



DOSSIER TECHNIQUE WEAMEC



L'éolien flottant en plein essor Défis et avancées de la recherche et développement

Dominique Follut, Directeur de WEAMEC (West Atlantic Marine Energy Community) – École Centrale de Nantes
avec la participation de Stéphane Bertholin, Responsable de programme Eolien et Energies Marines – IFP Energies nouvelles

1. Introduction

L'éolien flottant et ses avantages

Face à l'urgence de la transition énergétique et à la nécessité de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, l'éolien s'impose comme une source d'énergie renouvelable incontournable. Son potentiel est immense, d'autant plus que les technologies offshore permettent d'exploiter la force du vent en mer, où il est plus puissant et plus constant. Cependant, les éoliennes posées, ancrées au fond marin, atteignent leurs limites physiques et environnementales. C'est dans ce contexte que l'éolien flottant émerge comme une solution prometteuse, ouvrant de nouvelles perspectives pour la production d'énergie propre à grande échelle.

Malgré son fort potentiel, l'éolien flottant demeure une technologie en développement et doit relever des défis majeurs avant de se déployer à grande échelle. C'est dans ce contexte que la recherche et le développement (R&D) jouent un rôle crucial pour lever les verrous technologiques et économiques, et faire de l'éolien flottant une solution énergétique compétitive et durable.

Contrairement aux éoliennes posées, qui nécessitent des fonds marins peu profonds, les éoliennes flottantes sont installées sur des structures flottantes, généralement composées d'un flotteur et d'un système d'ancrage. Cette technologie novatrice permet de déployer des éoliennes dans des zones plus profondes et plus éloignées des côtes, là où les vents sont plus forts et plus réguliers.

De nombreux avantages accompagnent l'éolien flottant :

- **Un accès à des ressources éoliennes inexploitées** : En s'affranchissant des contraintes de profondeur et de distance au littoral, l'éolien flottant multiplie les zones propices à l'implantation d'éoliennes, multipliant ainsi le potentiel de production d'énergie éolienne offshore.
- **Une production d'énergie accrue** : Les vents en mer étant plus puissants et plus stables, les éoliennes flottantes génèrent une production d'énergie plus importante par rapport aux éoliennes posées.

- **Un moindre impact** : L'installation en mer profonde réduit les conflits d'usage avec les activités humaines et limite l'impact sur les écosystèmes marins côtiers.
- **Une contribution à la lutte contre le changement climatique** : Comme le reste des énergies renouvelables, en se substituant aux énergies fossiles, l'éolien flottant participe activement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à l'atténuation du changement climatique.

Enjeux de la recherche et du développement dans l'éolien flottant

Les efforts de R&D dans l'éolien flottant visent à optimiser les performances techniques et économiques de cette technologie, tout en minimisant son impact environnemental. Les principaux enjeux portent sur :

- **L'amélioration de la stabilité et de l'ancrage des éoliennes flottantes** : Il est essentiel de garantir la résistance des structures aux vagues, aux courants et aux vents violents, afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des installations.
- **L'optimisation de la production d'énergie** : Le développement de turbines plus puissantes et performantes, ainsi que l'amélioration des systèmes de conversion d'énergie, sont nécessaires pour maximiser la production d'électricité par éolienne flottante.
- **La fiabilisation et la maintenance des installations** : La maintenance des éoliennes flottantes en mer pose des défis spécifiques, notamment en raison de l'éloignement des côtes et des conditions météorologiques difficiles. Des solutions innovantes doivent être développées pour réduire les coûts de maintenance et prolonger la durée de vie des installations.
- **La prise en compte de l'impact environnemental et de la biodiversité** : L'intégration des enjeux environnementaux dès la conception des projets est essentielle pour minimiser les impacts sur la faune

et la flore marines. Des études approfondies et des mesures de suivi rigoureuses sont nécessaires pour évaluer et atténuer les effets potentiels de l'éolien flottant sur les écosystèmes marins.

- **La réduction des coûts de construction et d'exploitation** : L'optimisation des designs, l'industrialisation des processus de fabrication et l'innovation dans les matériaux de construction sont des leviers importants pour réduire les coûts de l'éolien flottant et le rendre plus compétitif face aux autres sources d'énergie.

2. Les défis à relever

L'éolien flottant, bien que recelant un potentiel immense, n'est pas sans défis. Pour les relever et faire de cette technologie une réalité concrète, la recherche et le développement s'imposent comme des leviers incontournables.

Stabilité et ancrage : un ballet entre puissance et résilience

Comment garantir la stabilité de ces colosses flottants face aux assauts des vagues, des courants et des vents violents ? Concevoir des structures ingénieuses, capables de résister aux forces de la nature tout en optimisant la production d'énergie, est une priorité absolue. L'innovation dans les matériaux, l'optimisation des designs et le développement de systèmes d'ancrage intelligents sont autant de pistes prometteuses à explorer.

Concevoir des structures ingénieuses : une adaptation aux forces de la nature

La conception des éoliennes flottantes est un défi d'ingénierie majeur. Il s'agit de trouver un équilibre subtil entre la légèreté nécessaire pour optimiser la production d'énergie et la robustesse indispensable pour résister aux forces de la nature.

Flotteurs : la base de l'équilibre

Le flotteur, véritable socle de l'éolienne flottante, doit être capable de maintenir la structure à flot et de lui



conférer une stabilité directionnelle. Sa forme, son volume et ses matériaux doivent être soigneusement étudiés pour optimiser ses performances hydrodynamiques et sa résistance aux vagues.

Des ballasts, réservoirs d'eau ou de matériaux lourds, peuvent être intégrés au flotteur pour ajuster son centre de gravité et améliorer sa stabilité. Le remplissage et la vidange des ballasts permettent de contrôler l'inclinaison de l'éolienne et de compenser les mouvements des vagues. Des amortisseurs sont aussi à l'étude pour absorber la houle.

Systèmes d'ancrage : le point de fixation face aux tempêtes

L'ancrage est l'élément crucial qui relie l'éolienne flottante au fond marin. Il doit être suffisamment puissant pour résister aux vents et aux courants les plus violents, tout en limitant l'impact sur l'environnement marin. Différents types d'ancres peuvent être utilisés, comme les ancres caténaires, les ancres hélicoïdales ou les ancres à succion par exemple.

L'utilisation de plusieurs ancres disposées stratégiquement autour de l'éolienne flottante permet de répartir les

forces et d'accroître la résistance à l'arrachement. Cette redondance est essentielle pour garantir la sécurité de l'installation en cas de conditions météorologiques extrêmes.

Des systèmes d'ancrage intelligents peuvent être intégrés pour ajuster la tension des câbles d'ancrage en fonction des conditions environnementales. Des capteurs mesurent en permanence les mouvements de l'éolienne flottante et les forces exercées sur les ancres. Ces données sont analysées par des algorithmes qui ajustent la tension des câbles pour optimiser la stabilité et la sécurité de l'installation.

Lignes d'amarrage : un défi pour la filière du cordage synthétique

Les cordages en polyester, polyéthylène ou nylon sont beaucoup plus légers que les chaînes en acier et permettent d'obtenir des propriétés mécaniques à la fois performantes et variables, notamment en terme de raideur, pour s'adapter aux différents types de flotteurs.

Leur utilisation pour l'éolien flottant demande une garantie de durée de vie importante (20-25 ans) qui nécessite une compréhension fine des mécanismes de vieillissement par fatigue, à la fois en opération et lors du déploiement et de l'installation où les mouvements sont moins maîtrisés.

L'évolution du comportement dans le temps (élongation ? impact biofouling ?), l'adaptation de la supply chain à ce nouveau marché titanesque, le risque de rejet plastique dans l'océan... les défis adressés à la filière sont encore nombreux !

Systèmes de liaison : la flexibilité au service de la stabilité

Le système de liaison, qui relie le flotteur à la structure supportant la turbine, joue un rôle essentiel dans la gestion des mouvements de l'éolienne flottante. Il doit être suffisamment flexible pour absorber les mouvements des vagues tout en garantissant la rigidité nécessaire à la production d'énergie.

Des articulations intelligentes, telles que des rotules ou

des joints universels, permettent à la structure supportant la turbine de s'incliner et de pivoter légèrement pour absorber les mouvements des vagues sans compromettre la production d'énergie.

Des systèmes de contrôle actifs peuvent être intégrés pour ajuster l'orientation de la turbine et l'inclinaison de la structure en fonction des conditions de vent et de mer. Des capteurs mesurent en permanence la vitesse et la direction du vent, ainsi que les mouvements de l'éolienne flottante. Ces données sont analysées par des algorithmes qui commandent les moteurs d'orientation et d'inclinaison pour optimiser la production d'énergie et la stabilité de l'installation.

Matériaux, designs et systèmes intelligents : au cœur du défi

Pour relever le défi de la stabilité et de l'ancrage, la recherche et le développement explorent de nouvelles pistes prometteuses :

Matériaux composites : légers, robustes et durables

L'utilisation de matériaux composites, tels que la fibre de carbone ou la fibre de verre, permet de concilier légèreté et robustesse, des atouts précieux pour la conception des éoliennes flottantes. Ces matériaux offrent également une excellente résistance à la corrosion et à l'eau de mer, garantissant une longévité accrue des installations.

La recherche se concentre sur le développement de nouveaux matériaux composites encore plus légers, robustes et durables, capables de répondre aux exigences extrêmes de l'environnement marin. Des matériaux tels que le carbone renforcé de nanotubes ou les composites à matrice thermoplastique font l'objet d'études prometteuses.

L'optimisation des processus de fabrication des matériaux composites est également un axe de recherche important. Des techniques comme le placement automatisé de fibres et l'impression 3D permettent de créer des structures complexes et légères, tout en garantissant

une résistance et une durabilité optimales.

Optimisation des designs : une approche bio-inspirée

En s'inspirant des formes et des structures présentes dans la nature, les concepteurs développent des designs innovants pour les éoliennes flottantes. Les formes biomimétiques permettent d'améliorer l'efficacité hydrodynamique des flotteurs, de réduire les contraintes sur les systèmes d'ancrage et d'optimiser la stabilité globale de l'éolienne.

L'intelligence artificielle et la simulation numérique jouent un rôle de plus en plus important dans la conception des éoliennes flottantes. Ces outils permettent de tester virtuellement des milliers de configurations différentes et d'identifier les designs les plus performants en termes de stabilité, de production d'énergie et de résistance aux intempéries.

Systèmes de contrôle intelligents : une adaptation en temps réel

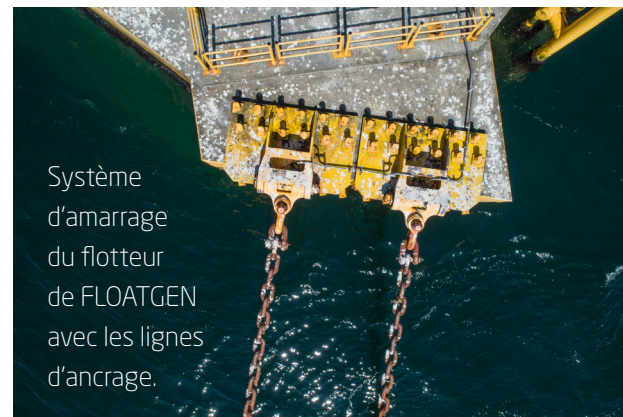
L'intégration de systèmes de contrôle intelligents permet d'adapter le comportement de l'éolienne flottante aux conditions environnementales en temps réel. Des capteurs mesurent en permanence les mouvements de la structure, les forces exercées et les caractéristiques du vent. Ces données sont analysées par des algorithmes sophistiqués qui ajustent l'orientation de la turbine, l'inclinaison du flotteur et la tension des systèmes d'ancrage pour maximiser la stabilité et la production d'énergie.

L'intégration de l'apprentissage automatique dans les systèmes de contrôle des éoliennes flottantes permet d'optimiser en permanence les performances de l'installation. En analysant les données historiques et en temps réel, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent ajuster de manière autonome les paramètres de fonctionnement de l'éolienne flottante pour maximiser la production d'énergie tout en garantissant la stabilité de la structure.

Du point de vue de la production, le développement de

la communication machine à machine (M2M) permettra aux éoliennes flottantes de communiquer entre elles et avec des centres de contrôle à terre. Ce réseau intelligent permettra d'optimiser collectivement la production d'énergie d'un parc éolien flottant en tenant compte des conditions environnementales locales et des besoins du réseau électrique.

La stabilité et l'ancrage : un enjeu crucial pour l'avenir de l'éolien flottant



La maîtrise de la stabilité et de l'ancrage est un enjeu crucial pour le développement à grande échelle de l'éolien flottant. En relevant ce défi, nous pourrions exploiter pleinement le potentiel immense de cette technologie et contribuer à un avenir énergétique durable.

La stabilité des éoliennes flottantes est cruciale pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle garantit la sécurité des personnes et des équipements en mer. Une structure instable pourrait se renverser, entraînant des dommages matériels importants et des risques pour la vie des techniciens d'intervention.

De plus, la stabilité est essentielle pour optimiser la performance énergétique des éoliennes flottantes. Une structure qui oscille excessivement perturbe le fonctionnement des turbines et réduit la production d'électricité et fragilise la liaison mât-plateforme, ce qui engendre un risque de rupture.

La recherche et le développement dans le domaine de la stabilité et de l'ancrage doivent également prendre en compte l'impact environnemental des éoliennes flottantes. Des études approfondies sur l'interaction

entre les structures et les écosystèmes marins sont nécessaires pour garantir un développement durable et respectueux de la biodiversité.

Puissance et performance : capturer l'énergie du vent avec une efficacité optimale

Tirer parti du vent capricieux pour générer une énergie propre et fiable : tel est le défi que la recherche doit relever. Développer des turbines plus puissantes et légères, capables de convertir efficacement l'énergie cinétique du vent en électricité, est crucial pour maximiser le rendement des éoliennes flottantes. L'aérodynamisme, l'optimisation des systèmes de transmission et l'intégration de technologies de pointe sont des domaines clés dans lesquels l'innovation peut faire la différence.

Turbines : capter l'énergie cinétique du vent

Le choix de la taille et de la puissance des turbines est un élément déterminant pour optimiser la production d'énergie d'une éolienne flottante. Il s'agit de trouver un équilibre subtil entre la capacité à capturer le vent et la stabilité de la structure. Des turbines plus grandes permettent de générer plus d'énergie, mais elles augmentent également les charges sur la structure flottante. L'analyse approfondie des caractéristiques du site, notamment la vitesse et la direction du vent, les courants et les vagues, est essentielle pour déterminer la configuration optimale de la turbine.

L'aérodynamisme des pales de turbine joue également un rôle crucial dans l'efficacité de capture d'énergie. Les pales à écoulement laminaire, grâce à leur forme profilée, permettent de réduire la traînée et d'augmenter la portance, améliorant ainsi la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité. De nouvelles conceptions de pales, telles que les turbines à axe vertical, font l'objet de recherches prometteuses pour s'adapter aux conditions variables du vent en mer et optimiser la production d'énergie.

L'utilisation de matériaux légers et résistants, tels que la fibre de carbone et les composites, est essentielle pour la conception des turbines éoliennes flottantes. Ces maté-

riaux offrent un compromis idéal entre résistance et légèreté, permettant de maximiser la production d'énergie tout en minimisant les charges sur la structure flottante. L'impression 3D ouvre également de nouvelles perspectives en matière de fabrication de pièces complexes et optimisées pour les turbines éoliennes flottantes.

Enfin, l'intégration de systèmes de contrôle intelligents permet d'optimiser en permanence les performances des turbines éoliennes flottantes. Des algorithmes sophistiqués analysent en temps réel les conditions de vent et de mer et ajustent l'orientation et la vitesse de rotation des pales en conséquence. Cela permet de maximiser la capture d'énergie tout en réduisant les charges structurales et en améliorant la stabilité de l'éolienne flottante.

Systèmes de transmission : transférer l'énergie efficacement

Le système de transmission assure le transfert de l'énergie mécanique produite par la turbine vers le générateur électrique. Le choix entre une transmission directe ou par multiplicateur dépend de plusieurs facteurs, tels que la puissance de la turbine et la configuration de l'éolienne flottante. La transmission directe offre un rendement plus élevé, mais elle est plus complexe à mettre en œuvre. La transmission par multiplicateur, bien que plus simple, présente un rendement légèrement inférieur.

Dans le contexte des éoliennes flottantes, les systèmes de transmission doivent être capables de s'adapter aux mouvements de la structure causés par les vagues et les courants. Des solutions innovantes, telles que les joints flottants et les systèmes à cardan, permettent de maintenir l'alignement entre la turbine et le générateur, garantissant ainsi un transfert d'énergie efficace malgré les mouvements de la structure flottante.

Le choix de matériaux performants et de composants optimisés est également crucial pour minimiser les pertes d'énergie dans les systèmes de transmission. Des roulements à faible friction et des matériaux résistants à la corrosion sont essentiels pour une transmission d'énergie durable et efficace dans l'environnement marin exigeant. De plus, une conception optimisée des engrenages et des autres composants du système de

transmission permet de réduire les pertes mécaniques et de maximiser le rendement global.

Transport de l'électricité : la fiabilité avant tout

Le flottant impose un comportement dynamique aux câbles électriques, aussi bien pour les raccordements entre éoliennes que pour le câble d'export si la sous-station est flottante. Ces sollicitations mécaniques associées aux contraintes électriques, thermiques, et à la présence d'eau qui peut s'infiltrer jusque dans la couche isolante, sont très complexes à modéliser, à expérimenter, et donc à prédire.

L'enjeu fiabiliste est pourtant essentiel sur ces équipements, notamment pour le câble d'export qui concentre la totalité de la production. Des développements sont toujours en cours pour valider des technologies qui autorisent la pénétration d'eau à forte puissance (66kV et au-delà), qui limitent les contraintes mécaniques (raidisseur au raccordement, bouées, protection des zones de contacts), et qui facilitent la maintenance par du monitoring et des systèmes de connexion rapides.

Le système Réduction des pertes d'énergie : vers une efficacité optimale

La minimisation des pertes d'énergie est un enjeu crucial pour optimiser l'efficacité globale des éoliennes flottantes. Cela passe par une conception aérodynamique optimisée des pales de turbine, du mât et de la structure flottante pour réduire la traînée et maximiser la capture d'énergie. Les simulations numériques et les tests en soufflerie permettent d'identifier les formes les plus performantes et de minimiser les résistances aérodynamiques. Fiabilité et maintenance : garantir une exploitation durable et rentable

L'éloignement des côtes et les conditions marines difficiles rendent la maintenance des éoliennes flottantes difficile et constitue un défi majeur. Réduire les coûts d'intervention, optimiser les cycles de maintenance et développer des solutions de diagnostic et de réparation à distance sont des enjeux critiques pour garantir la viabilité économique de ces installations. La robotique,

l'intelligence artificielle et l'Internet des objets recèlent un fort potentiel pour révolutionner ce domaine.

L'optimisation des systèmes de transmission, comme mentionné précédemment, joue également un rôle important dans la réduction des pertes d'énergie. Le choix de matériaux à faible perte et de conceptions optimisées pour les engrenages, les roulements et les systèmes d'accouplement permet de minimiser les pertes mécaniques dans les systèmes de transmission.

Impact environnemental et biodiversité : naviguer en harmonie avec les écosystèmes marins

L'éolien flottant, bien que prometteur, ne doit pas se développer au détriment de la richesse des écosystèmes marins. Intégrer dès la conception des projets des mesures rigoureuses de protection de l'environnement et de la biodiversité est essentiel. Des études approfondies concernant l'impact des éoliennes flottantes sur la faune et la flore marines, ainsi que le développement de solutions d'atténuation et de compensation, sont indispensables pour une transition énergétique respectueuse de l'environnement. Il n'y a pas que des problèmes, on constate que les oiseaux apprécient de se poser sur la plateforme de Floatgen. Des études sont en cours (PIAFF&CO) pour tenter d'évaluer les effets de l'éolien offshore en Atlantique sur les chiroptères et oiseaux

Comprendre et évaluer avant de déployer

Avant de déployer des éoliennes flottantes à grande échelle, il est crucial de mener des études approfondies et rigoureuses pour appréhender les impacts potentiels de cette technologie sur la faune et la flore marines. Ces études, fondées sur des méthodes scientifiques solides, doivent tenir compte de la diversité des écosystèmes marins, en prenant en considération les habitats sensibles, les espèces protégées et les interactions complexes entre les différents acteurs de cet environnement. Il reste encore de nombreux axes de recherche pour améliorer cette compréhension des impacts et l'évaluation des risques :

- **Risque de collision avec les pales des turbines** : Évaluer le risque de collision pour différentes espèces d'oiseaux marins, de chauves-souris et de mammifères marins, en tenant compte des facteurs environnementaux (météo, visibilité, etc.) et des comportements migratoires. Identifier les espèces les plus vulnérables et les périodes critiques.
- **Perturbations acoustiques et comportementales** : Mieux comprendre les effets du bruit généré par les éoliennes flottantes et les infrastructures associées sur les communications acoustiques, la reproduction, la recherche de nourriture et l'orientation des espèces marines. Déterminer les seuils de tolérance et les distances de sécurité pour les espèces sensibles.
- **Modification de l'habitat et des ressources alimentaires** : Évaluer les impacts à long terme sur les habitats benthiques, les herbiers marins et les zones de reproduction. Analyser les modifications des courants marins, de la turbidité de l'eau et de la photosynthèse des algues. Identifier les espèces et les écosystèmes les plus fragiles.
- **Évaluation des impacts, le bruit et la turbidité** : Évaluer les impacts, le bruit et la turbidité générés par les travaux sous-marins lors de l'installation, lors de la pose.

Atténuer et compenser pour minimiser les effets négatifs

Sur la base des connaissances acquises sur les impacts potentiels, il est indispensable de développer et de mettre en œuvre des mesures d'atténuation et de compensation efficaces pour minimiser les effets négatifs des éoliennes flottantes sur l'environnement marin. Là encore diverses pistes de Recherche sont ouvertes, on retiendra notamment :

- **Optimisation de la conception des éoliennes flottantes** : Réduire la taille des pales, utiliser des matériaux moins bruyants, explorer des concepts innovants pour minimiser les perturbations acoustiques et physiques.
- **Mise en place de mesures de dissuasion** :

Délimiter des zones de protection autour des éoliennes flottantes pour limiter l'accès des espèces sensibles et développer des systèmes acoustiques, lumineux ou électromagnétiques pour dissuader les animaux de s'approcher des pales.

- **Techniques de pose minimisant les impacts** : Perfectionner les techniques de pose des câbles et des structures sous-marines pour réduire la perturbation des fonds marins et favoriser la restauration des habitats.
- **Restauration des habitats benthiques** : Développer des techniques de restauration efficaces pour les habitats benthiques endommagés, telles que la replantation d'herbiers marins, la création de récifs artificiels ou le dragage de sédiments.

Un équilibre indispensable à trouver

L'éolien flottant s'impose comme une solution prometteuse pour exploiter le potentiel énergétique du vent en mer et répondre aux défis croissants du changement climatique. Toutefois, son développement doit s'inscrire dans une démarche globale de transition énergétique respectueuse de l'environnement et de la biodiversité marine.

Une approche collaborative et transparente s'avère indispensable. Cela implique une concertation étroite entre les acteurs de l'industrie éolienne offshore, les organismes de protection de l'environnement, les scientifiques et les communautés locales. Cette collaboration permet de définir des zones d'implantation optimales, minimisant les impacts sur les écosystèmes sensibles, et d'intégrer les mesures d'atténuation et de compensation dès la phase de conception des projets. Un travail reste à faire sur la conception de méthodes de concertations et de dialogues qui favorisent les échanges ouverts et inclusifs entre les acteurs de l'industrie éolienne offshore, les organismes de protection de l'environnement, les scientifiques, les communautés locales et les autorités publiques.

L'évolution des cadres réglementaires est un autre élément clé. Des réglementations, fondées sur des évalua-

tions environnementales rigoureuses, sont nécessaires pour encadrer le développement de l'éolien flottant et garantir la protection de la biodiversité marine. Ces réglementations doivent évoluer en fonction des nouvelles connaissances scientifiques pour assurer une gestion durable des ressources marines. Là encore des travaux doivent continuer pour :

- Établir des standards homogènes et normalisés d'évaluation environnementale tenant compte des connaissances scientifiques les plus récentes et des impacts cumulatifs de plusieurs parcs éoliens flottants.
- Préciser la définition des normes acoustiques et des seuils de perturbation acceptables pour l'habitat et les espèces marines afin de guider l'implantation et l'exploitation des parcs éoliens flottants.
- Mettre en place des programmes de surveillance et de suivi environnementaux à long terme pour évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation et de compensation et adapter la réglementation en conséquence. Ces programmes doivent inclure le monitoring de la faune et de la flore marines, ainsi que des mesures des paramètres physiques et chimiques de l'environnement (bruit, turbidité, etc.).

Réduction des coûts : un levier essentiel de la compétitivité

Pour que l'éolien flottant devienne une source d'énergie compétitive, il est impératif de réduire significativement ses coûts. L'optimisation des designs, l'industrialisation des processus de fabrication, l'innovation dans les matériaux de construction, le développement d'outils de surveillance en temps réel et le développement de solutions de transport et d'installation plus efficaces sont autant de leviers à explorer pour rendre l'éolien flottant accessible à grande échelle.

En effet, si l'éolien flottant présente des avantages indéniables par rapport à l'éolien posé en mer fixe, tels que l'accès à des sites plus profonds et moins contraints par les infrastructures existantes, il se heurte encore à des coûts de production plus élevés. Cette barrière écono-

mique constitue un défi majeur pour son développement à grande échelle et son intégration effective dans le mix énergétique.

Pour lever cet obstacle et permettre à l'éolien flottant de jouer pleinement son rôle dans la transition énergétique, il est indispensable de s'attaquer de front à la question de la réduction des coûts. Plusieurs leviers stratégiques peuvent être activés pour atteindre cet objectif ambitieux, mais c'est dans le domaine de la Recherche et Développement (R&D) que réside le potentiel le plus important pour des avancées significatives.

Optimisation des designs : une quête de sobriété et de performance structurelle

L'optimisation des designs des éoliennes flottantes est un axe crucial pour réduire les coûts de production. Les efforts de R&D doivent se concentrer sur le développement de structures plus sobres et performantes, en s'appuyant sur des approches bio-inspirées et en explorant de nouvelles solutions de fondation et d'ancrage plus efficaces. L'objectif est de trouver un équilibre optimal entre sobriété structurelle et performance énergétique, permettant de réduire les coûts sans compromettre la production d'électricité. Cela ouvre différentes pistes de recherche et de développement :

- Des outils de simulation et de modélisation avancés pour explorer de nouvelles configurations architecturales et optimiser la répartition des charges dans les structures flottantes.
- L'analyse des données collectées en mer sur les performances réelles des éoliennes flottantes permettra de valider les modèles de simulation et d'affiner les designs en conséquence.
- L'exploration de matériaux composites innovants plus légers et plus résistants, tels que la fibre de carbone ou les composites thermoplastiques, est également un champ de recherche prometteur pour l'optimisation des designs.

Industrialisation des processus de fabrication : standardisation et automatisation

pour des gains d'efficacité

L'industrialisation des processus de fabrication des éoliennes flottantes est un autre levier essentiel pour réduire les coûts. La R&D doit jouer un rôle central dans le développement de solutions de production standardisées et automatisées, permettant de réaliser des économies d'échelle significatives et de réduire les coûts unitaires. Là encore des axes de développement émergent, on citera notamment :

- La mise au point de robots et de machines autonomes pour la fabrication et l'assemblage des composants des éoliennes flottantes permettra d'accroître la précision, la flexibilité et la productivité des lignes de production.
- Le développement de systèmes de contrôle qualité avancés basés sur l'intelligence artificielle et l'analyse d'images permettra de garantir la qualité des produits finis et de réduire les taux de rebut.
- L'optimisation de la logistique et de la gestion de la chaîne d'approvisionnement est également un axe de R&D important pour améliorer l'efficacité des processus de fabrication.

Innovation dans les matériaux de construction : légèreté, durabilité et recyclabilité pour un impact environnemental réduit

L'innovation dans les matériaux de construction des éoliennes flottantes est un champ de recherche prometteur pour réduire les coûts tout en améliorant la performance et la durabilité de ces structures. La R&D doit se concentrer sur le développement de matériaux plus légers, plus résistants et plus respectueux de l'environnement. Deux grands sujets sont largement investigués :

- L'exploration de matériaux biosourcés issus de ressources renouvelables, tels que le lin, le chanvre ou le bois, permettra de réduire l'empreinte carbone des éoliennes flottantes et de contribuer à une économie circulaire.
- Le développement de matériaux recyclables permettra de faciliter le démantèlement et la revalorisation

des éoliennes flottantes en fin de vie, réduisant ainsi l'impact environnemental global de cette technologie.

Développement de solutions logistiques optimisées

Le transport et l'installation des éoliennes flottantes représentent des étapes critiques et coûteuses du processus de production d'énergie. La R&D doit jouer un rôle moteur dans le développement de solutions de transport et d'installation plus efficaces, permettant de réduire les coûts et d'améliorer la sécurité des opérations en mer.

Des navires de transport spécialisés équipés de systèmes de levage et d'ancrage innovants permettront d'optimiser les opérations de transport et de manutention en mer, réduisant ainsi les délais et les risques notamment lors d'interventions en mer formée.

La mise au point de systèmes de positionnement et d'installation automatisés basés sur la robotique et la technologie GNSS (Global Navigation Satellite System) permettra d'accroître la précision et la sécurité des opérations d'installation des éoliennes flottantes.



La formation de la main-d'œuvre : un pilier de la réussite de l'éolien flottant

La formation de la main-d'œuvre aux nouvelles technologies et aux spécificités de l'éolien flottant est également un axe de développement important pour garantir la qualité et l'efficacité des interventions en mer. Pour répondre à ces besoins spécifiques, le développement de programmes de formation spécialisés dédiés à l'éolien flottant est indispensable.

Cela implique la mise en place de programmes de formation spécifiques à plusieurs niveaux :

Formation des ingénieurs en conception de systèmes

- **Programmes d'enseignement dédiés** : Des cursus universitaires et des formations post-graduées spécialisés dans la conception des systèmes d'éoliennes flottantes doivent être développés pour former les ingénieurs de demain.
- **Partenariats avec l'industrie** : Des collaborations étroites entre les institutions d'enseignement et les acteurs industriels de l'éolien flottant sont essentielles pour garantir que les programmes de formation répondent aux besoins réels du secteur.
- **Recherche appliquée et innovation** : L'implication des ingénieurs en formation dans des projets de recherche appliquée et d'innovation permettra de les familiariser avec les dernières avancées technologiques et de contribuer au développement de l'éolien flottant.

Formation des techniciens d'intervention

- **Modules spécialisés** : Des formations complémentaires dédiées aux spécificités de l'éolien flottant doivent être proposées aux techniciens déjà qualifiés dans le domaine de l'éolien offshore ou des travaux en mer.
- **Simulateurs immersifs** : L'utilisation de simulateurs immersifs permet aux techniciens de se familiariser

avec les environnements de travail en mer et de développer leurs compétences en toute sécurité.

- **Certifications reconnues** : La délivrance de certifications reconnues par l'industrie atteste du niveau de compétences acquis par les techniciens et leur permet de se positionner comme des professionnels qualifiés dans le domaine de l'éolien flottant.

Ces programmes doivent combiner une approche théorique rigoureuse avec une mise en pratique concrète pour permettre aux techniciens d'acquérir les compétences nécessaires en toute confiance. Un axe fort de recherche dans ce domaine porte sur la conception de simulateurs dédiés pour une expérience réaliste et sécurisée.

En complément des différents modèles conçus pour la formation, des simulateurs dédiés, utilisant notamment des technologies de réalité virtuelle ou augmentée, offrent une expérience d'apprentissage unique et particulièrement adaptée pour la formation à l'éolien flottant.

- **Reproduction réaliste des environnements de travail** : Les simulateurs permettent de reproduire fidèlement les conditions réelles d'intervention en mer, immergeant les techniciens dans un environnement réaliste et sécuritaire.
- **Mise en situation face à des scénarios variés** : Les formations peuvent simuler des situations d'urgence, des pannes techniques ou des conditions météorologiques difficiles, permettant aux techniciens de s'entraîner à réagir de manière appropriée.
- **Apprentissage par l'erreur** : Dans un simulateur, les techniciens peuvent commettre des erreurs sans conséquences graves, leur permettant d'apprendre de leurs expériences et d'améliorer leurs compétences en toute sécurité.

L'utilisation de simulateurs dédiés dans les programmes de formation à l'éolien flottant contribue à renforcer la confiance des techniciens, à améliorer leur préparation aux interventions en mer et à réduire les risques d'accidents.

3. Conclusion : vers un éolien flottant compétitif et durable grâce à la R&D



L'optimisation de la technologie et la réduction des coûts de l'éolien flottant sont des défis majeurs qui ne peuvent être relevés qu'en s'appuyant sur des efforts soutenus de recherche et développement. En explorant de nouvelles solutions de design, en optimisant les processus de fabrication et en innovant dans les matériaux de construction, la R&D jouera un rôle clé dans l'amélioration de la compétitivité de l'éolien flottant, et donc dans son déploiement à grande échelle. Malgré les progrès encourageants réalisés ces dernières années, l'éolien flottant demeure une technologie relativement jeune qui nécessite encore des avancées significatives sur le plan scientifique et technologique pour lever les verrous qui freinent son développement à grande échelle. Différents axes majeurs de recherche et de développement sont encore devant nous :

- **Industrialisation des processus de fabrication** : L'industrialisation des processus de fabrication est essentielle pour réduire les coûts de production et permettre un déploiement massif de l'éolien flottant.
- **Innovation dans les matériaux de construction** : L'exploration de nouveaux matériaux de construction plus légers, plus résistants et plus respectueux de l'environnement est un axe de recherche majeur pour l'éolien flottant.
- **Développement de solutions d'installation et de**

maintenance : La mise en place d'éoliennes flottantes en mer nécessite des outils de suivis du fonctionnement ainsi que des solutions d'installation et de maintenance spécifiques et efficaces.

- **Amélioration de la modélisation et de la simulation** : Le développement de modèles numériques plus précis et de simulateurs immersifs permet d'optimiser la conception des éoliennes flottantes, de prédire leur comportement en mer et de former les techniciens d'intervention.
- **Gestion des impacts environnementaux** : L'éolien flottant doit être développé de manière durable et responsable en minimisant ses impacts sur les écosystèmes marins. Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux doivent continuer d'être testées afin de converger vers une harmonisation des approches.
- **Cadre réglementaire et soutien politique** : La mise en place d'un cadre réglementaire clair et favorable est indispensable pour encourager les investissements dans l'éolien flottant et faciliter son déploiement à grande échelle. Des politiques de soutien public jouent sans aucun doute, à ce stade de maturité des technologies, un rôle important pour stimuler le développement de cette technologie prometteuse.

L'éolien flottant présente un potentiel considérable pour contribuer à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique. En levant les verrous scientifiques et technologiques, en favorisant l'innovation et en adoptant une approche responsable du développement, il est possible de faire de l'éolien flottant une source d'énergie propre, durable et compétitive pour les générations futures.

En conjuguant les efforts de recherche et développement, l'engagement des acteurs publics et privés, et la mobilisation de la société civile, il est possible de construire un avenir où l'éolien flottant joue un rôle majeur dans la production d'une énergie propre et respectueuse de l'environnement.



Crédit photo : Centrale Nantes et N.Wernimont-DonfutBalao