الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـحـــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Optimisation de la maintenance préventive pour la sécurité des techniciens éoliens

Présenté et soutenu publiquement par :

Bekkari Ahlem & Beldjilali Ikram

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
M. zouari saim	MCA	IMSI	**Président**
Mme. Mimouni chahinez	MCA	IMSI	**Encadrante**
M. Terfaya anis	MCB	IMSI	**Examinateur**

Année 2025/2026

Résumé

La maintenance préventive joue un rôle essentiel dans la sécurité des techniciens et la disponibilité des installations éoliennes. Ce mémoire s'intéresse à l'optimisation de la maintenance préventive de la ferme éolienne de Kabertène (Adrar), premier parc éolien d'Algérie, implanté dans un environnement saharien marqué par des conditions climatiques extrêmes. L'objectif est d'identifier les principaux risques auxquels sont exposés les techniciens lors des opérations de maintenance et de proposer des mesures permettant d'améliorer leur sécurité tout en renforçant la fiabilité des équipements.

La démarche adoptée repose sur une étude bibliographique, une analyse des caractéristiques techniques et organisationnelles du parc, ainsi qu'une évaluation des risques à l'aide de l'AMDEC et d'une matrice de criticité. Les résultats montrent que les risques les plus importants sont les chutes de hauteur, les risques électriques, les défaillances mécaniques, les incendies ainsi que les contraintes liées aux fortes températures, aux tempêtes de sable et à l'isolement du site. Des recommandations portant sur le renforcement de la maintenance préventive, la formation, les procédures HSE et l'utilisation des équipements de protection sont proposées afin de réduire les accidents, d'améliorer la disponibilité des installations et de contribuer au développement durable de l'énergie éolienne en Algérie.

Mots-clés : maintenance préventive, sécurité, éolienne, AMDEC, analyse des risques, Kabertène.

Abstract

Preventive maintenance is essential for ensuring technician safety and improving the reliability of wind energy systems. This thesis focuses on optimizing preventive maintenance at the Kabertène wind farm in Adrar, the first wind farm in Algeria, operating under harsh Saharan environmental conditions. The main objective is to identify maintenance-related hazards and propose effective measures to improve occupational safety while increasing equipment reliability.

The study combines a literature review, a technical analysis of the wind farm, and a risk assessment based on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and a criticality matrix.

The findings indicate that the most significant hazards include falls from height, electrical risks, mechanical failures, fire hazards, and the effects of extreme heat, sandstorms, and the remote location of the site. Several recommendations are proposed, including strengthening preventive maintenance practices, improving HSE procedures, enhancing technician training, and ensuring the proper use of personal protective equipment. These measures contribute to reducing occupational risks, increasing system availability, and supporting the sustainable development of wind energy in Algeria.

Keywords: preventive maintenance, safety, wind turbine, FMEA, risk assessment, Kabertène.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

En premier lieu, nous remercions chaleureusement notre encadreure, Mme MIMOUNI CHAHINEZ, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience et son soutien constant tout au long de ce mémoire. Son encadrement bienveillant et rigoureux a été pour nous une source d'inspiration et de motivation.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu examiner ce travail et lui accorder de leur temps précieux.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du corps enseignant du département HSE pour la qualité de la formation dispensée et les connaissances transmises au cours de ces années d'études.

Nous remercions par ailleurs l'ensemble du personnel de la ferme éolienne de Kabertène et de la Société de Production d'Électricité (SPE) – filiale de Sonelgaz – pour leur accueil chaleureux, leur collaboration et les informations techniques précieuses qu'ils ont bien voulu partager avec nous.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre reconnaissance à nos collègues de promotion pour la solidarité et la bonne ambiance qui ont régné tout au long de notre cursus commun.

Enfin, nos remerciements les plus profonds vont à nos familles respectives, à nos parents et à tous nos proches, dont le soutien moral indéfectible a été la source de notre motivation et de notre persévérance.

Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents,

qui m'ont toujours entourée d'amour, de tendresse et de dévouement inépuisable,

et dont les sacrifices ont rendu ce parcours possible.

À mes frères (HAMID et KADER) et mes sœurs (SAIDA et NAWEL),

pour leur encouragement constant, leur présence bienveillante et leur amour fraternel.

À toute ma famille,

qui a été à mes côtés dans les moments de joie comme dans les moments difficiles.

À ma chère binôme Ahlem,

pour sa patience, son soutien et la belle compréhension qui a marqué notre collaboration.

À tous mes amis et collègues,

compagnons de route durant toutes ces années d'études.

À M. BENGOU TOUFIK, ingénieur HSE,

pour son encadrement professionnel et ses précieux conseils.

BELDJILALI Ikram

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents,

source de mon courage et de ma force, qui n'ont cessé de croire en moi

et dont l'amour inconditionnel a été ma plus grande richesse.

À Mon frère KHALED et mes sœurs (SALIHA et KHADIDJA),

pour leur soutien affectueux et leur présence rassurante à chaque étape de ma vie.

À toute ma famille,

pour tous les moments de bonheur partagés et pour leur amour sans faille.

À ma chère binôme Ikram,

pour son sérieux, sa générosité et l'harmonie qui a rendu notre travail commun si agréable.

À tous mes amis et collègues,

qui ont partagé avec moi les joies et les peines de ces belles années universitaires.

À M. BENGOU TOUFIK, ingénieur HSE,

pour son encadrement professionnel et ses précieux conseils.

BEKKARI Ahlem

Sommaire

Résumé / Abstract ..... **I**
Remerciements ..... **II**
Dédicace ..... **III**
Sommaire ..... **IV**
Liste des figures ..... **V**
Liste des tableaux ..... **VI**
Liste des abréviations ..... **VII**
Introduction générale **01**
Chapitre I : Généralité sur les éoliennes **03**
I.1 Définition et catégories 04
I.2 Histoire de l'éolien 05
I.3 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne 06
I.4 Principales composantes d'une éolienne 07
I.5 Les différents types d'éoliennes 09
I.6 Accouplement mécanique de l'éolienne 13
I.7 Le principe de fonctionnement 14
I.8 Vitesse et direction du vent 15
I.9 Répartition de la vitesse du vent dans le monde 16
Chapitre II : Présentation de la ferme éolienne de Kabertène **20**
II.1 Historique et données de réalisation 22
II.2 Caractéristiques techniques des éoliennes Gamesa G52/850 23
II.3 Infrastructure et raccordement électrique 24
II.4 Organisation de la maintenance 25
II.5 Enjeux HSE à la ferme éolienne de Kabertène 26
Chapitre III : Identification des risques liés à la maintenance **30**
III.1 Identification des dangers 31
III.2 Méthodologie d'identification 32
III.3 Dangers liés aux activités de maintenance 33
III.4 Dangers spécifiques aux équipements 37
Chapitre IV : Analyse des risques liés à la maintenance **40**
IV.1 Analyse des accidents et incidents 41
IV.2 Facteurs contributifs aux accidents 41
IV.3 Synthèse de l'analyse des accidents 52
IV.4 Évaluation des risques 53
Conclusion générale **58**
Bibliographie **60**

Liste des figures

Figure I.1 : Moulin à vent traditionnel – ancêtre historique de l'éolienne moderne 6
Figure I.2 : Schéma de composition générale d'une éolienne.....7
Figure I.3 : Vue interne d'une nacelle d'éolienne – composants principaux numérotés 9
Figure I.4 : Éoliennes à axe horizontal avec différents nombres de pales 10
Figure I.5 : Types de montage de la voilure : configuration amont et configuration aval ... 11
Figure I.6 : Éolienne de type Savonius 12
Figure I.7 : Types d'éoliennes à axe vertical – Rotor Darrieus, Darrieus-H et Hélioïdale ..13
Figure I.8 : Carte du gisement éolien en Algérie 17
Figure I.9 : Ferme expérimentale éolienne de Kabertène (Adrar, Algérie).....18
Figure II.1 : Vue générale de la ferme éolienne de Kabertène, wilaya d'Adrar.....21
Figure II.2 : Carte de localisation de la wilaya d'Adrar – site de Kabertène 22
Figure II.3 : Éolienne Gamesa G52/850 kW installée à la ferme éolienne de Kabertène....23
Figure II.4 : Composants principaux d'une éolienne à axe horizontal 25
Figure II.5 : Schéma du raccordement électrique du parc de Kabertène 27
Figure III.1 : Les chutes de hauteur dans le secteur éolien 33
Figure III.2 : Incendie de nacelle d'une éolienne 35
Figure III.3 : Tempête de sable saharienne.....36

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Échelle de Beaufort – extrait des degrés pertinents pour l'éolien.....15

Tableau II.1 : Données générales de la ferme éolienne de Kabertène.....22

Tableau II.2 : Fiche technique de l'éolienne Gamesa G52/850 – Kabertène 25

Tableau II.3 : Structure organisationnelle de la maintenance de la ferme de Kabertène ...25

Tableau II.4 : Analyse des risques HSE spécifiques au site de Kabertène.....27

Tableau III.1 : Dangers spécifiques aux éoliennes de Kabertène 37

Tableau IV.1 : Analyse AMDEC des composants critiques de l'éolienne – Parc de Kabertène.....44

Tableau IV.2 : Matrice de criticité pour l'évaluation des risques – Parc éolien de Kabertèn.....54

Liste des abréviations

AMDEC Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

ARIA Analyse, Recherche et Information sur les Accidents

BT Basse Tension

CDER Centre de Développement des Énergies Renouvelables

CEI / IEC Commission Électrotechnique Internationale

DFIG / MADA Doubly Fed Induction Generator / Machine Asynchrone à Double Alimentation

DZD Dinar Algérien

EPI Équipement de Protection Individuelle

FTA Fault Tree Analysis (Analyse par Arbre de Défaillances)

GMAO Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur

GWO Global Wind Organisation

HAWT Horizontal Axis Wind Turbine (Éolienne à Axe Horizontal)

HSE Hygiène, Sécurité et Environnement

HTA / HTB Haute Tension A / Haute Tension B

INRS Institut National de Recherche et de Sécurité

IPR Indice de Priorité du Risque

ISO Organisation Internationale de Normalisation

KPI Key Performance Indicator (Indicateur Clé de Performance)

LOTO Lockout / Tagout (Consignation / Déconsignation)

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation

MTBFMean Time Between Failures (Temps Moyen Entre Pannes)

MTTR Mean Time To Repair (Temps Moyen De Réparation)

O&M Operation & Maintenance (Exploitation et Maintenance)

PDCA Plan – Do – Check – Act

PNDER Programme National de Développement des Énergies Renouvelables

RCP Réanimation Cardio-Pulmonaire

REX Retour d'Expérience

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition

SGRE Siemens Gamesa Renewable Energy

SPE Société de Production d'Électricité

UDRER-MS Unité de Développement des Équipements Ruraux et des Énergies Renouvelables – Milieu Saharien

VAT Vérification d'Absence de Tension

VAWT Vertical Axis Wind Turbine (Éolienne à Axe Vertical)

Introduction générale

Le développement des énergies renouvelables constitue aujourd'hui l'un des enjeux stratégiques majeurs pour l'Algérie, dont l'économie reste fortement dépendante des hydrocarbures. Dans ce contexte, le Programme National de Développement des Énergies Renouvelables (PNDER) a fixé des objectifs ambitieux d'installation de capacités de production à partir de sources renouvelables, parmi lesquelles l'énergie éolienne occupe une place de choix.

La ferme éolienne de Kabertène, inaugurée en juillet 2014 dans la wilaya d'Adrar, constitue la première réalisation industrielle de ce programme dans le domaine de l'éolien terrestre. Implantée en plein désert saharien, à 72 km au nord d'Adrar, cette installation regroupe douze éoliennes Gamesa G52/850 kW pour une puissance totale installée de 10,2 MW et une production annuelle de 3,42 GWh.

Si les retombées économiques et environnementales de ce parc sont indéniables, son exploitation soulève des défis spécifiques liés à l'environnement saharien : chaleur extrême dépassant 45 °C en été, tempêtes de sable récurrentes, amplitude thermique journalière importante et isolement géographique. Ces facteurs transforment profondément les conditions de maintenance et de sécurité des techniciens.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif est d'analyser de manière systématique les risques professionnels liés à la maintenance des éoliennes de Kabertène et de contribuer à l'amélioration des pratiques de sécurité sur ce site unique en Algérie.

Problématique centrale : Quels sont les risques spécifiques liés à la maintenance des éoliennes dans un environnement saharien, et quelles mesures préventives peut-on mettre en place pour garantir la sécurité des techniciens sur le parc de Kabertène ?

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres complémentaires :

- Chapitre I – Généralité sur les éoliennes : revue bibliographique sur les éoliennes (définition, histoire, types, composantes, principe de fonctionnement, gisement éolien).

• Chapitre II – Présentation de la ferme éolienne de Kabertène : caractéristiques techniques et organisationnelles de l'installation, infrastructure de raccordement, organisation de la maintenance et enjeux HSE spécifiques au milieu saharien.

• Chapitre III – Identification des risques : identification systématique des dangers liés aux activités de maintenance sur ce site, en combinant l'analyse documentaire, les référentiels normatifs (ISO 45001, GWO) et les données accidentologiques.

• Chapitre IV – Analyse des risques : analyse quantitative par les méthodes AMDEC et matrice de criticité (NF EN ISO 31010), aboutissant à une hiérarchisation des risques et à des recommandations de mesures préventives prioritaires.

Chapitre I

Généralité sur les éoliennes

Introduction

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes à l'échelle mondiale. Propre, inépuisable et économiquement compétitive, elle constitue une réponse concrète aux défis énergétiques et climatiques actuels.

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les éoliennes, couvrant leur définition, leur historique, leurs composantes, leurs types, leur principe de fonctionnement ainsi que le gisement éolien en Algérie. Ces connaissances constituent le socle théorique nécessaire à la compréhension des enjeux de maintenance préventive et de sécurité des techniciens, développés dans les chapitres suivants.

I.1 Définition et catégories

L'énergie éolienne est définie comme l'énergie cinétique contenue dans les masses d'air en mouvement à la surface du globe. Le mot "éolien" tire son origine du nom d'Éole, personnage mythologique grec reconnu comme le gardien et le maître des vents. Sur le plan physique, l'énergie éolienne est une manifestation indirecte de l'énergie solaire : le rayonnement solaire provoque des contrastes thermiques dans l'atmosphère, générant des différences de pression qui mettent les masses d'air en mouvement et leur confèrent une énergie cinétique exploitable **[1]**.

Cette énergie peut être convertie et utilisée sous deux formes principales :

- **Conversion en énergie mécanique** : le vent peut servir à propulser des véhicules (voiliers, chars à voile), à pomper l'eau pour l'irrigation des terres agricoles ou l'alimentation en eau des élevages, ou encore à actionner des meules de moulin pour la transformation des grains.
- **Conversion en énergie électrique** : un aérogénérateur (éolienne de production électrique) couple un rotor éolien à un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. L'électricité peut être injectée directement sur le réseau public ou stockée dans un système de batteries pour les installations autonomes.

Du point de vue environnemental, l'énergie éolienne présente l'avantage majeur de ne générer aucune émission directe de gaz à effet de serre durant sa phase d'exploitation, ce qui en fait un levier incontournable de la décarbonation des systèmes énergétiques **[1][2]**.

I.2 Histoire des eoliennes

L'exploitation de la force du vent figure parmi les toutes premières formes d'utilisation de l'énergie par l'humanité. Dès les civilisations antiques, l'Homme a tiré parti du vent pour se déplacer sur les mers, moudre ses grains et irriguer ses terres. Les premiers moulins à vent à axe vertical apparaissent en Perse (actuel Iran) au VIIe siècle, tandis que les moulins à vent à axe horizontal se répandent en Europe à partir du XIIe siècle, principalement aux Pays-Bas, en Angleterre et dans les régions méditerranéennes **[3]**.

La révolution industrielle du XIXe siècle marque l'avènement de l'éolien électrique. En 1887, l'ingénieur écossais James Blyth construit la première éolienne productrice d'électricité [3]. En 1891, le Danois Poul la Cour pose les bases scientifiques de l'aérogénérateur moderne. Ces pionniers ouvrent la voie à une technologie qui, au fil du XXe siècle, va s'affranchir de son image artisanale pour devenir une industrie à part entière **[3][4]**.

Le véritable tournant intervient avec les chocs pétroliers des années 1970 et le mouvement antinucléaire des années 1980 : face à la vulnérabilité énergétique révélée par ces crises, les gouvernements occidentaux financent massivement la recherche sur les énergies alternatives. Des instituts spécialisés voient le jour, tels que le German Wind Energy Institute (DEWI) en Allemagne et le Danish Research Institute Riso au Danemark. Leurs travaux conduisent à l'établissement de standards internationaux, à des innovations aérodynamiques majeures et au déploiement des premiers parcs éoliens commerciaux dès 1981 (machines de 55 kW**) [4][5].**

Depuis les années 1990, la croissance de l'industrie éolienne est spectaculaire. Portée par les politiques climatiques internationales, les économies d'échelle et les progrès technologiques continus, la capacité mondiale installée a franchi le seuil du terawatt en 2023. Les leaders mondiaux sont désormais la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et l'Espagne, et l'industrie éolienne est devenue un vecteur économique de premier plan dans de nombreux pays **[5]**.



Figure I.1: Moulin à vent traditionnel – ancêtre historique de l'éolienne moderne **[3]**

I.3 Les modes exploitation de l'énergie eolienne

L'exploitation de l'énergie éolienne se décline selon deux critères principaux : la localisation géographique de l'installation et son échelle de production **[8]**.

Selon l'emplacement, on distingue :

- **Les éoliennes terrestres ("onshore") :** installés sur la terre ferme, dans des zones présentant un potentiel éolien suffisant (plaines, collines, littoraux, plateaux désertiques). Elles constituent aujourd'hui la grande majorité du parc mondial installé et bénéficient d'une technologie mature, de coûts d'installation et de maintenance inférieurs à l'offshore, et d'un accès facilité par voie routière.
- **Les éoliennes maritimes ("offshore")** : implantées en mer, sur des fondations fixes (pour des fonds inférieurs à 50 m) ou flottantes (pour les eaux profondes). Elles bénéficient de vents plus forts, plus réguliers et moins turbulents, permettant des facteurs de charge supérieurs, au prix de coûts d'installation et de maintenance significativement plus élevés.

Selon l'échelle, on trouve :

- **Les installations industrielles** : grands parcs éoliens regroupant plusieurs dizaines à plusieurs centaines de machines, raccordés au réseau électrique national ou régional. Ils sont destinés à alimenter des milliers de foyers ou des industries.

- **Les installations domestiques et autonomes** : petites éoliennes de quelques kilowatts installés chez des particuliers ou pour des sites isolés (hameaux, relais de télécommunication, stations de pompage), fonctionnant souvent en système hybride avec des batteries de stockage.

I.4 Principales composantes d'une éolienne

Une éolienne se compose de plusieurs parties **[9][10]** :

- La fondation
- Les pales
- Le mat
- La nacelle
- Le rotor (moyeu + hélice)
- La cabine de dispersion (poste de transformation)

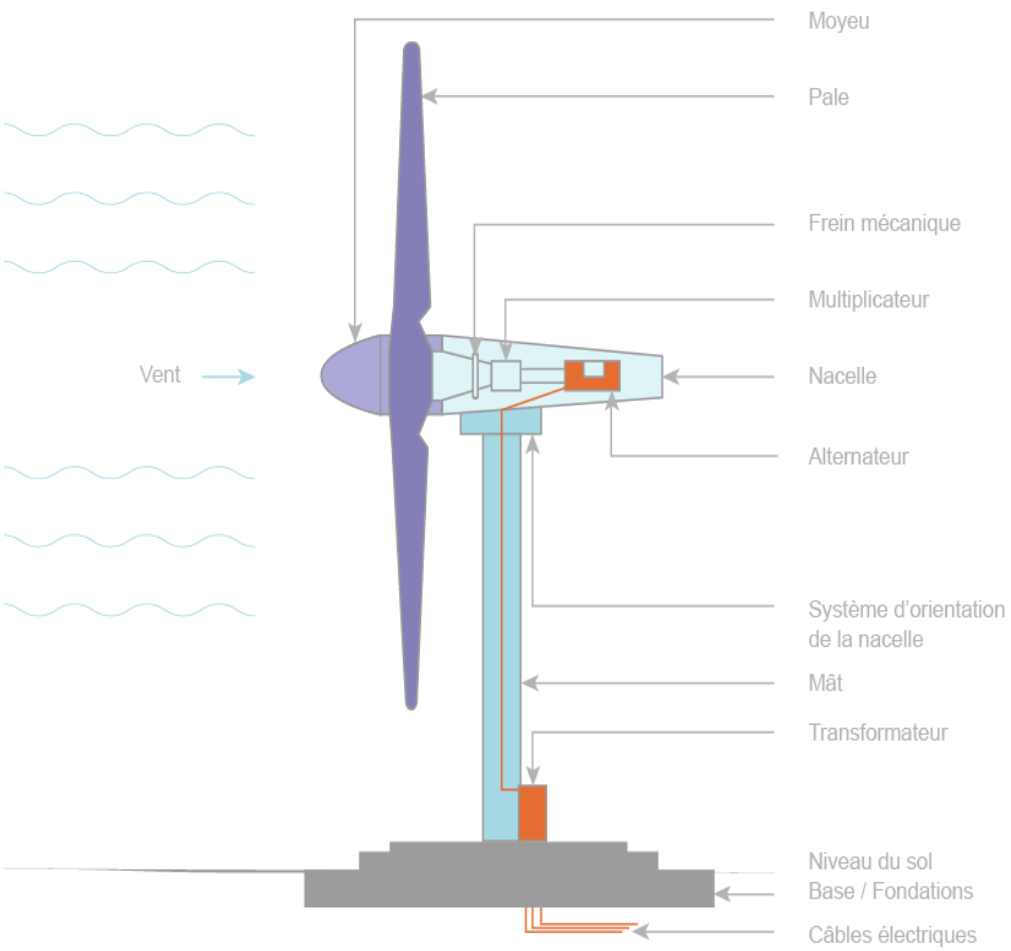


Figure I.2 : Schéma de composition générale d'une éolienne **[9]**

I.4.1 La fondation

La fondation est l'élément d'ancrage de l'éolienne dans le sol, généralement réalisée en béton armé. Sa conception est déterminée par les charges mécaniques qu'elle doit reprendre sur toute la durée de vie de l'installation (20 à 25 ans) : le poids propre de la structure, les efforts dynamiques générés par le vent et les vibrations du rotor, ainsi que les effets sismiques éventuels. La fondation doit également s'adapter aux caractéristiques géotechniques du terrain, notamment dans les sites sahariens où la nature sableuse du sol impose des études spécifiques. Pour une éolienne de puissance moyenne telle que la Gamesa G52/850 kW, la fondation circulaire peut nécessiter jusqu'à 300 à 500 tonnes de béton armé **[9]**.

I.4.2 Le mât

Le mât est la structure métallique verticale qui soutient l'ensemble nacelle-rotor à la hauteur de moyeu requise pour capter des vents suffisamment puissants et stables. Sa hauteur varie typiquement de 50 à plus de 100 m selon la puissance de la machine et le profil du vent sur le site considéré : plus le rotor est élevé, moins il est perturbé par les obstacles au sol et par la turbulence de couche limite, et meilleur est le rendement énergétique de l'installation. Le mât est généralement de section tronconique, constitué de plusieurs tronçons en acier à haute résistance (S355) assemblés par boulonnage. À l'intérieur du mât cheminent les câbles électriques reliant la nacelle au réseau, ainsi qu'une échelle équipée d'un système antichute permettant aux techniciens de maintenance d'accéder en sécurité à la nacelle **[9][10]**.

I.4.3 La nacelle

La nacelle est l'enceinte mécanique et électrique positionnée au sommet du mât. C'est le cœur opérationnel de l'éolienne : elle abrite le générateur électrique chargé de convertir l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique, le multiplicateur de vitesse, le système de freinage, les systèmes de lubrification et de refroidissement, ainsi que les capteurs et l'électronique de contrôle-commande. La nacelle peut pivoter à 360 degrés autour de l'axe du mât grâce au système de lacet (yaw), afin de maintenir en permanence le rotor face à la direction du vent. Des systèmes de supervision performants permettent d'arrêter automatiquement l'éolienne en cas de vent insuffisant, excessif ou de tout autre dysfonctionnement détecté **[9][10]**.

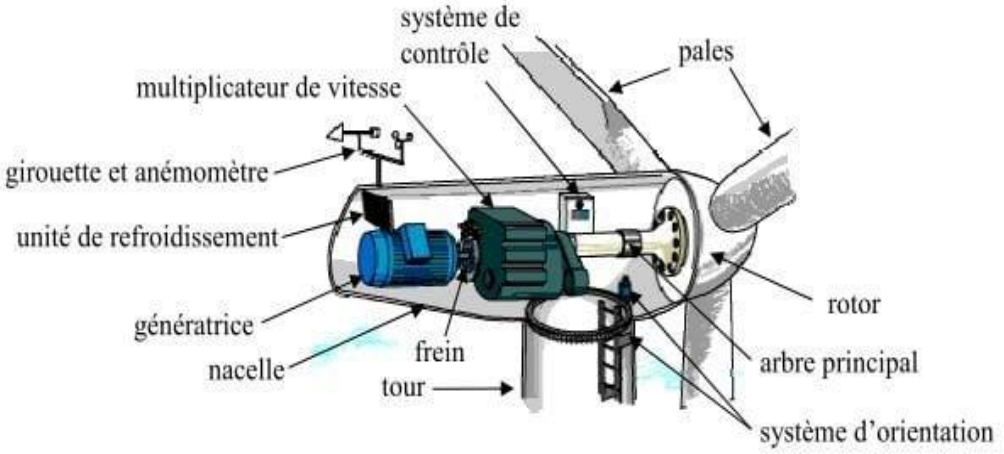


Figure I.3 : Vue interne d'une nacelle d'éolienne – composants principaux numérotés **[10]**

I.4.4 Le rotor

Le rotor est l'organe capteur d'énergie éolienne. Il comprend le moyeu et l'hélice. L'hélice se compose en général de trois pales fabriquées en matériaux composites à base de fibres de verre et/ou de fibres de carbone en matrice époxy, combinant légèreté, rigidité structurelle et résistance à la fatigue cyclique. Les pales sont positionnées en amont de la nacelle et reliées au moyeu central, qui transmet le mouvement de rotation à l'arbre lent de la transmission mécanique. En captant l'énergie cinétique du vent par effet de portance aérodynamique, les pales produisent une énergie mécanique qui sera ensuite transmise au générateur électrique. L'électricité produite est acheminée par les câbles situés dans le mât vers la cabine de dispersion en pied de mât **[9][10]**.

I.4.5 La cabine de dispersion

La cabine de dispersion, également appelée poste de transformation, est située à la base de l'éolienne ou à sa proximité immédiate. Elle assure l'interface électrique entre la production de l'éolienne et le réseau de collecte du parc. Elle contient principalement le transformateur élévateur (qui passe la tension de sortie du générateur, typiquement 690 V, à la tension du réseau de collecte interne), les protections électriques et les équipements de mesure. Elle permet d'injecter l'électricité produite sur le réseau, ou de la stocker si la production excède la demande instantanée **[9]**.

I.5 Les different types d'éoliennes

La classification des éoliennes s'effectue principalement selon l'orientation de leur axe de rotation. On distingue deux grandes familles : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical **[12]**.

I.5.1 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) représentent de loin la technologie dominante dans les parcs éoliens industriels à l'échelle mondiale. Dans cette configuration, l'axe de rotation du rotor est parallèle au sol et orienté perpendiculairement à la direction du vent incident. Le nombre de pales varie selon l'application : les modèles tri-pales sont privilégiés pour la production d'électricité car ils offrent le meilleur compromis entre rendement aérodynamique (coefficient Cp de 0,44 à 0,50), équilibre dynamique et niveau sonore, tandis que les modèles multi-pales (plusieurs dizaines de pales) sont utilisés pour le pompage d'eau en raison de leur fort couple de démarrage **[12][13]**.

L'orientation face au vent est assurée soit passivement (par un safran qui agit comme une girouette), soit activement par un système de motoréducteurs (système yaw) pilotés par des capteurs électroniques de direction et de vitesse du vent. On distingue deux configurations de voilure :

- **Configuration amont (Upwind)** : les pales sont situées en amont de la tour, directement exposées au vent. C'est la configuration la plus répandue pour les grandes machines industrielles car elle minimise les perturbations aérodynamiques liées au sillage de la tour.
- **Configuration aval (Downwind)** : les pales se trouvent en aval de la tour. Elle autorise une orientation passive sans système de lacet actif, mais expose les pales aux fluctuations de charge lors de leur passage dans le sillage de la tour.

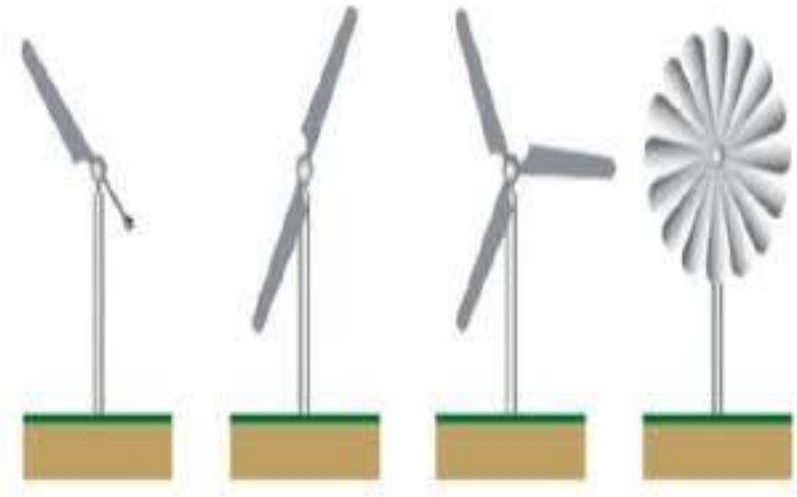


Figure I.4 : Éoliennes à axe horizontal avec différents nombres de pales **[12]**

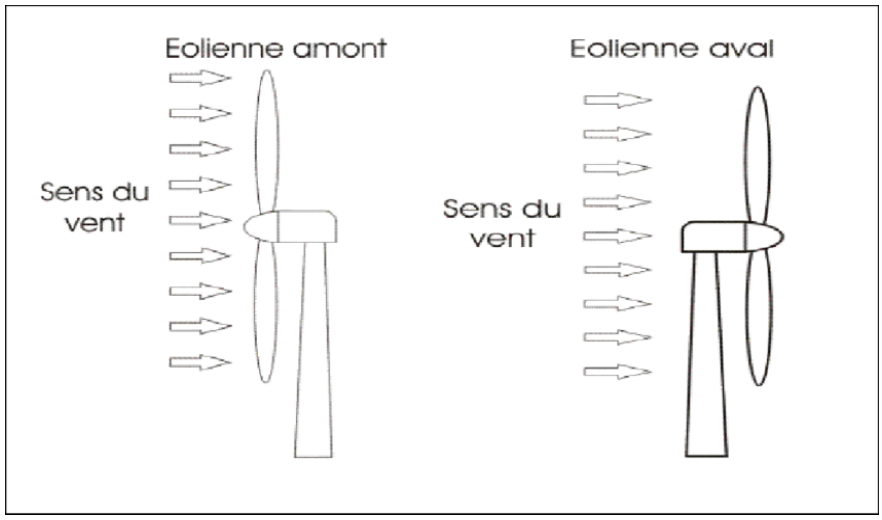


Figure I.5 : Types de montage de la voilure : configuration amont et configuration aval **[9]**

I.5.2 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine) se caractérisent par un axe de rotation orienté perpendiculairement au sol. Leur principal atout est leur omni directionnalité : elles captent le vent quelle que soit sa direction, sans nécessité de système d'orientation. Bien que leur rendement aérodynamique soit généralement inférieur à celui des HAWT, elles présentent des avantages spécifiques : démarrage à faible vitesse de vent, plus grande robustesse aux vents turbulents et maintenance simplifiée par la localisation du générateur en pied de mât. Il en existe deux types principaux **[12]** :

I.5.2.1 Éoliennes de type Savonius

Conçue par l'ingénieur finlandais Sigurd Johannes Savonius en 1922, l'éolienne Savonius fonctionne principalement par effet de traînée (drag). Elle est constituée de deux ou plusieurs demi-cuves cylindriques fixées à un axe vertical de façon décalée, créant une forme en S caractéristique vue de dessus. Ses nombreuses variantes se distinguent par le nombre de pales et leur géométrie, qui peut être droite ou hélicoïdale. La forme hélicoïdale procure un couple plus régulier et des vibrations réduites. Malgré un rendement limité (coefficient de puissance Cp inférieur à 0,20), la Savonius se distingue par un fort couple de démarrage et un fonctionnement dès les plus faibles vitesses de vent, ce qui la rend adaptée au pompage et aux petites applications urbaines **[12]**.



Figure I.6 : Éolienne de type Savonius **[12]**

I.5.2.2 Éoliennes de type Darrieus

Brevetée par l'ingénieur français Georges Jean Marie Darrieus en 1931, l'éolienne Darrieus exploite le principe de la portance aérodynamique (lift) appliquée à des pales à profil NACA. Contrairement à la Savonius, elle développe un rendement nettement supérieur (Cp de l'ordre de 0,30 à 0,40). Il en existe trois variantes principales :

- Rotor Darrieus classique (ou à œuf) : pales en forme de courbe parabolique (courbe de troposkine), la configuration la plus ancienne et la plus connue.
- Rotor Darrieus H (H-rotor) : pales droites à profil NACA disposées parallèlement à l'axe de rotation et reliées au moyeu par des bras horizontaux. Conception plus simple, fabrication facilitée.
- Rotor hélicoïdale : pales enroulées en hélice autour de l'axe vertical, procurant un couple de rotation plus uniforme et des vibrations moindres.

Les éoliennes Darrieus présentent l'avantage d'une intégration architecturale facilitée en milieu urbain ou périurbain. Leur principal inconvénient est l'absence d'auto-démarrage, qui nécessite un dispositif de lancement. Elles restent marginales dans l'éolien industriel mais connaissent un regain d'intérêt pour les applications urbaines et les sites à vent turbulent **[12]**.

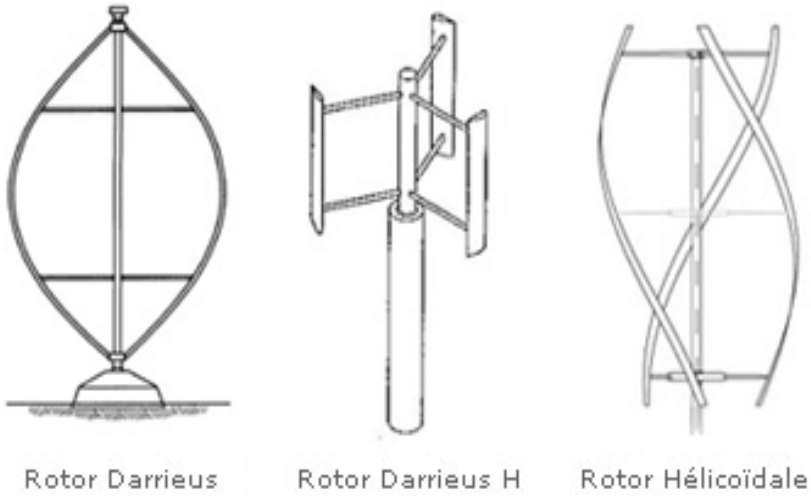


Figure I.7 : Types d'éoliennes à axe vertical – Rotor Darrieus, Darrieus-H et Hélicoïdale **[12]**

I.6 Accouplement mécanique de l'éolienne

Le mode d'accouplement mécanique entre le rotor et le générateur est un paramètre architectural fondamental de l'éolienne, qui conditionne son rendement global, sa fiabilité et ses exigences de maintenance **[14]**.

I.6.1 Éolienne à attaque directe (Direct Drive)

Dans la configuration à attaque directe, le générateur est couplé directement à l'arbre du rotor, sans aucun multiplicateur de vitesse intermédiaire. Le générateur tourne donc à la même vitesse lente que le rotor, typiquement entre 10 et 50 tr/min. Pour générer de l'électricité à fréquence nominale (50 Hz) à une telle vitesse de rotation, il est indispensable d'utiliser un générateur synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles (plusieurs dizaines de paires de pôles). Cette architecture présente l'avantage majeur d'éliminer le multiplicateur mécanique – principal siège de pertes d'énergie et source de pannes dans les éoliennes conventionnelles – au prix d'un générateur significativement plus volumineux, plus lourd et plus coûteux. Elle est notamment adoptée par Enercon et Siemens Gamesa pour certaines gammes **[14][11]**.

I.6.2 Éolienne à attaque indirecte (avec multiplicateur)

Dans l'architecture à attaque indirecte, un multiplicateur de vitesse à engrenages (gearbox) est intercalé entre l'arbre lent du rotor et l'arbre rapide du générateur. La turbine tournant à faible vitesse avec un couple mécanique élevé, le multiplicateur amplifie la vitesse de rotation par un rapport typique de 1:50 à 1:100 pour atteindre la plage de vitesse requise par

le générateur (900 à 1800 tr/min). Le générateur utilisé est fréquemment une machine asynchrone à cage d'écureuil, ou, pour un fonctionnement à vitesse variable plus économique, une machine asynchrone à double alimentation (MADA/DFIG).

Le multiplicateur de vitesse constitue le composant le plus vulnérable de l'éolienne sur le plan de la fiabilité : il concentre la majorité des défaillances mécaniques et son remplacement représente un coût considérable. Sa surveillance régulière (analyse vibratoire, analyse physicochimique de l'huile, contrôle des jeux d'engrenages) et le respect strict des intervalles de maintenance préventive sont des priorités absolues pour garantir la disponibilité du parc et la sécurité des techniciens.

I.7 Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une éolienne repose sur une chaîne de conversion énergétique se déroulant en quatre étapes successives, transformant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique injectable sur le réseau **[9]** :

- **Étape 1** : Le vent exerce une force de portance aérodynamique sur les pales profilées du rotor. Sous l'action de cette force, les pales entrent en rotation autour de l'axe horizontal du rotor, générant une énergie mécanique à faible vitesse sur l'arbre lent.
- **Étape 2** : Le multiplicateur de vitesse amplifie la vitesse de rotation de l'arbre lent (15 à 25 tr/min) jusqu'à la vitesse requise par le générateur électrique (900 à 1800 tr/min), en augmentant la fréquence de rotation tout en conservant la puissance transmise.
- **Étape 3** : Le générateur électrique (alternateur ou machine asynchrone) convertit le mouvement de rotation rapide en courant électrique alternatif triphasé. Dans le cas de la MADA, un convertisseur de fréquence assure la stabilité de la fréquence de sortie à 50 Hz malgré les variations de vitesse du vent.
- **Étape 4** : Le transformateur, situé dans la nacelle ou en pied de mât, élève la tension du courant produit pour minimiser les pertes lors de son transport jusqu'au réseau électrique régional.

Au niveau du parc, les éoliennes sont espacées de plusieurs centaines de mètres et interconnectées par un réseau interne de câbles souterrains à moyenne tension. Ce réseau collecteur est raccordé au réseau de distribution public via un poste de livraison équipé d'un transformateur principal. Sur le plan opérationnel, l'éolienne requiert une vitesse de vent minimale de 10 à 15 km/h (vitesse de démarrage, cut-in) pour démarrer sa production. Au-delà de 90 km/h (vitesse de coupure, cut-out), les systèmes de sécurité arrêtent

automatiquement la machine pour protéger la structure mécanique. La vitesse optimale de production est de l'ordre de 50 km/h (vitesse nominale), pour laquelle l'éolienne atteint sa puissance nominale **[16]**.

I.8 Vitesse et direction du vent

La mesure de la vitesse du vent est réalisée par un anémomètre. On en distingue deux catégories principales :

- **Anémomètres à rotation** : les plus répandus, fonctionnant par entraînement mécanique d'un organe rotatif (coupelles hémisphériques ou hélice) dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse du vent.

La direction du vent est déterminée par une girouette électronique. L'échelle de Beaufort, établie en 1806 par l'Amiral Francis Beaufort, fournit une classification pratique des vents en 13 degrés (0 à 12) selon leurs vitesses et leurs effets observables (Tableau I.1) **[15][16]**.

Tableau I.1 : Échelle de Beaufort – extrait des degrés pertinents pour l'éolien

Degré	Vitesse (m/s)	Description / Effets observés
0	< 0,3	Calme – Fumée montant verticalement, mer d'huile
1	0,3 – 1,5	Très légère brise – Fumée légèrement déviée
3	3,4 – 5,4	Petite brise – Feuilles et brindilles en mouvement constant
4	5,5 – 7,9	Jolie brise – Poussière et papiers soulevés, petites branches bougent
5	8,0 – 10,7	Brise fraîche – Arbustes feuillus oscillent (zone idéale pour l'éolien)
6	10,8 – 13,8	Vent frais – Grosses branches agitées, parasols difficiles à ouvrir
7	13,9 – 17,1	Grand frais – Arbres entiers agités, marche contre le vent pénible
8	17,2 – 20,7	Coup de vent – Branches cassent, vitesse de coupure des éoliennes
9	20,8 – 24,4	Fort coup de vent – Dommages légers aux structures

Degré	Vitesse (m/s)	Description / Effets observés
10	24,5 – 28,4	Tempête – Arbres arrachés, dommages importants

Pour l'implantation d'un parc éolien, une campagne de mesures météorologiques d'au moins un an est indispensable : vitesse moyenne annuelle, distribution statistique selon la loi de Weibull, rose des vents, variation en altitude et turbulence. Les vents réguliers de 6 à 10 m/s sont les plus rentables énergétiquement, offrant le meilleur compromis entre fréquence d'apparition et puissance extractible **[15][16]**.

I.9 Répartition de la vitesse du vent dans le monde

I.9.1 Carte du gisement éolien dans le monde

Les ressources éoliennes sont réparties de façon inégale à la surface du globe, en fonction de la météorologie régionale, de la topographie et de la proximité des océans. Les zones les plus venteuses se situent principalement aux latitudes moyennes (40-60 degrés Nord et Sud), sur les côtes océaniques exposées aux vents dominants d'ouest (Europe du Nord, côtes américaines), dans les régions de grands plateaux et dans les déserts chauds tels que le Sahara. L'Atlas Mondial du Vent (Global Wind Atlas), développé par l'Université Technique du Danemark (DTU) en partenariat avec la Banque Mondiale, fournit la cartographie de référence mondiale des ressources éoliennes à une résolution de 250 m et pour différentes hauteurs de mat **[17]**.

I.9.2 Carte du gisement éolien en Algérie

Pour l'implantation d'une éolienne ou d'un parc éolien, le choix du site est déterminé en premier lieu par le potentiel éolien local, caractérisé par la vitesse moyenne annuelle du vent et sa distribution statistique. Des études cartographiques détaillées menées par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) d'Alger ont mis en évidence plusieurs zones à fort potentiel éolien en Algérie, notamment dans les régions sahariennes du sud du pays **[18]**.

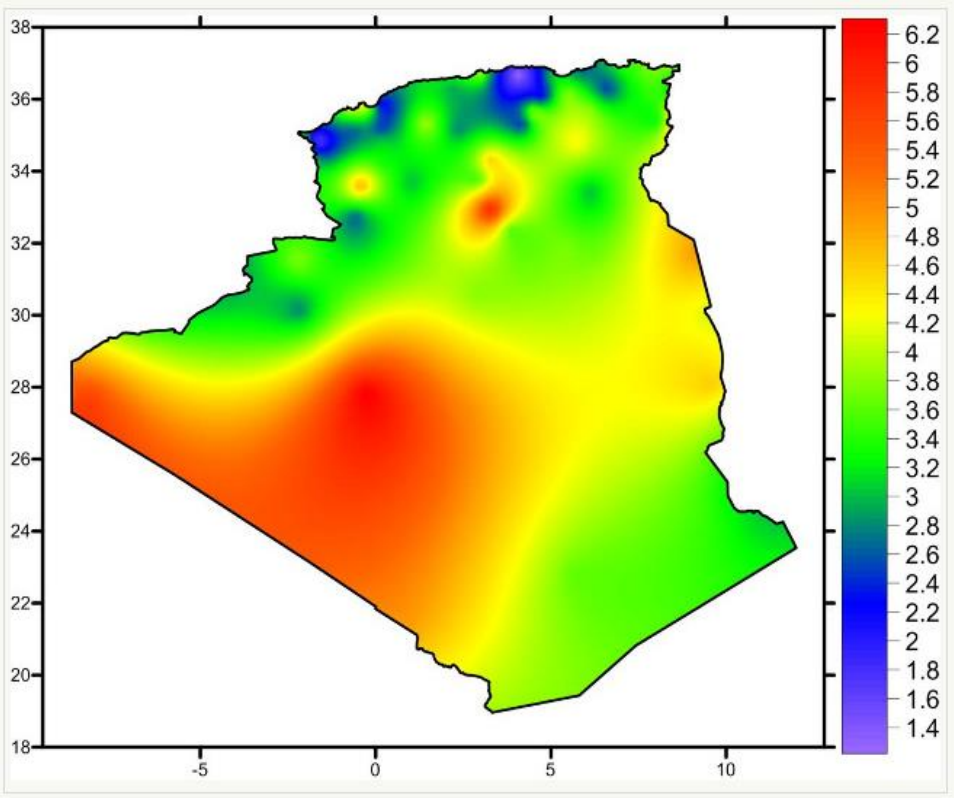


Figure I.8 : Les régions les plus ventées en Algérie – Vitesses moyennes annuelles du vent (m/s) **[18]**

I.9.3 Influence de la hauteur sur la vitesse du vent

La vitesse du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol, en raison de la réduction du frottement exercé par la rugosité de la surface terrestre (couche limite atmosphérique). Cette variation est modélisée par la loi de puissance de Hellmann :

$$V(z) = V(z0) \times (z / z0)^{alpha}$$

Où V(z) est la vitesse du vent à la hauteur z (m), V(z0) la vitesse mesurée à la hauteur de référence z0 (généralement 10 m), et alpha le coefficient de Hellmann (ou exposant de rugosité), qui vaut approximativement 0,10 à 0,14 pour une mer ouverte, 0,20 pour une plaine dégagée, 0,25 à 0,30 pour un terrain boisé et 0,35 à 0,40 pour un milieu urbain. Ce profil vertical justifie l'intérêt d'élever la hauteur de mât des éoliennes : à Adrar, passer de 10 m à 55 m de hauteur de moyeu accroît la vitesse du vent d'environ 30 à 40 %, soit une multiplication de la puissance extractible (proportionnelle à V^3) par un facteur de l'ordre de 2 à 3 **[18][19]**.

I.9.4 L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie figure parmi les pays qui investissent dans le développement de l'énergie éolienne, malgré la prédominance de l'énergie solaire sur son territoire. Les études saisonnières et annuelles du vent, réalisées sous l'égide du CDER, montrent que le potentiel éolien algérien est concentré principalement dans les régions méridionales, où les vitesses annuelles moyennes dépassent 4 m/s, avec des pointes à 6 m/s dans la région de Tindouf et jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar. Ces valeurs sont économiquement exploitables pour des projets de production électrique à échelle industrielle **[18][20]**.

Dans ce cadre, la première ferme éolienne industrielle algérienne, d'une puissance totale de 10,2 MW, a été réalisée à Kabertène, commune de Tissabit, wilaya d'Adrar, et mise en service en juin 2014. Le projet, confié au consortium algéro-français CEGELEC en partenariat avec les filiales de Sonelgaz ETTERKIB et INERGA, regroupe 12 éoliennes Gamesa G52/850 kW sur une superficie de 30 hectares. L'électricité produite est injectée sur le réseau régional d'Adrar via le poste de transformation 30/220 kV de Kabertène. Ce parc pilote constitue la référence technique nationale pour le développement futur de l'éolien en Algérie, inscrit dans le Programme National de Développement des Énergies Renouvelables (PNDER) visant 15 000 MW de capacité renouvelable à l'horizon 2035, dont plus de 5 000 MW éoliens **[17][20]**.



Figure I.9. : Ferme expérimentale éolienne de Kabertène (Adrar, Algérie) – vue générale du parc **[21]**

Conclusion

Ce premier chapitre a présenté les notions fondamentales relatives aux éoliennes : définition et historique de l'énergie éolienne, modes d'exploitation, composantes de la machine (fondation, mât, nacelle, rotor), types d'éoliennes (HAWT et VAWT), principe de fonctionnement de la chaîne de conversion énergétique, caractéristiques du vent, et gisement éolien en Algérie avec le parc pilote de Kabertène (10,2 MW, 12 éoliennes Gamesa G52/850 kW).

Ces connaissances constituent le cadre théorique indispensable pour aborder les chapitres suivants, consacrés à la présentation du parc éolien de Kabertène, à l'identification des risques liés à la maintenance, et aux recommandations d'optimisation de la maintenance préventive pour la sécurité des techniciens éoliens.

Chapitre II

Présentation de la ferme éolienne de Kabertène

Introduction

Après avoir établi, dans le premier chapitre, les bases théoriques et techniques relatives aux éoliennes — leur histoire, leurs composantes et leurs principes de fonctionnement — il convient à présent de porter le regard sur le terrain d'étude qui constitue le cœur de ce mémoire : la ferme éolienne de Kabertène.

Inaugurée en juillet 2014 dans la wilaya d'Adrar, cette installation représente la première réalisation industrielle éolienne d'envergure en Algérie. Implantée au cœur du désert saharien, à 72 km au nord d'Adrar, elle regroupe douze éoliennes de type Gamesa G52/850 kW, pour une puissance totale installée de 10,2 MW. Son caractère pionnier, combiné à la singularité de son environnement géographique et climatique, en fait un site d'étude particulièrement pertinent dans le cadre d'une analyse HSE.

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter de manière détaillée ce parc éolien sous ses différentes dimensions. Nous aborderons successivement son historique et ses données de réalisation (section 2.1), les caractéristiques techniques des éoliennes Gamesa G52/850 qui le composent (section 2.2), son infrastructure et son raccordement électrique (section 2.3), l'organisation de sa maintenance (section 2.4), ainsi que les enjeux HSE spécifiques liés au milieu saharien dans lequel il s'inscrit (section 2.5).

Cette présentation constitue le socle indispensable à l'identification et à l'analyse des risques professionnels qui seront développées dans les chapitres suivants.

Description de la ferme éolienne

La ferme éolienne de Kabertène, implantée au cœur du Sahara algérien dans la wilaya d'Adrar, constitue le premier parc éolien industriel d'Algérie. Ses caractéristiques générales sont récapitulées dans le Tableau II.1. **[22][23]**

Comme présenté au Chapitre I, ce parc revêt une dimension stratégique double : productive (injection sur le réseau électrique de la wilaya d'Adrar) et expérimentale (station pilote pour la maîtrise de la technologie éolienne en milieu saharien), dans le cadre du PNDER. Ce chapitre en présente les caractéristiques techniques détaillées, l'organisation de la maintenance et les enjeux HSE spécifiques au contexte saharien. **[24][25]**

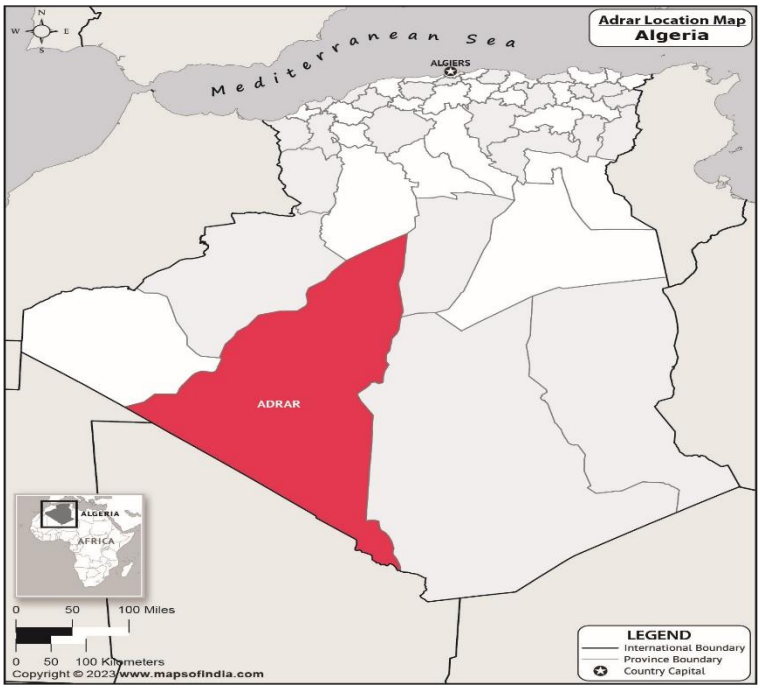


Figure II.2 : Carte de localisation de la wilaya d'Adrar en Algérie – site de Kabertène à 72 km au nord d'Adrar (Source : World Atlas)

La wilaya d'Adrar jouit d'une longue tradition en matière d'énergie éolienne : la première éolienne installée sur le territoire algérien date de 1953, dans la zone voisine de Ouled-Aïssa. Cette antériorité historique, combinée à la fréquence et à la régularité des vents caractéristiques de la région, a motivé le choix de Kabertène comme site d'implantation pour ce projet pionnier. **[23][24]**

II.1. Historique et données de réalisation :

Le projet, dont l'historique de réalisation a été présenté au Chapitre I (section I.9.4), a été réceptionné officiellement le 3 juillet 2014. Les données générales du parc sont récapitulées dans le Tableau II.1 ci-après. **[22][25][30]**

Tableau II.1 : Données générales de la ferme éolienne de Kabertène **[22][23][25][30]**

Paramètre	Valeur
Localisation	Kabertène, commune de Tissabit, wilaya d'Adrar
Coordonnées GPS	28°27'31.8"N 0°03'14.7"W
Distance du chef-lieu	72 km au nord d'Adrar

Paramètre	Valeur
Superficie	30 hectares
Type	Terrestre (onshore) – milieu saharien
Réalisateur	Consortium CEGELEC + ETTERKIB + INERGA
Date de mise en service	3 juillet 2014
Coût global	2,8 milliards DZD (≈ 25,9 M€)
Raccordement réseau	Poste 220/30 kV de Kabertène
Production annuelle	3,42 GWh/an
Exploitant	SPE – filiale Sonelgaz

II.2 Caractéristiques techniques des éoliennes Gamesa G52/850 :

Les 12 éoliennes sont des Gamesa G52/850, modèle de la plateforme G5x-850 kW conçue pour les sites de classe IEC IA : vents forts, environnements poussiéreux, conditions logistiques exigeantes — profil correspondant aux contraintes du site saharien de Kabertène. Le constructeur Gamesa a été intégré à Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE) en 2017. **[35][33][38]**



Figure II.3 – Éolienne Gamesa G52/850 kW (Source : wind-turbine-models.com, 2022

La G52/850 est équipée d'un système de surveillance préventive SMP intégré au contrôle-commande, et du SCADA propriétaire Gamesa pour la supervision à distance en temps réel — essentiel pour un site isolé à 72 km d'Adrar. **[33]**

Paramètre	Valeur	Unité	Source
Modèle	Gamesa G52/850	–	**[22][35]**
Puissance nominale	850	kW	**[35]**
Nombre d'éoliennes	12	unités	**[22]**
Puissance totale installée	10,2	MW	**[22]**
Diamètre du rotor	52	m	**[35][36]**
Surface balayée	2 124	m²	**[35]**
Hauteur de moyeu	55	m	**[22][35]**
Hauteur totale (tip)	≈ 81	m	**[35]**
Vitesse cut-in	4	m/s	**[35][36]**
Vitesse nominale	13	m/s	**[35]**
Vitesse cut-out	25	m/s	**[35][36]**
Vitesse de survie	70	m/s	**[36]**
Vitesse max. rotor	30,8	tr/min	**[35]**
Type de générateur	Asynchrone DFM 690 V	–	**[33][35]**
Multiplicateur	3 étages planétaire	–	**[35]**
Pales	3 – Fibre de verre/époxy	–	**[35]**
Classe IEC	IA – vents forts / sites exigeants	–	**[36][38]**
Durée de vie nominale	≥ 20	ans	**[36]**
Système SCADA	Gamesa SGIPE	–	**[33][36]**
Production annuelle	3,42	GWh/an	**[22]**
Coût de réalisation	2,8 Mds DZD (≈ 25,9 M€)	–	**[22][25]**

II.3 Infrastructure et raccordement électrique

L'énergie produite est collectée via un réseau interne souterrain à 30 kV et évacuée vers le poste de transformation 220/30 kV de Kabertène. La gestion opérationnelle est assurée par la SPE, appuyée scientifiquement par l'UDRER-MS d'Adrar.**[22][23][30]**

2.4 Organisation de la maintenance :

II.4.1 Cadre normative et contractuel

La maintenance s'appuie sur un cadre tripartite : la norme IEC 61400 et EN 13306:2017 au niveau international ; les prescriptions OEM Gamesa au niveau constructeur ; et la Loi n° 88-07 relative à l'hygiène, à la sécurité et à la médecine du travail au niveau national algérien.

[26][27][34]

II.4.2 Typologies de maintenance appliqués

a) Maintenance preventive systématique

Elle est organisée en deux niveaux : visite semestrielle (Minor Service) incluant inspection visuelle, niveaux de lubrifiants, fixations et équipements de sécurité ; et visite annuelle (Major Service) couvrant remplacement des filtres, lubrification complète, contrôles électriques et vérification des protections contre la foudre.**[27] [28]**

b) Maintenance corrective

L'isolement géographique du site (72 km, route saharienne) rend les interventions correctives non planifiées particulièrement délicates. Le délai d'acheminement des pièces peut s'étendre de plusieurs heures à plusieurs jours en cas de tempête de sable. Cette réalité renforce l'intérêt stratégique de la maintenance préventive optimisée.**[23][28]**

II.4.3 Structure organisationnelle

Tableau II.3 – Structure organisationnelle de la maintenance de la ferme de Kabertène **[23][24] [27][34]**

Niveau	Acteur	Responsabilités	Indicateur clé
Stratégique	Direction SPE / Sonelgaz	Politique ENR, budget O&M, objectifs de disponibilité	Taux de disponibilité global (> 97 %)

Niveau	Acteur	Responsabilités	Indicateur clé
Tactique	Chef de parc / Ingénieur O&M	Planification maintenance, coordination équipes, interface SCADA	MTBF, MTTR, coût/MWh
Opérationnel	Techniciens de maintenance	Inspections périodiques, lubrification, réparations, rapports	Conformité procédures HSE
Support / Méthodes	Ingénieur méthodes + UDRER-MS	Retour d'expérience (REX), GMAO, formation HSE GWO	Réduction des accidents du travail
Prestataires	Sous-traitants spécialisés	Travaux spéciaux : pales, grues, contrôles non-destructifs	Conformité Loi 88-07

II.4.4 Indicateurs de performance

Les KPI suivis sont : taux de disponibilité (objectif > 97 %), MTBF, MTTR et coût de maintenance par MWh. Pour un parc de 10,2 MW produisant 3,42 GWh/an, une heure d'indisponibilité non planifiée représente une perte d'environ 390 kWh, soulignant l'impact économique direct de chaque intervention corrective évitable. **[22][28]**

2.5 Enjeux HSE à la ferme éolienne de Kabertène

II.5.1 Panorama des risques professionnels

Les techniciens de Kabertène sont exposés à un profil de risques combinant les dangers génériques du secteur éolien mondial (travail en hauteur à 55 m en nacelle, risques électriques, espaces confinés) et des facteurs aggravants propres au milieu saharien. La hauteur totale de la turbine G52/850 (≈ 81 m en bout de pale) place ces interventions dans la catégorie de criticité maximale selon la GWO. **[22][31] [35]**

Selon les statistiques GWO (2022), les chutes de hauteur représentent 38 % des accidents mortels du secteur, suivies par les accidents électriques (22 %) et les incendies (15 %).

[31]



Figure II.5 : Technicien de maintenance en ascension d'une tour d'éolienne avec équipement de protection individuelle (EPI) anti-chute (Source : STL USA)

Tableau II.4 – Analyse des risques HSE spécifiques au site de Kabertène

Risque identifié	Criticité	Mesures de prévention	Réf.
Chute de hauteur (≈ 81 m)	CRITIQUE	Harnais anti-chute, ligne de vie, point d'ancrage certifié	**[GWO][31]**
Électrocution / arc électrique	ÉLEVÉ	Procédure LOTO, habilitation électrique, EPI arc-flash	**[32]**
Stress thermique / coup de chaleur	ÉLEVÉ – SAHARA	Hydratation, rotation équipes, suivi médical (T° > 40°C)	**[37]**
Tempête de sable (sirocco)	ÉLEVÉ – SITE	Arrêt activité, EPI respiratoires, seuils vent/sable	**[37]**
Isolement géographique (72 km)	ÉLEVÉ	Plan de secours, véhicule 4x4, radio/GSM, double équipe	**[23][37]**
Incendie en nacelle	MOYEN	Détecteurs CO_2, extincteurs, procédure évacuation à 55 m	**[31]**
Manutention lourde	MOYEN	Grue intégrée, outillage certifié, plan de levage	**[GWO]**
Risque chimique (huiles)	FAIBLE	FDS, EPI chimiques, récupération déchets	**[33]**

Note : Les risques en fond orange/jaune sont spécifiques ou aggravés par le contexte saharien **[23][31][34][33][34][37]**

II.5.2 Risques spécifiques au contexte saharien d'Adrar

a) Stress thermique

Les températures estivales à Adrar dépassent régulièrement 45°C à l'ombre et peuvent atteindre 60°C dans la nacelle à l'arrêt. Ces conditions extrêmes exposent les techniciens aux risques de coup de chaleur, déshydratation sévère et perte de vigilance pouvant conduire à des chutes — risque absent de la plupart des référentiels européens. **[37]**

b) Tempêtes de sable

Les tempêtes de sable (chergui, sirocco) interdisent tout travail en hauteur, imposent l'arrêt des éoliennes et peuvent bloquer l'accès routier au site. L'érosion chronique des pales par les particules abrasives nécessite des inspections plus fréquentes qu'en contexte européen.**[23][37]**

c) Isolement géographique

Le délai d'intervention des secours médicaux peut dépasser 90 minutes, rendant la formation GWO First Aid et la disponibilité d'un défibrillateur sur site une nécessité absolue.**[31][37]**

II.5.3 Cadre réglementaire HSE

La prévention est encadrée par la Loi algérienne n° 88-07 du 26 janvier 1988, et ses décrets d'application. Au niveau international, le référentiel GWO BST (Basic Safety Training) constitue le standard mondial : travail en hauteur, premiers secours, protection contre l'incendie et manutention manuelle. **[31][34]**

II.5.4 Intégration HSE dans la stratégie de maintenance

Une maintenance préventive insuffisante génère des interventions correctives d'urgence dans des conditions dégradées (nuit, chaleur extrême, tempête de sable), augmentant exponentiellement les risques d'accidents. Une maintenance préventive bien optimisée réduit la fréquence des interventions non planifiées et permet de les programmer dans des fenêtres favorables (matinée fraîche, météo stable, plein jour). **[28][31]**

Conclusion

Ce deuxième chapitre a présenté en détail la ferme éolienne de Kabertène, première installation éolienne industrielle d'Algérie. Les caractéristiques techniques des 12 éoliennes Gamesa G52/850 kW ont été exposées, ainsi que l'infrastructure de raccordement électrique au réseau régional d'Adrar. L'organisation de la maintenance, encadrée par les normes IEC

61400 et EN 13306, repose sur deux niveaux d'intervention préventive (visite semestrielle et annuelle) complétés par des indicateurs de performance (disponibilité > 97 %, MTBF, MTTR). Enfin, l'analyse HSE a mis en évidence les risques spécifiques au contexte saharien stress thermique, tempêtes de sable et isolement géographique qui amplifient les dangers génériques du secteur éolien et justifient une stratégie de maintenance préventive optimisée. Ces éléments constituent le cadre de référence pour les recommandations développées dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Identification des risques liés à la maintenance des éoliennes de Kabertène

Introduction

La sécurité des travailleurs constitue un enjeu fondamental dans toute activité industrielle, et plus encore lorsque celle-ci se déroule dans des environnements extrêmes. Le parc éolien de Kabertène, implanté à 72 km du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, représente un cas d'étude particulièrement révélateur : il combine les dangers inhérents à la maintenance de grandes machines tournantes en hauteur avec les contraintes spécifiques du milieu saharien, à savoir la chaleur extrême, les tempêtes de sable et l'isolement géographique.

L'identification des risques constitue la première étape indispensable de toute démarche de prévention. Sans une connaissance précise et exhaustive des dangers auxquels sont exposés les techniciens, il est impossible de mettre en place des mesures de protection efficaces et adaptées. C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent chapitre, dont l'objectif est de répertorier, de décrire et d'analyser l'ensemble des dangers liés aux activités de maintenance des éoliennes Gamesa G52/850 du parc de Kabertène.

Ce travail s'appuie sur une méthodologie structurée combinant l'analyse documentaire, le retour d'expérience accidentologique national et international, les référentiels normatifs en vigueur (ISO 45001, GWO) ainsi que les observations de terrain. Il prend en compte non seulement les dangers génériques du secteur éolien, mais également les facteurs d'aggravation propres au contexte désertique d'Adrar, qui transforment des risques ordinaires en situations potentiellement mortelles.

Le chapitre est structuré en trois parties complémentaires : la méthodologie d'identification des dangers (section 3.1 et 3.2), l'analyse détaillée des dangers par nature d'exposition (section 3.3), et enfin l'identification des dangers spécifiques aux équipements constitutifs de l'éolienne, présentés sous forme de tableau synthétique (section 3.4).

III.1 Identification des Dangers

L'identification des dangers constitue la première étape de toute démarche de prévention des risques professionnels. Elle consiste à recenser de manière exhaustive l'ensemble des situations, équipements, substances ou conditions de travail susceptibles de causer un dommage aux travailleurs**.[46]**

La notion de **danger** désigne une propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore…), à un système technique (mise sous pression d'un gaz…), à une disposition (élévation d'une charge…) ou à un organisme (microbes), de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable ». Sont ainsi rattachées à cette notion les propriétés d'inflammabilité,

d'explosivité, de toxicité, de caractère infectieux — inhérentes à un produit — ainsi que celle de l'énergie disponible (pneumatique ou potentielle) qui caractérise le danger.**[47]**

III.2 Méthodologie d'Identification

III.2.1 Approche systématique

L'identification des dangers du parc éolien de Kabertène s'appuie sur une méthodologie structurée combinant plusieurs approches complémentaires :

- Analyse par phase d'intervention : décomposition des activités de maintenance en phases successives (préparation, accès au site, montée dans l'éolienne, intervention en nacelle, descente, retour) et identification des dangers spécifiques à chaque phase.
- Analyse par composant : examen systématique de chaque sous-système de l'éolienne (rotor, nacelle, mât, système électrique, système hydraulique, système de contrôle) et identification des dangers associés.
- Analyse des situations de travail : observation et description des postes de travail, des tâches réalisées, des équipements utilisés et des conditions d'exécution pour identifier les expositions aux dangers.
- Retour d'expérience : exploitation des données d'accidentologie du secteur éolien international, des presqu'accidents et incidents survenus sur site ou sur des sites similaires, et des bonnes pratiques identifiées.
- Consultation des acteurs : implication des techniciens de maintenance, du superviseur, du responsable HSE et des équipes du constructeur pour capitaliser sur leur connaissance du terrain et leur expérience.**[48][49]**

III.2.2 Outils d'identification

Plusieurs outils méthodologiques sont utilisés pour structurer l'identification des dangers :

- Check-lists normalisées : utilisation de listes de vérification basées sur les référentiels GWO (Global Wind Organisation) et les normes ISO 45001, adaptées au contexte spécifique du parc de Kabertène.
- Visites d'inspection : inspections régulières du site, des éoliennes, des équipements et des conditions de travail par le responsable HSE et des experts externes.
- Analyse documentaire : examen des manuels techniques du constructeur Gamesa/SGRE, des procédures de maintenance, des fiches de données de sécurité (FDS) des produits chimiques et de la réglementation applicable.

- Observations de terrain : accompagnement des techniciens lors d'interventions réelles pour observer les pratiques effectives, les écarts éventuels par rapport aux procédures et les situations imprévues.
- Interviews et groupes de travail : échanges structurés avec les équipes pour recueillir leur perception des risques, leurs suggestions d'amélioration et leur retour d'expérience.**[50][51][52]**

III.3 Dangers liés aux Activités de Maintenance

III.3.1 Danger de hauteur

L'accès à la nacelle de l'éolienne Gamesa G52/850 du parc d'Adrar s'effectue à 55 mètres de hauteur, via une échelle fixe intérieure ou un élévateur. Le technicien est exposé au danger de chute à tout moment : lors de la montée, de la descente ou lors de travaux en nacelle (sortie au sommet pour vérification des anémomètres, travaux sur les pales). Après l'élévateur, il reste une quinzaine de mètres à parcourir sur l'échelle, sécurisés par un rail antichute, et un passage étroit avant d'accéder à la nacelle.**[53]**



Figure III.1 : Les chutes de hauteur dans le secteur éolien

Le 15 décembre 2010, un employé chargé de la maintenance d'une éolienne a fait une chute de 3 mètres à l'intérieur de la nacelle, située à 98 m du sol. Le technicien a été grièvement blessé au dos. Une équipe du GRIMP l'a évacué par l'extérieur et transféré à l'hôpital.**[54]**

Les statistiques d'accidents mortels lors des opérations de maintenance s'élevaient à 0,40 mort par TWh produit dans les années 1990, et à 0,15 mort par TWh dans les années 2000.**[55]**

III.3.2 Danger électrique

La sécurité à l'intérieur et autour d'une éolienne est particulièrement critique, car les parties électromécaniques se trouvent généralement dans des espaces très confinés, situation aggravée par la présence de plusieurs personnes dans une zone restreinte et par des itinéraires d'évacuation souvent difficiles à négocier.**[56]**

Les éoliennes fonctionnent en permanence sous tension électrique (générateur 690 V, transformateur HTA). Le courant devient dangereux dès 10 mA (effet non-lâcher) ; 30 mA provoquent la paralysie respiratoire ; 75 mA entraînent la fibrillation cardiaque irréversible. Les quatre types d'accidents électriques sont : l'électrisation, l'électrocution, l'arc électrique et l'incendie d'origine électrique.**[57]**

Le 6 février 2012, lors d'une opération de maintenance dans la nacelle d'une éolienne de 100 m, un arc électrique à 690 V a blessé deux sous-traitants : l'un gravement (brûlures aux mains et au visage) et l'autre légèrement (brûlures aux mains). Les victimes portaient leurs EPI lors des faits. Un accident similaire s'était produit en 2009.**[41]**

III.3.3 Danger d'incendie

Le risque d'incendie existe dans les éoliennes car on y retrouve, dans un même espace confiné, de l'électronique, des équipements électriques, de l'huile inflammable et divers fluides. Le feu d'origine électrique peut provenir de mauvais contacts entraînant un échauffement anormal des composants et conducteurs, ou d'un éventuel coup de foudre sur la structure.**[58]**

La base ARIA recense 31 incendies survenus sur des éoliennes entre 2006 et 2022.**[58]** Lors d'un incendie en nacelle, 450 litres d'huile de boîte de vitesse se sont écoulés au sol, nécessitant une étude de pollution des sols. Une pale est tombée au sol et une autre menaçait de tomber. Un périmètre de sécurité de 150 mètres a été mis en place.**[42]** À Adrar, la chaleur saharienne (> 45 °C) accentue ce danger en augmentant la volatilité des huiles et la probabilité d'inflammation spontanée.



Figure III.2 : Incendie de nacelle d'une éolienne

III.3.4 Danger lié aux tempêtes de sable

Le site de Kabertène est situé en plein désert saharien. Les tempêtes de sable constituent un danger majeur et spécifique, absent dans les parcs éoliens classiques. Des experts ont souligné l'absence d'études sur les vents de sable et leurs impacts sur les installations du parc éolien d'Adrar, ainsi que les problèmes d'accès liés aux conditions désertiques.**[59]**

Ces tempêtes provoquent trois types de dangers simultanés pour le technicien en maintenance :

- Danger physique : visibilité réduite à zéro, rendant impossible toute intervention en hauteur ou tout déplacement sur site.

• Danger respiratoire : le sable fin et abrasif pénètre partout — dans les yeux, les oreilles, les poumons. Une exposition de 20 minutes peut causer des lésions pulmonaires.**[60]**

- Danger mécanique aggravé : l'abrasion du sable accélère l'usure des composants (roulements, pales, joints), augmentant la fréquence des interventions correctives dans des conditions dangereuses.



Figure III.3 : Tempête de sable saharienne

III.3.5 Danger thermique ambiant — Chaleur extrême

La wilaya d'Adrar est l'une des régions les plus chaudes du monde. Les techniciens intervenant en nacelle métallique à 55 mètres de hauteur, exposée au soleil direct sans ombrage, sont soumis à des températures pouvant dépasser 50 °C à l'intérieur de la nacelle en été. Ce danger provoque :

- Coup de chaleur (hyperthermie) : température corporelle dépassant 40 °C, entraînant confusion, perte de connaissance et mort si non traité.
- Déshydratation sévère : aggravée par l'effort physique de l'ascension des 55 mètres.
- Défaillance cognitive : altération du jugement du technicien, source d'erreurs fatales lors des interventions.

La chaleur intense, parfois supérieure à 45 °C en été, nécessite une hydratation constante et une protection solaire adaptée. Les coups de chaleur ou la déshydratation constituent des risques majeurs si les précautions ne sont pas respectées.**[61]**

III.3.6 Danger mécanique

Les éoliennes comportent des dangers mécaniques dus à leur hauteur, à la largeur des pales et à leurs parties mécaniques mobiles. La présence de pièces en rotation rapide constitue un facteur de danger majeur. Une défaillance mécanique — défaut de lubrification ou de refroidissement, survitesse du rotor avec rupture du système de freinage — est une cause majeure d'accidents.**[55]**

Lors des interventions de maintenance, les techniciens opèrent directement sur ou à proximité de ces pièces mobiles : roulements de la génératrice, boîte de vitesse, arbre

principal, système d'orientation des pales. Le non-respect de la procédure de consignation expose le technicien à un happement, un écrasement ou une projection de fragments.

Une éolienne a perdu ses trois pales, le mât s'est brisé à mi-hauteur et la nacelle a chuté. Une expertise technique a établi un défaut de conception lié au non-respect du resserrage mensuel des goujons de fixation des pales lors de la maintenance.**[43]**

III.3.7 Danger chimique

Les opérations de maintenance impliquent la manipulation régulière de produits chimiques présents dans la nacelle : huiles hydrauliques (système de freinage), huiles de transmission (boîte de vitesse), graisses lubrifiantes, solvants et dégraissants. Une inhalation prolongée ou répétée de brouillards d'huile en suspension peut causer une irritation respiratoire ou d'autres effets sur les poumons. Les symptômes d'une irritation respiratoire sont la toux et les difficultés respiratoires.**[62]**

À Adrar, la chaleur saharienne extrême augmente la volatilité de ces produits, rendant le danger d'inhalation plus élevé qu'en conditions climatiques normales. En cas de fuite, les huiles hydrauliques peuvent se répandre jusqu'à 100 mètres du pied du mât, comme le montrent les cas documentés par l'ARIA.**[42]**

III.3.8 Danger lié à l'isolement géographique

Le parc éolien de Kabertène est implanté à 72 km du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, en plein désert saharien, sans infrastructure médicale ni équipe de secours spécialisée à proximité.

L'éloignement des éoliennes par rapport aux établissements médicaux signifie que tout accident nécessitant une hospitalisation peut rapidement devenir catastrophique en raison du délai entre le moment de l'accident et l'arrivée des secours professionnels.**[56]**

Ce danger aggrave les conséquences de tous les autres dangers recensés : une chute, une électrisation, un coup de chaleur ou une blessure mécanique qui serait bénigne dans un environnement urbain peut devenir mortelle en raison du délai d'intervention des secours dans le contexte désertique d'Adrar.

III.4 Dangers Spécifiques aux Équipements

Tableau III.1 : Dangers spécifiques aux éoliennes de Kabertène

Équipement	Danger principal	Cause lors de la maintenance	Conséquence	Facteur aggravant (Adrar)	Réf.
Pales (composite 26 m)	Rupture et projection de fragments	Défaut de réparation du bord de fuite ; mauvais serrage des goujons de fixation	Blessure mortelle jusqu'à 300 m	Sable abrasif → dégradation accélérée du matériau composite	**[39]**
Multiplicateur (boîte de vitesse)	Surchauffe par défaut de lubrification ; projection d'huile brûlante	Remplissage incorrect d'huile ; filtre colmaté non remplacé ; fuite non détectée	Brûlures du technicien ; grippage mécanique ; incendie	Chaleur + sable → dégradation rapide de l'huile et colmatage des filtres	**[40]**
Générateur (MADA 690 V)	Arc électrique ; court-circuit interne ; explosion du convertisseur	Intervention sans consignation électrique ; isolants dégradés non détectés	Électrocution (75 mA → fibrillation cardiaque) ; brûlures mains/visage	Chaleur extrême → vieillissement prématuré des isolants électriques	**[41]**
Nacelle (espace confiné)	Incendie en espace confiné (huile + électricité + chaleur)	Défaillance électrique ; fuite d'huile ; coup de foudre ; opération incorrecte	Décès du technicien piégé ; chute de 55 m lors de l'évacuation ; 31 incendies recensés (2006–2022)	Température interne > 60 °C → volatilité des huiles augmentée → inflammation facilitée	**[42]**
Mât (acier tubulaire 55 m)	Effondrement structurel ; chute lors de l'ascension intérieure	Survitesse du rotor ; défaut de fondation ; corrosion non détectée lors de la visite	Décès immédiat ; zone de danger > 150 m ; destruction totale	Amplitude thermique > 30 °C/jour → contraintes cycliques sur fondations dans sol sableux	**[43]**
Transformateur (HTA/huile diélectrique)	Court-circuit interne ; fuite d'huile diélectrique ; surtension par foudre	Dégradation des papiers isolants ; joints vieillis ; foudre non protégée	Incendie nacelle ; électrocution HTA ; pollution du sol par huile	Chaleur saharienne → vieillissement accéléré de l'huile diélectrique et des joints	**[44]**
Système de freinage (frein aéro + hydraulique)	Défaillance du frein → survitesse et emballement du rotor	Pression hydraulique insuffisante ; câble aérofrein rompu ; remise en marche sans vérification	Happement/écrasement du technicien ; survitesse → rupture des pales → incendie	Sable + chaleur → dégradation des joints hydrauliques → perte de freinage lors des interventions	**[45]**

Conclusion

L'analyse conduite dans ce chapitre a permis d'identifier et de caractériser huit catégories de dangers auxquels sont exposés les techniciens de maintenance du parc éolien de Kabertène. Ces dangers couvrent des domaines aussi variés que la sécurité physique (chutes de hauteur, dangers mécaniques), la sécurité des installations (risques électriques, incendie), la santé des travailleurs (dangers chimiques, thermiques, respiratoires) et les facteurs organisationnels et géographiques (isolement, tempêtes de sable).

Un constat majeur ressort de cette étude : le contexte saharien du site de Kabertène transforme significativement le profil de risque par rapport à celui d'un parc éolien standard. La chaleur extrême (> 45 °C), les tempêtes de sable, l'amplitude thermique journalière importante et l'isolement géographique à 72 km d'Adrar constituent des facteurs d'aggravation systématiques qui amplifient chacun des dangers identifiés. Ainsi, ce qui serait un accident mineur dans un environnement tempéré et urbanisé peut devenir fatal dans ce contexte.

L'analyse des accidents recensés dans la base ARIA et dans la littérature spécialisée confirme que ces dangers ne sont pas théoriques : ils se sont matérialisés dans des accidents réels, certains mortels, sur des parcs éoliens comparables à travers le monde. La spécificité d'Adrar exige cependant d'adapter les mesures de prévention généralement préconisées pour tenir compte des contraintes locales.

Les résultats de cette identification constituent le socle indispensable sur lequel s'appuiera le chapitre suivant, consacré à l'évaluation quantitative et qualitative des risques. Cette évaluation permettra de hiérarchiser les dangers selon leur criticité et d'orienter les ressources vers les mesures de prévention les plus urgentes et les plus efficaces pour garantir la sécurité des techniciens du parc de Kabertène.

Chapitre IV

Analyse des risques liés à la maintenance des éoliennes de Kabertène

Introduction

La sécurité des personnels affectés à l'exploitation et à la maintenance des éoliennes constitue un enjeu majeur dans le développement des énergies renouvelables. Le parc éolien de Kabertenè, situé dans la wilaya d'Adrar en plein désert saharien, présente des spécificités géographiques, climatiques et opérationnelles qui amplifient considérablement les risques inhérents à ce type d'infrastructure industrielle.

Ce chapitre est consacré à l'analyse systématique des risques liés à la maintenance des éoliennes de type Gamesa G52/850 kW du parc de Kabertenè. Cette analyse s'articule autour de trois axes complémentaires : l'étude des accidents et incidents survenus dans le secteur éolien au niveau national et international, l'identification et la hiérarchisation des dangers spécifiques au site, et l'évaluation quantitative des risques par des méthodes reconnues (AMDEC, matrice de criticité).

La démarche adoptée s'inscrit dans le cadre réglementaire algérien (décret exécutif n°05-09) et est alignée sur les normes internationales en vigueur, notamment la norme NF EN ISO 31010 relative aux techniques d'appréciation du risque et la norme CEI 61025 pour l'analyse par arbre des causes. L'objectif final est de fournir une base scientifique solide pour l'élaboration du plan de maintenance préventive présenté au chapitre suivant, en privilégiant une approche systémique qui prend en compte les facteurs humains, organisationnels, techniques et environnementaux.

IV.1 Analyse des Accidents et Incidents

L'analyse des accidents et incidents survenus dans le secteur éolien constitue une source d'enseignements précieuse pour comprendre les mécanismes de survenue des événements indésirables et identifier les mesures de prévention efficaces **[65]**. Cette approche par retour d'expérience permet d'éviter de reproduire les erreurs passées et d'anticiper les scénarios d'accidents potentiels sur le parc de Kabertène.**[66]**

- **Accident :** Événement indésirable conduisant à des dommages pour les personnes.
- **Incident :** Événement indésirable conduisant à des dommages pour les installations, matériels, process industriels, ou pour l'environnement, circonscrits au périmètre de l'entreprise.
- **Presqu'accident :** Événement indésirable ne produisant aucun dommage.**[67]**

IV.2.1 Méthodologie d'Analyse

L'analyse des accidents et incidents s'appuie sur plusieurs sources complémentaires:

- Bases de données internationales : Statistiques d'accidentologie du secteur éolien compilées par les organisations professionnelles (European Wind Energy Association, American Wind Energy Association, Global Wind Organisation)
- Publications scientifiques : Études académiques analysant les accidents mortels et graves dans l'industrie éolienne
- Rapports d'inspection : Analyses d'accidents par les autorités de sécurité au travail de différents pays
- Retours d'expérience constructeurs : Données de Gamesa/Siemens Gamesa sur les incidents survenus sur les éoliennes G52/850 et modèles similaires
- Incidents locaux : Presque-accidents et incidents mineurs survenus sur le parc de Kabertène (déclarations encouragées dans une culture de sécurité positive)**[68]**

Chaque accident ou incident significatif fait l'objet d'une analyse structurée selon la méthode de l'arbre des causes :

- Description factuelle : Reconstitution chronologique précise de l'événement (qui, quoi, où, quand, comment)
- Identification des causes immédiates : Facteurs ayant directement déclenché l'accident (action dangereuse, défaillance technique)
- Identification des causes profondes : Facteurs organisationnels, techniques ou humains sous-jacents (procédure inadaptée, formation insuffisante, défaut de conception, pression temporelle)
- Identification des barrières de sécurité défaillantes : Mesures de prévention qui auraient dû empêcher l'accident mais qui n'ont pas fonctionné
- Formulation et recommandations : actions correctives et préventives pour éviter la récurrence**[69]**

IV.2.2 Outils d'analyse des causes racines

Plusieurs méthodes structurées ont été mobilisées pour analyser les causes profondes des évènements indésirables identifiés :

a) L'arbre des causes (FTA - Fault Tree Analysis)

L'arbre des causes est une méthode déductive normalisée (CEI 61025) qui part de l'évènement indésirable (effet) pour remonter, par étapes successives, vers les causes immédiates, contributives et profondes. Appliquer un scénario de chute en nacelle, par exemple, cette méthode permet d'identifier la conjonction de facteurs tels qu'une formation insuffisante, l'absence de harnais certifié CE, et un sol glissant consécutif à une fuite d'huile hydraulique.**[70] [71]**

b) La méthode AMDEC

L'AMDEC est une méthode inductive normalisée (NF EN 60812) permettant d'analyser systématiquement les modes de défaillance potentiels de chaque composant d'un système, leurs effets sur le fonctionnement global et leur criticité. Elle est particulièrement adaptée aux installations mécaniques et électrotechniques complexes telles que les éoliennes. La criticité de chaque mode de défaillance est calculée selon la formule : **[réf. manquante], [64][70]**

IPR (Indice de Priorité du Risque) = O x G x D

Où : O = Occurrence (probabilité d'apparition du défaut, note de 1 à 4), G = Gravité des effets (note de 1 à 4), D = Détectabilité (facilité de détection avant la défaillance, note de 1 à 4). Un IPR supérieur ou égal à 8 est généralement considéré comme nécessitant une action prioritaire. Un IPR élevé indique une priorité d'action corrective ou préventive. **[64]**

L'application de cette méthodologie aux composants critiques de la turbine éolienne du parc de Kabertène a conduit aux résultats synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Analyse AMDEC des composants critiques de l'éolienne - Parc de Kabertène (O = Occurrence, G = Gravité, IPR = Indice de Priorité du Risque) - Élaboré selon NF EN 60812

Composant	Mode de défaillance	Effet potentiel	O	G	D	IPR	Actions préventives
Générateur (MADA 690 V)	Arc électrique ; court-circuit interne ; explosion du convertisseur	Électrocution (75 mA → fibrillation cardiaque) ; brûlures mains/visage	3	4	3	**36**	Consignation LOTO obligatoire ; test VAT avant intervention ; inspection isolants semestrielle
Système de freinage (frein aéro + hydraulique)	Défaillance du frein → survitesse et emballement du rotor	Happement/écrasement du technicien ; rupture des pales ; incendie	3	4	3	**36**	Contrôle pression hydraulique mensuel ; remplacements joints tous les 6 mois ; test frein avant chaque intervention
Multiplicateur (boîte de vitesse)	Surchauffe par défaut de lubrification ; projection d'huile brûlante	Brûlures du technicien ; grippage mécanique ; incendie	3	4	3	**36**	Analyse d'huile trimestrielle ; remplacement filtre mensuel ; capteurs température

Composant	Mode de défaillance	Effet potentiel	O	G	D	IPR	Actions préventives
							et vibration continus
Système de contrôle-commande	Défaillance capteurs anémométriques → surégime du rotor	Surégime → rupture des pales → destruction totale de l'éolienne	3	4	2	**24**	Étalonnage semestriel des capteurs ; redondance SCADA ; alarmes automatiques de surégime
Pales (composite 26 m)	Rupture et projection de fragments	Blessure mortelle jusqu'à 300 m du mât	2	4	3	**24**	Inspection par drone annuelle ; contrôle serrage goujons tous les 6 mois ; périmètre de sécurité 300 m
Nacelle (espace confiné)	Incendie en espace confiné (huile + électricité + chaleur)	Décès du technicien piégé ; chute de 55 m lors de l'évacuation	3	4	3	**36**	Détecteur de fumée et sprinkler ; procédure d'évacuation d'urgence ;

Composant	Mode de défaillance	Effet potentiel	O	G	D	IPR	Actions préventives
							ventilation forcée en été
Mât (acier tubulaire 55 m)	Effondrement structurel ; chute lors de l'ascension intérieure	Décès immédiat ; zone de danger > 150 m ; destruction totale	1	4	3	**12**	Inspection fondations annuelle ; contrôle corrosion semestrielle ; harnais antichute sur rail certifié
Transformateur (HTA / huile diélectrique)	Court-circuit interne ; fuite d'huile diélectrique ; surtension par foudre	Incendie nacelle ; électrocution HTA ; pollution du sol par huile	2	4	3	**24**	Test Mégohmétrie annuel ; protection parafoudre ; inspection joints et papiers isolants semestrielle

Les composants présentant un IPR supérieur ou égal à 8 sont considérés comme prioritaires et font l'objet de mesures préventives renforcées dans le plan de maintenance propose au chapitre 4. Il s'agit notamment du générateur, du système de freinage, du multiplicateur, du système de contrôle-commande et du transformateur. **[64], [65]**

IV.2.3 Statistiques d'Accidentologie du Secteur Éolien

En l'absence d'un historique accidentologique suffisamment exhaustif propre au parc de Kabertène (installation récente, première du genre en Algerie), l'analyse est complétée par un benchmarking avec les statistiques du secteur éolien au niveau international. Selon le rapport de WindEurope (anciennement EWEA) de 2022, les principales causes d'accidents mortels dans les parcs éoliens terrestres sont, par ordre de fréquence : **[65]**

- Les chutes de hauteur lors des opérations d'inspection ou de maintenance en nacelle (38% des accidents mortels recensés entre 2000 et 2022). **[65]**
- Les accidents électriques lors des interventions sur les équipements HTB/BT (27%), principalement causés par des défauts de consignation. **[65]**
- Les incendies de nacelle, principalement causés par des défauts électriques ou des surchauffes d'huile de lubrification (19%). **[66]**
- Les accidents de transport vers et depuis les sites isoles, particulièrement significatifs pour les parcs en zones désertiques (16%). **[65]**

Ces données statistiques confirment la pertinence des catégories de dangers identifiées en section 2.1 et orientent la hiérarchisation des risques présentée dans la section suivante. Elles soulignent notamment la spécificité du parc de Kabertène, ou le facteur d'isolement géographique amplifie le risque accidentel lors des opérations de transport et d'évacuation d'urgence. **[63], [66]**

IV.2.4 Analyse de Cas d'Accidents Significatifs

L'examen détaillé de cas d'accidents réels permet d'en comprendre les mécanismes et d'en tirer des enseignements pour la prévention.

IV.2.4.1 : Chute mortelle lors de la montée dans l'éolienne (Cas n°1)

4.2.4.1 Circonstances : Un technicien de maintenance expérimenté (35 ans, 8 ans d'ancienneté) effectue seul la montée dans une éolienne de 80 mètres de hauteur par une température extérieure de 38°C. Arrivé aux trois quarts de l'ascension (environ 60 mètres), il fait un malaise (probable coup de chaleur) et lâche l'échelle. Son système antichute (longe avec absorbeur d'énergie) se déclenche correctement et arrête la chute après quelques mètres,

mais le technicien reste suspendu inconscient dans son harnais. Le binôme resté au sol donne l'alerte immédiatement, mais les secours mettent plus d'une heure à arriver sur le site isolé. Entre-temps, le technicien décède du syndrome du pendule (suspension prolongée dans le harnais entraînant un choc orthostatique et un arrêt cardiaque).

IV.2.4.2 Causes identifiées :

- Cause immédiate : Malaise par coup de chaleur provoquant la chute
- Causes profondes :
  - Intervention programmée en milieu de journée malgré température extérieure très élevée (non-respect de la procédure préconisant interventions matinales)
  - Hydratation insuffisante avant et pendant l'ascension
  - Absence de système de sauvetage autonome permettant au technicien de se dégager seul ou d'être secouru rapidement
  - Délai d'intervention des secours trop long pour ce type d'urgence
  - Travail en solo alors que procédure impose binôme (pression de production)

IV.2.4.3 Barrières défaillantes :

- Planification des interventions (non-respect des horaires adaptés)
- Supervision insuffisante (autorisation donnée malgré conditions défavorables)
- Absence d'équipement de sauvetage autonome embarqué
- Procédure binôme non respectée

IV.2.4.4 Enseignements pour Kabertène :

- Interdiction absolue d'intervention solitaire en hauteur
- Planification stricte des interventions aux heures fraîches (avant10h, après 17h en été)
- Hydratation systématique obligatoire (consommation d'au moins 0,5 L avant montée)
- Équipement de chaque technicien d'un système de descente d'urgence autonome (descenseur autobloquant)

- Formation renforcée au sauvetage en hauteur pour tous les techniciens
- Procédure de surveillance mutuelle rigoureuse du binôme

IV.2.5 : Électrocution lors d'une intervention de maintenance ((Cas n°2)

IV.2.5.1 Circonstances : Deux techniciens interviennent sur une armoire électrique de la nacelle pour remplacer un contacteur défaillant. La procédure prévoit la consignation électrique préalable de l'armoire. Cependant, en raison d'un défaut de communication, l'opérateur SCADA remet l'éolienne en service alors que les techniciens sont encore en intervention. L'un des techniciens, en train de rebrancher les connexions, subit une électrocution par contact avec les bornes sous tension (690V). Il tombe en arrêt cardiaque. Son binôme, formé aux premiers secours GWO, pratique immédiatement une réanimation cardio-pulmonaire (RCP) et parvient à faire repartir le cœur. Les secours arrivent 45 minutes plus tard et évacuent la victime vers l'hôpital. Le technicien survit mais conserve des séquelles neurologiques.

IV.2.5.2 Causes identifiées :

- **Cause immédiate :** Remise sous tension intempestive de l'installation pendant l'intervention
- **Causes profondes :**
  - Absence de consignation physique (verrouillage mécanique) empêchant la remise sous tension
  - Procédure de consignation/déconsignation insuffisamment formalisée et non sécurisée
  - Communication défaillante entre techniciens terrain et opérateur SCADA
  - Absence de panneau de signalisation visible "Travaux en cours - Ne pas manœuvrer"
  - Formation insuffisante de l'opérateur SCADA aux procédures de consignation

IV.2.5.3 Barrières défaillantes :

- Verrouillage physique de la consignation (LOTO - Lockout/Tagout)
- Communication entre terrain et salle de contrôle
- Double vérification avant remise sous tension

- Détecteur de présence dans l'éolienne bloquant la remise en service

IV.2.5.4 Enseignements pour Kabertène :

- Mise en place obligatoire d'un système de verrouillage physique (cadenas personnel de chaque technicien sur le dispositif de coupure)
- Procédure de consignation en 5 étapes strictement appliquée : Séparation - Condamnation - Identification - Vérification Absence de Tension (VAT) - Mise à la terre
- Communication formalisée par bons de travail et autorisations écrites
- Étiquetage visible sur tous les points de coupure "Défense de manœuvrer - Travaux en cours"
- Formation renforcée de tous les acteurs (techniciens, superviseur, opérateur SCADA) aux procédures de consignation
- Vérification systématique par le superviseur avant toute remise sous tension
- Exercices réguliers de réanimation cardio-pulmonaire (recyclage annuel GWO First Aid)

IV.2.6 Analyse des Incidents et Presqu'Accidents (Near-Miss)

Les incidents et presqu'accidents, bien qu'ils n'aient pas entraîné de blessures, constituent une mine d'informations pour la prévention.

Selon la pyramide de Bird, pour 1 accident grave, on recense environ 10 accidents mineurs, 30 incidents avec dégâts matériels et 600 situations dangereuses ou presqu'accidents **[73]**. L'analyse de ces événements permet d'agir en prévention avant qu'un accident grave ne survienne.

Exemples de presqu'accidents significatifs survenus sur le parc de Kabertène :

<u>Incident 1 : Chute d'outil depuis la nacelle</u>

Un technicien laisse tomber accidentellement une clé à molette (poids 1 kg) depuis la nacelle (hauteur 55 mètres). L'outil tombe au sol à proximité du pied de l'éolienne. Heureusement, aucun autre technicien ne se trouvait dans la zone d'impact. Cependant, une chute d'objet d'1 kg depuis 55 mètres peut atteindre une vitesse de 100 km/h et provoquer des blessures

mortelles. L'importance du périmètre de sécurité au pied des éoliennes, obligation d'attacher tous les outils par longes de sécurité lors de travaux en hauteur, sensibilisation au risque de chute d'objets.

Incident 2 : Début d'échauffement du multiplicateur

L'opérateur SCADA détecte une montée anormale de la température du multiplicateur d'une éolienne (85°C au lieu de 70°C habituellement). Il déclenche l'arrêt préventif de l'éolienne et prévient les techniciens. L'analyse révèle une baisse du niveau d'huile (fuite lente non détectée lors des inspections visuelles). Le multiplicateur est rempli et la fuite réparée. Sans cette détection et cet arrêt préventif, une surchauffe importante aurait pu se produire, entraînant une détérioration majeure du multiplicateur voire un incendie.

L'importance de la surveillance en temps réel des paramètres critiques par le SCADA, pertinence des seuils d'alarme, nécessité de réagir immédiatement aux alarmes, efficacité de la maintenance conditionnelle pour prévenir les pannes graves.

IV.2.7 Facteurs Contributifs aux Accidents

IV.2.7.1 Facteurs humains *(présents dans 70 à 80 % des accidents)*

Plusieurs éléments liés à l'individu peuvent se combiner pour influencer le comportement au travail : l'état de santé physique et mental (fatigue, concentration), les conditions d'exécution des tâches, la pression de production, ainsi que la qualité des relations au sein du collectif de travail. Cela se traduit concrètement par : **[72]**

- Sous-estimation du danger et mauvaise évaluation du risque
- Contournement des procédures établies (raccourcis, routines)
- Fatigue, stress et pression temporelle excessive
- Formation initiale insuffisante ou inadaptée au poste
- Manque d'expérience, particulièrement chez les nouveaux embauchés
- Déficit de communication au sein de l'équipe ou avec l'encadrement
- Excès de confiance lié à l'ancienneté, entraînant un relâchement de la vigilance

IV.2.7.2 Facteurs organisationnels (présents dans 50 à 60 % des accidents)

Dans les accidents majeurs, les causes organisationnelles pèsent bien plus que les causes individuelles. Les conditions dans lesquelles évoluent les individus sont déterminantes : elles influent directement sur les comportements. Parmi ces facteurs :**[73]**

- Procédures absentes, inadaptées ou trop complexes à appliquer
- Planification insuffisante des interventions (délais serrés, conditions défavorables)
- Primauté des impératifs de production sur la sécurité
- Supervision inadéquate des activités à risque
- Recyclages et formations continues trop espacés
- Culture de sécurité faible (incidents non déclarés, sanctions sans analyse)
- Ressources insuffisantes (EPI manquants, effectifs réduits)

IV.2.7.3 Facteurs techniques (présents dans 30 à 40 % des accidents)

Il convient de vérifier l'état et l'adéquation des équipements utilisés, ainsi que d'analyser l'ergonomie des postes de travail et les conditions environnementales (éclairage, bruit, température). Cela inclut : **[74]**

- Défaillance de dispositifs de sécurité (antichute, détecteurs, alarmes)
- Conception inadaptée des espaces de travail (zones exiguës, accès difficiles)
- Absence ou insuffisance de protections collectives
- Maintenance préventive négligée ou absente
- Usure prématurée des équipements due aux conditions d'exploitation

IV.2.7.4 Facteurs environnementaux (particulièrement présents à Kabertène)

- Conditions climatiques extrêmes (chaleur intense, tempêtes de sable)
- Isolement géographique allongeant les délais d'intervention d'urgence
- Visibilité réduite (poussière, sable en suspension)
- Vents violents déstabilisant les techniciens en hauteur

Les accidents résultent rarement d'une cause unique mais de la combinaison de plusieurs facteurs (facteurs humains + organisationnels + techniques + environnementaux). Cette approche systémique est essentielle pour développer des stratégies de prévention efficaces.

IV.3 Synthèse de l'Analyse des Accidents

L'analyse des accidents et incidents du secteur éolien permet de tirer plusieurs enseignements majeurs pour le parc de Kaberten :

- ***La chute de hauteur est le risque n°1*** : Près de 50% des accidents mortels. La prévention de ce risque doit être la priorité absolue (EPI, formation, surveillance).
- ***Les conditions sahariennes aggravent les risques*** : Chaleur extrême augmentant significativement le risque de malaise et de chute, isolement prolongeant les délais de secours.
- ***Le respect des procédures est vital*** : De nombreux accidents surviennent lors de non-respect de procédures de sécurité pourtant établies (consignation électrique, travail en binôme, horaires d'intervention).
- ***La formation et le recyclage sont essentiels*** : Les compétences en sécurité doivent être entretenues régulièrement (GWO tous les 2 ans, premiers secours annuellement).
- ***La surveillance mutuelle du binôme est cruciale*** : De nombreux accidents auraient pu être évités par une vigilance accrue du binôme.
- ***Les presqu'accidents doivent être analysés*** : Ils constituent des opportunités d'apprentissage et de prévention avant qu'un accident grave ne survienne.
- ***L'organisation et la culture de sécurité sont déterminantes*** : Les facteurs organisationnels sont présents dans la majorité des accidents. Une culture de sécurité forte, portée par la direction et incarnée au quotidien, est indispensable.

Cette analyse des accidents constitue un socle essentiel pour l'évaluation des risques qui sera développée dans la section suivante, permettant de quantifier la criticité de chaque danger identifié en tenant compte à la fois de la probabilité d'occurrence (fréquence observée dans le secteur) et de la gravité potentielle (enseignements des accidents passés).

IV.4 Évaluation des Risques

L'évaluation des risques constitue l'étape conclusive du processus d'analyse. Elle vise à qualifier et quantifier chaque risque identifié afin de hiérarchiser les actions préventives et

correctives à mettre en œuvre. Cette démarche est conforme aux prescriptions de la norme ISO 31010 :2019 relatives aux techniques d'appréciation du risque, ainsi qu'au décret exécutif algérien n°05-09 du 8 janvier 2005 relatif aux commissions paritaires et aux préposes à l'hygiène et à la sécurité. **[75][76]**

IV.4.1 Méthode d'évaluation : la matrice de criticité

La méthode retenue est la matrice de criticité à double entrée, largement utilisée dans la littérature sur la gestion des risques industriels et recommandée par la norme NF EN ISO 31010. Elle permet de croiser deux paramètres fondamentaux pour chaque risque identifié : **[75] [70]**

- La probabilité d'occurrence (P) : fréquence estimée d'apparition du danger, notée de 1 (improbable) à 4 (fréquent).
- La gravité des conséquences (G) : sévérité des dommages potentiels (humains, matériels, environnementaux), notée de 1 (négligeable) à 4 (catastrophique).

Le niveau de criticité (C) est alors calculé selon la relation :

C = P x G

Probabilité / Gravité	**Négligeable (1)**	**Marginal (2)**	**Critique (3)**	**Catastrophique (4)**
Improbable (1)	1 - Faible	2 - Faible	3 - Moyen	4 - Moyen
Rare (2)	2 - Faible	4 - Moyen	6 - Moyen	**8 - Elevé**
Occasionnel (3)	3 - Moyen	6 - Moyen	**9 - Elevé**	**12 - Critique**
Fréquent (4)	4 - Moyen	**8 - Elevé**	**12 - Critique**	**16 - Critique**

Tableau IV.2 : Matrice de criticité pour l'évaluation des risques - Parc éolien de Kabertène (adapté de NF EN ISO 31010:2019)

IV.4.2 Niveaux de risque et seuils d'acceptabilité

Sur la base de la matrice de criticité et conformément aux seuils recommandés par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurite) et la norme NF EN ISO 31010, quatre niveaux de risque sont définis, auxquels correspondent des seuils d'acceptabilité et des obligations d'action : **[75] [69]**

- Risque faible (C de 1 à 3) : risque acceptable en l'état. Une surveillance périodique est nécessaire sans modification immédiate des pratiques opérationnelles.
- Risque moyen (C de 4 à 6) : risque tolérable sous réserve de mesures de maîtrise adéquates. Un plan d'action formalisé doit être défini à moyen terme (horizon 6 à 12 mois).
- Risque élevé (C de 8 à 9) : risque intolérable nécessitant des mesures correctives prioritaires à court terme (horizon inférieur à 3 mois). Ces risques font l'objet d'une attention particulière dans la conception du plan de maintenance préventive.
- Risque critique (C de 12 à 16) : risque inacceptable au sens de la réglementation algérienne. L'activité concernée doit être suspendue jusqu'à la mise en œuvre de mesures de réduction adéquates (arrêté ministériels, loi 88-07).

IV.4.3 Cartographie des risques du parc de Kabertène

L'application de la matrice de criticité à l'ensemble des dangers identifiés au sein du parc éolien de Kabertène permet d'établir la cartographie des risques. Les risques relatifs aux chutes de hauteur en nacelle (P=3, G=4, C=12), aux défauts électriques haute tension (P=2, G=4, C=8) et aux incendies de nacelle (P=2, G=4, C=8) apparaissent comme les plus critiques, en cohérence avec les statistiques accidentologiques du secteur présentés en section précédemment. **[65]**

Les risques liés aux conditions climatiques extrêmes spécifiques à la région d'Adrar (P=3, G=3, C=9) et aux défaillances mécaniques des composants tournants (P=3, G=3, C=9) se situent dans la zone de risque élevé, nécessitant des mesures préventives renforcées. **[63] [64]**

IV.4.4 Limites de l'évaluation et incertitudes

Il convient de souligner que toute évaluation des risques comporte une part d'incertitude, liée notamment à la subjectivité inhérente à la cotation des paramètres, au manque de données

historiques locales pour une installation inaugurale, et à l'évolution temporelle des conditions d'exploitation. Ces limites sont reconnues dans la littérature scientifique et doivent être explicitement mentionnées dans tout document d'évaluation des risques. **[75][70]**

Ces limitations seront prises en compte dans la conception du plan de maintenance préventive, qui intègrera des mécanismes de mise à jour périodique de la cartographie des risques (revue annuelle recommandée), conformément aux prescriptions du cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act) de la norme ISO 9001 :2015 appliquée à l'amélioration continue des systèmes de management. **[76][77]**

IV.5 Recommandation : La mise en place d'un système formalisé de reporting des incidents et presqu'accidents (culture du reporting non punitif) est fortement preconisée, conformément aux bonnes pratiques de l'EU-OSHA [réf. manquante]. Cette démarche permettra d'enrichir progressivement la base de données accidentologique propre au parc de Kabertène et d'affiner l'évaluation des risques au fil du temps. **[69]**

Conclusion

L'analyse approfondie des risques menée dans ce chapitre a permis de dresser un tableau complet et hiérarchisé des dangers auxquels sont exposés les techniciens de maintenance du parc éolien de Kabertenè. En conjuguant le retour d'expérience du secteur éolien international, l'analyse AMDEC des composants critiques et la cartographie des risques par la matrice de criticité, il a été possible d'identifier et de quantifier les principaux scénarios accidentels susceptibles de survenir sur le site.

Les résultats obtenus mettent en évidence quatre catégories de risques prioritaires : les chutes de hauteur en nacelle (C = 12, risque critique), les accidents électriques haute tension (C = 8, risque élevé), les incendies en espace confiné (C = 8, risque élevé), et les défaillances mécaniques des composants tournants aggripées par les conditions climatiques extrêmes de la région d'Adrar (C = 9, risque élevé). La chaleur saharienne, l'isolement géographique et l'exposition aux tempêtes de sable constituent des facteurs aggravants spécifiques au site qui ont été intégrés dans la cotation des risques.

L'analyse des cas d'accidents réels et des presqu'accidents survenus sur le parc a confirmé que la grande majorité des événements indésirables résultent d'une conjonction de facteurs humains, organisationnels et techniques. Cette approche systémique est fondamentale pour concevoir des stratégies de prévention efficaces et durables.

Les enseignements tirés de ce chapitre constituent le fondement de l'élaboration du plan de maintenance préventive qui sera développé au chapitre suivant. Ce plan visera à réduire de manière significative la criticité des risques identifiés, en mobilisant des mesures de prévention techniques (EPI adaptés, dispositifs de consignation LOTO, systèmes de surveillance SCADA), organisationnelles (procédures formalisées, culture du reporting, supervision rigoureuse) et humaines (formation GWO, recyclage annuel aux premiers secours, adaptation des horaires d'intervention aux conditions climatiques sahariennes).

Conclusion générale

Le présent mémoire avait pour ambition de dresser un état des lieux complet et rigoureux des enjeux de maintenance préventive et de sécurité des techniciens à la ferme éolienne de Kabertène, premier parc éolien industriel d'Algérie.

Les quatre chapitres développés ont permis de progresser méthodiquement du général au particulier : des fondements théoriques de la technologie éolienne (Chapitre I) à la présentation du site d'étude et de son organisation (Chapitre II), en passant par l'identification exhaustive des dangers spécifiques au contexte saharien (Chapitre III) et leur analyse quantitative par les méthodes AMDEC et matrice de criticité (Chapitre IV).

Le fil conducteur de cette étude a été la démonstration que le contexte saharien du site de Kabertène — chaleur extrême dépassant 45 °C en été, tempêtes de sable, amplitude thermique journalière importante et isolement géographique à 72 km d'Adrar — transforme profondément le profil de risque par rapport à celui d'un parc éolien standard en milieu tempéré. Ce qui constituerait un accident mineur dans un environnement urbain peut devenir fatal dans ce contexte désertique, en raison principalement des délais d'intervention des secours.

L'analyse AMDEC a mis en évidence que quatre composants concentrent l'essentiel de la criticité : le générateur (MADA 690 V), le système de freinage, le multiplicateur et la nacelle en tant qu'espace confiné, avec des Indices de Priorité du Risque atteignant 36. La cartographie des risques par la matrice de criticité a confirmé que les chutes de hauteur constituent le risque n°1 (C = 12, risque critique), suivies des accidents électriques et des incendies de nacelle (C = 8, risque élevé).

Ces résultats ouvrent la voie à plusieurs perspectives d'amélioration : l'élaboration d'un plan de maintenance préventive adapté aux contraintes sahariennes, la mise en place d'un système de management de la sécurité conforme à la norme ISO 45001, et le développement d'une

culture de reporting non punitif permettant d'alimenter progressivement la base de données accidentologique du parc.

En définitive, ce travail confirme que la sécurité des techniciens et la performance de la maintenance ne sont pas des objectifs antagonistes, mais bien complémentaires : une maintenance préventive rigoureuse et adaptée aux conditions sahariennes est la meilleure garantie à la fois de la disponibilité du parc et de la sécurité des hommes qui en assurent l'exploitation.

Bibliographie

[1] International Energy Agency (IEA) – Wind Power – https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind

[2] IRENA – Wind Energy Technology Overview – https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy

[3] TheWindPower.net – World Wind Energy Database – https://www.thewindpower.net/

[4] Poul la Cour Museum – History of Wind Turbines (Denmark) – https://www.poullacourfonden.dk/

[5] GWEC – Global Wind Report 2024 – https://www.gwec.net/global-wind-report/

[6] IRENA – Renewable Power Generation Costs in 2023 – https://www.irena.org/publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023

[7] IEA – World Energy Outlook, Wind Power Benefits and Challenges – https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind

[8] Connaissance des Énergies – Éoliennes terrestres onshore – https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/éoliennes-terrestres

[9] NREL – National Renewable Energy Laboratory, Wind Research – https://www.nrel.gov/wind/

[10] NREL – Wind Turbine Technology Overview, Technical Report TP-500-53554 – https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53554.pdf

[11] Wind-Turbine-Models.com – Gamesa G52/850 kW Specifications – https://en.wind-turbine-models.com/turbines/45-gamesa-g52

[12] IRENA – Wind Energy Technology, Types of Wind Turbines – https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy

[13] ScienceDirect Topics – Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT) – https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/horizontal-axis-wind-turbine

[14] Hameed Z. et al. – Condition monitoring and fault detection of wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13 (2009) – https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832019303606

[15] Météo France – Échelle de Beaufort – https://www.meteo.fr/meteonet/temps/vent/echell_b.htm

[16] TheWindPower.net – Wind Characteristics and Measurement – https://www.thewindpower.net/

[17] Global Wind Atlas – DTU Wind Energy / World Bank Group – https://globalwindatlas.info

[18] CDER – Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Algérie – https://www.cder.dz/

[19] Merzouk N.K. – Wind energy potential of Algeria, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 36, pp. 254-263 (2014) – https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148113004473

[20] Ministère de l'Énergie et des Mines – Programme National de Développement des Énergies Renouvelables (PNDER) 2035 – https://www.energy.gov.dz/

[21] Le Courrier d'Algérie – Ferme éolienne de Kabertène, Adrar – https://lecourrier-dalgerie.com/ferme-eolienne-de-kabertene-adrar-energies-renouvelables/

[22] Wiki Éolienne. (2014). Parc éolien d'Adrar – Fiche technique (puissance 10,2 MW, 12 éoliennes G52/850, superficie 30 ha, production 3,42 GWh/an). https://eolienne.f4jr.org/parcs/adrar

[23] Le Courrier d'Algérie / APS. (2016, 28 octobre). Ferme éolienne de Kabertène (Adrar) : Un modèle réussi d'exploitation des énergies renouvelables. (Déclarations Pr. Hamouda, UDRER-MS). https://lecourrier-dalgerie.com/ferme-eolienne-de-kabertene-adrar-un-modele-reussi-dexploitation-des-energies-renouvelables/

[24] Maghreb Émergent. (2016). Algérie – La ferme éolienne de Kabertène, un modèle réussi. (Données PNDER, potentiel éolien Adrar). https://maghrebemergent.news/fr/algerie-la-ferme-eolienne-de-kabertene-un-modele-reussi-d-exploitation-des-energies-renouvelables/

[25] EspaceManager.com. (2014). L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar. (Coût 2,8 Mds DZD, réalisation CEGELEC/ETTERKIB/INERGA, appel d'offre 2010). https://www.espacemanager.com/lalgerie-inaugure-sa-premiere-ferme-eolienne-de-10-megawatts-adrar.html

[26] AFNOR. (2017). NF EN 13306 : Maintenance – Terminologie de la maintenance. Paris : Association Française de Normalisation. https://www.boutique.afnor.org

[27] IEC. (2019). IEC 61400-1 Ed. 4 : Wind Energy Generation Systems – Part 1: Design Requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission. https://www.iec.ch/store

[28] Márquez, F.P.G. et al. (2012). Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. Renewable Energy, 46, 169–178. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003

[29] BSI. (2014). BS ISO 55000:2014 – Asset Management. Overview, principles and terminology. London : British Standards Institution. https://www.iso.org/standard/55088.html

[30] SkyscraperCity Forum. (2010–2014). KABERTENE | Wind farm | 10 MW | #Realized. (Données historiques projet, phasage mise en service 2014). https://www.skyscrapercity.com/threads/kabertene-wind-farm-10-mw-completed-2013.1278161/

[31] Global Wind Organisation (GWO). (2022). Basic Safety Training (BST) Standard V5. Copenhagen. (Statistiques accidents : chutes 38 %, électrocution 22 %, incendies 15 %). https://www.globalwindsafety.org

[32] Legifrance / Journal Officiel Algérie. Décret algérien relatif à l'habilitation électrique des travailleurs (conditions et modalités d'octroi). https://www.joradp.dz

[33] Energy-XPRT / Gamesa. Gamesa G52-850 kW – Fiche technique : SMP Predictive Maintenance System, SCADA WindNet®, génératrice DFM 690 V. https://www.energy-xprt.com/products/gamesa-model-g52-wind-turbine-330543

[34] Journal Officiel de la République Algérienne. Loi n° 88-07 du 26 janvier 1988 relative à l'hygiène, à la sécurité et à la médecine du travail. https://www.joradp.dz

[35] Wind-turbine-models.com. (2022). Gamesa G52 – 850 kW : Fiche technique complète (diamètre 52 m, surface 2 124 m², cut-in 4 m/s, cut-out 25 m/s, 30,8 tr/min). https://en.wind-turbine-models.com/turbines/45-gamesa-g52

[36] Energy-XPRT / Gamesa. Gamesa G52-850 kW – Spécifications : IEC Class IA, survie 70 m/s, durée de vie ≥ 20 ans, cut-out 28 m/s. https://www.energy-xprt.com/products/gamesa-model-g52-wind-turbine-330543

[37] Données climatiques région d'Adrar – UDRER-MS Adrar / Météo Algérie. Températures extrêmes, régime de vents, tempêtes de sable (chergui/sirocco), contraintes opérationnelles sahariennes. https://www.meteo.dz

[38] Windpower Monthly. (2014, 24 avril). Turbines of the year – Turbines up to 2MW. Gamesa G52-850 kW : sites exigeants, poussiéreux, IEC IA, marchés à faible infrastructure. https://www.windpowermonthly.com/article/1225303/turbines-year-turbines-2mw

[39] ARIA – Base de données accidents technologiques. Accident n°63382 : rupture de pale d'éolienne. Ministère de la Transition écologique, France. Disponible sur : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/63382/

[40] F4JR – Documentation technique sur le multiplicateur d'éolienne. Disponible sur : https://eolienne.f4jr.org/multiplicateur

[41] ARIA – Base de données accidents technologiques. Accident n°41628 : arc électrique en nacelle d'éolienne (690 V). Ministère de la Transition écologique, France. Disponible sur : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/41628/

[42] ARIA – Base de données accidents technologiques. Accident n°43630 : incendie de nacelle avec déversement d'huile. Ministère de la Transition écologique, France. Disponible sur : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/43630/

[43] Wikibooks – Atlas éolien / Accidents. Disponible sur : https://fr.wikibooks.org/wiki/Atlas_%C3%A9olien/Accidents

[44] TSV Transfo – Exemples de types de défauts de transformateurs. Disponible sur : https://www.tsv-transfo.com/en/decouvrir-le-transformateur/exemple-de-types-de-defauts-de-transformateurs/

[45] ARIA – Base de données accidents technologiques. Accident n°47675 : défaillance du système de freinage d'éolienne. Ministère de la Transition écologique, France. Disponible sur : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/47675/

[46] INRS – Démarche d'évaluation des risques professionnels. Disponible sur : https://www.inrs.fr/demarche/evaluation-risques-professionnels/ce-qu-il-faut-retenir.html

[47] Préfecture de la Charente – Étude de dangers : énergie du Confolentais. Disponible sur : https://www.charente.gouv.fr/content/download/30335/190567/file/16-EnergieDuConfolentais-5-EtudeDeDangers.pdf

[48] Techniques de l'Ingénieur – Méthode d'analyse des risques professionnels en maintenance (MT9556). Disponible sur : https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/

[49] ISO 45001:2018 – Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail. Organisation internationale de normalisation. Disponible sur : https://www.iso.org/fr/standard/89698.html

[50] ISO – Publication PUB100427 : guide sur l'évaluation des risques. Disponible sur : https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/fr/PUB100427_fr.pdf

[51] AFNOR International – Certification GWO (Global Wind Organisation). Disponible sur : https://international.afnor.com/boutique/type-de-prestation/certifications-de-systemes-de-management/certification-gwo/

[52] Global Wind Safety Organisation (GWO). Disponible sur : https://www.globalwindsafety.org/

[53] Travail & Sécurité – Les chutes de hauteur dans les éoliennes : un risque bien identifié et maîtrisé. INRS. Disponible sur : https://www.travail-et-securite.fr/ts/842/DOS/les-chutes-de-hauteur/eoliennes-un-risque-bien-identifie-et-maitrise

[54] ARIA – Base de données accidents technologiques. Accident n°39464 : chute de 3 mètres en nacelle à 98 m de hauteur (15 décembre 2010). Disponible sur : https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/39464/

[55] Pages Jaunes – Statistiques d'accidents mortels dans les éoliennes (TWh produit). Disponible sur : https://eolienne.pagesjaunes.fr/astuce/voir/376111/accident-d-eolienne

[56] Skanwear – Electrical safety in wind turbines. Disponible sur : https://skanwear.com/blogs/industry-news/electrical-safety-in-wind-turbines

[57] Optim-Elec – Informations à connaître pour éviter l'accident électrique. Disponible sur : https://optim-elec.com/blog/quelles-sont-les-informations-a-connaitre-pour-eviter-l-accident-electrique.html

[58] Sénat français – Question écrite n°02614 : incendies d'éoliennes (2022). Disponible sur : https://www.senat.fr/questions/base/2022/qSEQ220902614.html

[59] Algérie 360 – Production d'énergie éolienne en Algérie : une aventure qui risque de nous coûter cher. Disponible sur : https://www.algerie360.com/production-denergie-eolienne-en-algerieune-aventure-qui-risque-de-nous-couter-cher/

[60] ONAT Algérie – Quels sont les dangers du désert lors d'un circuit touristique au Sahara ? Disponible sur : https://onatdz.com/quels-sont-les-dangers-du-desert-lors-d-un-circuit-touristique-au-sahara

[61] Libre Comme l'Air – Merzouga : dangers du désert saharien. Disponible sur : https://librecommelair.fr/merzouga-danger/

[62] Chevron / CGLapps – Fiche de données de sécurité (FDS) : huile hydraulique industrielle. Disponible sur : https://cglapps.chevron.com/msdspds/SDSDetailPage.aspx?docDataId=448740&docFormat=PDF

[63] M. Shafiee, « Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring LD : A review,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 86, pp. 68–82, 2018. DOI : 10.1016/j.rser.2018.01.011

[64] P. J. Tavner, « Offshore Wind Turbines : Reliability, Availability and Maintenance,» The Institution of Engineering and Technology, London, 2012. DOI : 10.1002/we.204

[65] WindEurope, « Wind energy in Europe : 2022 statistics and the outlook for 2023–2027,» WindEurope, Brussels, 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://windeurope.org

[66] Global Wind Safety Organisation (GWO), « Accident Database : Wind Turbine Incidents 2000–2022,» [En ligne]. Disponible sur : https://www.globalwindsafety.org

[67] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), « Méthode d'analyse des accidents du travail,» INRS, Paris, 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.inrs.fr

[68] R. Byrne, D. O'Rourke, et A. Keane, « Prognostics and health management of wind turbines : Current progress and future challenges,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, n° 6, 2016. DOI : 10.1109/TIE.2016.2558169

[69] Commission Électrotechnique Internationale (CEI), « IEC 61025 : Analyse par arbre de panne (FTA),» IEC, Genève, 2006. [En ligne]. Disponible sur : https://webstore.iec.ch

[70] AFNOR, « NF EN 60812 : Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE),» AFNOR, Paris, 2006. [En ligne]. Disponible sur : https://www.boutique.afnor.org

[71] A. M. Smith et G. R. Hinchcliffe, RCM : Gateway to World Class Maintenance, Industrial Press, New York, 2004.

[72] Cikaba, « Prévention et facteurs humains et organisationnels,» [En ligne]. Disponible sur : https://www.cikaba.com

[73] ICSI – Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle, « Facteurs organisationnels et humains : 4 axes pour agir,» [En ligne]. Disponible sur : https://www.icsi-eu.org

[74] Anthéa Conseils, « L'importance des facteurs organisationnels, techniques et humains (OTH) dans le nouveau référentiel MASE 2024,» [En ligne]. Disponible sur : https://anthea-conseils.com

[75] Organisation Internationale de Normalisation (ISO), « ISO 31010 :2019 – Management du risque – Techniques d'appréciation du risque,» ISO, Genève, 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.iso.org/fr/standard/65694.html

[76] Organisation Internationale de Normalisation (ISO), « ISO 9001 :2015 – Systèmes de management de la qualité,» ISO, Genève, 2015. [En ligne]. Disponible sur : https://www.iso.org/fr/standard/72140.html

[77] Organisation Internationale de Normalisation (ISO), « ISO 45001 :2018 – Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail,» ISO, Genève, 2018. [En ligne]. Disponible sur : https://www.iso.org/fr/standard/62085.html