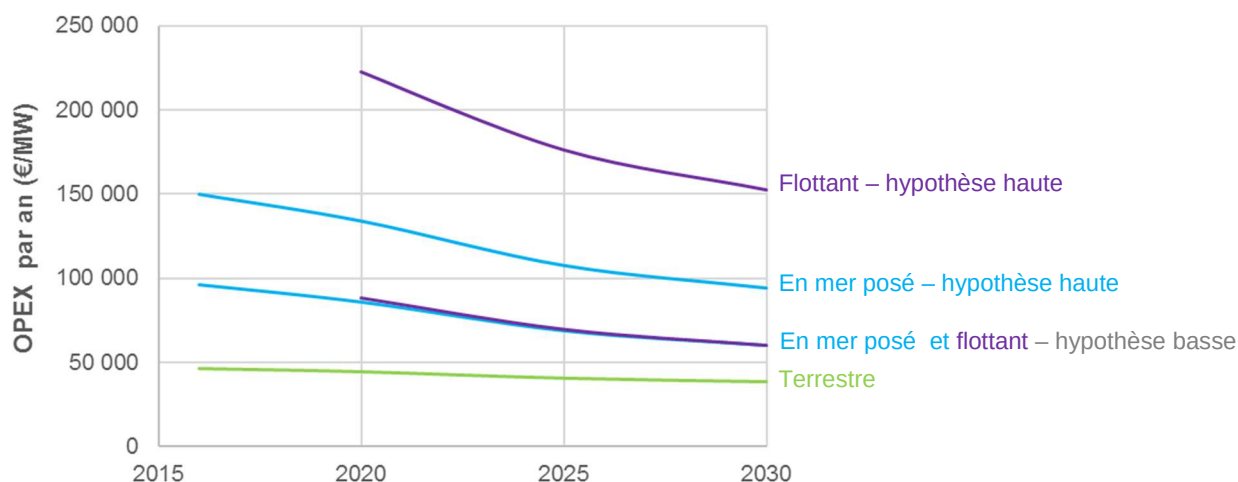


Figure 37 : Evolution des coûts OPEX pour les sites de référence

7.2. Sensibilité des filières aux effets de marché et de maturité technico-commerciale

Nous avons entrepris une analyse de sensibilité en modifiant les pourcentages de maturité commerciale au niveau de chaque groupe d'innovation. Nous avons appliqué en moyenne les facteurs -10% et +10% pour chacun de ces groupes. Pour les innovations de développement, nous avons appliqué -5% et +15% spécifiquement car les innovations de ce groupe sont plus aisées à mettre en œuvre que la plupart des innovations des autres groupes et leur impact a de plus grandes chances d'être plus fort que d'être moins important. Dans le cas des fondations et des innovations de rotor, nous avons appliqué -10% et +15% car certaines innovations de ce groupe peuvent être la source d'importantes réductions.

L'effet de ces sensibilités est montré pour les trois sites de références sur les hypothèses basses dans les Figure 38, Figure 39 et Figure 40. Dans tous les cas, l'écart de variabilité donnée par l'analyse de sensibilité augmente avec le temps : plus la date est lointaine, plus l'incertitude est grande.

Dans le cas de l'éolien terrestre, l'écart reste faible même à 2030, ce qui indique un degré de confiance plus élevé dans les calculs LCOE.

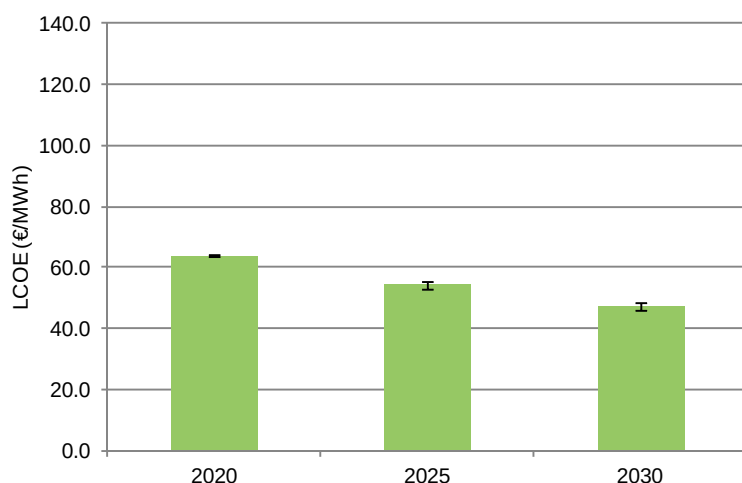


Figure 38 : Anticipation des coûts de l'énergie éolienne terrestre (hypothèse basse) : sensibilité au rythme d'innovation

L'analyse pour l'éolien maritime révèle une incertitude plus marquée en 2030, ce qui indique un potentiel important pour l'avancement des innovations en matière de préparation commerciale pour influencer positivement ou négativement le LCOE. Cela indique que les politiques visant à garantir le bon développement et la commercialisation adaptée de ces innovations sont essentielles pour la réduction des coûts.

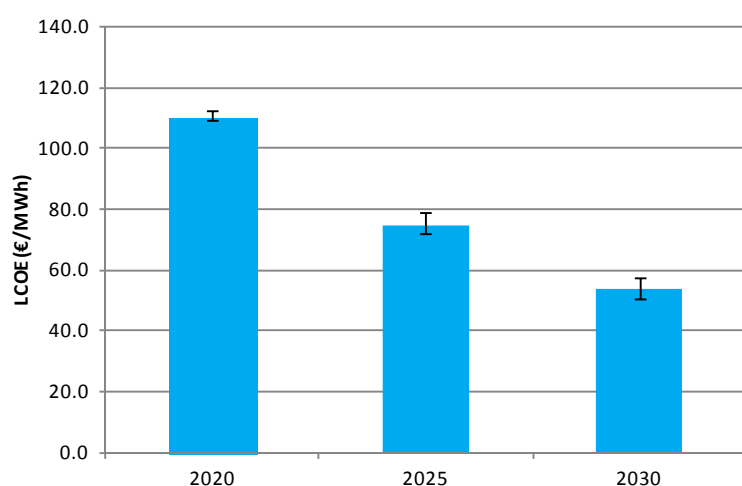


Figure 39 : Anticipation des coûts de l'énergie de l'éolien en mer posé (hypothèse basse) : sensibilité au rythme d'innovation

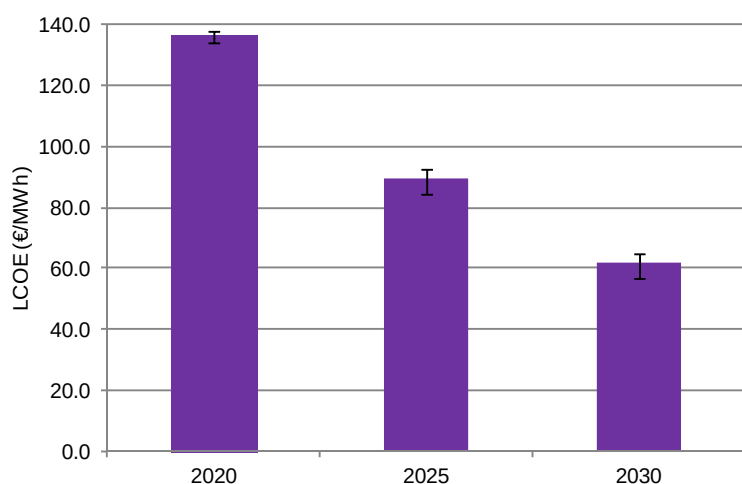


Figure 40 : Anticipation des coûts de l'énergie de l'éolien flottant (hypothèse basse) : sensibilité au rythme d'innovation

7.3. Les taux d'apprentissage des différentes filières éoliennes

Les courbes d'apprentissage ont un intérêt tout particulier pour l'industrie éolienne qui reste une industrie jeune et plus particulièrement pour les filières de l'éolien en mer qui ont un potentiel de réduction de leur coût de l'énergie important. Les particularités du marché français en termes de coûts et de capacités anticipées ne permettent pas d'établir une courbe d'apprentissage liée au volume de marché. On analyse donc ci-dessous le taux d'apprentissage annuel attendu pour obtenir les baisses de coûts anticipé pour le marché français. Par définition, l'apprentissage annuel moyen t est tel que le LCoE en année n s'exprime en fonction du LCoE en année 0 de référence par :

$$LCoE_n = LCoE_0 \times (1 - t)^n$$

La filière terrestre est la filière la plus mature et il apparaît que le taux d'apprentissage annuel est en dessous de 5% en 2020 et baisse progressivement jusqu'à 3,2% en 2030.

Pour l'éolien en mer posé, on anticipe une baisse importante entre 2020 et 2025 avec un taux d'apprentissage annuel à 7,4% en 2020 et toujours au-dessus de 6,5% en 2025.

L'éolien flottant bénéficiera en grande partie de l'apprentissage fait dans l'éolien en mer posé : on anticipe dès lors un taux d'apprentissage annuel au-dessus de 8% en 2025 et se stabilisant autour de 7% en 2030.

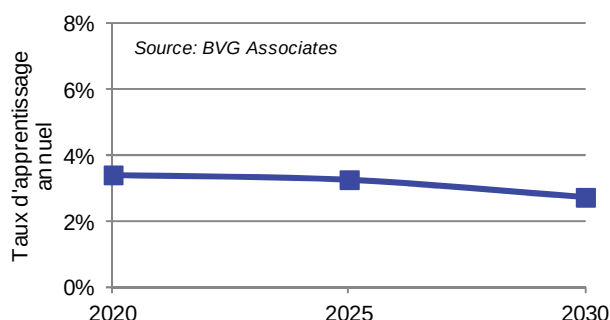


Figure 41 : Taux d'apprentissage annuel anticipé pour la filière de l'éolien terrestre

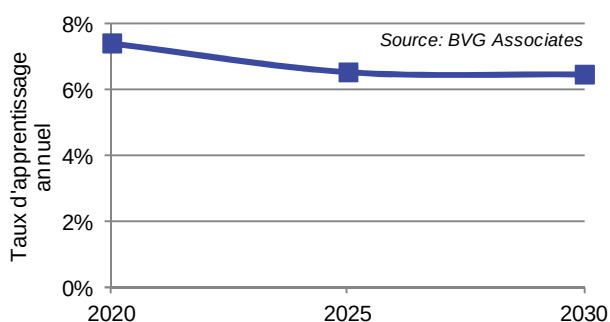


Figure 42 : Taux d'apprentissage annuel anticipé pour la filière de l'éolien en mer posé

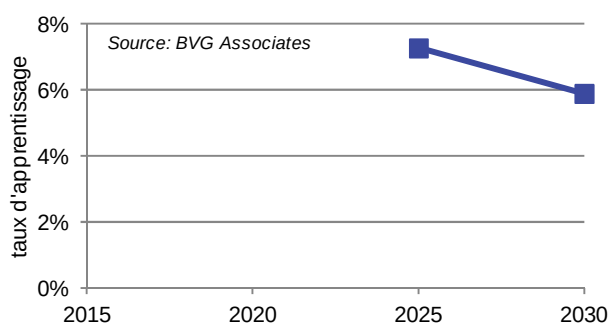


Figure 43 : Taux d'apprentissage annuel anticipé pour la filière de l'éolien en mer flottant

8. Capacité d'innovation de la chaîne d'approvisionnement française

8.1. Les acteurs français innovants

Le Tableau 4 présente les organisations françaises innovantes significatives – cette liste n'est pas exhaustive, le nombre d'instituts de recherche impliqués, à des degrés divers, est par exemple très important. L'identification a plutôt été orientée vers les acteurs industriels.

Une cinquantaine d'acteurs ont été interrogés par questionnaire concernant leur activité d'innovation. Le développement tardif de la filière éolienne en France conduit à un nombre très restreint de donneurs d'ordres et de fournisseurs, avec un rattrapage en cours sur l'éolien en mer où de nouvelles références pourront être constituées.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des acteurs français innovants et leur positionnement sur la chaîne de valeur (page suivante)



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
ACOEM	Equipements et des services en maintenance conditionnelle	PME	Industrie Energie Transport Défense	Maintenance conditionnelle des éoliennes Surveillance des éoliennes Détection précoce de défauts Surveillance vibratoire en continu	30 ans d'expérience dans le domaine de la maintenance conditionnelle	Surveillance vibratoire en continu des éoliennes	x	x	x
Adwen	Constructeur d'éoliennes	Filiale de grand groupe	Non	Conception, fabrication, assemblage, installation et maintenance d'éoliennes en mer	3 ^{ème} acteur du marché éolien en mer	Développement d'éoliennes en mer de grande puissance, développement de technologies dédiées à l'éolien flottant.		x	x
Airbus (ex-Astrium)	Aéronautique	Grand groupe		Transfert de technologies aéronautiques			x	x	x
Airbus Safran Launcher	Lutte incendie	Filiale de 2 grands Groupes : Airbus & Safran	Lanceurs spatiaux et militaires et équipements	Néant à ce stade	Systèmes automatiques de suppression d'incendie	Systèmes automatiques de suppression d'incendie sans maintenance pendant 15 ans	x	x	x
Arkema	Chimie	Grand groupe	Chimie		Diversification, nouvel entrant	Résines thermoplastiques pour composites	x	x	x
Aveni-sense	Capteurs pour fluides	Start up	Capteurs pour fluides	Capteurs pour huile, voire pour le vent	Nouvel arrivant	Capteurs pour fluides	x	x	x

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Biotope	Ingénierie environnementale	PME	Ingénierie environnementale	Etudes environnementale et développement de solutions pour le suivi de la biodiversité	Acteur historique dans l'éolien	Développement de dispositifs de détection et de reconnaissance de la biodiversité	x	x	x
Bouygues	Construction de fondations	Grand groupe	Construction d'infrastructures dans le cadre de contrats de construction, conception-construction, concessions ou PPPs.	Construction de supports ou fondations destinées à l'éolien maritime : - Fondations gravitaires (GBS) - Coques pour éoliennes flottantes	Nouvel entrant, fournisseur de rang 1 pour les lots de fondations en mode EPCI, ayant déjà réalisé des études techniques poussées réalisées (géotechnique, couplage structure / éolienne,...), des études de méthodes et prix depuis 2011.	- Développement de formulation de béton spécifique (béton allégé auto-plaçant satisfaisant aux exigences de durabilité en mer) - Méthodes de construction innovantes visant à abaisser le coût de production en série de flotteurs en béton (projet FUI Optiflot)	x	x	x
CANOE	Caractérisation des composites	Plateforme technologique		Recherche collaborative	R&D	Composites à résines thermoplastiques, matériaux biosourcés	x	x	x
Cégélec	Raccordement électrique	Grand groupe	Conception, installation et maintenance de systèmes	Conception, installation et maintenance du raccordement électrique	Acteur historique dans l'éolien		x		

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
CETIM	Ingénierie mécanique	Centre Technique de la Mécanique	Toutes les industries de la mécanique (transport, énergie, aéro...)		Prestations de Services : Analyse de défaillance/conception/reconception/Contrôle et mesures/formations/Expertises/Surveillance...	Expertise en support aux porteurs d'innovation	x	x	x
Chomarat	Textiles spéciaux	PME	Textiles spéciaux		Renforts composites	Matériaux nouveaux	X	X	X
CNIM	Ingénierie mécanique	Grand groupe	Systèmes de Défense, efficacité énergétique, valorisation des déchets	Etudes, ingénierie, assistance à maîtrise d'ouvrage	Navire de soutien et de maintenance pour les champs éoliens en mer	Nouveau concept de navire spécialisé visant à doubler la capacité d'intervention annuelle		X	X
Compagnie du Vent	Pôle de compétitivité	Filiale Grand groupe	Solaire PV	Développement de projets éoliens Evaluation de productible Construction Exploitation et maintenance de parcs éoliens	Pionnier dans l'éolien (1 ^{ère} éolienne de France en 1991, 1 ^{er} parc éolien en 1993)	Prédiction court terme 24 à 48 h Analyse de performance des parcs éolien	x	x	
CORIA	Laboratoire d'aéro-thermochimie	Laboratoire		Calcul des sillages		Projet de "soufflerie numérique" avec des méthodes de simulation fluides avancées (CFD) prenant en compte les effets du comportement de la structure	x	x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
CTE WIND	Calcul de structures	Bureau d'étude dans le génie civil	Aucune	Dimensionnement de fondations éoliennes en béton armé, expertises.	Leader sur le marché français	Tour béton armé pour l'éolien.	x		
DCNS Energies	Construction navale	PME	- Energie thermique des mers - hydroliennes	- Constructions fondations équipées (flotteurs, ancrages, câbles dynamiques) - Développement de fermes	- stade actuel de développement de fermes pilotes - projets en cours	- Architecture de ferme (développement de nouvelles techniques afin de limiter les coûts et d'optimiser l'utilisation des fermes, nouvelles techniques de mesure du vent) - Nouveaux concepts d'installation (réduction de la durée et des coûts d'installation) - Amélioration des fondations (câbles dynamiques, nouveau design de flotteurs, nouveaux matériaux pour les lignes d'ancrages)		x	x

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Ecole Centrale Nantes	Grande école, laboratoires	Etablissement public de formation et R&D	Mécanique et Matériaux, Robotique, Ingénierie Domaines : Marine, Automobile, Santé, Réseau électrique	R&D : environnement et ressource, outils de conception, essais expérimentaux sur les composants : turbine (matériaux et contrôles, robotique), fondations (posées et flottantes), composants marins (ancrage), raccordement électrique (câbles et connecteurs), monitoring et méthodes de surveillance	Activité de R&D sur la filière depuis 15 ans (30 ans dans les EMR)	Modélisation numérique et Moyens d'essais innovants utilisés pour les tests des nouveaux concepts de fondation (fixes ou flottantes) pour l'éolien grande puissance. Site d'essais en mer (SEM-REV) raccordé au réseau : test de la 1ère éolienne offshore en France (flottante) à partir de 2017. Etudes des réseaux électriques (schéma de raccordement, composants câbles et connecteurs, gestion de l'intermittence et système de stockage d'énergie). Prédiction et suivi de la ressource et des impacts environnementaux et sociétaux (monitoring en mer, cadre réglementaire, sécurité).		x	x
Ecole des Mines	Grande école, laboratoires	Etablissement public de formation et R&D	Mécanique, matériaux, énergie, économie	R&D	Activités de R&D	Ressource, analyse de cycle de vie, marché de l'électricité	x	x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
EDF EN	Energéticien	Grand groupe	Energies renouvelables		Développement, exploitation (terrestre et en mer)	Projet éolien flottant, pales furtives en zone de restrictions radars...	x	x	x
Eiffage	Construction de fondations	Grand groupe	Energie, Projets industriels, Ouvrages d'arts, Enveloppes et façades, Projets clé en main et complexes	Construction métallique	Eiffage métal a réalisé plus de 1400 fondations pour l'éolien offshore et 20 sous-stations électriques en mer. L'entreprise se positionne comme leader sur le marché Européen.	Fondations fixes, flotteurs, sous-stations électriques dans le cadre de projets clé en main.		x	x
Enercon	Constructeur éolien	ETI		Eoliennes à entraînement direct		Bases de mâts béton fabriqués en France	x		
Engie France Renouvelables	Energéticien	Business unit d'un grand groupe énergétique	Production d'énergie d'origine renouvelable (éolien, solaire, énergies marines)	Développement, financement, construction, exploitation, maintenance	1 ^{er} producteur éolien terrestre en France en termes de capacités installées (1730 MW)	Dans tous les domaines de nos activités éoliennes, via la synergie entre nos filiales et les opportunités apportées par le digital.	x	x	x
EOLFI	Développeur	ETI			Développeur français historique	Projet éolien flottant	x		x
Eoltech	Expert ressource vent	TPE		Expert indépendant de la ressource vent	Bureau d'étude vent depuis 2002	IREC : indicateur énergétique	x		



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Epsiline	Constructeur de sondes laser à effet doppler de courte portée	Start up			Nouvel entrant	Sondes conçues pour l'installation sur la nacelle dans le but d'optimiser l'alignement de l'éolienne face au vent	x		
Epsilon Composite	Fabrication de profilés carbone	PME	Industrie, transport, énergie, sport	Fournisseur de renfort de pales	Développeur de solutions innovantes	Renfort en carbone	x	x	x
FEM	Institut de R&D	Institut	EMR	Projets de recherche collaborative	Structuration de projets de R&D entre acteurs de l'éolien en mer	– Outils et méthodes de caractérisation de site – Outils de conception des technologies pour les applications EMR – Impacts environnementaux et socio-économiques – Architecture de fermes et intégration aux réseaux		x	x
FMGC	Fonderie	ETI	Manutention, Agriculture, Plaisance, Travaux Publics. Contrepoids, ancres...	Fabrication de solutions de lestage en fonte	Nouvel entrant, développant des solutions innovantes lestage en fonte de type « couronne » ou « clump weight ».	Développement de « Couronnes en fonte » pour les fondations d'éoliennes terrestres. Développement de Clump Weight pour l'éolien en mer flottant.	x	x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Freyssinet	Construction de mâts en béton	Grand groupe	Génie Civil	Construction de tours	Acteur mature – présence sur le marché depuis 2008	Construction de tours sans grue, amortisseurs actifs	x	x	x
GE Energy connection (ex Alstom)	Equipementier	Grand groupe	GE Grid Solutions fournit des produits et des services qui maximisent l'efficacité, la fiabilité et la sécurité du réseau électrique.	Equipement HT, Contrôle & Protection, Electronique de Puissance (HVDC & FACTS), Software Solutions, Projets & Services, Etude de réseaux, Modélisation et Assistance/Conseil		Réduction du poids des plateformes de raccordement offshore	x	x	x

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
GE Renewables (ex Alstom)	Constructeur d'éoliennes	Grand groupe	Filiale d'un grand leader international de l'industrie et des technologies numériques, GE Renewables propose une gamme diversifiée d'éoliennes	De la fourniture de pièces à celle de parcs éoliens clé en main, de services de conception, de développement, d'exploitation et de maintenance.	Acteur historique notamment aux Etats-Unis, qui s'est implanté plus fortement en Europe avec le rachat d'Alstom, acteur de l'éolien terrestre nouvel entrant dans l'éolien offshore	Conception de la structure des éoliennes "Pure Torque" permettant d'éviter des efforts parasites à la boîte de vitesses. Conception avancée de l'entraînement direct "Permanent Magnet Generator (PMG)" permettant l'allègement et la compacité de la nacelle de l'éolienne offshore. Avec ses pales allégées de 73,5m, elle permet un gain de production de 15% par rapport aux technologies existantes. La conception est aussi innovante pour maximiser la disponibilité et réduire les coûts de maintenance.	x	x	x
Greensolver	Expert en gestion de parcs	PME	Eolien, Solaire	Société de services : - Exploitation - Assistance à construction - Audit technique	Expert indépendant sur le marché (nous ne détenons pas d'actifs et travaillons uniquement pour le compte de tiers)	Majoritairement des services dédiés à l'exploitation. Notre innovation passe principalement par la création de services innovants n'existant pas sur le marché	x		



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Ideol	Technologie d'éolienne flottante	PME	Néant	Design et ingénierie de fondation flottantes, ingénierie et fourniture de composants clés, ingénierie des méthodes d'installation offshore, et installation offshore	Parmi les 3 leaders mondiaux dans cette nouvelle industrie ; leader français	Fondations flottantes brevetées en rupture avec les technologies existantes Développement de systèmes et composants d'ancrage innovants Développement de méthodes d'industrialisation de fondation flottantes en béton Développement de nouveaux matériaux			x
IFP EN	Technologies offshore	EPCI		Conception de solutions technologiques et logicielles : - Caractérisation de la ressource - Dimensionnement des éoliennes - Contrôle des éoliennes et parcs éoliens - Conception de systèmes flotteurs/ancrage pour l'éolien flottant Réseau : représentant français à l'ExCO de l'IEA-Wind	Actif depuis 2011	- Conception de systèmes flotteurs/ancrages pour l'éolien flottant - Caractérisation de la ressource - Dimensionnement des éoliennes - Contrôle des éoliennes et parcs éoliens			x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Iméca (groupe REEL)	Levage offshore	PME	Ingénierie offshore		IMECA est impliqué dans des applications de levage de fortes charges	Projets d'installation d'éoliennes en mer Système de compensation de houle,	x	x	x
INSA Rouen	Grande école, laboratoires	Etablissement public de formation et R&D		R&D structures	Activités de R&D	Modélisation holistique vent-turbine-mât-fondations	x	x	
Jeumont Electric	Développement de technologie	ETI	Production d'alternateurs et de moteurs électriques		Initialement constructeur, repositionné comme fournisseur de technologie	Supraconducteurs	x	x	x
Leosphere	Constructeur de LIDARs	PME		Constructeur de LIDARs	Pionnier du développement des LIDARs		x	x	
LM Blades	Constructeur de pales	Grand groupe	Non	Conception et fabrication de pales d'éoliennes	Un des leaders mondiaux pour la conception et la fabrication de pales d'éoliennes	Structure et dimensions des pales			
Mer Agitée	Ecurie de course à la voile	PME	Nautisme	Capteurs de flux de vent	Nouvel entrant (2016)	Capteur de l'état du flux local de vent	x	x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Meteoswift	Prévisions météorologiques	Start up	Non	Prévision météo et de production éolienne (de quelques heures à quelques jours à l'avance)	Nouvel entrant / marché émergent suite à la loi de transition énergétique	Prévision de production sur-mesure, adaptée à l'usage qui en est fait, fondée sur l'intelligence artificielle. Prévision de production à partir de modèles météorologiques d'ensemble, intégrant les incertitudes associées aux prévisions	x	x	x
Nenuphar	Technologie d'éolienne flottante	Start up				Eolienne à pales verticales			x
NetWind	Maintenance de parcs	PME		Expertise, ingénierie, maintenance	Pure player de maintenance, créé en 2011		x		
Nexans	Fabricant de câbles	Grand groupe	Câbles haute tension	Modélisation et Assistance/Conseil	Un des principaux fournisseurs au niveau mondial	Câbles pour éoliennes flottantes	x	x	x
Plastinov	Fabricant de composites	PME	Industrie, nautisme	Nacelles, pales	Fabrication de pales	Extension de pales	x		
Pôles Mer	Plate-forme de recherche	Agence				Favorise l'innovation de ses adhérents		x	x

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
POMA	Constructeur éolien	ETI	Remontées mécaniques pour les sports d'hiver, transport urbain...	Assemblage d'éoliennes terrestres	Premier constructeur d'éoliennes terrestres multi-MW en France	Assemblage d'éoliennes terrestres en France	x		
Powersea	Ingénierie connecteur drymate	Start up	Connectique sous-marine éolien flottant / hydrolien / houlomoteur	Fabrication de connecteurs hybrides « wetmate » et « drymate »	Start up	Connecteur hybride de forte puissance combinant moyenne tension, basse tension, et fibres optiques		x	x
PRINCIPIA	BE structures offshore	PME				Logiciels de calcul		x	x
QOS Energy	Système de gestion de production d'énergie	Start up	Autres secteurs énergétiques dont solaire	Monitoring et à la gestion de performance des installations de production, de stockage et de gestion de l'énergie		Analyses permettant de détecter immédiatement les pertes de rendement et sous-performances	x		
Quadran	Développeur	ETI			Développeur historique	Eolien flottant			
Rollix Defontaine	Constructeur de roulements	PME		Roulements de grande dimension	Industriel français très présent à l'export	Roulements de grande dimension	x	x	x
SAIPEM	Ingénierie offshore	Grand groupe	Ingénierie pour l'industrie pétrolière et gazière	Ingénierie de structures offshore		Conception de structures gravitaires de grande dimension		x	x

Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
SEREEMA	Boitiers diagnostic	Start up	Néant	Services de monitoring et d'analyse de fonctionnement	Nouvel entrant (2016)	Système intégré de capteurs intelligents permettant d'optimiser le pilotage et la maintenance des éoliennes	x		
Siemens	Constructeur éolien	Grand groupe	Electrification, automatisation et digitalisation	Acteur de la filière en tant que turbinier, fournisseur des composants, actif sur le lot raccordement	Turbine, raccordement, composants	Siemens a investi 4,8 milliards d'euros dans des activités de R&D en 2016	x	x	x
General Cable France	Fabricant de câbles	Grand groupe	Câbles haute tension	Câbles terrestres et maritimes	Un des fournisseurs principaux au niveau mondial	Technologie de câbles à isolation synthétique en Courant Continu aussi bien qu'en alternatif	x		
STX	Constructeur naval	Grand groupe	Construction de navires pour les croisières ou le domaine militaire.	Conception, construction, installation et maintenance de plateformes de raccordement en mer. Conception et construction de fondations (jackets et flotteurs).	Acteur établi au niveau européen pour les plateformes de raccordement en mer, les fondations et les études d'ingénierie et d'industrialisation.	Conception allégée des plateformes. Conception de fondations optimisées (jackets et flotteurs).		x	
Technip	Ingénierie offshore	Grand groupe	Ingénierie pour l'industrie pétrolière et gazière	Ingénierie	Actionnaire de DCNS Energies	Energies marines		x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Tensyl	BE composites	PME	bureau d'ingénierie spécialisé dans les structures mettant en œuvre partiellement ou totalement des matériaux composites, présent dans les secteurs suivants : Aéronautique, Défense, Ferroviaire, Naval, Industrie générale	Activités : bureau d'ingénierie, maîtrise d'œuvre Domaine : Conception, Certification, remise à jour de parc.	20 ans d'expérience dans le domaine du composite et 6 dans l'éolien.	Prédiction de durée de vie, revamping de machine.	x	x	x
Valorem	Développeur exploitant - Maintenance prédictive, Condition monitoring system	PME	Autres ENR : photovoltaïque, hydroélectricité, EMR	Activités d'exploitation d'une part, de maintenance et de prestations techniques.	Plus de 10 ans d'expérience dans la gestion technique d'actifs. Les activités de VALEMO couvrent environ 8% des turbines installées en France.	Maintenance conditionnelle - Surveillance continue des éoliennes	x	x	x



Société	Domaine	Structure	Activités hors éolien	Activités dans l'éolien	Positionnement dans l'éolien	Activités innovantes	Terrestre	Posé	Flottant
Vestas	Constructeur d'éoliennes	Grand groupe		Constructeur d'éoliennes	Leader historique	Eolienne maritime de 9,5 MW. Un prototype d'éolienne « multi rotors » munie de 4 rotors installés sur un mât acier a vu le jour en avril 2016 (projet R&D non commercialisable à ce jour). Un concept de tour équipé de 3 haubans à mi-hauteur a été pour la première fois installé sur un site test au Danemark. Ce nouveau concept permet de diminuer drastiquement la quantité d'acier nécessaire à la fabrication des tours de grandes hauteurs (150 m). Développement de solutions dite hybrides (éolien + solaire + stockage).	x	x	x
WPD	Développeur	Grand groupe			Développeur terrestre et en mer, partenaire d'EDF EN sur des projets français d'éolien en mer		x	x	

8.2. Vue d'ensemble des innovations et l'intérêt des acteurs français

Le Tableau 5 présente des innovations pour lesquelles les acteurs français significatifs innoveront et/ou développent une expertise.

Tableau 5: Tableau synthèse de la capacité d'innovation des acteurs français par innovation

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Acteurs français innovants sur ce segment	Expertise française disponible (liste non exhaustive)
1	Développement	Optimisation multicritère des implantations des parcs éoliens	Eolfi avec Abysscad, CAPSIM, INNOSEA et ECN (Nantes); IFP EN, Principia	Développeurs éoliens
2	Développement	Amélioration de la caractérisation et de la modélisation des ressources, y compris l'amélioration de la modélisation des terrains complexes et des forêts pour les sites terrestres	Leosphère, CORIA	INRIA
3	Développement	Utilisation croissante et amélioration des stations météorologiques flottantes	Leosphère, NKE Instrumentation, EOLFI	
4	Développement	Approfondissement des études géophysiques et géotechniques	IFREMER	BRGM
5	Développement	Optimisation pendant l'ingénierie détaillée d'avant-projet	EDF EN, Engie, grands développeurs	GE-Alstom, Adwen
6	Développement	Réduction de la profondeur d'enfouissement des câbles		Travocéan (Louis Dreyfus Armateurs), Geocœan (Vinci)
7	Développement	Amélioration de la modélisation des conditions de la mer	France Energie Marine	IFREMER, ECN
8	Rotor	Amélioration de l'aérodynamique et de l'aéroélasticité des pales	LM, Astrium, Chomarat, CORIA	INRIA
9	Rotor	Optimisation de la commande de l'orientation des pales	GE - Alstom, Adwen	
10	Rotor	Amélioration apportées aux matériaux et à la fabrication des pales (y compris le potentiel d'augmentation de la taille des rotors en résultant)	IRT Jules Verne, CANOE, Arkema, Chomarat, Tensyl	Plastinov
11	Rotor	Amélioration de la vitesse de pointe de pale	GE, Adwen, Astrium (Airbus)	

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Acteurs français innovants sur ce segment	Expertise française disponible (liste non exhaustive)
12	Rotor	Amélioration des normes et processus de conception des pales	LM, Astrium, Plastinov, Tensyl	
13	Rotor	Mesure du vent entrant	Leosphère, Avenisense, Epsiline, IFP EN, Mer agitée	
14	Rotor	Contrôle aérodynamique actif sur les pales		GE, LM, Airbus, Adwen
15	Rotor	Améliorations des composants (rotor et moyeu)	LM, Airbus	
16	Rotor	Nouveaux concepts de pale (y compris les pales furtives)	LM, Airbus, Thomson CSF, Nenuphar	
17	Nacelle	Amélioration des tests de vérification des nacelles en atelier		GE, Adwen
18	Nacelle	Améliorations des composants de la nacelle (à l'exception du système de transmission)	GE, Adwen, Rollix-Desfontaines	
19	Nacelle	Outils avancés d'optimisation pour les éoliennes	IFP EN, Principia	Dassault Systèmes
20	Nacelle	Nouvelles plateformes d'éoliennes plus puissantes	GE, Adwen, Rollix-Desfontaines	
21	Nacelle	Optimisation du contrôle-commande des éoliennes	GE, Adwen, Sereema	
22	Nacelle	Améliorations des boîtes de vitesses (à moyenne et à grande vitesse)	GE, Adwen	DCNS
23	Nacelle	Améliorations des générateurs à entraînement direct	GE, Jeumont, DDIS	
24	Nacelle	Nouveaux systèmes de transmission et génératrices	GE, Adwen, Jeumont	DCNS
25	Nacelle	Amélioration des convertisseurs et transformateurs	GE Power conversion	
26	Nacelle	Système de distribution à courant continu (DC) (de l'éolienne au poste de raccordement offshore)	GE Renewables, GE Power conversion, Nexans, General Cable	
27	Nacelle	Introduction de nouvelles configurations de turbines : turbines à axe vertical, turbines à deux pales, rotors multiples, éoliennes sous le vent...	Nenuphar, Eolfi, DCNS	

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Acteurs français innovants sur ce segment	Expertise française disponible (liste non exhaustive)
28	Fondations	Amélioration de la fabrication des monopieux	Eiffage (Smulders Projects Belgium NV), Dillinger France	DCNS (mise en forme de tôles de 200 mm d'épaisseur, soudage sous vide), Entrepose projects (CMP Dunkerque), STX
29	Fondations	Amélioration du flotteur et des amarres des éoliennes flottantes	DCNS, Idéol, IFP EN, Eiffage	Technip, SAIPEM
30	Fondations	Tours treillis en acier	GE Renewables	Francéole, Eiffage
31	Fondations	Amélioration de la conception des fondations et des normes de conception	GE, Adwen, STX, Technip	
32	Fondations	Amélioration des câbles dynamiques	Nexans, General Cable	IFPEN, DCNS Energies, Technip, SAIPEM
33	Fondations	Nouveaux matériaux pour les amarrages	IFPEN, DCNS Energies, Technip, SAIPEM	IRT Jules Verne
34	Fondations	Design holistique de la structure	GE, Adwen, INSA Rouen	Francéole
35	Fondations	Nouveaux matériaux pour les tours	Freyssinet, CTE Wind, SETEC	Lafarge
36	Raccordement électrique	Développement de la transmission en courant continu sur de longues distances	GE Grid Solutions	
37	Raccordement électrique	Réduction du poids des postes de transformation en mer	GE Grid Solutions, STX, Engie (Fabricom)	
38	Raccordement électrique	Améliorations des standards de câbles inter éoliennes et des spécifications client	Nexans, General Cable	
39	Raccordement électrique	Haute tension en sortie des éoliennes jusqu'au poste en mer	GE, Adwen, Nexans, General Cable	
40	Raccordement électrique	Matériau alternatif au cuivre dans les câbles	Nexans, General Cable, EDF EN	
41	Raccordement électrique	Sous-stations flottantes / auto-installées		Technip, IFPEN, STX
42	Installation	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques et océaniques pour l'installation des fondations d'éoliennes en mer	EDF EN	STX France

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Acteurs français innovants sur ce segment	Expertise française disponible (liste non exhaustive)
43	Installation	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques des techniques d'installation des éoliennes	Freyssinet	IMECA
44	Installation	Amélioration du processus d'installation du monopieu (y compris les performances sonores)		EDF EN
45	Installation	Fondations gravitaires en béton pouvant être déplacées par flottaison	EDF EN	Freyssinet (Vinci), Eiffage, Bouygues
46	Installation	Installation par flottaison / remplissage de la turbine et de la fondation, réversible pour le démantèlement	Freyssinet, EDF EN, Adwen	Technip, SAIPEM
47	Installation	Amélioration de l'installation des câbles	TravOcean	Geocéan
48	Installation	Utilisation de bateaux de transport des éléments d'éoliennes permettant de dédier les jacks-up à l'installation des turbines		STX France, LD Armateurs
49	Installation	Installation en un seul levage d'une turbine montée à terre, potentiellement avec une partie de sa fondation.	Iméca	
50	Installation	Amélioration de la conception des véhicules de transport pour l'accès au site		Volvo Trucks
51	Installation	Amélioration de la planification de la construction	EDF EN, Engie, développeurs	
52	Installation	Amélioration de l'installation des postes de transformation en mer		STX, Engie (Fabricom), GE Grid Solutions
53	Installation	Amélioration du processus de démantèlement de la turbine	Freyssinet, EDF EN, Adwen	EDF EN, Engie
54	Exploitation Maintenance	Développement de la maintenance conditionnelle et de stratégies de maintenance holistique	CETIM, ACOEM, SEREEMA	
55	Exploitation Maintenance	Système de commande des éoliennes intégré à l'échelle du parc éolien	GE, Adwen	

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Acteurs français innovants sur ce segment	Expertise française disponible (liste non exhaustive)
56	Exploitation Maintenance	Amélioration des prévisions météorologiques	Meteo*swift	MétéoFrance, RTE
57	Exploitation Maintenance	Amélioration de la gestion des stocks		RFID Aéro
58	Exploitation Maintenance	Amélioration de la surveillance de l'état des fondations		
59	Exploitation Maintenance	Amélioration de la stratégie d'exploitation et de maintenance pour les parcs éoliens en haute mer	GE, Adwen, EDF EN	
60	Exploitation Maintenance	Amélioration du transfert de personnel de la base à l'emplacement de la turbine et du bateau de transfert à la turbine	CNIM, LD Armateurs, EDF EN, Iméca	Bourbon
61	Exploitation Maintenance	Solutions d'exploitation et de maintenance à distance et automatisées	EDF EN, Engie, Valorem, CETIM, SEREEMA, QOS Energy	
62	Exploitation Maintenance	Optimisation des inspections et des réparations de pales	Cornis, Pro Drone	Héliopale
63	Exploitation Maintenance	Améliorations de la connexion et de la déconnexion des structures flottantes	Comex, EDF EN, Nexans, PowerSea, SubSea tech	SILEC
64	Exploitation Maintenance	Facilité d'installation et de remplacement pour les structures flottantes	Idéol, IFP EN, Eiffage, Eolfi	Technip, IFP EN, SAIPEM, TOTAL

9. Stratégie d'innovation

9.1. Identification des opportunités d'innovations

Le Tableau 7 classe les innovations selon l'opportunité qu'elles représentent pour le marché français. Le classement a été réalisé selon la combinaison des critères suivants :

- l'impact anticipé sur la réduction du LCOE (étant l'importance de ce critère, il est pondéré d'un facteur 2) ;
- l'existence d'acteurs français sur le marché concerné ;
- les synergies possibles entre les filières (terrestre, en mer posé et flottant) ;
- la menace que représentent les innovations pour la chaîne de valeur existante ;
- la maturité commerciale des innovations.

La grille de notation du Tableau 6 explique le système de notation utilisé. Les dix-huit innovations obtenant une note globale supérieure à 18 sont dans le Tableau 7, le reste des innovations est décrit dans le Tableau 12 en annexes.

Tableau 6 : Grille des critères de notation des innovations

#	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menace	Maturité commerciale
1	Innovations de rang 49 à 64 en termes de réduction de coût (inférieure à 0,07%) *	Pas d'acteur français identifié	L'innovation est une innovation spécifique à une filière uniquement	L'innovation a un impact neutre sur la chaîne de valeur existante	L'horizon d'application de l'innovation à échelle commerciale en 2030
2	Innovations de rang 37 à 48 en termes de réduction de coût (entre 0,07% et 0,20%) *	Un acteur français présent sur le segment mais n'ayant pas la taille critique	L'innovation est une innovation spécifique à la filière de l'éolien en mer uniquement	L'innovation a un impact faible sur la chaîne de valeur existante	L'horizon d'application de l'innovation à échelle commerciale en 2025
3	Innovations de rang 25 à 36 en termes de réduction de coût (entre 0,20 % et 0,60%) *	Un acteur présent sur le segment avec des capacités et présents sur le marché mais qui n'innove pas	L'innovation est applicable transversalement dans les trois filières éoliennes	L'innovation représente un risque moyen à la chaîne de valeur existante	L'horizon d'application de l'innovation à échelle commerciale en 2020
4	Innovations de rang 13 à 24 en termes de réduction de coût (entre 0,6% et 1,4%) *	Un ou plusieurs acteurs présents sur le segment, innovant et leader sur le marché français et à l'export avec une innovation applicable	L'innovation est applicable au travers de la filière éolienne et a le potentiel d'être appliquée en retrofit aux capacités installées	L'innovation représente un risque majeur à la chaîne de valeur existante	NA
5	Les 12 innovations apportant la plus forte réduction de coût (supérieure à 1,4%) *	NA	NA	NA	NA

* moyenne entre les 3 filières terrestre, en mer posé et flottant

Tableau 7 : Tableau de synthèse de l'attractivité des innovations pour le marché français (partie 1)

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menaces	Maturité commerciale	Opportunité globale
10	Rotor	Améliorations apportées aux matériaux et à la fabrication des pales (y compris le potentiel d'augmentation de la taille des rotors en résultant)	5	3	4	3	3	23
5	Développement	Optimisation pendant l'ingénierie détaillée d'avant-projet	5	3	3	3	3	22
54	Exploitation Maintenance	Développement de la maintenance conditionnelle et de stratégies de maintenance holistique	4	4	4	3	3	22
62	Exploitation Maintenance	Optimisation des inspections et des réparations de pales	4	4	4	3	3	22
9	Rotor	Optimisation de la commande de l'orientation des pales	5	2	4	2	3	21
17	Nacelle	Amélioration des tests de vérification des nacelles en atelier	5	2	3	3	3	21
20	Nacelle	Nouvelles plateformes d'éolienne plus puissantes	5	3	3	3	2	21
21	Nacelle	Amélioration de la conception du contrôleur (y compris la stratégie de coupure et de redémarrage, le contrôle de l'orientation de la nacelle en lacet, le contrôle du convertisseur de puissance, le contrôle de la vitesse et l'inertie synthétique)	4	3	4	3	3	21
23	Nacelle	Améliorations des systèmes de transmission à entraînement direct	5	3	3	3	2	21

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menaces	Maturité commerciale	Opportunité globale
60	Exploitation Maintenance	Amélioration du transfert de personnel de la base à l'emplacement de la turbine et du bateau de transfert à la turbine	5	3	2	3	3	21
1	Développement	Optimisation multicritère des implantations des parcs éoliens	5	2	3	2	3	20
25	Nacelle	Amélioration des convertisseurs et transformateurs	4	3	3	3	3	20
7	Développement	Amélioration de la modélisation des conditions de la mer	5	3	2	2	2	19
22	Nacelle	Améliorations des boîtes de vitesses (à moyenne et à grande vitesse)	4	3	3	2	3	19
29	Fondations	Amélioration du flotteur et des amarres des éoliennes flottantes	5	4	1	2	2	19
31	Fondations	Amélioration de la conception des fondations et des normes de conception	5	3	1	2	3	19
43	Installation	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques des techniques d'installation des éoliennes	4	2	3	3	3	19
51	Installation	Amélioration de la planification de la construction	3	4	3	3	3	19

9.2. Synthèse de la stratégie d'innovation

La filière éolienne française part avec des handicaps connus, liés au soutien tardif à son essor : pour l'éolien terrestre, l'absence d'un grand constructeur implanté en France, un marché arrivé à maturité en Europe en termes de capacités de production ; pour l'éolien en mer, une filière bien développée avec une forte expérience acquise par les acteurs d'Europe du Nord, l'absence de candidats français pour la construction de monopieux et de mâts complets ou d'opérateurs de barges d'installation. A terme, les acteurs industriels qui se positionnent en France dans l'éolien courent certains risques de se voir marginaliser dans une compétition très féroce où comptent la capacité à se déployer vers les marchés émergents, à proposer rapidement de nouvelles plateformes toujours plus puissantes dans l'éolien en mer en s'appuyant sur une forte expérience pour maîtriser les risques techniques, de pouvoir

s'appuyer sur un marché national fort, et d'être pénalisés par des facteurs de compétitivité (charges, impôts, flexibilité réduite) souvent à leur désavantage.

Cependant la filière française peut aussi s'appuyer sur des atouts importants : de grands projets industriels de conception et de fabrication d'éoliennes pour les parcs en mer, de nombreux développeurs et exploitants dynamiques qui se sont déployés à l'international, des fournisseurs compétitifs et innovants, de nombreuses structures de coopération régionales ou d'envergure nationale, des structures scientifiques et de recherche et développement de premier plan. Les appels d'offres en mer font l'objet d'une forte mobilisation, des projets pilotes en éolien flottant placent la France à la pointe de l'état de l'art sur ce segment. Enfin, la filière peut mettre à profit les capacités de pointe dans des industries connexes : aéronautique, naval, automobile, etc. L'innovation est la principale clef pour développer la filière et répondre aux défis du futur.

Les innovations sont portées suivant les cas par les grands constructeurs d'éoliennes ou de structures maritimes, par de petits acteurs innovants ou par des organismes scientifiques.

Le plus fort potentiel de réduction des coûts (de 8% en terrestre à 16% en mer) réside dans l'augmentation de la taille des éoliennes : rotors toujours plus grands, vitesse de pointe de pale accrue, nouvelles plateformes plus puissantes produisant des économies d'échelle importantes, indispensables dans la compétition renforcée sur des mécanismes d'appels d'offres plus compétitifs.

Mais il y a aussi de gros potentiels dans les segments tels que la maintenance et l'exploitation, les fondations, l'installation ou le raccordement en mer.

La typologie des innovations est variée. Certains sujets concernent des fournitures innovantes à l'ensemble des acteurs, d'autres sujets sont au cœur de la compétitivité future des grands industriels sur un marché très compétitif. Les grands énergéticiens doivent quant à eux s'assurer de maîtriser des risques parfois très importants sur l'ensemble de la durée de vie du projet.

Les innovations importantes pour la filière ont globalement une maturité avancée : il s'agit plus de travailler à leur mise en œuvre que de porter leur développement très en amont. Le rôle des grands donneurs d'ordre est crucial à ce stade : il s'agit d'évaluer les risques et les actions qui peuvent les sécuriser, et de piloter les projets de démonstration à petite ou grande échelle. Il est utile de discuter les modalités de soutien pour trouver les bons mécanismes, pour que le risque puisse être réduit pour l'investisseur privé, en échange de retours éventuels pour la puissance publique (remboursement d'avance, part de capital, etc.).

Les opportunités de développement sont importantes, on peut préconiser différents axes pour soutenir la filière :

Pour les acteurs publics :

Accompagnement

- Financer des projets de démonstration, en priorité sur des innovations suffisamment matures
- Coordonner la recherche entre les différents organismes publics et privés pour éviter les doublons et vérifier le bon ciblage des priorités, en perspective avec les avancées des autres pays
- Susciter les partenariats de recherche collaborative sur les innovations importantes là où ils ne sont pas suffisants, notamment en mobilisant la recherche publique
- Améliorer les mécanismes de financement de l'innovation et le partage des risques du développement de l'innovation, notamment en augmentant le volume de subventions qui permet d'augmenter le budget de R&D des entreprises
- Lancer des appels à projets ouverts ciblant l'innovation dans l'éolien pour renforcer la capacité à l'innovation dans l'écosystème industriel

- Stimuler le co-financement avec d'autres organismes financeurs comme les fonds régionaux et les fonds européens

Montée en compétence

- Susciter un tutorat de PME par de grandes entreprises de secteurs connexes
- Favoriser les coopérations et transferts de technologie avec d'autres industries de pointe (aéronautique, naval, robotique ...)

Planification et réglementation

- Développer à l'avance des secteurs de développement en mer pour disposer suffisamment tôt de zones techniquement bien caractérisées où des appels d'offres peuvent être lancés dans des délais rapides, afin que les plateformes les plus récentes puissent être mises en œuvre en France.
- Réserver aux projets innovants quelques emplacements dans le développement des grands parcs en mer et à terre
- Donner des signaux de visibilité à long terme aux marchés : feuilles de route, plans, consensus politiques
- Anticiper la préparation des moyens d'essai, à commencer par les moyens de test des grands sous-systèmes

Pour les acteurs privés :

Coopération

- Renforcer les coopérations et transferts de technologie avec d'autres industries de pointe (aéronautique, naval, robotique...)
- Renforcer les partenariats de recherche collaborative sur les innovations importantes là où ils ne sont pas suffisants

Montée en compétence

- Mettre en place un tutorat de PME par de grandes entreprises de secteurs connexes

Partager une stratégie de long terme

- Anticiper la préparation des moyens d'essai, à commencer par les moyens de test des grands sous-systèmes
- Lors des appels d'offres pour la réalisation et l'installation des éoliennes, ouvrir la possibilité de proposer des alternatives innovantes comprenant des négociations de cahiers des charges : « on a besoin d'un travail d'optimisation entre l'ensemble des dimensions, qui est rendu complexe par la contractualisation.
- Développer les synergies possibles entre filières pour qu'une innovation développée sur un créneau puisse aussi se développer sur d'autres : par exemple, encourager le développement d'une innovation terrestre qui pourra avoir une application en mer avec un impact important.

La mise en œuvre de ces axes de progrès sur les innovations principales fournira le soutien le plus efficace à la filière pour les années à venir, qui seront décisives pour son avenir.

Annexe A : Méthodologie LCOE

A.1 Définition et contexte

Notre définition du coût actualisé de l'énergie (ou LCOE ou Coût de l'énergie) est le revenu requis (quel qu'en soit la source) pour obtenir un taux de retour sur investissement égal au taux d'actualisation (aussi appelé le CMPC (Coût Moyen Pondéré du Capital) sur la vie du parc éolien. Les impôts et taxes ainsi que l'inflation ne sont pas modélisés. La définition technique est :

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

où les abréviations suivantes représentent :

LCOE le coût actualisé de l'énergie – (Levelized Cost Of Energy)

I_t les dépenses d'investissement pour l'année t

M_t les dépenses d'exploitation et de maintenance de l'année t

E_t la production d'énergie dans l'année t

r le taux d'actualisation

n la durée de vie du projet.

A.2 Définition des termes

Les définitions proposées pour chaque terme sont présentées dans le Tableau A.1. Ceux-ci sont compatibles avec la plupart des autres analyses détaillées qui ont été publiées.

Tableau 8 Définition des termes

Type de coût	Domaine d'innovation associé	Élément de coût	Définition	Unité de mesure
DEVEX	Développement	Le développement de projet	Développement et obtention des autorisations à la charge du maître d'ouvrage jusqu'à la date de première mise en service (DPMS). Comprend : • les activités internes et externes telles que les études environnementales et de la faune, l'étude de vent avec un mât (y compris la construction) et les études de planification jusqu'à la FID • d'autres enquêtes sur le terrain et des enquêtes après FID • études d'avant-projet détaillé (Front End Engineering Design - FEED) • les études environnementales pendant la construction • la gestion de projet (travaux entrepris ou contracté par le développeur jusqu'à leur finalisation)	€/MW

			• les autres services administratifs et professionnels tels que la comptabilité et les conseils juridiques, et • tous les acomptes et arrhes aux fournisseurs. Sont exclues : • l'assurance de la phase construction • la gestion de projet propre aux fournisseurs	
CAPEX	Rotor	Rotor	Paiement du fabricant d'éoliennes pour la fourniture du rotor et de ses sous-composants : pales et moyeu. Ceci inclut la livraison au site terrestre ou au port le plus proche du fournisseur, 5 ans de garantie et les coûts de mise en service. Il exclut tout coût d'OPEX ou R&D.	€/MW
	Nacelle	Nacelle	Paiement du fabricant d'éoliennes pour la fourniture de la nacelle et les systèmes électriques de l'éolienne au point de connexion du poste de raccordement. Ceci inclut la livraison au site terrestre ou au port le plus proche du fournisseur, 5 ans de garantie et les coûts de mise en service. Il exclut tout coût d'OPEX ou R&D.	€/MW
	Fondation	Mât	Comprend le paiement au fabricant d'éoliennes pour l'approvisionnement de la tour. Ceci inclut la livraison au site terrestre ou au port le plus proche du fournisseur, 5 ans de garantie et les coûts de mise en service. Il exclut tout coût d'OPEX ou R&D.	€/MW
		Fondations	Le paiement aux fournisseurs pour la fourniture de la fondation comprenant la fondation (incluant, dans le cas le plus courant en mer, le monopieu, la pièce de transition et le travail de l'acier secondaire tels que tubes en J, l'accès du personnel, des échelles et des plateformes). Cela comprend également le flotteur et les systèmes d'ancrage associés à la structure flottante. Comprend : • La livraison au site terrestre ou au port le plus proche pour le fournisseur • La garantie Sont exclus : • Le mât • Les coûts d'exploitation et maintenance • Les coûts de R&D	€/MW
	Raccordement électrique	Réseau électrique interne	Comprend : • La livraison des câbles et de la station de raccordement au port le plus proche pour le fournisseur	€/MW

			• La garantie Sont exclus : • Les coûts d'installation • Les coûts éventuels de protection des câbles • Les coûts d'exploitation et maintenance • Les coûts de R&D	
		Raccordement au réseau	Comprend la fourniture et l'installation : • du câblage sous-marin du poste raccordement en mer jusqu'à terre, • du poste de raccordement en mer, Le coût du raccordement au réseau est exclu pour les sites terrestres	€/MW
	Installation	Installation	Comprend : • pour les sites en mer, le transport de tous les éléments depuis le port le plus proche de chaque fournisseur • Le travail de pré-assemblage terminé dans le port de construction avant que les composants soient transportés en mer • Tous les travaux d'installation des fondations, des turbines et des câbles de réseau interne. • La mise en service pour tous les éléments exceptée la turbine (y compris les dommages après mise en service) • La pose de protections contre l'érosion (pour la fondation et le réseau de câble) La pose de tapis de protection des câbles sous-marins, etc., selon les besoins • Assurance pendant la phase de construction jusqu'à la mise en service, y compris tous les risques de construction et de dommages de tiers Sont exclus : • l'installation de câbles et du poste de transmission offshore	€/MW
	Tous les domaines	Couverture du risque	Provision pour les risques et les aléas pendant la construction du projet	€/MW
DECEX	Installation	Démantèlement	Comprend : • Les travaux de planification et de conception de tout équipement supplémentaire requis • la désinstallation de la structure de la turbine et de soutien pour répondre aux obligations légales	€/MW

			des travaux supplémentaires et les études environnementales	
OPEX	Exploitation et Maintenance	Exploitation et maintenance préventive	Démarre une fois que la première turbine est mise en service. Comprend : - Les coûts relatifs à l'exploitation au jour le jour du parc éolien, y compris les coûts des installations portuaires, des bâtiments et du personnel en contrat de long terme. - La surveillance de l'état opérationnel. - Les inspections d'entretien préventif prévues, la sécurité et l'hygiène - L'assurance de phase opérationnelle	€/MW/an
		Maintenance corrective	Démarre une fois que la première turbine est mise en service Comprend un service réactif en réponse à aux pannes non planifiées des systèmes dans la turbine ou des systèmes électriques.	€/MW/an
		Autres coûts d'exploitation	Les autres OPEX couvrent des éléments de coûts posés qui ne sont pas affectés par les innovations technologiques, notamment : - Loyer du terrain ou de la concession - Contributions locales, mesures compensatoires, ... - Le suivi de l'impact environnemental local du parc éolien. - Assurance phase opérationnelle	
		Maintenance du raccordement	Comprend l'exploitation du système de raccordement. - Maintenance préventive et corrective des câbles des raccordements électriques - Frais de réseau	€/MW/an
Production annuelle d'énergie	Tous les domaines	Production brute	Productible brut moyen sur la durée de vie de parc éolien en sortie des turbines. Exclut les pertes de sillage aérodynamiques, les pertes de réseau électriques et autres pertes. Comprend les ajustements de densité de l'air du site de la courbe de puissance de la turbine standard.	MWh
		Pertes de production	Comprennent : - les pertes d'énergie à partir des hystérésis de démarrage et d'arrêt, la dégradation de la courbe de puissance, et la perte de performance de puissance. - Les pertes de sillage. - Les pertes de réseau électrique au point de comptage en mer	%

			• Les pertes dues à un manque de disponibilité des équipements du parc éolien	
			Exclut les pertes de transmission.	
		Production nette	Productible net moyen sur la durée de vie du parc éolien au point de comptage (en mer : à l'entrée du poste de raccordement).	MWh

A.3 Hypothèses de sites types

Les coûts de base et l'impact des innovations sont fondés sur les hypothèses suivantes.

A.3.1 Hypothèses globales

- Prix réels 2016
- Autres prix des produits de base fixés à la moyenne pour 2016
- Les taux de change Euro à GBP fixés à la moyenne du T3-2016 (soit £ 1,00 = 1,1 €)
- Les prévisions de nouvelles capacités éoliennes installées sont fondées sur une "vision moyenne" des attentes du marché
- La date considérée est toujours celle de la mise en service des projets.

Tableau 9 : Paramètres des sites de références

Site	Moyenne de vitesse de vent à 100m (m/s)	Taille de projet (MW)	Taille de turbine - mise en service 2016 (MW)	Taille de turbine - mise en service 2020 (MW)	Taille de turbine - mise en service 2025 (MW)	Taille de turbine - mise en service 2030 (MW)	Profondeur moyenne (m)	Distance au port (km)	Distance au point de raccordement (km)	Durée de vie (année)
Terrestre	7	16	2	3	3,7	4	0	0	0	20
En mer posé	9	500	6	6	9	12,5	30	30	30	25
Flottant	9	500	NA	6	9	12,5	80	30	30	25

Tableau 10 : Hypothèses de financement et de durées de vie

	année	éolien terrestre	éolien en mer posé	éolien flottant
CMPC	2016	5,5%	10,0%	12,0%
	2020	5,5%	9,0%	10,5%
	2025	5,5%	8,0%	9,0%
	2030	5,5%	7,0%	7,5%
Durée de vie	2016	20	20	20

	année	éolien terrestre	éolien en mer posé	éolien flottant
	2020	25	25	25
	2025	27	27	27
	2030	30	30	30

Tableau 11 : Evolution des hypothèses de fondations et du réseau électrique

	Site	Mise en service 2016	Mise en service 2020	Mise en service 2025	Mise en service 2030
Fondations	En mer posé	Monopieu	Monopieu, fondation gravitaire	Monopieu, fondation gravitaire, jacket	Monopieu, fondation gravitaire, jacket
Réseau électrique interne	Terrestre	33 kV, HVAC	33 kV, HVAC	33 kV, HVAC	33 kV, HVAC
	En mer posé	33 kV, HVAC	66 kV, 33 kV HVAC	66 kV, HVAC	66 kV, HVAC
	Flottant	33 kV, HVAC	66 kV, 33 kV HVAC	66 kV, HVAC	66 kV, HVAC

A.3.2 Hypothèses des parcs éoliens terrestres

Hypothèses générales

Les hypothèses générales sont les suivantes :

- Un parc éolien de 16 MW
- Les turbines sont espacées de neuf diamètres de rotor (sous le vent dominant) et de six diamètres de rotor (perpendiculairement au vent dominant) dans un rectangle
- Les coûts de développement et de construction sont entièrement financés par le promoteur du projet
- Une approche multi-contractuelle est utilisée pour les contrats de construction.

Profil de dépense

Année	-5	-4	-3	-2	-1	0
Proportion de CAPEX dépensé					20%	80%

L'année 1 est définie comme la première année complète de production d'énergie.

Régime météorologique

- La vitesse du vent de la hauteur du moyeu est de 7 m / s
- Un exposant au cisaillement du vent de 0,10
- Une température moyenne annuelle moyenne de 10°C

Turbine

- Les hypothèses de l'éolienne sont :
- La turbine est certifiée Classe III à la conception internationale de la conception d'éoliennes offshore IEC 61400-3
- Turbine nominale 2 MW
- Diamètre du rotor de 90 m
- Hauteur du moyeu de 90 m
- Les turbines de base ont des réducteurs à faible rapport et des générateurs de courant alternatif moyenne tension.

Fondations

- La fondation de référence est une dalle de béton avec armature en acier coulée dans de bonnes conditions de sol (pression d'appui, composition chimique, etc.).

Réseau électrique

- Le composant électrique de réseau se compose d'un câble à trois conducteurs à 33 kV.

Raccordement au réseau

- Le système de transmission suppose un point de raccordement au réseau à moins de 5 km du site.

Installation

Les hypothèses d'installation sont :

- Le transport est effectué en juste à temps, sans zones d'attente importantes sur le site, et
- La construction est effectuée séquentiellement pour chaque éolienne avec mât, nacelle et rotor installés en une seule visite

Opérations et maintenance

Les opérations et la maintenance n'ont pas d'éléments CAPEX.

Démantèlement

- Le démantèlement inverse le processus d'assemblage pour aboutir à la remise à disposition du site à l'état naturel. La fondation est arasée pour laisser 1m de terre en surface, et les câbles sont retirés. Un bilan environnemental est mené à la fin. La valeur résiduelle et le coût de mise au rebut ou au recyclage sont considérés équivalents.

A.3.3 Hypothèses des parcs éoliens en mer posés

Description générale

- Un parc éolien de 500 MW
- Les turbines sont espacées de neuf diamètres de rotor (sous le vent dominant) et de six diamètres de rotor (perpendiculairement au vent dominant) dans un rectangle
- Un parc éolien certifié pour une durée de vie opérationnelle de 25 ans en 2020, et 30 ans en 2030.
- Le point le plus bas du balayage du rotor est d'au moins 22 mètres au-dessus du point d'eau moyen
- Les coûts de développement et de construction sont entièrement financés par le promoteur du projet et
- Une approche multi-contractuelle est utilisée pour les contrats de construction.

Profil de dépense

Année	-5	-4	-3	-2	-1	0
Proportion de CAPEX dépensé			6%	10%	34%	50%

L'année 1 est définie comme la première année complète de production d'énergie.

Régime météorologique

- Un exposant de cisaillement du vent de 0,12
- La vitesse du vent de la distribution selon la loi de Rayleigh
- Une température moyenne annuelle moyenne de 10° C
- La marée est de 4m
- Les Hs de 1,8 m ne sont jamais dépassés sur plus de 25% des jours sur les sites les plus éloignés du site de rivage, et
- Aucune tempête n'est envisagée.

Turbine

- La turbine est certifiée selon la classe IA de la norme internationale IEC 61400-3 de conception de turbines éoliennes offshore.
- Les turbines de base ont un rotor de 150 m de diamètre et une capacité de 6 MW.

Fondations

- Les conditions de sol sont de 10 m de sable dense sur 15 m d'argile rigide, avec de rares zones de pression faible, avec présence de blocs ou avec des gradients significatifs.

Réseau de câble interne

- L'hypothèse du câble inter-éolien est que l'on utilise un courant alternatif de 33 kV sur des cordons entièrement flexibles, c'est-à-dire avec la possibilité d'isoler une turbine individuelle.

Raccordement au réseau

• Les coûts de transport sont comptabilisés en CAPEX et OPEX, le cas échéant. Ce traitement des coûts de transport reflète les coûts réels de construction et d'exploitation, plutôt que des coûts encourus par le propriétaire de l'actif.

• Les liaisons en courant alternatif (HVAC) sont utilisées pour des sites jusqu'à 110 km de la côte.

• Les liaisons en courant continu (HVDC) sont utilisées plus loin du rivage.

Installation

• L'installation est effectuée séquentiellement : fondation, puis câble inter-éoliennes, enfin le mât pré-assemblé et la turbine.

• Un seul jack-up est utilisé pour installer les monopieux et les pièces de transition.

• Deux jack-ups sont utilisés pour l'installation des jackets et le martelage des pieux, la collecte des composants à partir du port d'installation.

• Les câbles inter éoliennes sont installés via des tubes en J, avec une pose de câble séparée, puis inspection et ensouillage.

• Un jack-up collecte les composants au port d'installation pour l'installation de la turbine.

Exploitation et maintenance

• L'accès pour les parcs peu éloignés du littoral est assuré par des navires de service opérationnel (SOV) ou des navires de transfert d'équipage (CTV). Au-delà de 110 km, l'accès est soit à partir de navires-bases de vie ou de plates-formes d'hébergement. Des jack-ups sont utilisés pour le remplacement des composants majeurs.

• L'OPEX de raccordement couvre à la fois les frais de maintenance et les frais de réseau.

Démantèlement

• Le démantèlement, qui inverse le processus d'assemblage pour aboutir à la remise en état du site, prend un an. Les pieux sont coupés à une profondeur au-dessous du fond de la mer peu susceptible d'être découverte, et les câbles sont retirés. Un bilan environnemental est mené à la fin. La valeur résiduelle et le coût de mise au rebut ou au recyclage sont considérés équivalents.

A.3.4 Hypothèses propres au parc éolien en mer flottant

Fondations

• L'amarrage se fait par l'intermédiaire d'ancrages de traîne avec la chaîne sur le fond de mer, puis câble jusqu'au flotteur (pour une vie plus longue). Tension et maintien de la tension sur le flotteur, sans aucune préoccupation particulière concernant la rotation de la plate-forme.

Installation

• Un seul remorqueur est supposé se connecter à la turbine et la fondation, puis les remorquer jusqu'à l'emplacement du parc éolien.

• Au moins un navire plus petit sera requis sur le site éolien pour soutenir la connexion des turbines aux amarrages.

• Remplacer les coûts d'ensouillage des câbles par installation en installant une flottabilité et une protection

Exploitation et maintenance

• Optimisation des OPEX de la fondation grâce au système actif de ballastage et d'amarrage

- Entretien planifié et service non planifié de composants mineurs inchangés.

- Une seule éolienne flottante de rechange est prévue au port pour un parc flottant. Le coût de ces éléments est intégré au coût d'opération et de maintenance pour les solutions flottantes. Cela peut être assemblé juste quand le besoin est identifié, avant remorquage et échange. L'ancienne unité peut ensuite être remorquée en une seule opération, ce qui minimise les temps d'arrêt et le transit des navires.

Démantèlement

- Le démantèlement inverse le processus d'assemblage pour aboutir à la remise en état du site. Les pieux sont coupés à une profondeur au-dessous du fond de la mer peu susceptible d'être découverte, et les câbles sont retirés. Un bilan environnemental est mené à la fin. La valeur résiduelle et le coût de mise au rebut ou au recyclage sont considérés équivalents.

Annexe B : Les tableaux de synthèse

Tableau 12 : synthèse de l'attractivité des innovations pour le marché français (partie 2)

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menace	Maturité commerciale	Opportunité globale
8	Rotor	Amélioration de l'aérodynamique et de l'aéroélasticité des pales	5	2	2	2	2	18
11	Rotor	Amélioration de la vitesse de pointe de pale	3	3	4	3	2	18
12	Rotor	Amélioration des normes et processus de conception des pales	4	2	3	2	3	18
13	Rotor	Mesure du vent entrant	3	4	4	2	2	18
15	Rotor	Améliorations des composants (rotor et moyeu)	4	2	3	2	3	18
34	Fondations	Design holistique de la structure	4	3	2	2	3	18
39	Raccordement électrique	Haute tension en sortie des éoliennes jusqu'au poste en mer	3	4	3	2	3	18
55	Exploitation Maintenance	Système de commande des éoliennes intégré à l'échelle du parc éolien	3	3	4	2	3	18
18	Nacelle	Améliorations des composants de la nacelle (à l'exception du système de transmission)	3	3	3	2	3	17
56	Exploitation Maintenance	Amélioration des prévisions météorologiques	2	4	4	2	3	17
57	Exploitation Maintenance	Amélioration de la gestion des stocks	2	4	4	2	3	17
58	Exploitation Maintenance	Amélioration de la surveillance de l'état des fondations	4	3	2	1	3	17
2	Développement	Amélioration de la caractérisation et de la modélisation des ressources, y compris l'amélioration de la modélisation des terrains complexes et des forêts pour les sites terrestres	4	2	1	2	3	16
4	Développement	Approfondissement des études géophysiques et géotechniques	3	2	3	2	3	16
14	Rotor	Contrôle aérodynamique actif sur les pales	2	3	4	3	2	16
19	Nacelle	Outils avancés d'optimisation pour les éoliennes	2	3	3	3	3	16
38	Raccordement électrique	Améliorations des standards de câbles inter éoliennes et des spécifications client	2	4	3	2	3	16

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menace	Maturité commerciale	Opportunité globale
47	Installation	Amélioration de l'installation des câbles	3	4	2	1	3	16
24	Nacelle	Nouveaux systèmes de transmission et génératrices	2	3	3	3	2	15
26	Nacelle	Système de distribution à courant continu (DC) (de l'éolienne au poste de raccordement offshore)	3	3	2	2	2	15
33	Fondations	Nouveaux matériaux pour les amarrages	3	4	1	2	2	15
37	Raccordement électrique	Réduction du poids des postes de transformation en mer	2	4	2	2	3	15
40	Raccordement électrique	Matériau alternatif au cuivre dans les câbles	1	4	4	2	3	15
42	Installation	Réduction de la sensibilité aux conditions météorologiques et océaniques pour l'installation des fondations d'éoliennes en mer	4	2	1	1	3	15
63	Exploitation Maintenance	Améliorations de la connexion et de la déconnexion des structures flottantes	3	4	1	2	2	15
52	Installation	Amélioration de l'installation des postes de transformation en mer	2	3	3	2	2	14
61	Exploitation Maintenance	Solutions d'exploitation et de maintenance à distance et automatisées	1	4	4	2	2	14
64	Exploitation Maintenance	Facilité d'installation et de remplacement pour les structures flottantes	3	3	1	2	2	14
3	Développement	Utilisation croissante et amélioration des stations météorologiques flottantes	2	3	2	2	2	13
6	Développement	Réduction de la profondeur d'enfouissement des câbles	2	3	2	2	2	13
16	Rotor	Nouveaux concepts de pale (y compris les pales furtives)	1	3	3	3	2	13
27	Nacelle	Introduction de nouvelles configurations de turbines : turbines à axe vertical, turbines à deux pales, rotors multiples, éoliennes sous le vent...	1	4	3	3	1	13
32	Fondations	Amélioration des câbles dynamiques	2	4	1	2	2	13
35	Fondations	Nouveaux matériaux pour les tours	1	4	3	2	2	13

#	Domaine d'innovation	Titre de l'innovation	Potentiel LCOE	Expertise française	Synergies	Menace	Maturité commerciale	Opportunit é globale
36	Raccordement électrique	Développement de la transmission en courant continu sur de longues distances	1	4	2	2	3	13
45	Installation	Fondations gravitaires en béton pouvant être déplacées par flottaison	2	4	1	2	2	13
59	Exploitation Maintenance	Amélioration de la stratégie d'exploitation et de maintenance pour les parcs éoliens en haute mer	1	3	2	3	2	12
28	Fondations	Amélioration de la fabrication des monopieux	1	3	1	2	3	11
30	Fondations	Tours treillis en acier	1	3	2	2	2	11
46	Installation	Installation par flottaison / remplissage de la turbine et de la fondation, réversible pour le démantèlement	1	4	1	2	2	11
53	Installation	Amélioration du processus de démantèlement de la turbine	1	3	3	1	2	11
41	Raccordement électrique	Sous-stations flottantes / auto-installées	1	3	2	1	2	10
44	Installation	Amélioration du processus d'installation du monopieu (y compris les performances sonores)	1	2	1	2	3	10
50	Installation	Amélioration de la conception des véhicules de transport pour l'accès au site	1	3	1	1	3	10
48	Installation	Utilisation de bateaux de transport des éléments d'éoliennes permettant de dédier les navires jack-up à l'installation des turbines	1	2	1	1	3	9
49	Installation	Installation en un seul levage d'une turbine montée à terre, potentiellement avec une partie de sa fondation.	1	2	1	1	2	8

Tableau 13 Impact brut des innovations sur la structure de coût des filières éoliennes à horizon 2030

#	Développement	Rotor	Nacelle	Mât	BOP	Réseau électrique interne	Construction	Raccordement au réseau	Couverture du risque	Exploitation et maintenance préventive	Maintenance corrective	Autres coûts d'exploitation	Maintenance du raccordement	Production brute	Pertes de production	DEC EX
1	2.5%	0.0%	0.0%	1.3%	0.9%	1.0%	2.6%	0.0%	0.0%	2.0%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.4%	0.0%
2	-0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	7.4%	0.0%
3	8.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	-6.1%	0.0%	0.0%	2.6%	5.1%	7.1%	4.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	-3.3%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	2.5%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	-1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7	-2.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	0.0%	1.5%	0.0%	3.0%	1.0%	2.0%	0.0%	0.0%	2.0%	1.0%	0.0%
8	0.0%	-0.8%	0.0%	2.2%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.7%	0.0%	0.0%	2.8%	-0.2%	0.0%
9	0.0%	1.2%	0.5%	4.3%	2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.8%	0.0%	0.0%	2.1%	-0.2%	0.0%
10	0.0%	24.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%
11	0.0%	5.3%	0.0%	-4.4%	-2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	0.0%	0.0%
12	0.0%	8.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	0.0%	0.0%	0.9%	0.3%	0.0%
13	0.0%	-2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-1.0%	0.0%	0.0%	2.1%	0.0%	0.0%
14	0.0%	-7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-3.1%	0.0%	0.0%	2.7%	-0.6%	0.0%
15	0.0%	2.4%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	0.0%
16	0.0%	-2.6%	-0.4%	-1.9%	-1.2%	-0.9%	-0.3%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	1.1%	0.0%	0.0%
17	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15.9%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	0.0%
23	0.0%	0.0%	13.1%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	23.1%	0.0%	0.0%	-0.2%	6.0%	0.0%
21	0.0%	0.0%	5.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.6%	0.0%	0.0%	0.9%	2.9%	0.0%
20	0.0%	-10.0%	-10.0%	-5.0%	-10.0%	5.0%	10.0%	0.0%	-7.0%	10.0%	10.0%	0.0%	0.0%	15.0%	10.0%	10.0%
18	0.0%	0.0%	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	0.0%

#	Développement	Rotor	Nacelle	Mât	BOP	Réseau électrique interne	Construction	Raccordement au réseau	Couverture du risque	Exploitation et maintenance préventive	Maintenance corrective	Autres coûts d'exploitation	Mainenance du raccordement	Production brute	Pertes de production	DEC EX
22	0.0%	0.0%	- 3.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	16.6%	0.0%	0.0%	1.7%	4.2%	0.0%
19	0.0%	7.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	9.9%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	0.0%
25	0.0%	0.0%	5.8%	0.0%	0.0%	17.3 %	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	2.1%	1.5%	0.0%
26	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	2.0%	0.0%
27	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	0.0%
31	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	30.9 %	0.0%	1.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%
29	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15.0 %	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%
34	0.0%	0.0%	0.0%	13.7 %	4.7%	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
32	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0 %	1.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
33	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
30	0.0%	0.0%	0.0%	10.0 %	0.0%	0.0%	- 1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
35	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
28	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
36	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%
37	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0 %	0.0%	0.0%	0.0%
38	-0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0 %	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
39	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	2.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	0.0%
40	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0 %	- 0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.4%	0.0%
41	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%

#	Développement	Rotor	Nacelle	Mât	BOP	Réseau électrique interne	Construction	Raccordement au réseau	Couverture du risque	Exploitation et maintenance préventive	Maintenance corrective	Autres coûts d'exploitation	Mainenance du raccordement	Production brute	Pertes de production	DEC EX
42	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
43	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	0.0%	15.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15.0%
44	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
45	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.8%	0.0%	15.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
46	0.0%	0.3%	0.1%	0.0%	4.1%	0.0%	12.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
47	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
48	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
49	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	2.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
50	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
51	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.5%
52	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
53	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%
54	0.0%	-1.1%	-0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.2%	2.4%	0.0%
55	0.0%	-1.4%	-0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	0.0%	0.0%	0.8%	0.3%	0.0%
56	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%
57	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%
58	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.5%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	2.0%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
59	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	7.6%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
60	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	6.2%	0.0%	0.0%	0.0%	6.6%	0.0%
61	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	2.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	0.0%
62	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.5%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%

#	Développement	Rotor	Nacelle	Mât	BOP	Réseau électrique interne	Construction	Raccordement au réseau	Couverture du risque	Exploitation et maintenance préventive	Maintenance corrective	Autres coûts d'exploitation	Maintenance du raccordement	Production brute	Pertes de production	DEC EX
63	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	- 0.5%	0.0%	5.0%	0.0%	3.0%	0.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
64	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Annexe C : Les sources

C.1 Consultations d'experts

Dans le cadre de l'étude, un panel d'experts a été contacté.

Le document partagé avec les participants en amont de l'entretien détaillait :

- les tendances des coûts sur les principaux postes de dépenses d'un parc éolien et l'évolution d'autres valeurs pertinentes pour l'étude sur un horizon 2030 ;
- la liste des innovations technologiques considérées, accompagnées de leur description ;
- l'impact des innovations principales sur la réduction LCOE.

Les participants étaient interrogés sur :

- la tendance au fil du temps, la tendance entre les filières, les valeurs absolues ;
- le choix des innovations ;
- l'impact relatif et absolu des innovations sur le LCOE.

Les retours ont été recueillis par entretien téléphonique et par retour écrit.

Tableau 14 Consultations réalisées.

Société	Périmètre concerné	Personne interviewée	Titre
EDF Energies Nouvelles	Toutes les filières	Jean-Philippe Salomé	VP Industry, EDF EN
Engie	Toutes les filières	Raphaël Genin	Responsable innovation
Areva / Adwen	Turbine	Cédric Turnaco / Christine de Jouët	Responsable des relations institutionnelles France / Head of Technical Unit
Vestas	Turbine	Nicolas Wolff / Samir Souchane	DG Vestas / Technical Bid manager
DCNS Energies	Eolien flottant	Frédéric Chino	Sales manager
STX	Fondations offshore	Benoit Tavernier	Responsable marketing
GE Energy connection	Raccordement offshore	Christian Derrien	Wind offshore sales manager Grid solutions
GE Renewables	Turbine	Steven Curet / Raphaël de Rocca	Responsable relations institutionnelles et financement / Product manager

Société	Périmètre concerné	Personne interviewée	Titre
LM Blades	Pales	Alexis Crama / Sarah Ruffenach	Vice President Offshore Business / Business developer
WPD	Toutes les filières	Pierre Warlop	Supply chain manager

Un questionnaire a également été envoyé pour avoir en complément le retour d'une quarantaine d'acteurs et pour capter de manière moins approfondie des informations sur les innovations en France et compléter le cas échéant la liste d'environ 60 innovations importantes. L'accent a été mis sur l'engagement des entreprises en France.

C.2 Sources académiques

Tableau 15 Sources de données

Auteur	Document	Date
Carbon Trust pour LCICG	Technology Innovation Needs Assessment (TINA): Offshore Wind Power Summary Report	Février 2012
BVG Associés pour The Crown Estate (sous la responsabilité de Bruce Valpy)	Offshore Wind Cost Reduction Pathways Study: Technology work stream (also Supply chain work stream)	Juin 2012
EC Harris pour The Crown Estate	Offshore Wind Cost Reduction Pathways Study: Supply chain work stream	Juin 2012
Roland Berger	Offshore wind Toward 2020	Avril 2013
Prognos & Fichtner pour Stiftung OWE	Cost Reduction Potentials of Offshore Wind Power in Germany	Août 2013
Deutsches Institut für Entwicklungspolitik	Innovation in wind power paths. - Insights from Denmark and Germany	2014
EC JRC	2014 Status Report wind	2014
Commonwealth of Australia (Australian Renewable Energy Agency)	Technology Readiness Levels for Renewable Energy Sectors	Février 2014
Commonwealth of Australia (Australian Renewable Energy Agency)	Commercial Readiness Index for Renewable Energy Sectors	Février 2014
BVG Associates pour KIC InnoEnergy (sous la responsabilité de Bruce Valpy)	Future renewable energy costs: onshore wind	Septembre 2014
PwC, DNV GL / Ecofys pour TKI Vent op Zee	Cost reduction options for offshore wind in the Netherlands FID 2010-2020	2015

Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières

Auteur	Document	Date
DNV GL	Cost Reduction Monitoring Framework – Summary Report (Qualitative Track)	Mars 2015
BVG Associates for The Comité sur les changements climatiques (sous la responsabilité de Bruce Valpy)	Approaches to cost-reduction in offshore wind: a report for the Committee on Climate Change	Juin 2015
AIE (BVG Associates a contribué à la conception et l'examen de l'étude)	Forecasting Wind Energy Costs and cost Drivers	Juin 2016
BVG Associates pour KIC InnoEnergy (sous la responsabilité de Bruce Valpy)	Future renewable energy costs: offshore wind (update)	Septembre 2016 (publié)
BVG Associates pour IRENA (sous la responsabilité de Bruce Valpy)	Offshore wind technology: Innovation outlook for its deployment	Septembre 2016 (publié)
EC JRC	Technological Evolution of onshore wind turbines - A market-based analysis	2016
Plate-forme TP Wind / technologique européenne pour l'énergie éolienne	Divers éléments	
ADEME	Évaluation, stratégie et perspectives de l'énergie éolienne	2017 (partie 1 : janvier 2017)

Annexe D : Sigles et acronymes

AD	Accelerated Depreciation (Dépréciation accélérée)
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AEE	<i>Asociacion Empresarial Eolica</i> (Association espagnole des entreprises de l'éolien)
AO	Appels d'offres
AWEA	<i>American Wind Energy Association</i> (Association américaine de l'éolien)
BMWI	<i>Bundesministerium für Wirtschaft & Energie</i> (Ministère fédéral allemand pour l'économie et l'énergie)
BNDES	<i>Banco Nacional de Desenvolvimento Economico e Social</i> (Banque nationale brésilienne de développement économique et social)
BWE	<i>Bundesverband Windenergie</i> (Association nationale allemande de l'énergie éolienne)
CA	Chiffres d'affaires
CI	Consommations intermédiaires
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> (Dépenses d'investissement)
CfD	<i>Contracts for Difference</i> (contrat de compensation)
CRE	Commission de Régulation de l'Energie
DoE	<i>Department of Energy</i> (ministère américain de l'énergie)
EIA	<i>Energy Information Administration</i> (Agence d'information américaine sur l'énergie)
EEG	<i>Erneuerbare Energien Gesetz</i> (loi allemande sur les énergies renouvelables)
EnR	Energies Renouvelables
ETP	Equivalent Temps Plein
EU	Etats-Unis
EWEA	<i>Wind Europe</i> (association européenne pour l'énergie éolienne)
FEE	France Energie Eolienne (Syndicat des entreprises de l'éolien)
FIT	<i>Feed-in Tariff</i> (tarif subventionné)
G€	Milliards d'Euros
GBI	<i>Generation Based Incentive</i> (programme incitatif liée à la production d'électricité)
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-heure
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> (association mondiale pour l'éolien)
IEA	<i>International Energy Association</i> (association internationale pour l'énergie)
IDE	Investissements Directs à l'Etranger
INWEA	<i>Indian Wind Energy Association</i> (association indienne pour l'énergie éolienne)
IREDA	<i>Indian Renewable Energy Development Agency</i> (association indienne pour le développement

	des énergies renouvelables)
IRENA	<i>International Renewable Energy Association</i> (association internationale pour les énergies renouvelables)
ITC	<i>Investment Tax Credit</i> (crédit d'impôt lié à l'investissement)
JRC	<i>Joint Research Council</i> (association de recherche entre pays européens)
K€	Milliers d'Euros
KfW	<i>Kreditanstalt für Wiederaufbau</i> (organisme de crédit public allemand)
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
LCOE	Levelized Cost of Energy
M€	Millions d'Euros
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-heure
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (laboratoire de recherche américain pour les énergies renouvelables)
Ofgem	<i>Office of Gas & Electricity Markets</i> (office britannique pour les marchés du gaz & de l'électricité)
OPEX	<i>Operational Expenditures</i> (dépenses opérationnelles)
PPA	<i>Power Purchasing Agreement</i> (contrat d'achat d'électricité long terme)
PTC	<i>Production Tax Credit</i> (crédit d'impôt lié à la production d'électricité)
R&D	Recherche & Développement
RU ou UK	Royaume-Uni
SCADA	Supervisory control and data acquisition, système de contrôle et de supervision des éoliennes interfacé avec les automates
SER	Syndicat français des énergies renouvelables
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-heure

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr