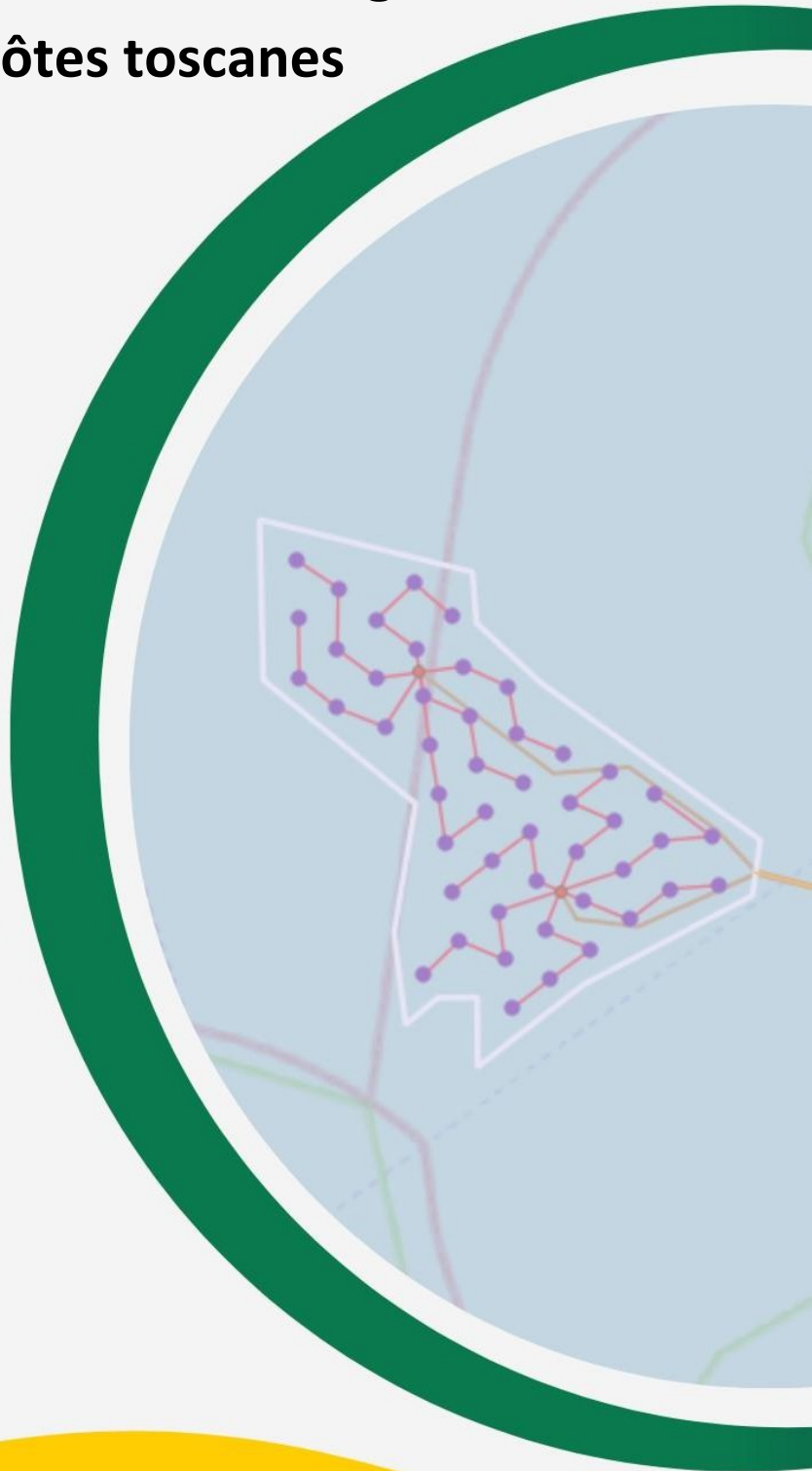


Projet de faisabilité technique et économique du parc éolien offshore flottant « Atis » de 864 MW dans la mer Ligure, au large des côtes toscanes

Plan préliminaire de maintenance



Signé numériquement par :
Laura Maria Conti
Date : 12/12/2024

16:38:

Révision

Auteur	Vérifié par	Société	Réviseur	Approuvé par	Société
Vito Cucciniello Matteo Lana	Carla Marcis Eleonora Lamanna Corrado Pluchino	Montana S.p.A.	Loreta Bruni Valerio Labattaglia	Enrico Testa	Eni Plenitude S.p.A

Document préparé par

Montana S.p.A

Via Angelo Carlo Fumagalli 6, Milan (MI), 20143, Italie

✉ segreteria@montanambiente.com

Ramboll

Ramboll Deutschland GmbH
Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763
Hambourg
Allemagne

✉ info@ramboll.de



Coordonnées de la société

Atis Floating Wind S.r.l

Numéro d'inscription au registre du commerce :
12645610960 Via Ripamonti 85, Milan (MI), 20141,
Italie

✉ Atisfloatingwind@legalmail.it

Contenu

1	Introduction	7
1.1	Objectifs du travail	7
1.2	Présentation du projet	7
1.2.1	Emplacement du parc éolien	7
1.2.2	Description des principaux composants.....	8
1.2.3	Caractéristiques de l'éolienne	10
1.2.4	Types de fondations	10
2	Stratégie de gestion et d'entretien des composants offshore.....	13
2.1	Sélection du port	13
2.2	Stratégie logistique.....	15
2.3	Stratégie de remplacement des composants principaux.....	15
2.4	Travaux à réaliser	16
2.5	Stratégie de maintenance	18
2.5.1	Stratégie d'appel d'offres	18
2.5.2	Stratégie pour les pièces de rechange	19
2.6	Autres éléments de maintenance générale	20
3	Stratégie de gestion et de maintenance des composants onshore	21
3.1	Conduites	21
3.2	Sous-station électrique	21
3.2.1	Travaux électriques	21
3.2.2	Travaux de génie civil.....	22
4	Prolongation de la durée de vie utile	24
5	Conclusions	25
6	Bibliographie	27

Liste des figures

Figure 1.1 : Cadre cartographique du parc éolien en projet.....	7
Figure 1.2 : Cadrage géographique des travaux du projet « Atis ».....	9
Figure 1.3 : Type de semi-submersible à 3 colonnes, avec tour centrale.....	11
Figure 1.4 : Type de semi-submersible à 4 colonnes, avec base rectangulaire.....	11
Figure 1.5 : Représentation tridimensionnelle de l'éolienne et de la fondation flottante.....	12
Figure 1.6 : Dessin d'ensemble de la sous-station marine (FOSS) et de la fondation flottante.....	12
Figure 2-1 : Étapes du processus de remorquage à terre.....	15
Figure 2-2 : Stratégies de maintenance possibles, adaptées de [3], basées sur [4].....	18

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Caractéristiques dimensionnelles des éoliennes de 18 MW envisagées pour le projet	10
Tableau 5-1 : Programme indicatif O&M	25

Abréviations et symboles

Abréviations	
AHTV	Remorqueur (Anchor Handling Tug Vessel)
BoP	Systèmes de soutien de l'installation
CPE	Polyéthylène chloré (Chlorinated Polyethylene)
CTV	Navire de transfert d'équipage (Crew Transfer Vessel)
DAS	Détection acoustique distribuée (Distributed Acoustic Sensing)
DPI	Équipements de protection individuelle
DTS	Détection acoustique distribuée (Distributed Acoustic Sensing)
EC	Câble sous-marin (Export cable)
EPR	Caoutchouc éthylène-propylène (Ethylene propylene rubber)
FMECA	Effets des modes de défaillance et analyse de criticité (Failure mode effect and criticality)
FOSS	Sous-stations électriques flottantes (Floating offshore sub-stations)
FOWT	Éolienne offshore flottante (Floating Offshore Wind Turbine)
IAC	Câble inter-réseaux
ISP	Fournisseur de services indépendant (Independent Service Provider)
JUV	Navire de levage (Jack-up Vessel)
MCE	Remplacement des composants principaux (Major Component Exchange)
MSL	Niveau moyen de la mer (Mean sea level)
O&M	Procédures d'exploitation et de maintenance (Operation and Maintenance)
OC	Câble terrestre (Onshore Cable)
OSS	Sous-station électrique (Onshore sub-station)
OEM	Fabricant d'équipements d'origine (Original Equipment Manufacturer)
OPEX	Dépenses opérationnelles (Operational Expenditures)
OWF	Parc éolien offshore (Offshore Wind Farm)
POC	Point de connexion (Point of Connection)
RNA	Assemblage de la nacelle du rotor (Rotor nacelle assembly)
ROV	Véhicule télécommandé (Remotely Operating Vehicle)
SMA	Contrat d'assistance et de maintenance (Service and Maintenance Agreement)
SOV	Navire de service (Service Operation Vessel)
T&I	Transport et installation (Transport and Installation)
TJB	Compartment de jonction (Transition Joint Bay)
TP	Raccord de transition (Transition piece)
TSA	Contrat d'assistance pour turbines (Turbine Service Agreement)
WTG	Éolienne (Wind turbine generator)

Sommaire

Ce document présente les procédures d'exploitation et de maintenance (O&M) du parc éolien offshore d'Atis. Il identifie les spécificités des procédures O&M applicables à ce type d'installations en fonction des caractéristiques propres au projet, telles que l'emplacement du projet, la distance par rapport à la côte, le type de fondation et le modèle des éoliennes. Sur la base de ces facteurs, une stratégie complète de gestion du parc éolien est proposée, tenant compte à la fois des activités de mise en place et des activités de gestion opérationnelle pendant les phases d'exploitation du parc. Cette stratégie comprend des considérations préliminaires telles que le port de référence choisi et le plan logistique.

Le document examine en particulier des facteurs tels que le choix du port, la logistique, le remplacement des composants principaux et les stratégies de maintenance, dans le but d'orienter le développement d'approches O&M efficaces et rentables. Il analyse également les stratégies de négociation et d'approvisionnement en pièces de rechange afin de garantir la mise en service du parc éolien et sa viabilité opérationnelle à long terme.

Le plan de maintenance préliminaire vise à fournir une première caractérisation des activités de maintenance prévues pour les différents composants du système, tant offshore qu'onshore, tout en mettant en évidence les interactions environnementales utiles pour évaluer les impacts potentiels.

Le plan analyse en particulier les éléments clés du projet, notamment :

- la maintenance des turbines ;
- entretien des structures de fondation, des amarrages et des ancrages ;
- entretien des câbles marins reliant les différentes turbines entre elles et des câbles reliant celles-ci à la terre ferme ;
- entretien des câbles terrestres ;
- entretien des stations électriques offshore ;
- entretien des stations électriques onshore.

1 Introduction

1.1 Objectifs du travail

Le projet en question concerne la réalisation d'un nouveau parc éolien offshore flottant, appelé « Atis », d'une capacité totale de 864 MW, situé à environ 55 km de la côte toscane. Les travaux de raccordement au réseau électrique national au point indiqué par TERNA concernent les communes de Rosignano Marittimo et Castellina Marittima, dans la province de Livourne, en Toscane.

La société promotrice est Atis Floating Wind S.r.l, dont le siège social est situé Via Ripamonti 85, Milan (MI). À cette fin, le présent document constitue le **plan de maintenance** du projet.

1.2 Présentation du projet

1.2.1 Emplacement du parc éolien

Le projet « Atis » concerne la réalisation d'un parc éolien offshore flottant dans les eaux de la mer Ligure et, plus précisément, dans une zone cartographiée par les coordonnées barycentriques P0 (43° 19' 20.0394" N, 9° 37' 38.6429" E) dans le système de référence WGS84-UTM zone 32N (Figure 1.1). La zone du site d'installation présente une profondeur de fond comprise entre -250 et -630 m au-dessus du niveau de la mer et se trouve à une distance minimale d'environ 17 km de l'île de Gorgona, à 22 km de l'île de Capraia et à 55 km des côtes de la Toscane continentale, plus précisément de la localité de Calafuria, dans les eaux face à l'archipel toscan, dans la province de Livourne.

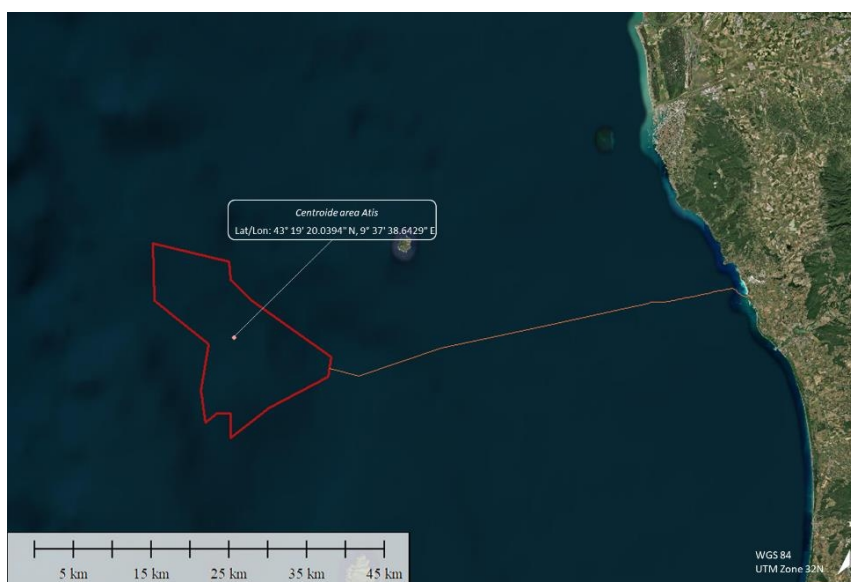


Figure 1.1 : Cartographie du parc éolien en projet.

Le projet, qui s'étend sur une superficie d'environ 264 km², prévoit l'installation de 48 éoliennes flottantes, chacune d'une puissance de 18 MW, pour une capacité totale de 864 MW. Les éoliennes seront reliées par une série de câbles sous-marins (IAC - Inter-array cable) à deux sous-stations électriques flottantes offshore (FOSS - Floating offshore sub-stations).

À partir des deux FOSS, quatre câbles (EC - Export cable), deux pour chaque sous-station, seront posés à partir des deux FOSS pour transporter l'électricité produite jusqu'à la zone d'atterrissage dans la commune de Rosignano Marittimo (à environ 1,6 km au nord du port de Vada) et la connexion à terre jusqu'à la sous-station électrique pour le raccordement au réseau national de transport d'électricité (RTN) selon les modalités prévues par TERNA (Figure 1.2).

Le projet a été développé en tenant compte des technologies émergentes de l'éolien offshore flottant, en incluant les détails essentiels et pertinents pour évaluer les impacts potentiels et vérifier la compatibilité environnementale. Au cours de la phase d'exécution, la conception sera optimisée et tiendra compte de la disponibilité commerciale des éléments au moment de la construction.

1.2.2 Description des principaux composants

Plus précisément, les principaux composants du parc éolien en projet se divisent en :

- **Parc éolien offshore (OWF - Offshore Wind Farm)**
Il s'agit du système qui permet aux éoliennes situées en mer d'exploiter l'énergie cinétique du vent, de la convertir en énergie électrique et de la transporter vers la terre ferme. Il comprend :
 - 48 éoliennes flottantes offshore (FOWT - Floating offshore wind turbine), y compris les fondations flottantes ;
 - 2 sous-stations électriques marines flottantes (FOSS - Floating offshore sub-stations) ;
 - des câbles inter-réseaux (IAC), câbles sous-marins qui relient les turbines entre elles au sein du parc éolien, transportant l'énergie produite vers les sous-stations offshore ;
 - Câbles d'exportation (EC), câbles sous-marins qui transportent l'énergie des sous-stations offshore vers la côte.
- **Atterrage ou « landfall »**
Zone à l'interface onshore/offshore où les câbles offshore sont amenés à terre pour être connectés à la ligne électrique terrestre, qui comprend :
 - Baie de jonction (TJB - Transition Joint Bay), essentielle pour garantir la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des connexions électriques entre les turbines et, de manière générale, tous les composants en mer et les sous-stations, c'est-à-dire les composants terrestres.
- **Infrastructure onshore**
Partie de l'installation qui se développe sur la terre ferme, qui comprend les travaux de connexion au réseau électrique national :
 - Câble terrestre (OC – Onshore cable), qui relie l'installation de la baie de jonction au point de connexion (POC – Point of connection), via la sous-station terrestre ;
 - n° 1 Sous-station électrique (OSS – Onshore sub-station), qui représente le point de connexion entre le parc éolien offshore et le réseau de transport d'électricité terrestre.

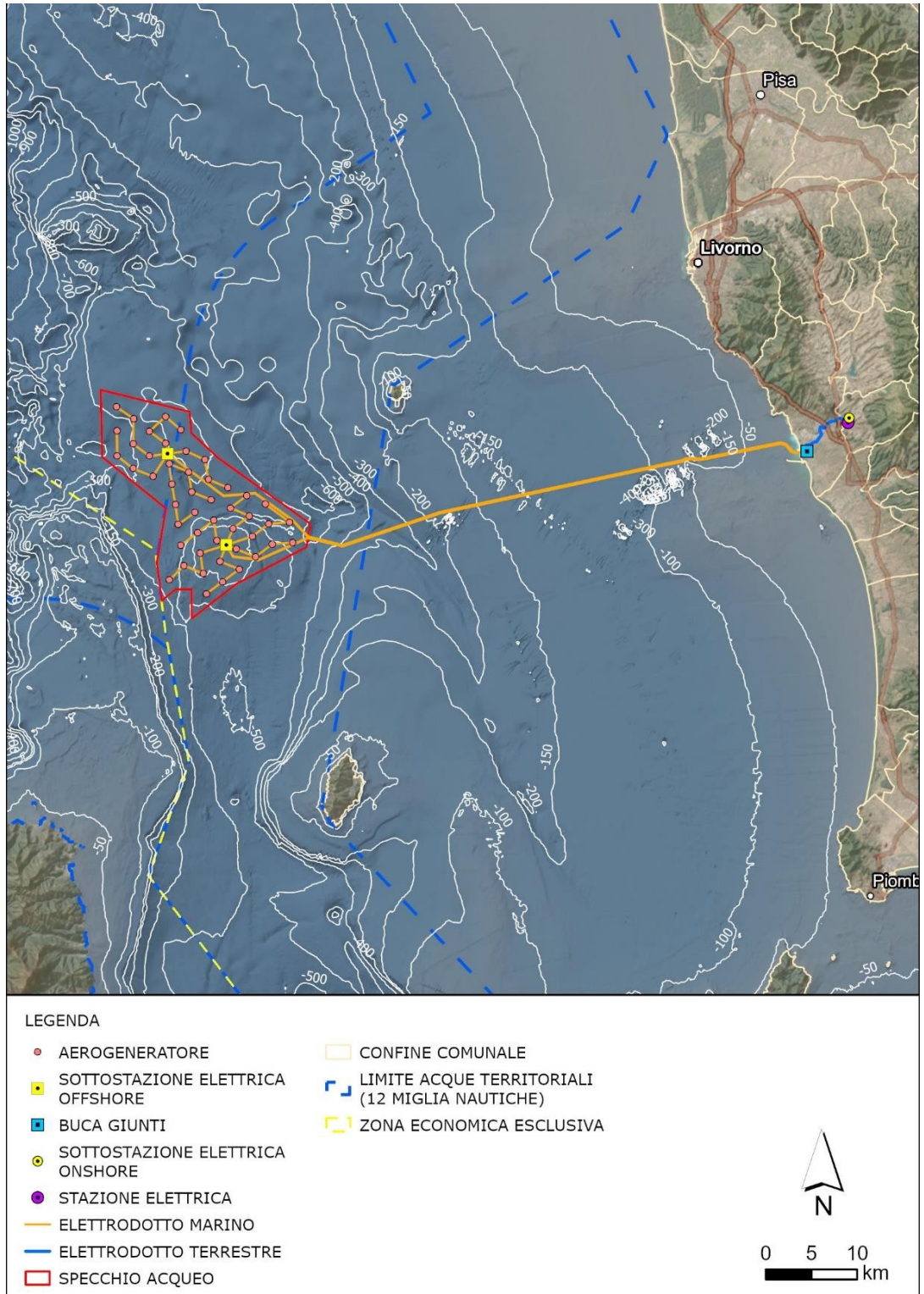


Figure 1.2 : Cadre géographique des travaux du projet « Atis ».

1.2.3 Caractéristiques de l'éolienne

Le projet prévoit l'installation d'éoliennes à trois pales à axe horizontal, d'une hauteur au moyeu de 155 m. Au sommet de la tour sera placée la nacelle, à laquelle est relié le rotor d'un diamètre de 250 m. La hauteur maximale totale du système tour-pales atteindra 280 m, en tenant compte de la pointe des pales.

Vous trouverez ci-dessous les principales caractéristiques dimensionnelles du type d'éoliennes actuellement envisagées pour le projet.

Tableau 1-1 : Caractéristiques dimensionnelles des éoliennes de 18 MW envisagées pour le projet

ÉOLIENNE DU PROJET		
Données de fonctionnement	Valeur	Unité de mesure
Puissance nominale	18	MW
Rotor		
Diamètre	250	m
Nombre de pales	3	-
Vitesse du rotor (nominale)	7,6	tr/min
Vitesse du rotor (minimale)	4,3	tr/min
Vitesse du rotor (maximale)	7,6	tr/min
Tour		
Type	Tubulaire	
Hauteur au moyeu	155	m
Pale		
Longueur	120	m
Caractéristiques globales		
Hauteur maximale	280	m
Poids (RNA : Rotor-Nacelle Assembly)	930	t

Au cours de la phase d'exécution, le choix de la marque et du modèle de l'éolienne sera effectué en tenant compte de l'évolution effective des machines disponibles au moment de la construction.

1.2.4 Types de fondations

Compte tenu de la profondeur des fonds marins sur le site, il a été décidé d'opter pour un système de fondations flottantes. Des structures flottantes semi-submersibles (floaters) en acier sont donc prévues. Le type de floater a été sélectionné à l'issue d'un processus d'évaluation basé sur un ensemble de critères technologiques spécifiques, combinés aux conditions particulières de la morphologie des fonds marins italiens. Ce concept repose sur :

- des semi-submersibles en acier à 4 colonnes ou à 3 colonnes avec une tour centrale ;
- un système d'amarrage tendu ou semi-tendu.

De seguito vengono riportate le rappresentazioni tridimensionali dei tipologici di fondazione de l'éolienne et de la sous-station électrique marine flottante.

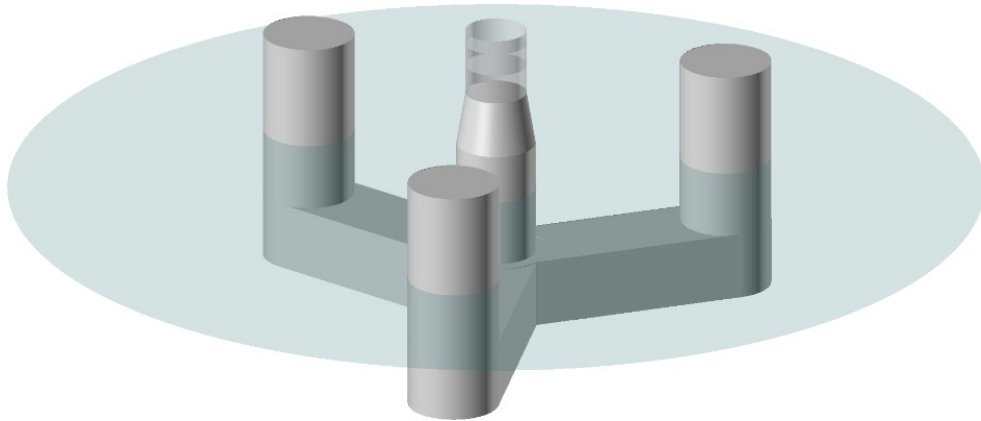


Figure 1.3 : Type de semi-submersible à 3 colonnes, avec tour centrale

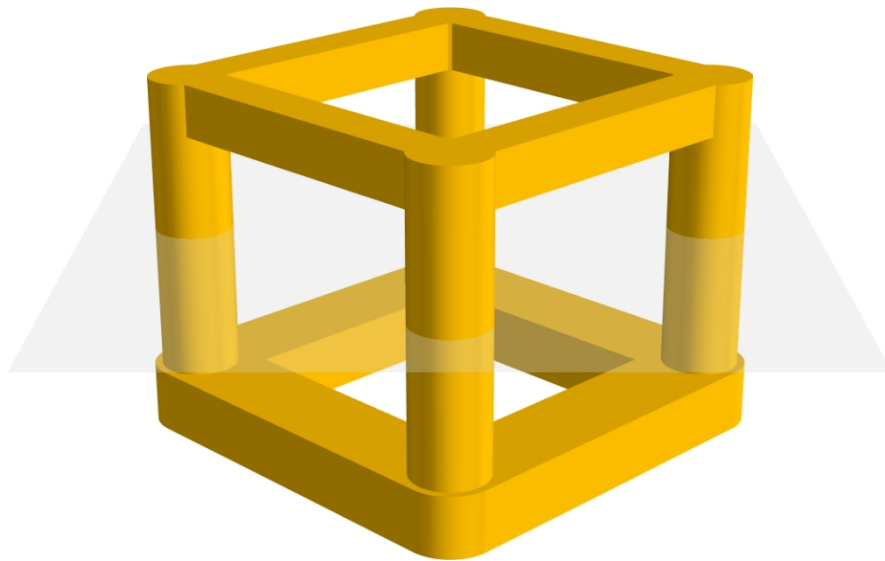


Figure 1.4 : Type de semi-submersible à 4 colonnes, avec base rectangulaire



Figure 1.5 : Représentation tridimensionnelle de l'éolienne et de la fondation flottante

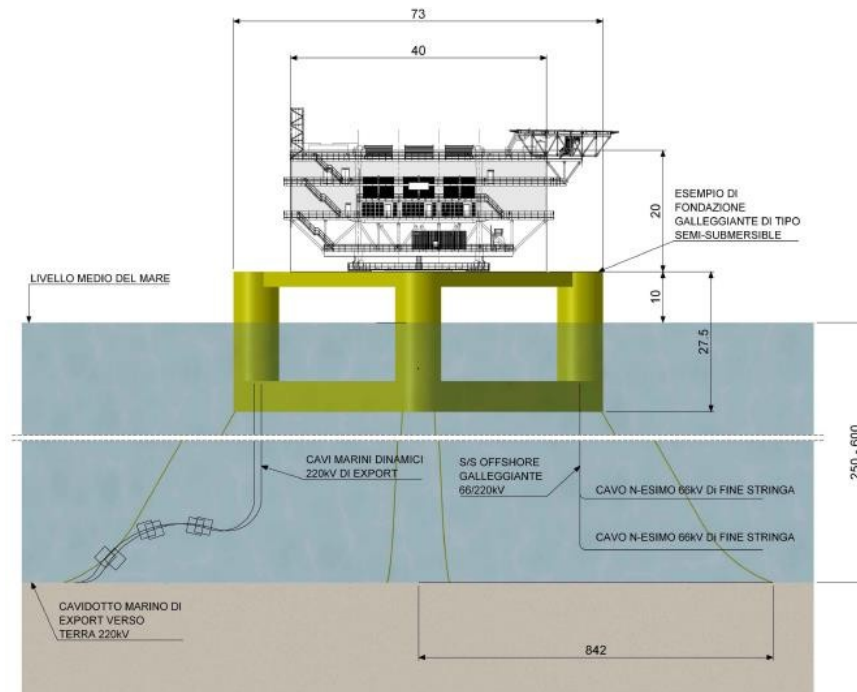


Figure 1.6 : Dessin d'ensemble de la sous-station marine (FOSS) et de la fondation flottante

2 Stratégie de gestion et de maintenance des composants offshore

Afin de permettre le développement d'une stratégie de gestion et de maintenance (ci-après O&M) à ce stade du projet, il est nécessaire de formuler certaines hypothèses de base qui devront être vérifiées, et éventuellement intégrées, dans les phases suivantes du projet.

Les principaux facteurs déterminants pour la définition de la stratégie, qui ont un impact sur les hypothèses formulées, sont les suivants :

- **Emplacement du parc éolien.**
L'emplacement du parc éolien déterminera plusieurs aspects, notamment : le type de fondations, le choix du modèle d'éolienne, le choix des ports pouvant être envisagés pour les opérations d'O&M, et enfin la stratégie logistique nécessaire.
- **Travaux prévus.**
La charge de travail prévue (en termes de volume et de délais) aura une incidence sur la logistique et les installations à terre nécessaires.
- **Critères de conception des opérations.**
Les hypothèses du concepteur détermineront les besoins et les préférences lors de la localisation des installations à terre.

Les paragraphes suivants développent les facteurs susmentionnés et fournissent des indications pour choisir la meilleure stratégie à partir des informations actuellement disponibles.

2.1 Sélection du port

Les activités opérationnelles nécessitent le soutien d'une base logistique portuaire adéquate où placer le personnel, les équipements et les moyens fonctionnels pour les opérations d'exploitation et de maintenance. Le port sélectionné devra notamment disposer d'un accès rapide au parc éolien et d'une capacité de navigation intérieure suffisante pour la mobilisation des pièces de rechange et du personnel nécessaires à la fourniture des services d'assistance requis. Cela implique non seulement un espace suffisant à quai, mais aussi une zone pour les entrepôts et de bonnes voies de communication terrestres.

La sélection finale du port sera effectuée au cours des phases les plus avancées du projet ; à titre préliminaire, au stade actuel de l'autorisation, plusieurs ports potentiels proches du site ont été identifiés comme pouvant fournir un soutien aux activités de maintenance du parc éolien Atis :

- Livourne,
- Piombino,
- La Spezia,
- Gênes,
- Savone,

- Civitavecchia,
- Arbatax.

Ces ports ont été examinés en tenant compte des paramètres suivants :

- **Objectif.** L'objectif pour lequel le port doit être utilisé définit les exigences auxquelles il doit satisfaire en matière d'entretien et d'inspections quotidiennes. Le port doit être en mesure d'accueillir un à deux navires de transfert d'équipage (CTV) ou un navire de service (SOV), selon la stratégie d'exploitation et de maintenance choisie. Un petit espace de stockage pour l'équipement nécessaire est également utile, éventuellement situé à 2-3 km à l'extérieur du port si l'espace à l'intérieur est limité. Le remplacement des principaux composants d'une turbine flottante peut nécessiter une opération de remorquage vers le port ; celui-ci doit donc garantir certaines des caractéristiques prévues lors de l'installation (par exemple, infrastructures, profondeur des eaux, remorqueurs, etc.).
- **Proximité et accès au parc éolien.** Ce paramètre décrit la proximité du port par rapport au parc éolien et dans quelle mesure la voie d'accès est entravée par des obstacles potentiels tels que des ponts et des lignes électriques qui limitent le passage de certains navires. La proximité du port par rapport au parc éolien est un facteur clé, car elle détermine le temps nécessaire au navire de transport de l'équipage (CTV) pour se rendre au parc éolien et, par conséquent, le temps dont dispose le technicien pendant son quart pour réparer les turbines.
- **Infrastructures portuaires et utilisation courante.** Il est souhaitable de sélectionner des ports disposant d'infrastructures disponibles et ne nécessitant pas de modifications importantes. En outre, à distance égale, il est préférable de choisir un port où des activités industrielles sont déjà exercées plutôt qu'un port principalement utilisé pour des activités touristiques et récréatives.
- **Type de navires utilisés.** Les ports adaptés aux navires SOV peuvent être relativement éloignés du parc (car les escales ne sont pas quotidiennes, mais peuvent avoir lieu tous les 14 jours, par exemple), mais ils nécessitent de meilleures infrastructures. En revanche, les ports CTV auront des exigences moins élevées, mais devront être plus proches du parc éolien, car le temps de trajet est essentiel pour maximiser les heures de travail disponibles des techniciens employés dans les opérations O&M offshore.
- **L'arrière-pays portuaire.** Il est souhaitable de disposer d'une bonne liaison routière vers le port. Il est également important de prendre en compte la communauté locale autour du port, les différentes industries et les services fournis par ces communautés : certaines zones peuvent en effet être axées sur l'industrie, d'autres sur le tourisme.

Sur la base de la liste des ports fournie, des exigences proposées et des informations disponibles, le port de **Livourne** a été préliminairement identifié comme le meilleur candidat pour l'implantation de la base d'assistance primaire pour les opérations d'exploitation et de maintenance, ainsi que comme première option pour les opérations de transport des structures flottantes en cas de remplacement des composants principaux. Le port de **Piombino** constituerait une bonne alternative. Ce choix s'aligne sur les ports proposés dans le rapport sur les activités de construction, d'installation et de mise en service des ouvrages (ATI-ING-VIA-RELCOS-R14-00). Dans tous les cas, des études plus approfondies devront être menées au cours des phases ultérieures du projet.

2.2 Stratégie logistique

La distance par rapport au port, l'étendue du parc éolien et les conditions météorologiques et maritimes sont des facteurs qui influencent la stratégie logistique optimale pour atteindre un équilibre entre faibles coûts d'exploitation et disponibilité élevée.

Compte tenu de la distance par rapport au port et des conditions météorologiques plutôt favorables dans la région, l'utilisation de navires de type CTV semble être l'approche la plus appropriée. L'accessibilité globale devrait être bonne tout au long de l'année, avec pratiquement aucune interruption en été et quelques retards à prévoir pendant les mois d'hiver, lorsque la hauteur des vagues atteint des valeurs plus élevées.

Les véhicules télécommandés (ROV) seraient lancés et manœuvrés à partir d'un navire de type CTV ou d'un navire de type SOV spécialement équipé, pour des inspections sous-marines, des tests et des réparations mineures.

2.3 Stratégie de remplacement des composants principaux

Pour le remplacement des composants principaux, on suppose que les turbines et les fondations flottantes seront remorquées jusqu'au port, où une grue à anneau ou une grue sur chenilles effectuera les opérations de levage et de dépôt à terre pour les réparations. Alternativement, la turbine peut être remorquée vers une zone maritime abritée et peu profonde où un navire jack-up (JUV) peut effectuer le remplacement des composants. Des remorqueurs offshore sont utilisés pour le remorquage et pour stabiliser le système flottant pendant les réparations/remplacements s'il ne peut être amarré à un quai.

Le processus de remorquage doit être effectué en suivant les étapes illustrées à la figure 2-1 :

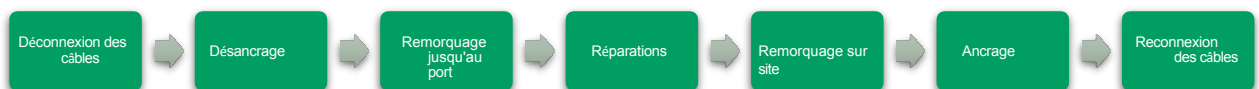


Figure 2-1 : Étapes du processus de remorquage à terre.

Pour la phase de remorquage à terre, on peut estimer approximativement les durées suivantes, qui comprennent une éventualité de retard météorologique de 50 %. Les durées dépendent fortement du type de flotteur et de sa conception, ainsi que du type de navire utilisé. Les délais indiqués sont donc à titre indicatif :

- 4 à 5 jours pour le débranchement des câbles,
- 2 à 3 jours pour le désancrage des amarres,
- 1 à 7 jours pour le remorquage jusqu'au port,
- 1/2 à 1 jour pour le positionnement et l'amarrage de la fondation flottante dans le port.

Les mêmes durées sont prévues pour le désancrage de la fondation flottante dans le port et les préparatifs pour le remorquage, pour le remorquage en mer ouverte et l'amarrage au large.

On suppose que pour les opérations de remplacement des câbles, un navire câblé peut être utilisé pour effectuer les principales réparations et remplacements des sections de conduites sous-marines à l'aide de moyens télécommandés (ROV).

En principe, le remplacement d'un câble d'amarrage est une opération inverse à la procédure de désancrage ; les exigences et les facteurs déterminants sont donc les mêmes. Il est prévu que de grands remorqueurs hauturiers seront nécessaires pour maintenir la position. Le remplacement du câble d'amarrage sera effectué par le navire chargé de la manutention des ancres. Les exigences relatives aux remorqueurs pour la manutention des ancres concernent principalement la traction du bollard et le positionnement dynamique.

2.4 Travaux à réaliser

Tous les travaux liés aux activités et services suivants sont soumis à la stratégie O&M :

- éoliennes ;
- structures flottantes ;
- câbles inter-réseaux ;
- câbles d'exportation offshore ;
- sous-stations offshore ;
- travaux de soutien sur site et back-office ;
- câble d'exportation terrestre ;
- sous-station terrestre.

Connaître les travaux à réaliser permettra d'estimer les besoins en personnel, les besoins logistiques et les besoins en espace (tant pour les bureaux que pour la taille de l'entrepôt au sein de la base O&M).

Les stratégies typiques de maintenance des parcs éoliens offshore reposent sur la maintenance corrective (run-to-failure) et préventive.

Une stratégie de maintenance corrective repose sur l'utilisation complète d'un élément jusqu'à ce que cette utilisation entraîne une défaillance, définie comme « l'incapacité d'un système ou d'un composant à remplir ses fonctions requises dans le respect des exigences de performance spécifiées » [4].

Une stratégie de maintenance préventive repose sur la planification régulière de la maintenance et des inspections. Cette stratégie présente l'avantage de garantir un approvisionnement en électricité fiable et prévisible. Cependant, ses inconvénients comprennent la possibilité d'une maintenance excessive, en remplaçant les composants bien avant la fin de leur durée de vie nominale, et en planifiant les inspections au mauvais moment, par exemple juste avant qu'un mécanisme de défaillance ne devienne visible ou quantifiable par des évaluations sur site.

Ces deux types de maintenance peuvent être subdivisés. La maintenance préventive comprend la maintenance basée sur le temps et les conditions, tandis que la maintenance corrective comprend la maintenance différée et immédiate. La maintenance basée sur le temps, également appelée maintenance programmée, est effectuée de manière préventive et sans évaluation préalable des conditions, à des intervalles ou des quantités spécifiés. Elle peut être subdivisée en maintenance fixe selon un calendrier, par exemple tous les deux ans, et en maintenance opérationnelle basée sur le temps, par exemple après un certain nombre de cycles de charge. La maintenance conditionnelle nécessite une surveillance du système et repose sur le résultat de la mesure de certains paramètres. Les mesures des paramètres peuvent être effectuées par une surveillance continue ou des inspections périodiques. La maintenance différée désigne la maintenance corrective qui n'est pas effectuée immédiatement après la détection des défauts, mais qui est reportée à un moment ultérieur conformément au plan de maintenance existant, généralement lors de la prochaine inspection programmée.

La maintenance préventive vise à minimiser les pannes ; elle peut donc entraîner des temps d'arrêt (perte de production pendant les inspections), des coûts de pièces de rechange et des coûts d'opportunité. La maintenance basée sur l'état d'usure est donc préférable lorsque des données suffisantes sur l'état des composants sont disponibles. Si, pour surveiller les pannes, on choisit un capteur qui collecte des données en continu plutôt qu'une inspection périodique, les données doivent ensuite être traitées afin d'exclure les valeurs aberrantes, d'identifier les tendances et d'obtenir un ensemble de données qui aide à la prise de décision. Les paramètres à surveiller peuvent inclure les vibrations et les paramètres mécaniques, la température de divers composants, la qualité de l'huile, les paramètres électriques tels que la tension, le courant, la puissance, les angles de lacet et de tangage, les paramètres structurels (à l'aide de capteurs qui détectent les fissures, les déformations, l'usure), les paramètres environnementaux tels que la vitesse et la direction du vent et d'autres paramètres dépendant des conditions météorologiques afin de comprendre le fonctionnement des turbines dans différentes conditions.

La complexité des méthodes de post-traitement dépend de la source des données, de leur qualité, de leur exhaustivité et des données attendues, et peut inclure ou non des techniques de traitement automatique et des algorithmes prédictifs. Le traitement automatique devient nécessaire lorsqu'il s'agit de grandes quantités de données provenant de divers capteurs et sources. Les algorithmes de traitement automatique peuvent identifier des modèles et des anomalies et prévoir des pannes potentielles sur la base de données historiques, contribuant ainsi à des stratégies de maintenance prédictive. Ceux-ci peuvent aider à analyser les relations complexes entre différents paramètres et leur impact sur les performances de l'éolienne.

Les stratégies de maintenance possibles sont présentées dans le schéma de la figure 2-2. La maintenance corrective présente l'avantage de maximiser la durée de vie des composants, mais elle est généralement associée à de longues périodes d'indisponibilité, au risque de dommages consécutifs, voire de pannes catastrophiques, et au fait que la maintenance ne peut être planifiée. La maintenance préventive planifiée présente l'avantage d'être prévisible, ce qui permet une gestion efficace des pièces de rechange et une plus grande disponibilité par rapport à la maintenance corrective. Cependant, le gaspillage de la durée de vie restante des composants peut en faire un choix coûteux.

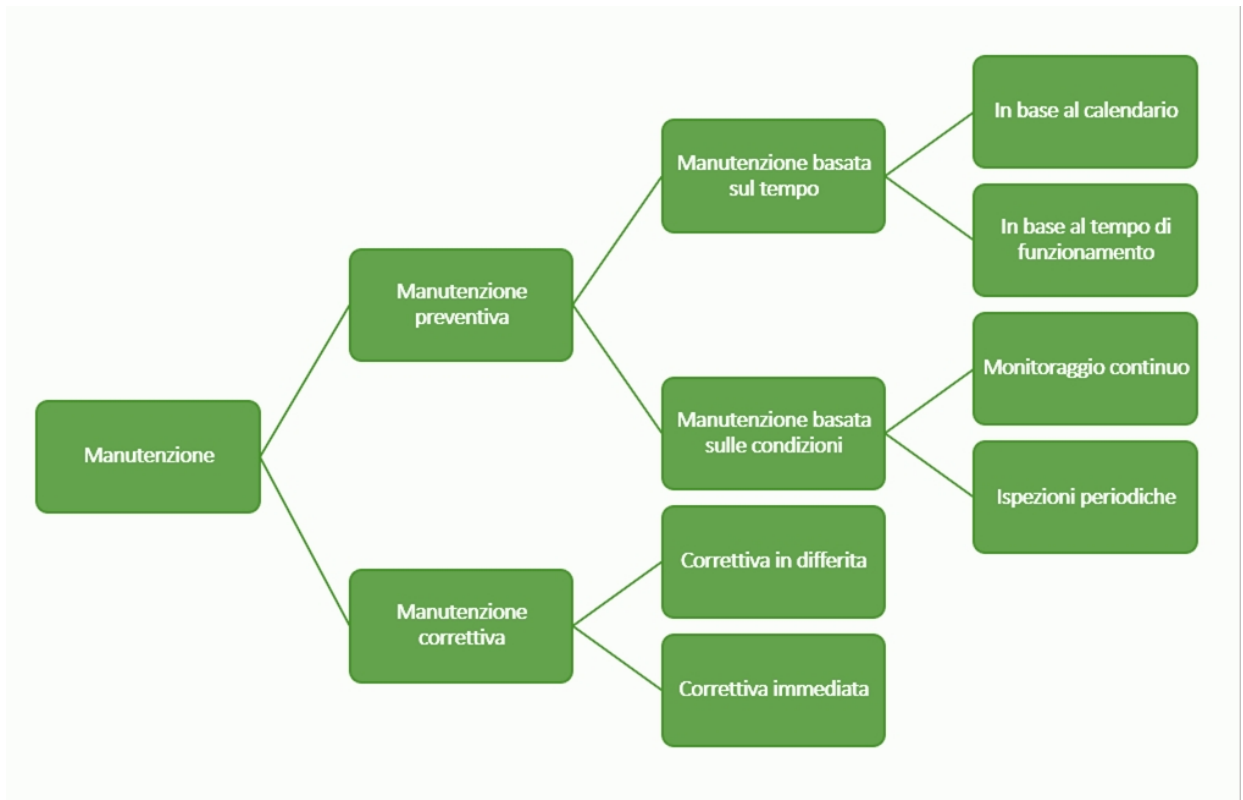


Figure 2-2 : Stratégies de maintenance possibles, adaptées de [3], basées sur [4].

2.5 Stratégie de maintenance

Outre les éléments déjà évoqués, la gestion d'un parc éolien doit également tenir compte des hypothèses de conception formulées par le professionnel mandaté. Dans le cas présent, la durée de vie utile du parc éolien d'Atis est estimée à 30 ans. Ce paragraphe traite brièvement de la stratégie d'approvisionnement et de la stratégie en matière de pièces de rechange.

2.5.1 Stratégie d'approvisionnement

Il est courant de conclure un contrat de maintenance (SMA) avec le fabricant d'origine des équipements des éoliennes (OEM) pendant les cinq premières années de fonctionnement du parc éolien. Pendant cette période, le remplacement des composants principaux sera effectué conformément au contrat de fourniture des turbines (TSA). La décision concernant la manière dont la maintenance des éoliennes sera effectuée à partir de la sixième année revient à l'exploitant du parc éolien. Cette maintenance peut être effectuée en interne par le personnel d'exploitation ou sous-traitée à l'OEM (fabricant d'origine) ou à un autre prestataire de services indépendant (ISP). Des contrats de service peuvent également être signés pour tous les autres composants de gestion de l'installation, tels que la fondation flottante, les stations électriques et la maintenance du câble inter-réseau.

2.5.2 Stratégie pour les pièces de rechange

La stratégie en matière de pièces de rechange, qui ne dépend pas entièrement de la stratégie contractuelle mais qui y est néanmoins liée, doit être convenue. Les pièces de rechange peuvent être divisées en trois groupes différents :

- Pièces de rechange demandées régulièrement.
- Pièces de rechange standard avec des délais de livraison longs (par exemple, pales et supports principaux).
- Pièces spécialement conçues (par exemple, câbles sous-marins).

Les pièces de rechange régulièrement demandées doivent être stockées avec les consommables dans l'entrepôt O&M de base, tandis que pour tous les autres éléments caractérisés par des délais de livraison longs, une stratégie d'approvisionnement doit être établie suffisamment à l'avance. Dans ce dernier cas, il est en effet possible d'envisager un achat anticipé avec stockage sur place par l'exploitant ou de rédiger des contrats spécifiques garantissant des délais de production et une disponibilité des pièces de rechange adaptés pendant toute la durée de vie opérationnelle du parc éolien. Par exemple, les câbles sous-marins devraient être commandés dans le cadre de la livraison du parc éolien offshore, car leur approvisionnement ultérieur sera très coûteux.

Le stock O&M devrait contenir des pièces de rechange pour les câbles d'exportation et les câbles inter-réseaux. Il est préférable que tous les câbles d'exportation du parc éolien soient du même type afin d'éviter d'avoir des pièces de rechange de types différents. Une philosophie similaire peut être appliquée aux câbles inter-réseaux.

Les pièces de rechange à conserver en stock dépendent de la fréquence des pannes, de l'importance de chaque composant et des délais d'approvisionnement sur le marché. Par exemple, les composants spécialement conçus peuvent avoir des délais de livraison longs en raison de leur faible disponibilité. De plus, si la panne de certains composants entraîne des pertes de production importantes (par exemple pour les câbles), ces composants deviennent hautement prioritaires pour le stockage. Outre les câbles, les pièces de rechange peuvent inclure des pièces pour les unités de contrôle, les circuits imprimés pour ordinateurs, les systèmes de freinage et les systèmes hydrauliques. Les boîtes de vitesses et les pales sont des éléments critiques, mais ils nécessitent de grands espaces de stockage. Une alternative recommandable consiste à conclure des contrats avec le fabricant d'origine afin de garantir des délais de production raisonnables et la disponibilité de pièces de rechange pendant toute la durée de vie du parc éolien, ou à coordonner l'échange de pièces de rechange avec des parcs éoliens voisins qui utilisent les mêmes composants.

Il est recommandé de vérifier en permanence les pièces de rechange stockées, car l'approvisionnement du stock doit être adapté en fonction des pannes survenues. L'évaluation du risque de panne doit également être mise à jour en permanence pendant la durée de vie du parc.

2.6 Autres éléments de maintenance générale

Outre les stratégies décrites ci-dessus pour les principales opérations de maintenance, d'autres thèmes généraux seront examinés au cours du développement du projet, notamment :

- Informatique, cybersécurité et maintenance des systèmes de communication, tant à terre qu'en mer. La cybersécurité est notamment un enjeu majeur qui doit être surveillé, car un parc éolien offshore doit être géré en partie à distance, ce qui implique des communications avec des systèmes terrestres situés dans une vaste zone, offrant ainsi de nombreux points d'accès aux cyberattaques. À cet égard, le projet Atis adhérera effectivement à toute mesure adoptée par la Commission européenne, qui a déjà examiné cette question et prévoit de travailler sur la cybersécurité et la surveillance des infrastructures offshore au cours de cette année ; et, indépendamment de cela, le projet adoptera les mesures d'atténuation nécessaires dès la phase de conception et d'approvisionnement (pare-feu entre les turbines, sécurisation des points d'extrémité - ordinateurs portables/téléphones - ou séparation de l'IT et de l'OT).
- Gestion de la base O&M : logistique, entrepôt, consommables ou gestion des déchets.
- Questions relatives à la santé, la sécurité et l'environnement, telles que la formation des équipes sur site et en back-office et la fourniture des EPI appropriés.
- Couverture d'assurance, qui sera maintenue en vigueur pour garantir la faisabilité du projet, pour les dommages matériels, l'interruption d'activité et la responsabilité civile.

3 Stratégie de gestion et de maintenance des composants onshore

Les stratégies de gestion et de maintenance exposées ci-dessus pour les composants offshore sont également valables pour les composants onshore, car ces derniers nécessitent également une maintenance régulière afin de garantir leur bon fonctionnement et leur efficacité à moyen et long terme.

Les opérations de maintenance sont évidemment plus faciles à planifier et à réaliser, car elles peuvent s'appuyer sur l'expérience acquise avec les parcs éoliens terrestres. En effet, les structures en question (sous-stations, conduits, etc.) sont les mêmes que celles d'une installation terrestre et les aspects liés à la maintenance sont donc largement consolidés.

Vous trouverez ci-dessous des considérations sur la maintenance des deux composants les plus importants, les conduits et la sous-station électrique.

3.1 Conduites

Les câbles terrestres seront largement surveillés par des systèmes de contrôle de supervision et d'acquisition de données (SCADA) et soumis à des tests de routine tels que le DTS (détection distribuée de température) ou le DAS (détection acoustique distribuée). Les tests visuels, les câbles étant enterrés, ne sont applicables qu'au niveau des boîtes de jonction (TJB - Transition Joint Bay) où se trouve l'interface entre les composants marins et terrestres, et au niveau des points de jonction le long du tracé de la gaine, où des regards inspectables devront être prévus.

Si nécessaire, des interventions pourront également être effectuées pour réparer des joints ou des tronçons de conduits qui pourraient subir des défaillances au fil du temps. Ces types d'activités, non programmées, seront toutefois planifiées et gérées de manière appropriée et coordonnées avec les autorités compétentes si nécessaire.

3.2 Sous-station électrique

La sous-station, et par conséquent les aspects liés à sa maintenance, peut être divisée en deux catégories : les travaux de génie civil et les travaux électriques.

3.2.1 Travaux électriques

En ce qui concerne les travaux électriques, en général, la maintenance de la sous-station électrique terrestre devra suivre les programmes d'inspection, de maintenance et de réparation recommandés par le concepteur et/ou le fournisseur des différents instruments et équipements.

Pour le parc en question, il est prévu de construire une seule sous-station électrique (SSE), où le courant est élevé d'une tension de 220 kV à une tension de 380 kV, puis connecté par antenne à une nouvelle station électrique du réseau électrique national. À l'intérieur de la sous-station se trouvent des transformateurs, des tableaux électriques, une alimentation auxiliaire pour l'éclairage, des systèmes de sécurité et de contrôle.

Tous ces équipements soutiennent et surveillent la transmission de l'énergie produite dans le parc et constituent donc également les premiers outils permettant de gérer les différentes tâches de maintenance. Pour les sous-stations électriques terrestres, cette dernière consiste principalement en la surveillance et l'inspection non intrusive des différents composants. Par exemple, les tableaux électriques et les transformateurs sont régulièrement examinés et l'huile des transformateurs est prélevée et contrôlée. Toutes ces investigations peuvent conduire à des interventions de réparation et/ou de remplacement des différents composants ou structures. Les opérations de réparation ou de remplacement les plus importantes seront généralement effectuées sur place à l'aide d'une grue de taille appropriée ou d'autres équipements similaires en fonction des caractéristiques du composant à réparer.

La fréquence des interventions sur la sous-station électrique sera faible et leur durée sera la plus courte possible afin de limiter au maximum les temps d'arrêt de la production d'électricité. Pour ces raisons, les activités de maintenance préventive sont fondamentales et, dans le respect de toutes les normes de sécurité en vigueur, elles pourront être effectuées sans interrompre le fonctionnement de la sous-station. En principe, celles-ci comprennent des contrôles généraux, des mesures, des images thermiques et des inspections visuelles, et sont effectuées chaque année.

En plus de la maintenance préventive et corrective de routine, des interruptions programmées sont effectuées tous les deux ans, pendant lesquelles tous les systèmes sont mis hors tension afin de permettre au personnel d'inspecter, de tester et de réparer les équipements qui sont normalement sous tension ou qui présenteraient un risque d'intervention sur l'installation s'ils étaient maintenus dans des conditions de fonctionnement anormales. La durée moyenne de l'interruption est de quatre jours et est généralement programmée pendant les périodes où la production du parc éolien est faible. Au cours de ces phases particulières, l'accessibilité à l'installation est réduite, avec des restrictions spécifiques pour le personnel au sol qui n'a pas les compétences requises ; la durée et le nombre de techniciens par activité peuvent être programmés et modifiés en fonction des besoins.

3.2.2 Travaux de génie civil

Les activités de maintenance ordinaire des ouvrages civils concernent les inspections visuelles, les interventions sur les ouvrages civils/bâtiments et sur la viabilité interne de la sous-station électrique. Comme déjà indiqué dans les paragraphes précédents concernant les ouvrages électriques onshore et, plus généralement, les composants offshore, les activités peuvent être divisées en activités périodiques et extraordinaires-correctives.

Les inspections périodiques ont pour fonction de vérifier l'état de conservation et la fonctionnalité des ouvrages civils, elles peuvent donc concerner : l'état de conservation de la chaussée de la viabilité interne ; la fonctionnalité hydraulique des caniveaux d'évacuation des eaux et des ouvrages de drainage en général ; les ouvrages de fondation (semelles, dalles, etc.) en détectant les affaissements localisés, les fissures et les crevasses, la perte de planéité et/ou de verticalité des ouvrages en élévation qui y sont reliés. Enfin, pour les ouvrages en béton armé (qu'ils soient coulés sur place ou préfabriqués), il est possible de vérifier l'absence de fissures ou de signes de rupture sur les éléments structurels, l'exposition des fers d'armature, le détachement du revêtement des fers et les déformations excessives.

Les opérations périodiques ont pour but de rétablir et/ou de maintenir les conditions générales d'exploitation des ouvrages civils. Elles peuvent être effectuées à des fréquences différentes en fonction du type d'intervention. En général, elles peuvent concerner : le fauchage de la végétation dans les zones adjacentes aux routes et à la sous-station ; l'entretien des ouvrages tels que les cabines électriques ; le nettoyage manuel des fossés pour l'évacuation des eaux. Pour les ouvrages de fondation et les ouvrages en béton armé (coulés sur place ou préfabriqués), elles peuvent concerner le nettoyage périodique des parties structurales de toute végétation éventuelle, la remise en état des éléments d'étanchéité, la remise en état des revêtements de surface (enduits, peintures, carreaux, etc.) lorsqu'ils sont endommagés ou en train de se détacher.

Les activités d'entretien extraordinaire des ouvrages civils peuvent concerner : les ouvrages en béton armé (coulés sur place ou préfabriqués) pour lesquels il est possible de restaurer le revêtement de ferrailage avec d'éventuelles interventions de dépassivation des armatures ; les surveillances avec relevés topographiques, contrôles non destructifs (CND), carottages ou autres investigations géognostiques (inclinomètres, piézomètres) à la suite de phénomènes d'instabilité des ouvrages ou des versants environnants.

4 Prolongation de la durée de vie utile

La prolongation de la durée de vie opérationnelle d'un parc éolien au-delà des 30 ans prévus dans le projet représente une opportunité de maximiser le retour sur investissement et de contribuer à la production d'énergie durable. Pour obtenir une prolongation à 35 ou même 40 ans, certaines considérations décrites ci-dessous entrent en jeu.

Tout d'abord, une évaluation approfondie et complète de l'ensemble de l'infrastructure du parc éolien est nécessaire. Cela comprend non seulement les turbines elles-mêmes, mais aussi les sous-structures de soutien, les systèmes électriques, les mécanismes de contrôle et les connexions au réseau. L'évaluation de l'intégrité structurelle est d'une importance capitale pour identifier les faiblesses potentielles ou les signes d'usure des composants, et toutes les réparations ou renforcements nécessaires doivent être effectués. La documentation des pannes des éoliennes et une évaluation continue de l'état critique des composants individuels sont très utiles, car elles constituent la base des décisions concernant les délais de maintenance et les mises à jour potentielles en fin de vie afin de soutenir les opérations pendant 5 à 10 ans supplémentaires.

De plus, les progrès technologiques peuvent contribuer de manière significative à prolonger la durée de vie d'un parc éolien. L'adaptation avec des composants modernisés, tels que des matériaux plus durables ou une meilleure aérodynamique, peut améliorer l'efficacité et la résistance à l'usure. Les politiques en matière d'énergies renouvelables et la dynamique du marché contribuent également à prolonger la durée de vie des parcs éoliens. Les accords d'achat d'énergie et les modèles de revenus qui permettent une durée de vie opérationnelle plus longue contribuent à la viabilité économique de ces prolongations.

En fin de compte, la décision de prolonger la durée de vie d'un parc éolien nécessitera un équilibre minutieux entre les investissements initiaux et les gains à long terme, toujours dans le but de minimiser les impacts sur l'environnement. Si le coût initial des évaluations, des mises à jour et du remplacement éventuel des composants doit être pris en compte, la perspective de poursuivre la production d'énergie renouvelable, de réduire les émissions de carbone et d'obtenir des rendements financiers rendra le projet encore plus intéressant d'un point de vue environnemental et économique.

5 Conclusions

La philosophie opérationnelle du projet vise à garantir une efficacité économique maximale de l'installation, en atteignant les objectifs de production d'énergie, en respectant toutes les procédures de sécurité et en se conformant à toutes les obligations réglementaires. L'identification et la documentation des hypothèses d'une stratégie de maintenance possible ont permis d'analyser les risques potentiels et les incertitudes liés à l'exploitation et à la maintenance, ce qui a permis d'élaborer des stratégies d'atténuation.

Sur la base de toutes les analyses et évaluations présentées ci-dessus, voici un résumé de l'évaluation préliminaire effectuée par rapport au projet du parc éolien d'Atis.

Tableau 5-1 : Programme indicatif O&M

Rubriques	Hypothèses	Remarques
Durée de vie	30 ans	
WTG		
Type WTG	Générique – Direct Entraînement	
Taille WTG	18 MW	
Nombre de WTG	48	
Maintenance programmée des éoliennes	Campagnes annuelles, une campagne tous les 5 ans et un contrôle à fin de garantie	
Maintenance non programmée des éoliennes	1 réinitialisation locale par an après les changements de composants	
BoP		
Inspections programmées	Une par an	
Inspections détaillées programmées (en plus des campagnes annuelles)	Tous les 4 ans	<i>25 % des fondations sont révisées chaque année. La fréquence d'inspection des éléments non critiques devrait être d'une fois tous les cinq ans. (DNVGL-ST-0126, 2018) L'hypothèse selon laquelle 25 % du parc éolien est inspecté chaque année signifie que l'ensemble du parc éolien est inspecté dans un délai de 4 ans, ce qui correspond à la fréquence d'inspection de chaque fondation flottante.</i>

Recrutements	Hypothèses	Observations
Inspections sous-marines	Inspections bisannuelles	
Maintenance non programmée	Petits travaux par an, réparations de peinture 4 ans, inspections sous-marines spéciales 10 ans après une tempête extrême	
Logistique		
Solution logistique de de base	CTVs	
Logistique utilisée	2 CTV toute l'année	
Accessibilité des navires	2,0 m Hs	
Vitesse du navire	24 nœuds	
Durée du trajet attendu	1,3 h	<i>Aller simple. En fonction de la distance du port et des caractéristiques du site.</i>
Autre		
O&M Base logistique	Port de Livourne (~60 km)	<i>Considéré à la fois comme base logistique et comme port.</i>
Port de remorquage (Tow-in port)	Livourne (~60 km)	<i>Considéré comme port de remorquage pour le remplacement des composants principaux.</i>
Nombre minimum de personnes dans l'équipe offshore	3 personnes	
Nombre estimé de techniciens employés	21 techniciens	
Nombre maximal de visites à différentes éoliennes par la même équipe au cours d'une même jour	2 visites	

6 Bibliographie

- [1]. Ramboll. (2023). Parc éolien offshore flottant Simply Blue - Plan d'exécution du projet - Projet Atis.
- [2]. Ramboll. (n.d.). Parc éolien offshore flottant Simply Blue - Évaluation météo-océanique pré-FEED - Projet Atis. 2023.
- [3]. Kolios, A., & Smolka, U. (2020). Stratégies de maintenance basées sur les risques pour les actifs éoliens offshore. Symposium annuel sur la fiabilité et la maintenabilité . IEEE
- [4]. DIN EN 13306:2010-12. Maintenance - Terminologie de la maintenance, 2010.