



FICHE
33

Quelles sont les grandes caractéristiques des parcs éoliens de la construction au démantèlement ?

Messages clés :

- Les éoliennes, à l'intérieur d'un parc, sont reliées entre elles et raccordées par des câbles électriques à un poste électrique en mer, lui-même raccordé au réseau national d'électricité.
- L'assemblage des différents éléments qui composent une éolienne en mer est réalisé à la fois à terre et en mer, et implique donc des activités portuaires importantes et la présence simultanée de différents navires d'installation.
- L'exploitation et la maintenance des parcs sont réalisées pendant toute la durée de vie du parc, estimée à une trentaine d'années. À l'issue de la phase d'exploitation, le développeur démantèle le parc à sa charge en vue de restituer le site dans un état comparable à l'état initial. Tous les composants démantelés sont ramenés à terre pour être presque intégralement réutilisés ou recyclés.

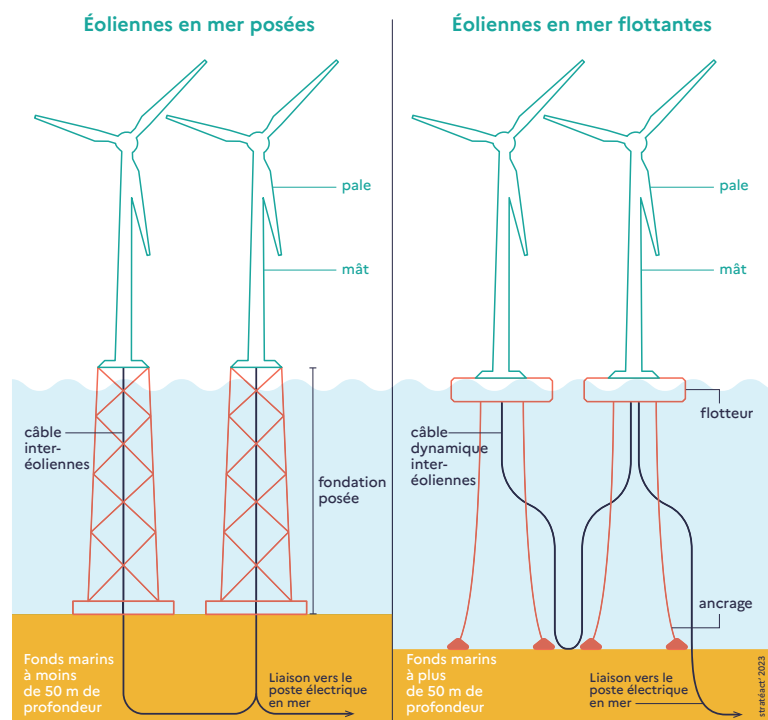
1. Les principales composantes d'un parc éolien en mer

1.1. L'éolienne

Une éolienne est constituée d'un mât, d'une nacelle et de pales. En mer, elle peut soit être posée sur le fond marin (technologie posée), soit reposer sur une base flottante ancrée aux fonds marins (technologie flottante), en fonction de la profondeur des fonds marins de la zone.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales : plus le diamètre de l'éolienne est grand, plus elle peut produire d'électricité. Par conséquent, pour une puissance totale donnée, plus les éoliennes sont grandes, moins elles sont nombreuses. Le parc éolien en mer posé de Saint-Nazaire, attribué en 2012, est ainsi composé de 80 éoliennes de 6 MW pour atteindre 480 MW, tandis que le projet du lauréat du projet Centre-Manche 1, attribué en mars 2023, ne dépassera pas 47 éoliennes pour une puissance totale d'environ 1000 MW (soit au moins 22 MW par éolienne).

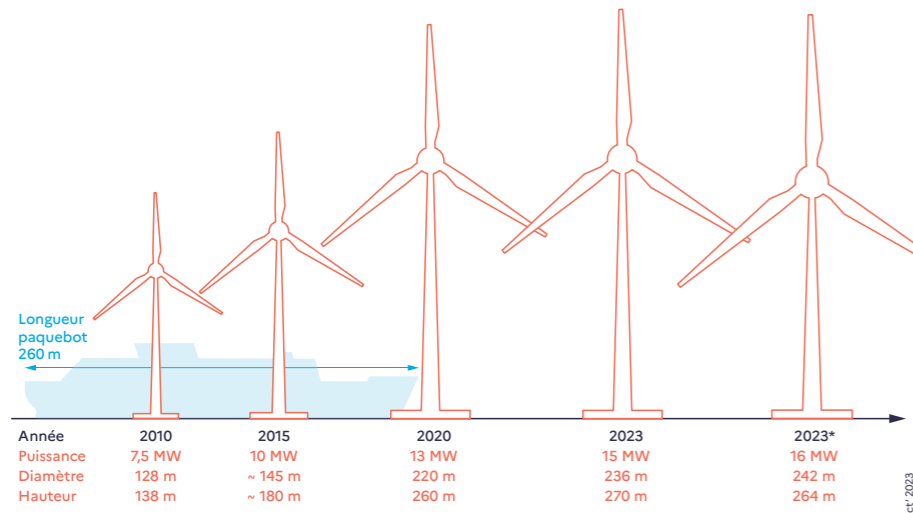
Les principales différences techniques entre éolien posé et flottant



Sources : Ministère de la Transition écologique, RTE

L'emprise totale du projet n'est pas réduite par l'augmentation de la puissance unitaire, car l'espacement entre les éoliennes doit être d'autant plus grand que les éoliennes sont hautes et puissantes. Cette même surface serait cependant composée d'un nombre bien plus faible d'obstacles, nécessitant moins de travaux d'implantation sur les fonds marins.

Évolutions de la taille et de la puissance d'une éolienne posée en mer



*Les dimensions représentées correspondent à celles de la plus grande éolienne en service à ce jour : MingYang MySE16.0-242. Les perspectives d'évolution de puissance et de taille des éoliennes dans les années à venir restent difficilement prévisibles. Certains industriels ont d'ores et déjà annoncé en début d'année des éoliennes de 18 MW.

Source : Ministère de la Transition énergétique

1.2. Les fondations

1.2.1 Technologie posée

Le mât de l'éolienne est installé sur une fondation, elle-même fixée au fond marin. La fondation doit résister aux efforts du vent, de la houle et des courants marins. À ce jour, il semble possible d'installer de l'éolien posé jusqu'à des profondeurs de fond de 70 m environ.

Trois principaux types de fondations sont utilisés pour les éoliennes posées : le monopieu, l'embase gravitaire ou le jacket. Le type de fondation est choisi en fonction des caractéristiques physiques du site d'implantation.

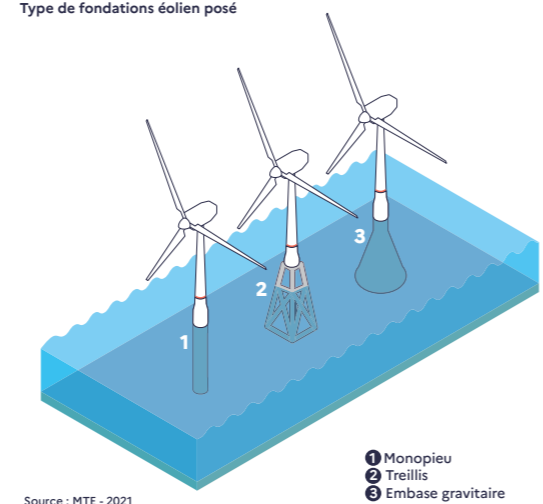
Principe de fondation monopieu

La fondation est constituée d'un pieu métallique enfoncé dans le fond marin par battage à l'aide d'un marteau hydraulique et/ou par forage. Le diamètre du pieu est de l'ordre de 10 m pour une éolienne de 13 MW. Ce type de fondation est notamment adapté aux terrains sédimentaires (sables et argiles) et est répandu en mer du Nord. En France, les parcs éoliens en mer de Courseulles-sur-Mer, Saint-Nazaire et Yeu-Noirmoutier utilisent des fondations monopieux.

Principe de fondation jacket

La fondation jacket est constituée d'un treillis métallique fixé sur le fond marin. Cette fondation repose généralement sur trois ou quatre pieds, ancrés au sol marin par des pieux battus et/ou forés, d'un diamètre de l'ordre de 2,5 m par pieu pour une éolienne de 13 MW. Les parcs éoliens en mer de Saint-Brieuc et de Dieppe-Le Tréport disposent de ce type de fondation.

Type de fondations éolien posé



Source : MTE - 2021

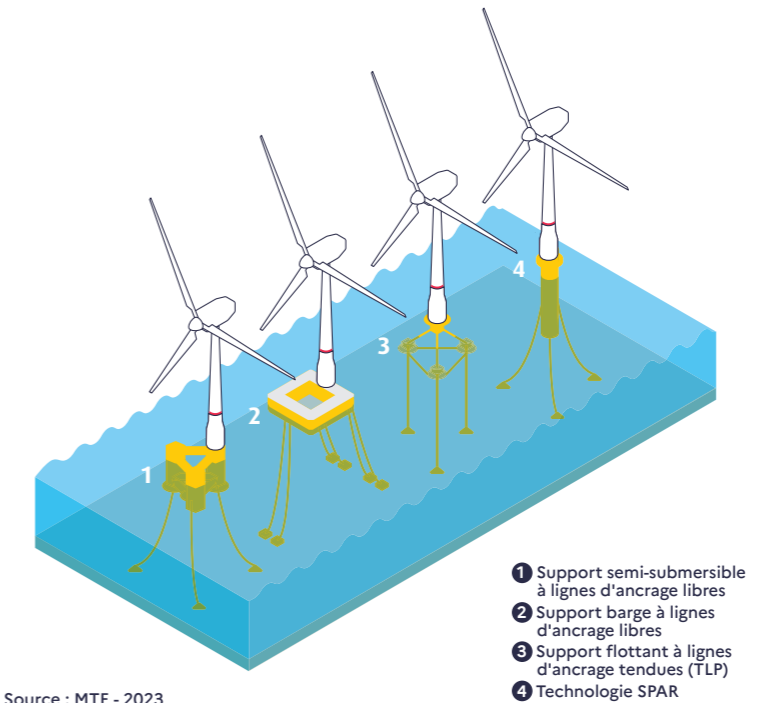
Figure 2 : Types de fondation d'éolien posé

Principe de fondation gravitaire

La fondation gravitaire est constituée d'une large structure en béton ou en acier, posée sur le fond marin afin d'assurer la stabilité de l'éolienne. Ce type de fondation est utilisé sur le parc de Fécamp pour lequel des turbines de 7 MW sont utilisées. Le diamètre au sol des fondations atteint plus de 30 mètres et la masse unitaire est de l'ordre de 5 000 tonnes.

1.2.2. Technologie flottante

Figure 3 : Types de flotteurs et d'ancrages pour l'éolien flottant



Source : MTE - 2023

Contrairement aux éoliennes posées en mer, qui reposent sur le fond, les structures flottantes sont maintenues par des lignes d'ancrage reliées aux fonds marins. Plusieurs technologies existent actuellement :

La plateforme semi-submersible avec ancrage caténaire

Le flotteur est stabilisé par sa forme qui comporte des volumes immergés. Les lignes d'ancrage doivent principalement résister aux efforts de dérive. Cette technologie est utilisée pour la ferme pilote des Éoliennes Flottantes du Golfe du Lion (EFGI).

La barge

La fondation flottante est ouverte en son centre afin de permettre une stabilisation du flotteur. Les lignes d'ancrage sont reliées au fond marin de manière à maintenir l'ensemble en position. Cette technologie est utilisée pour la ferme pilote Eolmed au large de Gruissan.

La plateforme avec ancrage à lignes tendues (Tensioned Leg Platform ou TLP)

La stabilité est obtenue grâce à un flotteur maintenu sous la surface de l'eau par des lignes qui le tirent vers le fond. Les lignes d'ancrage verticales doivent résister à des forces importantes dues à la pré-tension des lignes, en plus des efforts de dérive. Cette technologie est utilisée pour la ferme pilote Provence Grand Large (PGL).

La bouée équipée d'un flotteur de type « bouée crayon » (Single point anchor reservoir ou SPAR)

L'équilibre est assuré par le poids du flotteur immergé sur une grande hauteur. Ce concept ne peut s'envisager que si la profondeur d'eau est suffisante, c'est-à-dire supérieure à 100 mètres en général, et qu'il existe des sites à même d'accueillir l'installation des turbines sur de telles structures. À ce jour, seuls des fjords norvégiens ont accueilli de telles opérations d'installation et il apparaît peu probable que cette technologie soit utilisée en France.

Les systèmes d'ancrage peuvent être de différentes technologies : ancre à enfouissement, corps-mort, ancre à succion. Les chaînes d'ancrage sont généralement en acier mais d'autres types de matériaux pourraient être utilisés comme le nylon.

1.3. Les câbles électriques inter-éoliennes

Les éoliennes, à l'intérieur d'un parc, seront reliées entre elles et raccordées à un poste électrique en mer par des câbles électriques installés par le développeur du parc.

Pour les parcs flottants, ces câbles sont dynamiques sur une partie (de conception différente) pour absorber les mouvements de l'éolienne flottante liés à la houle ou la marée.

Ces câbles sont ensouillés (enfouis) dans le sol en priorité. Si l'ensouillage n'est pas possible, les câbles sont déposés sur le fond marin et protégés par des enrochements ou des matelas en béton.

1.4. Les systèmes de raccordement

Le système de raccordement du parc au réseau national, incluant le poste en mer et le(s) câble(s) d'export est décrit dans la fiche 39.

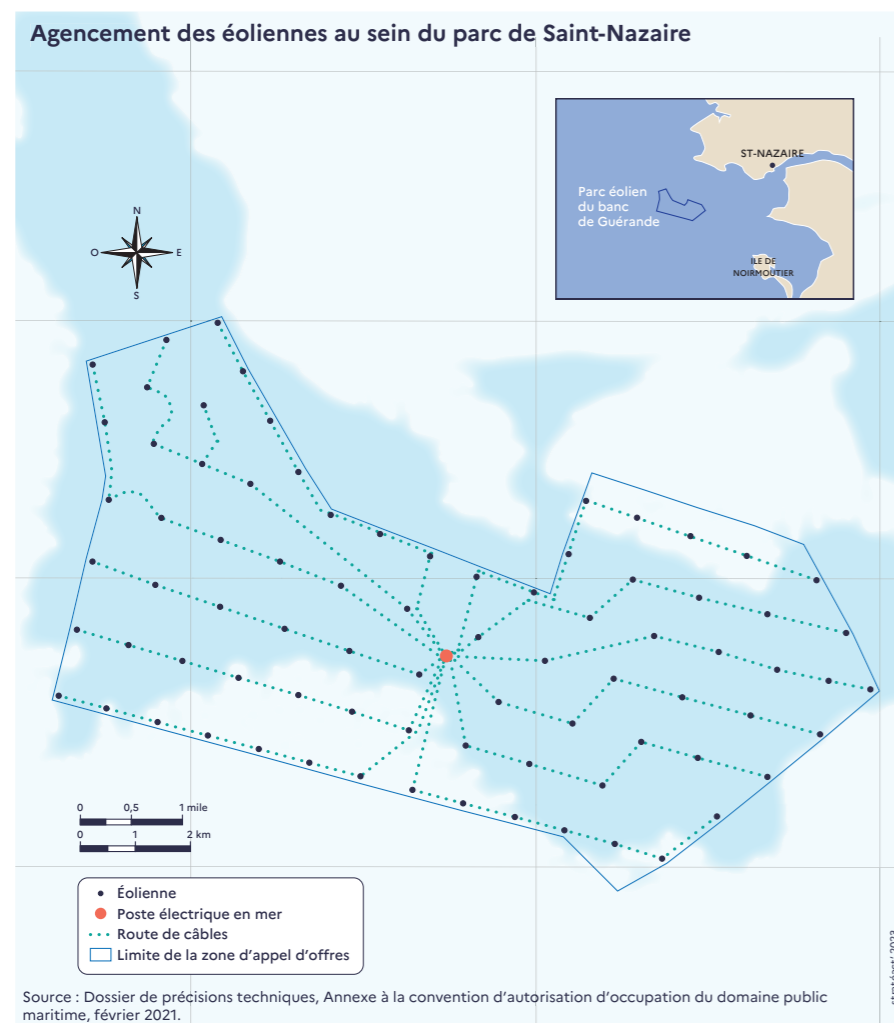
1.5. Organisation d'un parc éolien en mer

Au sein d'un parc, les éoliennes sont généralement agencées en lignes afin de limiter l'impact

- paysager selon certains angles de vue remarquables de la côte ;
- environnemental, en fonction par exemple des habitudes et directions de vol de certaines espèces sensibles ;
- sur les usagers de la mer, notamment les pêcheurs qui pêchent selon des axes préférentiels.

Des grappes d'éoliennes sont reliées entre elles par des câbles inter-éoliennes et reliées au poste en mer.

À titre d'exemple, l'agencement du parc de Saint-Nazaire est présenté ci-dessous.



2. Les principales étapes de la réalisation d'un parc éolien en mer

2.1. La construction du parc éolien en mer

2.1.1. Technologie posée

L'assemblage des différents éléments qui composent une éolienne en mer posée (fondations, mât, nacelle et pales) est réalisé en partie à terre et en partie en mer.

Les fondations sont généralement construites dans des usines et préassemblées dans des ports, d'où elles partiront pour être installées en mer.

- Les fondations sont habituellement transportées vers leur lieu d'implantation sur un navire auto-élévateur ou une barge auto-élévatrice. Il s'agit de bateaux avec une capacité d'auto-élévation au-dessus du niveau de l'eau qui assure la stabilité des opérations.
- Le levage des fondations nécessite des grues spécifiques de forte capacité. Si le navire ou la barge transportant les fondations n'est pas équipé(e) d'une telle grue, un autre navire qui en est équipé se charge du levage.

Les fondations gravitaires sont déposées sur les fonds marins après une préparation du sol nécessitant généralement un aplanissement. Les fondations de types monopieu et jacket nécessitent l'installation de pieux (de diamètre nettement plus faible pour les jackets) enfoncés dans le sous-sol marin. Selon les caractéristiques du sol, cette installation s'effectue soit par forage (des trous sont creusés dans le sol s'il est particulièrement dur), soit par battage (si le sol est plus friable et permet d'enfoncer des pieux à l'image de clous enfoncés par un marteau). Le navire qui a assuré le transport des pieux et leur levage réalise également les opérations d'installation dans le sous-sol.

Une fois les fondations installées, les autres composantes de l'éolienne (le mât, la nacelle et le rotor, les pales) sont acheminées jusqu'au lieu des fondations, également via un navire auto-élévateur.

En fonction du type d'installation retenue, une éolienne peut se composer de sept parties distinctes à assembler (les trois tronçons du mât, la nacelle assemblée au rotor, les trois pales). Afin de limiter le nombre et la complexité des opérations se déroulant en mer, les trois tronçons du mât sont en général assemblés à terre.

Les opérations de levage des composantes de l'éolienne (le mât, la nacelle et son rotor, les trois pales) nécessitent également des grues de forte capacité et de grande taille. Une fois l'opération terminée, le navire se remet en position de navigation et se déplace jusqu'aux fondations suivantes pour renouveler l'opération.

Les câbles inter-éoliennes sont installés par des navires spécialisés en parallèle des autres opérations sur le site.



Parc éolien en mer de Saint Nazaire (avril 2022)

2.1.2. Flottant

Les flotteurs sont assemblés dans un port, à partir de composants construits dans différentes usines et acheminés au besoin par bateau. L'assemblage des différentes parties des éoliennes (mats, nacelles, pales) sur leur flotteur sera réalisé à quai dans un port. Elles seront ensuite remorquées sur la zone d'implantation.

Les grandes phases de l'installation en mer du parc sont :

- l'installation des ancres et des lignes d'ancrage ;
- le remorquage et la connexion des éoliennes flottantes aux lignes d'ancrage ;
- la pose et la connexion des câbles inter-éoliennes aux éoliennes flottantes ;
- la mise en service du parc et du raccordement.

Les travaux en mer impliqueront la présence simultanée de plusieurs bateaux de différents types (remorqueur, navires de ravitaillement en mer hauturier, navette de transport de personnel, câblier, barge d'assistance, navire auxiliaire et de service, etc.) sur site pendant des durées variables.

2.2. L'exploitation et la maintenance d'un parc éolien en mer

L'exploitation et la maintenance des parcs sont réalisées pendant toute la durée de vie du parc, depuis la mise en service des installations jusqu'au démantèlement.

Elles sont assurées depuis une base portuaire de maintenance située préférentiellement à proximité immédiate du parc, qui doit être accessible 24h/24 et 7j/7 en cas d'urgence.

La liaison entre le port et les éoliennes se fait par des navires spécialisés (navires de transport de personnel) permettant un transfert sécurisé des techniciens du navire vers l'éolienne et vice-versa ou de systèmes de passerelles s'adaptant aux mouvements du bateau. En cas d'urgence, un transfert par hélicoptère est possible.

La durée de vie d'un parc éolien en mer dépend de ses caractéristiques et des conditions climatiques auxquelles il fait face. Il existe encore peu de retours d'expérience, mais les industriels estiment que les installations actuelles pourront fonctionner au moins 30 ans avant d'être démantelées. Ce chiffre pourrait augmenter avec l'amélioration des technologies. Le premier parc en mer installé au monde, à Vindeby au Danemark, a été exploité pendant 26 ans avant d'être démantelé en 2017.

2.3. Le démantèlement

2.3.1. Les opérations de démantèlement

Lorsque la durée d'exploitation d'un parc arrive à son terme, le développeur éolien est contraint de le démanteler afin de restituer le site dans un état comparable à l'état initial.

Pour l'éolien posé, les techniques de démantèlement sont similaires d'un parc à l'autre, à l'exception de celles relatives aux fondations : mise hors service de l'installation électrique du parc éolien ; démontage de l'ensemble des composants des éoliennes, avec des moyens similaires à ceux utilisés pour leur installation ; retrait des protections si nécessaire et récupération des câbles électriques inter-éoliennes et des câbles de raccordement, avec des moyens similaires à ceux utilisés en phase de construction.

Deux possibilités peuvent être envisagées quant au démantèlement des fondations : soit le développeur éolien est contraint de retirer intégralement les fondations, soit le développeur éolien peut laisser une partie des fondations en place, en particulier les éléments situés dans le sol marin, et ce afin d'éviter de creuser les fonds marins, ce qui serait susceptible d'avoir des impacts environnementaux importants. Les modalités précises seront décidées par l'État en amont des opérations de démantèlement en visant à une minimisation de la gêne pour les usagers et de l'impact environnemental.

Pour l'éolien flottant, le scénario de démantèlement est symétrique à celui de la phase d'installation : déconnexion des systèmes d'ancrages et du câble d'exportation de l'électricité ; remorquage du flotteur et de sa turbine jusqu'à un port, où les différentes sections de la turbine sont retirées une à une, démantèlement du flotteur.

Des études réalisées par le développeur éolien et par RTE permettront de préciser le périmètre et d'optimiser les modalités de démantèlement afin que l'ensemble de ces opérations, incluant la gestion de la sécurité en mer, soit réalisé suivant les meilleures conditions environnementales, techniques et économiques.

Par ailleurs, si l'étude réalisée par RTE démontre que les effets négatifs du démantèlement sont supérieurs à ceux du maintien (par exemple si le fait de déterrer les câbles en creusant les fonds marins risque d'impacter plus fortement l'environnement que de laisser les câbles sous terre), l'État peut autoriser RTE à déroger à l'obligation de démantèlement, et décider du maintien des câbles de raccordement. En revanche, certains éléments du poste électrique en mer seront obligatoirement démantelés.

Tous les composants démantelés sont ramenés à terre pour être éliminés ou recyclés. Les cahiers des charges comportent pour certains d'entre eux des exigences spécifiques en matière de recyclage ou de réutilisation des pales, des mâts, des nacelles, des flotteurs et des aimants permanents.

2.3.2. Les obligations imposées au développeur pour le démantèlement

Le développeur d'un parc éolien en mer est obligé de démanteler le parc, à sa charge, en vue de restituer le site dans un état comparable à l'état initial. Cette obligation de démantèlement est inscrite dans le cahier des charges de l'appel d'offres de la procédure de mise en concurrence. Cette obligation est retranscrite dans les autorisations administratives obtenues par le projet. Pour RTE, l'obligation de démantèlement et de remise en état du site est également inscrite dans les autorisations relatives au raccordement.

Pour les parcs déjà attribués, les autorisations prévoient qu'avant le terme de leurs autorisations administratives, le développeur éolien (trois ans avant) et RTE (deux ans avant) devront chacun communiquer au préfet du département concerné, pour approbation, une étude portant sur l'optimisation des conditions et opérations du démantèlement. Ces études devront impérativement prendre en compte les enjeux environnementaux, ainsi que ceux liés aux activités et à la sécurité maritime, et présenteront un calendrier d'exécution qui sera jalonné par des échéances à respecter.

Le respect du calendrier fait partie intégrante de l'obligation de démantèlement : si le développeur éolien ne respecte pas ces échéances, de lourdes pénalités pourront lui être appliquées. Par exemple, pour le projet éolien de Dunkerque, les pénalités seront de l'ordre de 10 000 à 40 000 euros par jour de retard.

2.3.3. Les garanties financières du démantèlement

Des garanties financières et des pénalités financières en cas de manquement permettent à l'État de s'assurer que les opérations de démantèlement seront effectivement réalisées. Si le développeur éolien manque à ses obligations de démantèlement, ou si la société qui constitue le développeur est dissoute ou liquidée avant la fin du démantèlement, l'État pourra procéder d'office aux opérations de démantèlement. Il fera appel aux garanties financières du développeur éolien pour financer ces opérations et pourra simultanément appliquer les pénalités de retard. Des sanctions administratives pourront également être prises à l'encontre du développeur éolien.

Dès le début de l'exploitation, le développeur éolien devra avoir constitué des garanties financières dédiées au futur démantèlement du parc éolien. Le montant de ces garanties financières doit permettre de couvrir l'intégralité des coûts des opérations de démantèlement.

Le montant initial des garanties est défini dans le cahier des charges. Il est indexé, c'est-à-dire qu'il évolue selon le prix de différents indices, et est réévalué périodiquement dans le cadre d'une procédure d'expertise réalisée aux frais du développeur éolien et prévue par l'autorisation administrative du projet.

Pour le projet éolien posé Centre-Manche 1, les garanties financières relatives au démantèlement constituées par le développeur du parc seront de l'ordre de 2,2 M€ par éolienne (hors indexation) au moment du démantèlement.

