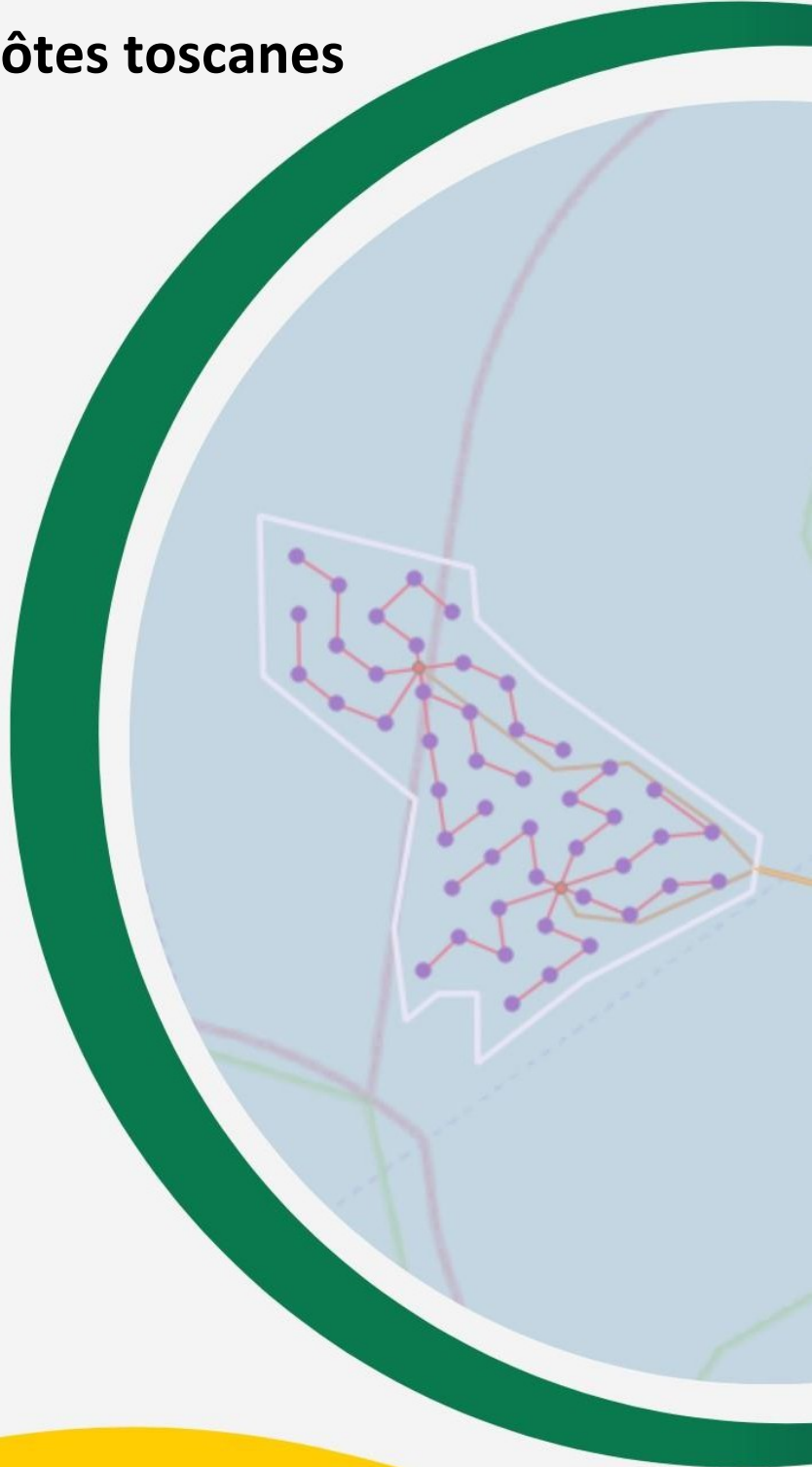


Projet de faisabilité technique et économique du parc éolien offshore flottant « Atis » de 864 MW dans la mer Ligure, au large des côtes toscanes

Analyse de la portée maximale



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

16:38:

Révision

Auteur	Vérfié par	Société	Réviséur	Approuvé par	Société
Vito Cucciniello Matteo Lana	Carla Marcis Eleonora Lamanna Corrado Pluchino	Montana SpA	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
1.3	Références législatives.....	13
2	Risque de rupture accidentelle	14
3	Forces agissant sur la trajectoire de la pale	15
4	Calcul de la portée maximale.....	17
4.1	Étude de cas : pale entière.....	19
4.2	Étude de cas : fragment de pale.....	21
5	Conclusions	23
6	Références bibliographiques.....	24

Liste des figures

Figure 1-1 : Localisation 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 3-1 : Système de coordonnées utilisé pour la pale.....	15
Figure 4-1 : Configuration du mouvement du projectile	17
Figure 4-2 : Cas de portée maximale pour le détachement complet de la pale	18
Figure 4-3 : Variation de la portée atteinte en fonction de l'angle initial du projectile, détachement complet de la pale.....	19
Figure 4-4 : Trajectoire du centre de gravité de la pale.....	20
Figure 4-5 : Mouvement du projectile influencé par la résistance de l'air, pour différentes vitesses initiales.	20
Figure 4-6 : Cas du fragment de pale (pointe de pale) : variation de la portée atteinte en fonction de l'angle initial du projectile.....	21
Figure 4-7 : Trajectoire du centre de gravité du fragment de pale.....	22



Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Caractéristiques dimensionnelles des éoliennes de 18 MW envisagées pour le projet10

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page4 sur 24	
ATI-ING-VIA-GITMAS-R09-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

Abréviations et symboles

Abréviations	
EC	Câble sous-marin (câble d'exportation)
FOSS	Sous-stations électriques flottantes (Floating offshore sub-stations)
FOWT	Éoliennes flottantes offshore (Floating offshore wind turbine)
HH	Hauteur du moyeu (Hub Height)
IAC	Câble inter-réseaux
MW	Mégawatt
nm	Milles nautiques (Nautical Miles)
NTG	Réseau national de transport d'électricité (National Transmission Grid)
OC	Câble terrestre (Onshore Cable)
OSS	Sous-station électrique (Onshore sub-station)
OWF	Parc éolien offshore (Offshore Wind Farm)
TJB	Baie de jonction (Transition Joint Bay)
WTG	Éolienne (Wind Turbine Generator)

Symboles	
α	Angle par rapport à l'axe horizontal au moment où se produit le détachement
D	Distance maximale atteinte par la pale par rapport à l'axe central de la tour
dx	Distance horizontale entre le centre de gravité de la pale et l'axe du rotor.
dy	Distance verticale entre le centre de gravité de la pale et l'axe du rotor
G	Distance maximale atteinte par la pale depuis le centre de gravité au moment du détachement
H	Hauteur du moyeu
L	Longueur de la pale
n	Vitesse de rotation des pales
rb	Rayon de gravité des pales
Vo	Vitesse du centre de gravité de la pale
Vox	Vitesse le long de l'axe x
Voy	Vitesse le long de l'axe y

Résumé

Ce document a été rédigé afin d'estimer la portée maximale dans le cas improbable où une pale ou un fragment de pale d'éolienne se détacherait pendant le fonctionnement du parc éolien. L'étude a été réalisée afin de déterminer la distance maximale que le composant serait en mesure d'atteindre, compte tenu des conditions de rotation au moment du détachement, telles que, par exemple, la vitesse et la hauteur du moyeu. Ce calcul a été effectué à la fois pour le détachement complet et partiel de la pale, en tenant compte des effets de la portance aérodynamique sur les pales, ainsi que des effets gravitationnels. Des considérations relatives à la probabilité qu'un tel événement se produise, ainsi que ses implications, sont également fournies.

L'analyse de la combinaison des charges, des matériaux utilisés et l'évaluation des conséquences en cas de rupture se réfèrent à la norme CEI EN61400-1.

La portée maximale et la vitesse d'impact sont les facteurs déterminants pour l'estimation du risque lié à ces événements.

Le calcul présente des complexités liées aux modalités et au moment du détachement. En effet, un corps projeté dans les airs en présence d'un vent fort pourrait donner lieu à des effets de « portance » susceptibles de prolonger la durée du vol. L'effet visqueux de l'air, en revanche, a un effet opposé en freinant le corps lui-même. Compte tenu de la nature aérodynamique de la pale, l'étude du mouvement est donc complexe, en raison de toutes les forces et moments qui naissent au moment du détachement et de l'interaction avec le vent. Ces complexités sont prises en compte en fournissant un calcul probabiliste plutôt que déterministe.

1 Introduction

1.1 Objectifs du travail

Le projet en question concerne la construction 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 concerneront 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 **l'analyse de la portée maximale** 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.

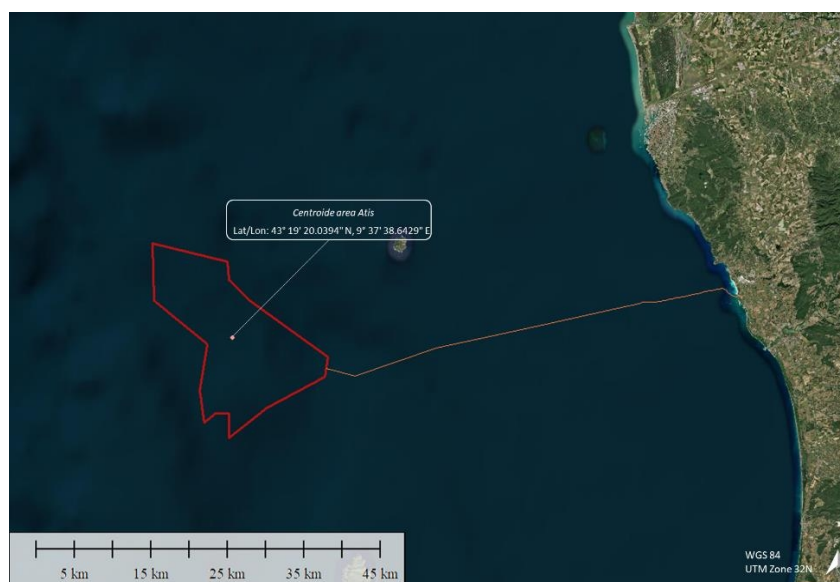


Figure 1-1 : Cartographie du parc éolien en projet.

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. Pendant 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 prévu se répartissent comme suit :

- **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.
- **Débarquement ou « landfall »**
Zone à l'interface onshore/offshore où les câbles offshore sont amenés à terre pour être connectés au conduit 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 terrestre**
Partie de l'installation située sur la terre ferme, qui comprend les ouvrages de raccordement au réseau électrique national :
 - Câble terrestre (OC – Onshore cable), qui relie l'installation depuis la fosse de raccordement au point de connexion (POC – Point of connection), via la sous-station onshore ;
 - n° 1 sous-station électrique (OSS – Onshore sub-station), qui représente le point de connexion entre le parc éolien offshore et le système de transmission électrique terrestre.

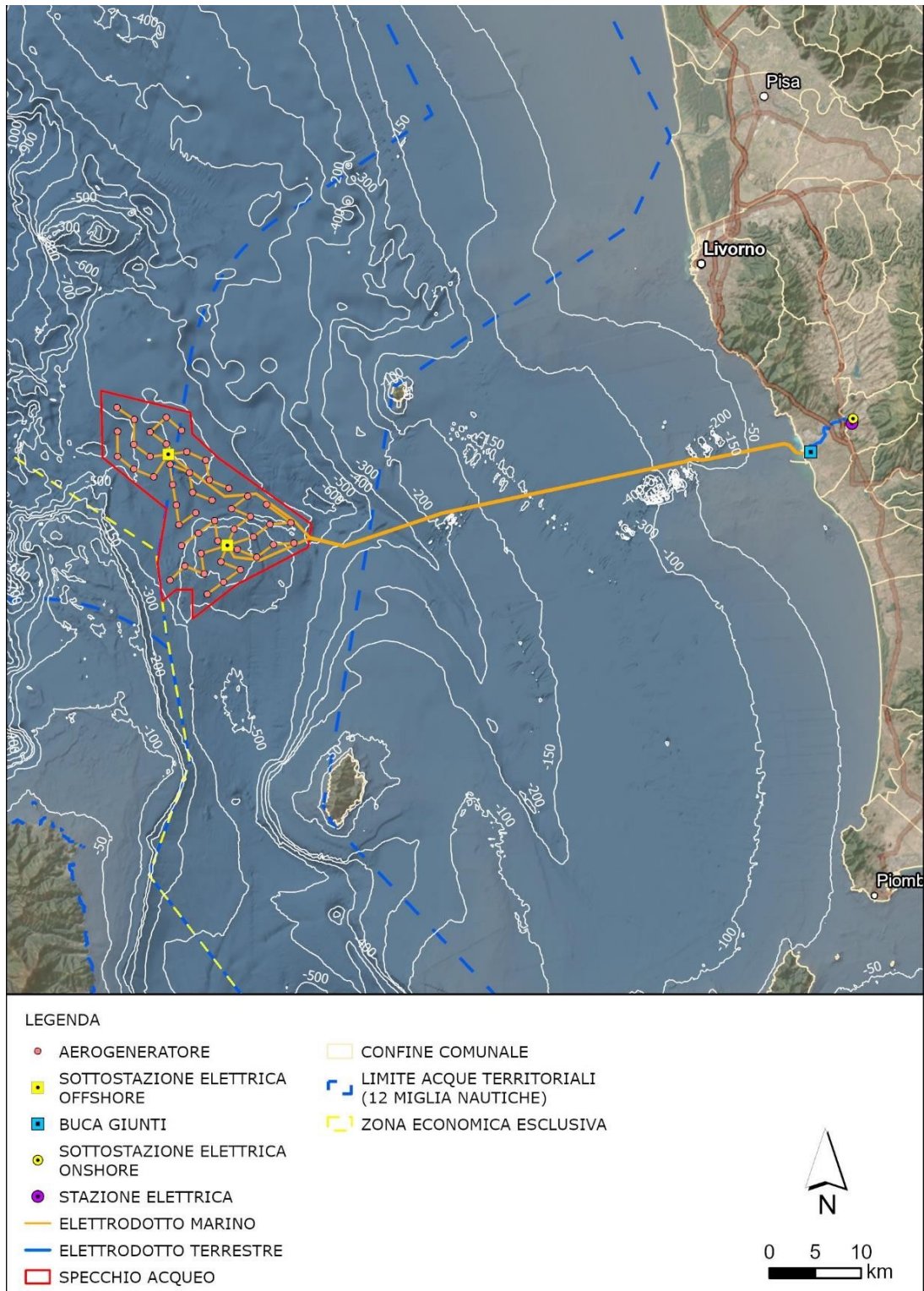


Figure 1-2 : Cadre géographique des travaux du projet « Atis ».

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 totale maximale du système tour-pales atteindra 280 m, en tenant compte de la pointe des pales.

Les principales caractéristiques dimensionnelles des types de turbines actuellement envisagés pour le projet sont présentées ci-dessous.

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, combiné 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.

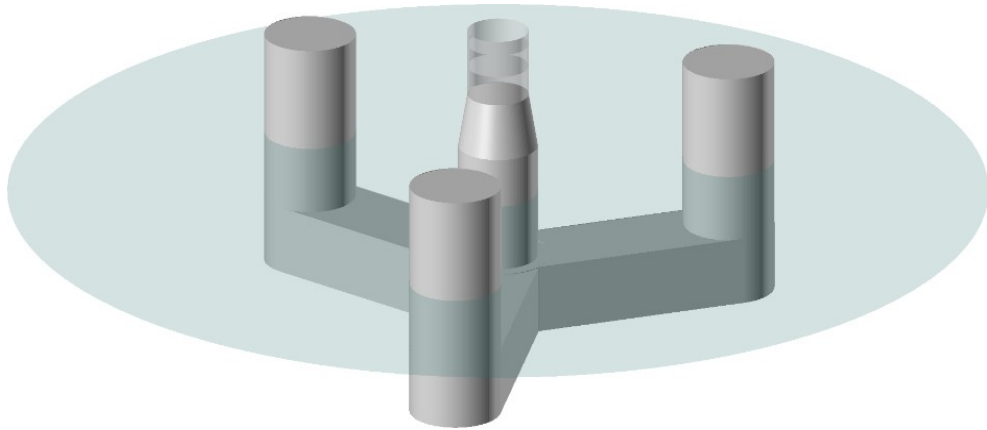


Figure 1-3 : Type semi-submersible à 3 colonnes, avec tour centrale

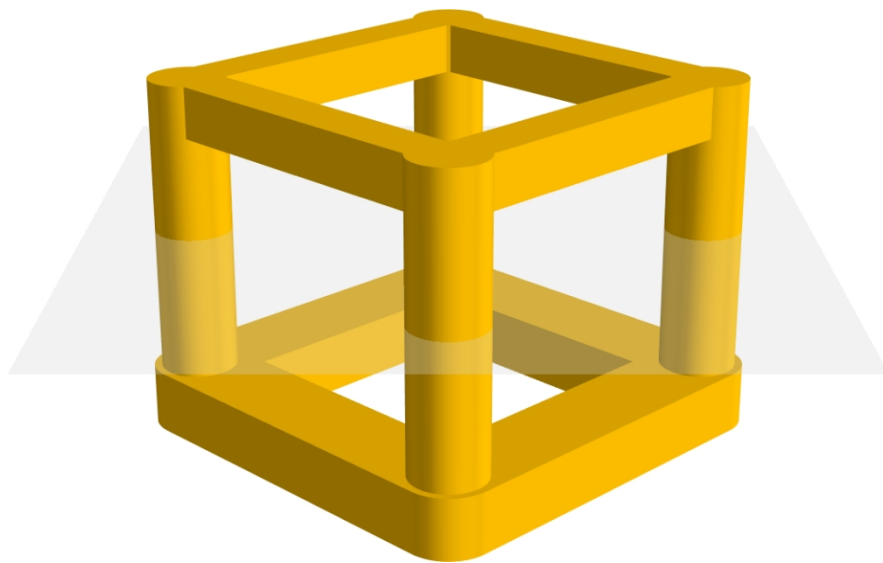


Figure 1-4 : Type de semi-submersible à 4 colonnes, avec base rectangulaire



Figure 1-5 : Représentation tridimensionnelle de l'éolienne et de la fondation flottante

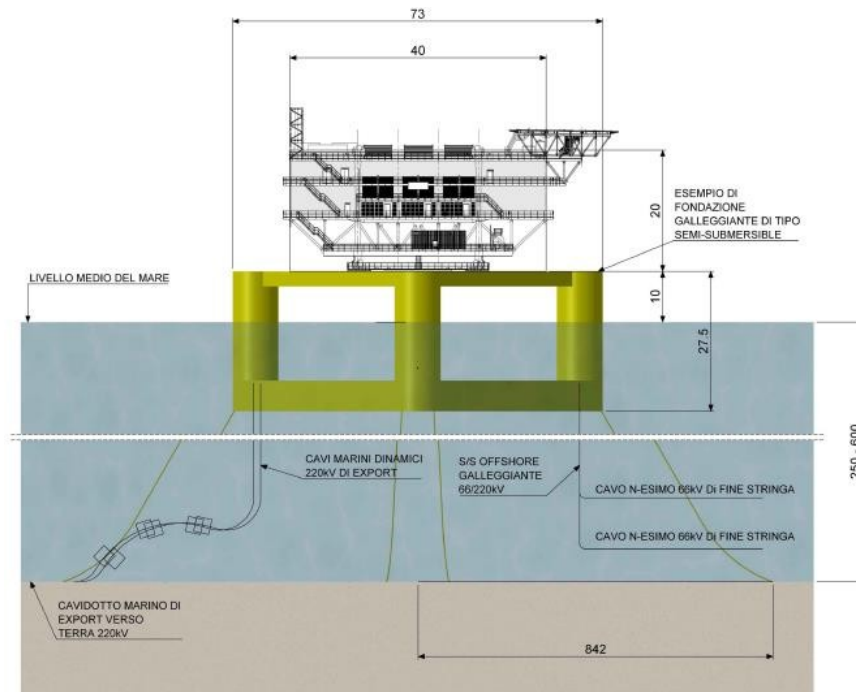


Figure 1-6 : Dessin d'ensemble de la sous-station marine (FOSS) et de la fondation flottante



1.3 Références législatives

Les normes applicables au présent rapport sont les suivantes :

- [1]. CEI EN61400-1:2019 - Systèmes de production d'énergie éolienne - Partie 1 : Exigences de conception
- [2]. CEI EN62305-1:2011 - Protection contre la foudre. Principes généraux.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page13 e sur 24	
ATI-ING-VIA-GITMAS-R09-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

2 Risque de rupture accidentelle

Afin de garantir la sécurité pendant le fonctionnement d'une éolienne, il est essentiel d'évaluer avec précision la distance maximale qu'un composant rotatif, tel que la pale d'une éolienne à axe horizontal, pourrait parcourir en cas de rupture accidentelle. Dans tous les cas, il convient de souligner que les probabilités de rupture accidentelle d'une pale ou d'un composant de celle-ci sont extrêmement faibles, compte tenu également des progrès technologiques et de l'utilisation de matériaux de pointe dans le processus de construction.

Dans ce contexte, le risque est déterminé par deux facteurs principaux : la probabilité qu'un événement se produise et la probabilité que cet événement ait des conséquences néfastes. Pendant le fonctionnement de l'installation, les risques les plus importants sont liés à la chute potentielle d'objets depuis les hauteurs, qui peut être causée par l'accumulation de glace sur la pale ou par la rupture accidentelle de composants mécaniques en rotation.

En ce qui concerne la formation de glace, compte tenu de la situation géographique du projet et des conditions climatiques, la probabilité est considérée comme négligeable.

En ce qui concerne la rupture des composants mécaniques, il est important de souligner que :

- la liaison rigide entre les pales et le moyeu réduit considérablement le risque de détachement d'une pale ;
- les pales des rotors sont fabriquées à partir de matériaux tels que la fibre de verre et le carbone renforcé de polyester ou de fibres époxy, ce qui réduit considérablement le risque de détachement des pièces mécaniques en rotation (même en cas de dommages importants, les fibres maintiennent la pale en un seul morceau) ;
- les éoliennes sont équipées d'un système sophistiqué de supervision et de contrôle des pales, qui permet une surveillance à distance et une intervention en cas d'urgence sans endommager le système ;
- les grandes éoliennes prévues dans le projet sont soumises à des programmes de maintenance rigoureux, qui prévoient des contrôles périodiques pour détecter d'éventuelles fractures, avec des interventions de réparation ou de remplacement des pièces endommagées.

Par conséquent, le détachement accidentel d'une pale d'éolienne (ou d'une partie de celle-ci) est très rare. Les statistiques montrent que parmi les principales causes de dommages figurent ceux résultant directement ou indirectement de la foudre. C'est pourquoi il est prévu de protéger le système composé de la nacelle, du rotor et de la tour tubulaire à l'aide de paratonnerres.

Conformément à la norme EN 62305, le système sera équipé de la classe de protection la plus élevée, à savoir la classe I. D'un point de vue probabiliste, cela implique un niveau de protection de 98 %, avec une probabilité de 2 % que le système subisse des dommages à la suite d'un coup de foudre. On peut donc affirmer que la probabilité de dommages au système suivis d'accidents ultérieurs est extrêmement faible, voire inexistante.

3 Forces agissant sur la trajectoire de la pale

Les forces agissant à la suite d'un détachement qui déterminent la trajectoire de la pale ou du fragment de pale et sa portée maximale sont multiples.

Le temps de vol est notamment influencé par la composante verticale de la vitesse initiale de la pale au moment du détachement, par l'accélération verticale, par l'angle de lancement, par la position par rapport au sol et par les forces de frottement agissant sur la pale elle-même.

À son tour, le temps de vol, associé à la composante horizontale de la vitesse au moment du détachement, aux forces de frottement et à la vitesse du vent, contribue à déterminer la distance horizontale parcourue par la pale ou le fragment de pale.

D'un point de vue théorique, si l'on ne tient pas compte des forces aérodynamiques, la portée maximale serait atteinte lorsque la pale est à 45 degrés dans le cas d'un mouvement parabolique.

Cependant, la complexité aérodynamique de la pale rend le mouvement parabolique pratiquement impossible. Les forces de résistance visqueuse, l'action du vent et le mouvement de rotation dû au profil aérodynamique s'opposent au mouvement, réduisant ainsi le temps et la distance de vol.

Pour analyser le mouvement de la partie détachée de la pale d'une éolienne, on adopte le modèle théorique « *Complex Rotational Motion* », en tenant compte des rotations autour des axes XX, YY et ZZ.

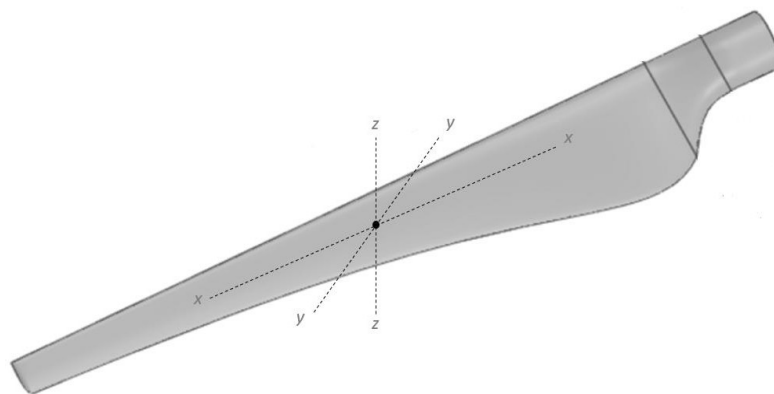


Figure 3-1 : Système de coordonnées utilisé pour la pale



En particulier :

- la rotation de la pale autour de l'axe ZZ est due à la conservation du moment cinétique (en cas de rupture, le fragment tend à tourner autour de l'axe orthogonal à son propre plan, selon ce principe) ;
- les rotations autour des autres axes sont quant à elles dues aux actions du vent incident sur la pale ou sur la section de pale (des moments sont générés autour des axes XX et YY en raison de la non-coïncidence entre le centre de masse et le centre aérodynamique de la partie détachée).

Ce modèle théorique est celui qui se rapproche le plus de la représentation d'un cas réel (ce dernier étant caractérisé par des éléments plus complexes, tels que les caractéristiques aérodynamiques et les conditions initiales du composant dues au roulis, à l'embarquée et au tangage de la pale).

Aux fins du présent rapport et conformément à l'étude Vestas [1], il a été décidé de se baser sur l'hypothèse d'un mouvement irrotationnel ou, en d'autres termes, d'une absence de rotation le long des axes XX, YY et ZZ (seuls les paramètres géométriques et cinématiques ont été pris en compte, et non le mouvement rotationnel complexe réel). Comme indiqué, « *cette hypothèse fait de ce cas le pire scénario possible, car elle définit la condition idéale de portée maximale* ».

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page16 e sur 24	
ATI-ING-VIA-GITMAS-R09-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		

4 Calcul de la portée maximale

Le calcul a été effectué à l'aide du système classique sans frottement visqueux. Il prend également en compte la direction de rotation des pales par rapport au côté où l'on suppose que le morceau de pale détaché est projeté.

L'analyse est effectuée dans le cadre de la trajectoire parabolique typique d'un corps en chute et des équations de mouvement correspondantes, c'est-à-dire le mouvement du projectile, en considérant que le mouvement le long de l'axe x est uniformément rectiligne et le long de l'axe y est uniformément accéléré.

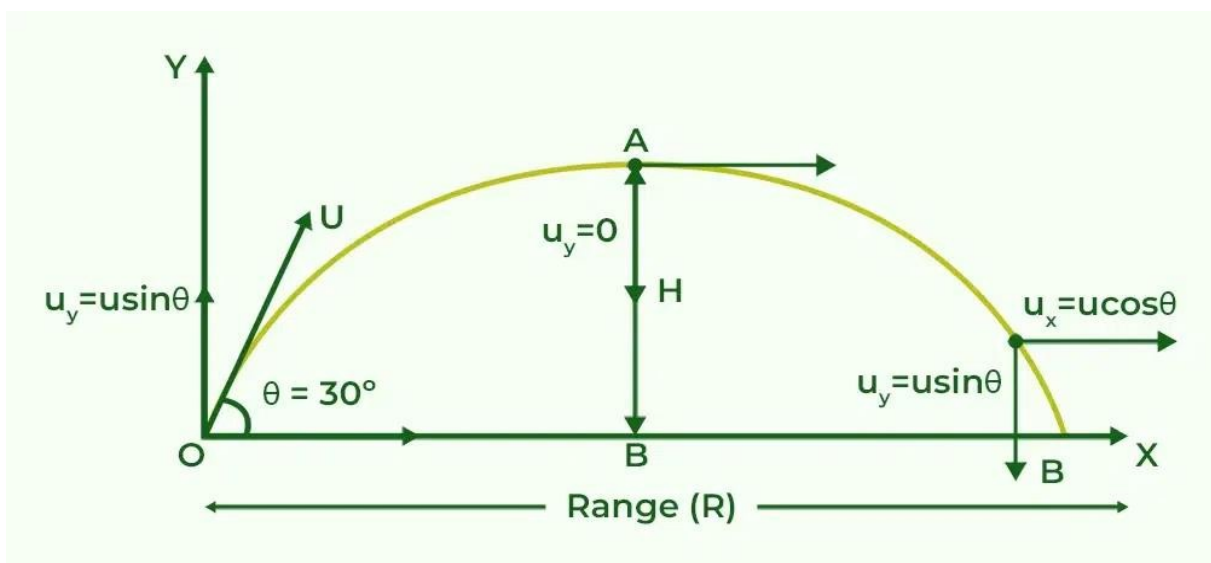


Figure 4-1 : Configuration du mouvement du projectile

Les paramètres cinématiques et géométriques pris en compte sont les suivants :

- hauteur du moyeu : $H = 155 \text{ m}$;
- le diamètre du rotor est de 250 m , donc la longueur de la pale : $L = 125 \text{ m}$ (simplification pour des raisons de calcul) ;
- la vitesse de rotation maximale des pales est supposée égale à $7,6$ tours par minute ;
- rayon du centre de gravité : $r_b = 41,7 \text{ m}$, en supposant que le centre de gravité se trouve à $1/3$ de la longueur totale de la pale ;
- α est l'angle, par rapport à l'axe horizontal, auquel se produit le détachement ;
- $V_0 = 30 \text{ m/s}$ est la vitesse du centre de gravité de la pale, obtenue à partir de la variation linéaire de la vitesse circulaire entre la pointe de la pale et l'axe du rotor ;
- V_{0x} est la vitesse le long de l'axe x ;
- V_{0y} est la vitesse le long de l'axe y.

Avec cette configuration, il est possible de calculer la portée maximale qui pourrait être atteinte. Comme le montre la figure 4-2, deux positions donnent la valeur de portée maximale : l'une (indiquée par l'indice « 1 » dans la figure 4-2) lorsque la pale se trouve dans un intervalle α compris entre 0° et 90° (0° lorsque la pale est complètement verticale, parallèle à la tour de la turbine, avec la pointe la plus proche du niveau de la mer) ; et une autre (indiquée par l'indice « 2 » dans la figure 4-2) lorsque la pale se trouve entre 90° et 180° . Ces mouvements du projectile propulseraient la pale dans des directions opposées et sont illustrés du même côté pour simplifier le dessin.

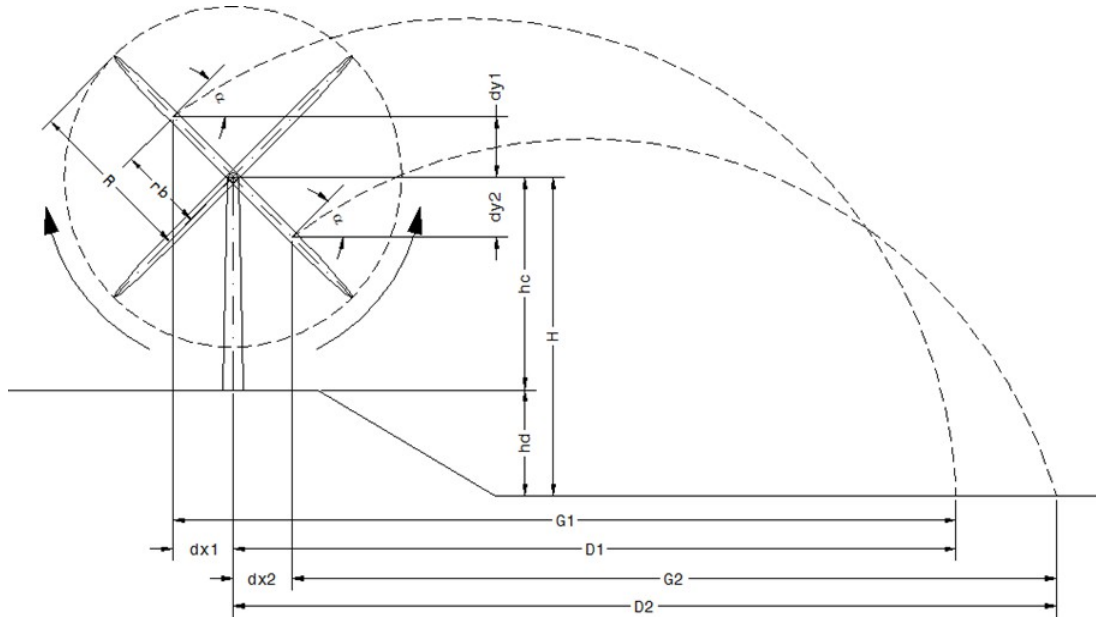


Figure 4-2 : Cas de portée maximale pour le détachement complet de la pale

Dans le graphique ci-dessus, les variables sont définies comme suit :

- dx fait référence à la distance horizontale entre le centre de gravité de la pale et l'axe du rotor
- dy fait référence à la distance verticale entre le centre de gravité de la pale et l'axe du rotor.
- G désigne la distance maximale atteinte par la pale par rapport au centre de gravité de la pale au moment du détachement.
- D désigne la distance maximale atteinte par la pale par rapport à l'axe central de la tour.

Les paragraphes 4.1 et 4.2 présentent respectivement les calculs de la portée pour le scénario de pale entière et pour le scénario de fragment de pale.

4.1 Étude de cas pale entière

La figure 4-3 présente l'analyse de la variation de la distance atteinte par le centre de gravité de la pale, en fonction de l'angle initial donné.

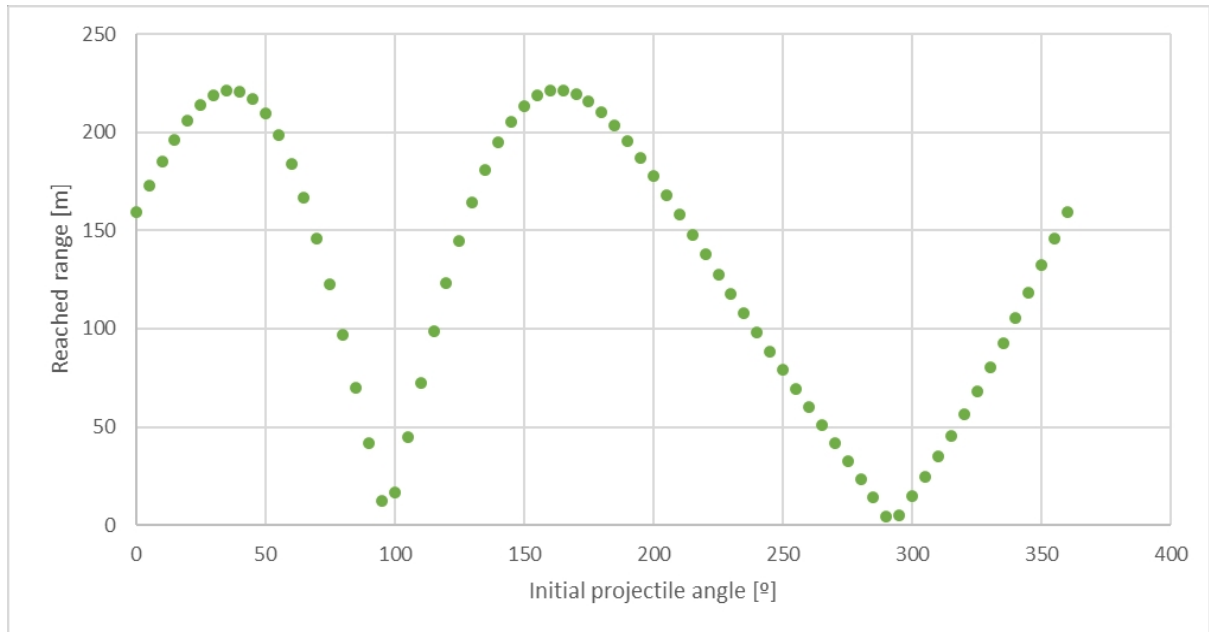


Figure 4-3 : Variation de la portée atteinte en fonction de l'angle initial du projectile, détachement complet de la pale

Comme on peut le voir, deux pics sont obtenus, comme prévu. La portée maximale obtenue à partir de l'axe de la tour est de 222 m et est obtenue pour des angles de lancement de $\alpha=36^\circ$ et $\alpha=166^\circ$. Comme indiqué, la situation avec $\alpha=0^\circ$ correspond à la configuration avec la pale complètement verticale et une distance minimale entre la pointe et le niveau de la mer.

La figure 4-4 montre les deux trajectoires du centre de gravité de la pale pour les deux cas de portée maximale, ainsi que la tour de la turbine et les deux positions de la pale aux moments respectifs de leur détachement.

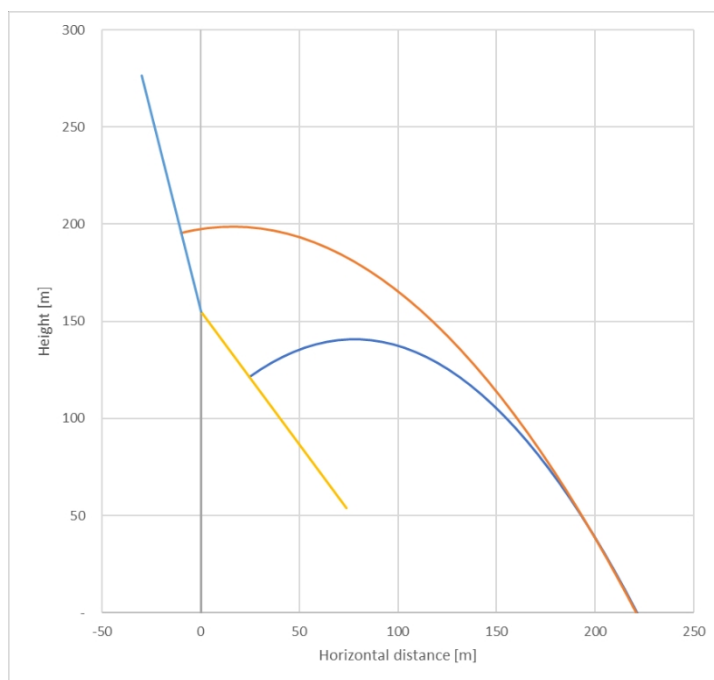


Figure 4-4 : Trajectoire du centre de gravité de la pale

Il convient de souligner que cette valeur est théorique et très prudente, car elle ne tient pas compte des forces de frottement visqueux et de la complexité du mouvement de rotation, c'est-à-dire la rotation de la pale pendant le mouvement de chute, conditions réelles qui atténuent les valeurs de portée maximale. La forme typique des mouvements du projectile compte tenu des effets de la résistance de l'air peut être consultée à la figure 4-5.

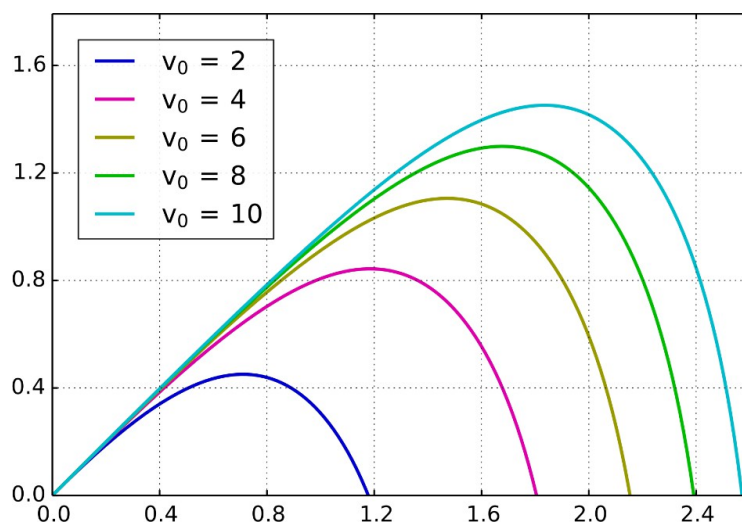


Figure 4-5 : Mouvement du projectile influencé par la résistance de l'air, pour différentes vitesses initiales.

4.2 Étude de cas : fragment de pale

La rupture d'un fragment de pale est un événement peu fréquent. En raison des caractéristiques du matériau structurel, la rupture tend à être progressive. Par conséquent, dans la plupart des cas, on observe d'abord une flexion de la structure, suivie d'un impact inévitable avec la tour (située sous le vent dans la quasi-totalité des éoliennes).

Dans la plupart des cas de projection de petits fragments de pale, la cause enregistrée est la concomitance de foudre atmosphérique. Ce phénomène a été pris en compte par les constructeurs qui ont commencé à équiper les éoliennes d'un système de convoyage du courant de foudre composé de récepteurs métalliques placés le long de la pale, d'un câble reliant les récepteurs à la racine de la pale et d'un système de mise à la terre. De cette manière, il est possible de drainer une grande partie des courants induits par les foudre atmosphériques sans endommager les pales. Dans certains cas, lorsque le courant d'un éclair a vraisemblablement dépassé les limites prévues, des dommages peuvent apparaître à l'extrémité de la pale, qui s'ouvre en raison de la séparation des deux coques, mais qui, normalement, ne se détache pas du corps de la pale. Il est possible que des fragments de coque se détachent, mais il s'agit toutefois de pièces très légères par rapport à la résistance qu'elles opposent à l'air et qui ne peuvent donc pas faire l'objet de calculs de portée comme ceux qui peuvent être effectués sur le corps de la pale.

Comme pour l'analyse effectuée dans le cas de la pale entière, nous présentons ici le cas du détachement de la pointe de la pale. En supposant que le fragment provienne de l'extrémité de la pale, il se déplacera à une vitesse maximale $V_0 = 7,6$ tr/min, comme indiqué précédemment au chapitre 4. Dans ce cas également, il existe deux angles pour lesquels la portée est maximale, comme le montre la figure 4-6.

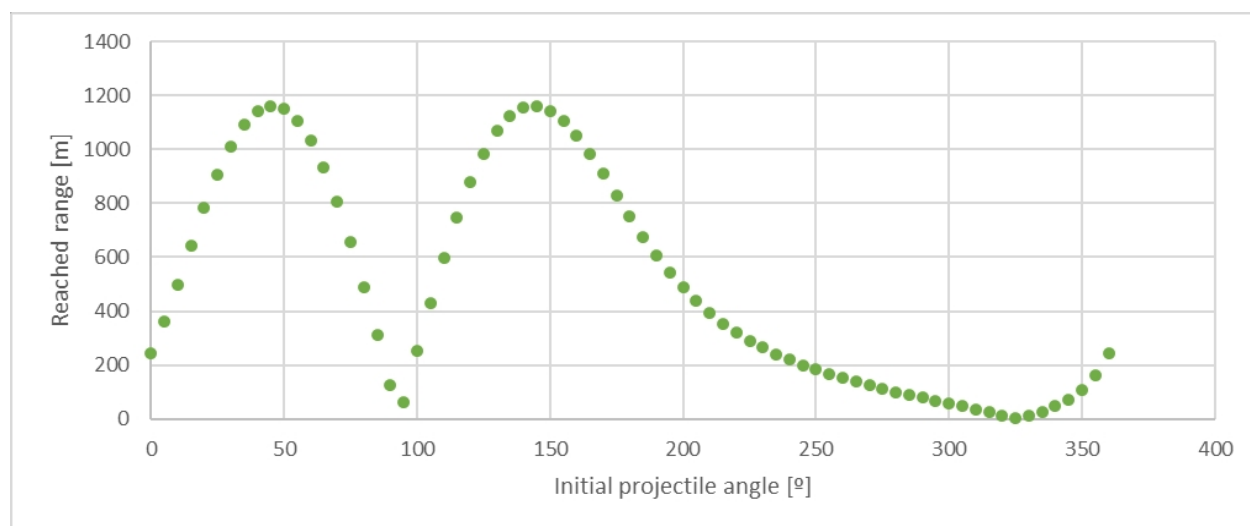


Figure 4-6 : Cas du fragment de pale (pointe de pale) : variation de la portée atteinte en fonction de l'angle initial du projectile

La portée maximale obtenue est de 1 160 m et est obtenue pour des angles de lancement de $\alpha=46^\circ$ et $\alpha=145^\circ$.

La figure 4-7 montre les deux trajectoires de la pointe de la pale pour les deux cas de portée maximale, ainsi que la tour de la turbine et les deux positions de la pale au moment de leur détachement respectif.

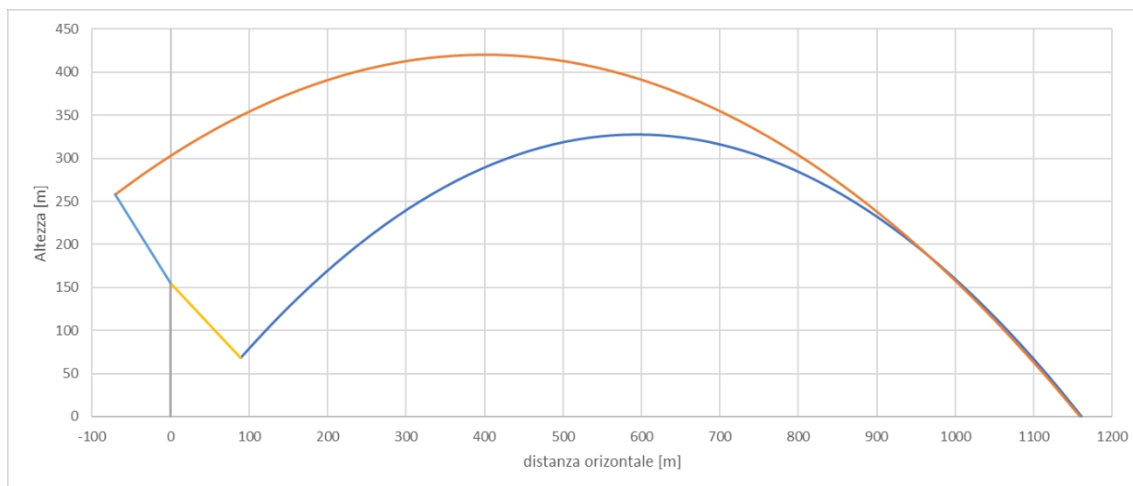


Figure 4-7 : Trajectoire du centre de gravité du fragment de pale

On observe une fois de plus que la probabilité de détachement d'une pale ou d'un fragment de celle-ci est très faible, et que la résistance de l'air réduirait considérablement la portée maximale atteinte, comme le montre la figure 4-5.

De plus, dans le passé, les méthodes de fabrication entraînaient un risque accru de détachement des composants assemblés en raison des contraintes induites, alors qu'aujourd'hui, ce problème est théoriquement résolu grâce à la fabrication de pales intégrales.

5 Conclusions

L'étude menée a fourni une évaluation de la portée maximale dans le cas hautement improbable du détachement d'une pale d'éolienne pendant le fonctionnement du parc éolien. La connaissance de cette distance est cruciale pour la conception, la sécurité et la gestion des parcs éoliens.

Deux scénarios ont été analysés, à savoir le détachement de la pale entière ou le détachement de la pointe de la pale (comme scénario le plus défavorable d'un détachement partiel de la pale).

Les principaux résultats montrent que la pale entière atteindrait une distance horizontale de 222 m par rapport à la tour de l'éolienne, tandis que le détachement partiel pourrait potentiellement atteindre 1 160 m.

Dans tous les cas, il convient de souligner que ces résultats ont été obtenus par mesure de précaution en ne tenant compte que des paramètres géométriques et cinématiques et non du mouvement de rotation complexe réel ; par conséquent, les valeurs de portée obtenues sont certainement supérieures aux valeurs réelles.

De plus, la rupture accidentelle est considérée comme un événement très peu probable (presque négligeable), étant donné que les procédures de fabrication et d'installation des pales sur le marché sont très bien établies et que très peu de cas ont été signalés dans le secteur de l'énergie éolienne au fil des ans.



6 Références bibliographiques

- [1]. « Calcul de la trajectoire d'une pale éolienne dans des conditions de fonctionnement nominales », Vestas, 2001.
- [2]. Ramboll. (2024). ATI-RAM-TEC-GEN-RPT-0010-R01 : Étude sur la portée maximale - Projet Atis.

Titre du document	Date	Auteur	Contrôlé par	Statut	Page 24 e sur 24	
ATI-ING-VIA-GITMAS-R09-00	30/09/2024	Montana	Eni Plenitude	Final		