

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologies

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Thème

**Evaluation des propriétés structurales et
mécaniques d'un matériau métallique destiné à
l'industrie d'éolienne**

Devant le jury composé de :

Dr. GUERRAH AYOUB Président

M^{me}. MEZIANE ASSIA Examineur

Dr. BOULIFA M. Iliasse Encadreur

Présenté par :

DJABALLAH ASSEM

KENIOUA Khalil

LABIDI Mohamed Nadir

Année Académique 2019-2020

Dédicace

Nous dédions ce travail :

À nos mères et à nos pères.

À nos sœurs et frères.

À nos chers amis.

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.

Nous remercions vivement Dr. BOULIFA Mohammed Ilias, Maître de conférences à l'Université d'el oued, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'encadrer ma mémoire.

Nous remercions à :

Dr. Meneceur Redha, chef département de génie mécanique,

Merci à tous ceux qui nous ont aidés dans ce travail un peu ou beaucoup

Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de génie mécanique.

Nomenclature

GS Graphite Sphéroïdal

GPV générateur photovoltaïque

PPM point de puissance maximale

ADI Austempered Ductile Iron

M Mechanical

CFD Computationnel Fluide Dynamics

CX Coefficient de traînée

CZ Coefficient moyen de portance

CM Coefficient de moment

Sommaire

Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Introduction générale	1

Chapitre I : Les énergies renouvelables

I.1. Introduction.....	2
I.2. Les énergies renouvelables :	4
I.3. Les différents types des énergies renouvelables :	4
I.3.1. La biomasse :	4
I.3.2. L'hydraulique :	5
I.3.3. La géothermie :	6
I.3.4. L'hydrogène :	6
I.3.5. Le solaire :	7
I.3.5.1. Energie solaire photovoltaïque :	7
I.3.6. L'éolienne :	8
I.4. Conclusion :	9

Chapitre II : Etude d'éolienne

II.1. Introduction	10
II.2. Généralités sur un système éolien	10
II.2.1. Définition de l'éolienne	11
II.2.2. Gisement éolien en Algérie	12
II.2.3. Les différents types d'éoliennes	12
II.2.4. Principe de fonctionnement	15
II.2.5. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur	15
II.3. L'éolien dans le monde	16
II.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	17
II.4.1. Les avantages	17
II.4.2. Les inconvénients.....	18

II.5. Conclusion.....	19
-----------------------	----

Chapitre III : Matériaux utilisé dans l'industrie d'éolienne

III.1. Introduction.....	20
III.2. Classification des matériaux	20
III.3. Matériaux pour fabrication du mat et nacelle	21
III.3.1. Les métaux et alliages	21
III.3.1.1. Aciers :	21
III.3.1.2. Fontes :	22
III.3.2.1. Classification de font.....	23
III.3.3. Comparaison avec l'acier	24
III.4. Matériaux pour fabrication de mat	25
III.4.1. Aluminium :	25
III.4.2. Les céramiques et les verres	26
III.4.3. Les polymères	26
III.4.4. Les matériaux composites	27
III.5. Propriétés mécaniques des matériaux	27
III.6. Conclusion.....	29

Chapitre IV : Résultats numérique et Interprétation

IV.1. Introduction.....	30
IV.2. Caractéristiques du matériau étudié	30
IV.2.1. Composition chimique	30
IV.2.2. Propriétés structurelle	30
IV.2.2.1. Diffraction des rayons X	30
IV.2.2.2. Structure métallographique	31
IV.2.3. Propriétés mécaniques.....	32
IV.3. SOLIDWORKS et M (Mechanical).....	33
IV.3.1. Géométries de mat d'éolienne.....	33
IV.3.2. Maillage	34
IV.4. FLUENT	35
IV.4.1. Choix des types de frontières :	35
IV.4.2. Les conditions aux limites.....	36

IV.4.3. Choix des schémas de discrétisation	36
IV.4.4. Sous relaxation	37
IV.5. Résultats et interprétation	37
IV.5.1. Analyse dynamique de solide/fluide	37
IV.5.1.1. L'effet de vitesse	37
IV.5.1.2. L'effet de pression sur la mat.....	39
IV.5.2. Analyse modale	41
IV.5.2.1. Les fréquences naturelles de la mat	41
IV.5.2.2. Les déformées modales :	42
IV.3.3. Analyse statique	45
IV.5.3.1. Les contraintes de la mat.....	46
IV.5.3.2. Les déformation de la mat.....	47
IV.5.3.3. Déplacement de la mat.....	49
IV.6. Conclusion	52
Conclusion générale	53

Liste des tableaux

Tableau III.1. Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux.....	22
Tableau III.2. Propriétés mécaniques de fonte.....	25
Tableau III.3. Ordres de grandeurs de propriétés selon la famille du matériau.....	27
Tableau IV.1. Composition chimique de la fonte expérimenté.....	30
Tableau IV.2. Composition chimique de la fonte expérimentée.....	32
Tableau IV.3. Types De Frontières	36
Tableau. IV.4. Les schémas de discrétisation	36
Tableau. IV.5. Les facteurs de sous relaxation	37
Tableau IV.6. La valeur de coefficient de portance et traine et moment.....	41
Tableau IV.7. Les fréquences naturelles du mat.....	41
Tableau IV.8. La déformation Max du mat	45
Tableau IV.9. Valeur max de contrainte	47
Tableau IV.10. Valeur max de déformation	47
Tableau IV.11. Valeur max d'énergie de déformation	48
Tableau IV.12. Valeur max de déplacement suivant X	49
Tableau IV.13. Valeur max de déplacement suivant Y	50
Tableau IV.14. Valeur max de déplacement suivant Z	51

Liste des figures

Figure I.1. Énergie Biomasse.....	5
Figure I.2. Différent types de l'hydraulique.....	5
Figure I.3. Une source d'énergie géothermique.....	6
Figure I.4. Énergie solaire thermique.....	7
Figure I.5. Système Photovoltaïque.....	8
Figure I.6. Schéma des différents éléments de l'éolien.....	9
Figure II.1. Éoliens.....	11
Figure II.2. Procédure d'production énergie éolien.....	11
Figure II.3. Distribution de vent en Algérie.....	12
Figure. II.4. éoliennes amont et aval.....	13
Figure II.5. Deux types des éoliennes.....	14
Figure II.6. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur.....	15
Figure II.7. L'éolien dans le monde.....	17
Figure III.1. Principales familles de matériaux.....	20
Figure IV.1. Spectre de diffraction X de la fonte étudiée.....	31
Figure IV.2. Microstructure de la fonte alliée ; a : à l'état brut de coulée, b : à l'état traité.....	32
Figure IV.3. Dimension de mat isolé 3D	33
Figure IV.4. Domine de travail simulation 3D.....	34
Figure IV.5. Maillage de mat isolé 3D	35
Figure IV.6. Contours de la grandeur de vitesse résultante.....	38
Figure IV.7. Vecteurs de la grandeur de vitesse résultante.....	38
Figure IV.8. Effet de mat sur le volume interné.....	39
Figure IV.9. Contours de pression totale (Pa).....	39
Figure IV.10. L'effet de pression totale sur la longueur de mat.....	40
Figure IV.11. Les valeurs Cd et Cl et Cm	40
Figure IV.12. La fréquence on fonction numéro de mode.....	41
Figure IV.13. Mode de 1er déformée.....	42
Figure IV. 14. Mode de 2ime déformée.....	42
Figure IV.15. Mode de 3ime déformée.....	43
Figure IV.16. Mode de 4ime déformée.....	43
Figure IV.17. Mode de 5ime déformée.....	44

Figure IV.18. Mode de 6ime déformée.....	44
Figure IV.19. Les Max déformation du mat.....	45
Figure IV.20. Position de force aérodynamique sur le mat.....	46
Figures IV.21. La contrainte Max du mat.....	46
Figures IV.22. La déformation Max du mat.....	47
Figures IV.23. Énergie de déformation	48
Figures IV.24. Déplacement suivant x	49
Figures IV.25. Déplacement suivant y	50
Figures IV.26. Déplacement suivant Z	51

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme sources de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que : « le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau ou encore les marées ». L'avance spectaculaire dans les différents domaines de technologie ces dernières années, ces formes alternatives de production d'électricité deviennent, pour certaines, compétitives par rapport aux combustibles fossiles qui révèlent leur épuisement et leur incidence environnementale.

L'éolien contribue de façon significative à la production de l'énergie électrique pour certains pays et ce grâce à sa maturité. L'éolien pourrait jouer un rôle clef dans l'évolution de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable œuvrant ainsi à la prévention du changement climatique vus qu'elles n'engendrent pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité.

L'éolienne est l'une des machines les plus importantes sur lesquelles s'appuyer pour générer des énergies renouvelables car elle se compose de nombreuses pièces de base, y compris le mât et la pale, ainsi que la nacelle. Les matériaux de fabrication pour chaque pièce que nous avons mentionné différent, mais dans cette étude, nous nous concentrerons sur l'un des éléments les plus importants, qui est le mât, dont nous traiterons les types. Ainsi que les différents matériaux qui le composent, et nous nous concentrerons dans cette étude sur l'un des matériaux les plus importants développés dans le domaine industriel afin de fabriquer une pièce de ce matériau et de la simuler sous l'influence de forces aérodynamiques réelles.

Notre travail est composé de quatre chapitres :

A partir d'une recherche bibliographique présentée, un résumé de l'état d'avancement des recherches scientifiques, dans le domaine de la dynamique du mât. La seconde partie porte sur la description des notions de base des phénomènes importants en dynamique du mât d'éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'une des éoliennes, ses composants, ses caractéristiques et ses principes de fonctionnement de base.

Nous avons également consacré le troisième chapitre à parler du matériau qui compose le mât, qui fait l'objet d'étude.

Le quatrième chapitre présente une simulation numérique du mât par le code de calcul éléments finis ANSYS pour déterminer les fréquences propres, les modes propres, les contraintes et les déplacements et le résultat de la partie solide/fluide.

Chapitre I

Les énergies renouvelables

I.1. Introduction

Depuis le début de l'énergie éolienne, les ingénieurs essayent de trouver des moyens de contrôler et d'améliorer le mat de l'éolienne [18]. Les objectifs sont variés. Il peut s'agir par exemple d'augmenter la structure de l'mat ou bien encore d'améliorer sa manœuvrabilité, c'est-à-dire d'obtenir un meilleur contrôle de sa trajectoire et de sa stabilité. A l'inverse, il peut être question d'essayer d'augmenter la durée de vie utile que porte l'éolienne. Un autre objectif pourrait concerner la discrétion ou bien encore la réduction des vibrations.

Mais, tous ces objectifs ne peuvent pas toujours être atteints en même temps car, étant donné l'état des compétences techniques actuelles, on arrive bien souvent à ne trouver qu'un compromis qui satisfait au mieux l'ensemble des critères d'un cahier des charges donné. C'est pour cette raison que de nouvelles méthodes, toutes aussi originales les unes que les autres, ont été envisagées pour trouver encore d'autres compromis, peut-être plus intéressants.

L'objectif de ce premier chapitre est l'avancement de recherche bibliographique et la notion de base de mât et l'éolienne aérodynamiques.

La recherche est liée directement à l'évolution de la technologie; et c'est ce qui pousse les chercheurs à avancer dans des cas très compliqués et d'actualités, susceptibles d'être traités à l'aide d'un outil informatique très puissant et des moyens expérimentaux les plus sophistiqués et les plus performants.

K. FERKOUS [1], Ce travail concerne l'étude du comportement d'un écoulement turbulent autour d'un mat. Elle est réalisée par le logiciel CFD qui est basé sur la méthode de volumes finis pour la résolution des équations de Navier-Stokes.

E. Hau [2], Dans cette recherche, une approche statistique est présentée pour développer une équation d'état (EOS) afin de quantifier la non-réalité de l'air (facteur de compressibilité) en fonction de la température réduite et de la pression réduite. La comparaison du modèle de substitution du facteur de compressibilité (Z) avec les résultats validés d'Engineering Equation Solveur (une base de données thermodynamique standard) indique que le modèle de substitution présente un écart absolu moyen global inférieur à 0,5% sur toute la plage de pression et de température étudiée.

D. A. Spera [3], Une étude numérique du contrôle de la séparation a été faite pour étudier les caractéristiques aérodynamiques du mat. Les résultats calculés ont démontré que les caractéristiques de décrochage et les performances de la surface de contrôle pouvaient être considérablement améliorées en redimensionnant les vortex de séparation. La portance

maximale a été obtenue lorsque le point de séparation coïncide avec l'emplacement du jet synthétique et le fréquence non-dimensionnelle est d'environ.

J. F. Manwell, J. G. McGowan [4], Dans ce travail, étudions les phénomènes dynamiques sollicitant des mats de section variable. Les résultats de l'étude donne un outil de simulation qui montre la répartition des contraintes dues au mode de flexion de la mat lors de sa rotation en tenant compte à la fois des forces mécaniques et aérodynamiques nécessaires pour estimer sa fatigue.

I. Graham [5], Cette étude concerne le comportement dynamique d'un mat d'éolienne. Cette étude a été réalisée pour évaluer les charges aérodynamiques appliquées et évaluées par une simulation numérique des fréquences et des modes propres et calculer les contraintes agissant sur la structure pour différents modes.

B. Lester and R. Brown [6], Ce travail présent les résultats expérimentaux de deux techniques de détection de dommages basées sur les propriétés modales, avec l'application sur un mat de rotor principal d'éolienne composite de taille normale. Les méthodes de détection des dommages utilisées dans cette étude sont le critère d'assurance modale coordonnée (COMAC) et la méthode d'énergie modale de déformation, qui sont respectivement basés sur la comparaison des modes de vibration et sur la comparaison de l'énergie modale de déformation.

Agli and maklid [7], Le but de cette étude est de présenter le comportement dynamique d'une mat d'éolienne composite basée sur la formulation de problèmes de fissures de Westerwald et une simulation utilisant la méthode des éléments finis étendue (XFEM). Enfin, plusieurs simulations numériques sont fournies pour illustrer la validité, la robustesse et l'efficacité de l'approche proposée pour évaluer les facteurs d'intensité de contrainte de mode I et les intégrales J dans les composites. L'étude du comportement transitoire permet de déterminer les réponses vibratoires dues au déséquilibre et aux différents modes d'excitation.

C. N. EBEY [8], Cette étude présente des dommages dans des structures similaires à des mats d'éoliennes soumises à un impact, La modélisation des dommages de la mèche est effectuée par un changement d'échelle. Cela permet une bonne représentation du comportement expérimental observé. Comme la densité de maillage est faible, elle peut être utilisée pour la modélisation d'une structure réelle.

T. Goyne [9] Ce travail se concentre sur l'étude des impacts de la vitesse moyenne oblique ($\sim 70\text{m / s}$) sur la surface inférieure des mats d'éoliennes. Une étude numérique est réalisée à l'aide d'une formulation d'éléments finis spécifique développée pour modéliser le

comportement de la peau composite tissée lors d'un impact. Les résultats numériques et expérimentaux sont comparés. La stratégie de modélisation proposée corrèle bien les tests. La modélisation est ensuite utilisée pour étudier l'influence de mat.

D. A. Spera [10] Dans cette étude, l'approche de la tolérance aux dommages est utilisée pour l'estimation de la durée de vie du mat d'éolienne soumis à un chargement aléatoire. Dans un premier temps, les propriétés de croissance des fissures de fatigue et la gamme d'intensité de contrainte de seuil du longeron sont obtenues sur la base de la méthode d'essai ASTM E647.

I.2. les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie [11].

I.3. les différents types des énergies renouvelables

I.3.1. la biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières : Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie, - La biomasse elle-même peut être incinérée. Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autres, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [12]. La figure I.1. Montre l'énergie biomasse.

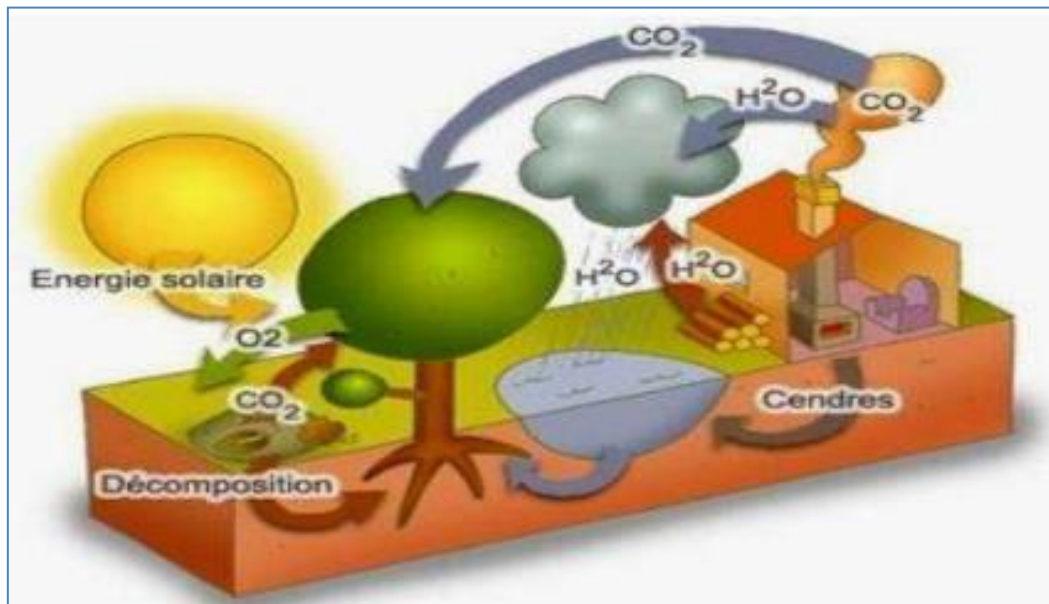


Figure. I.1. Énergie Biomasse [4]

I.3.2. L'hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [13].

(La figure I.2. montre différents types d'énergie hydraulique)

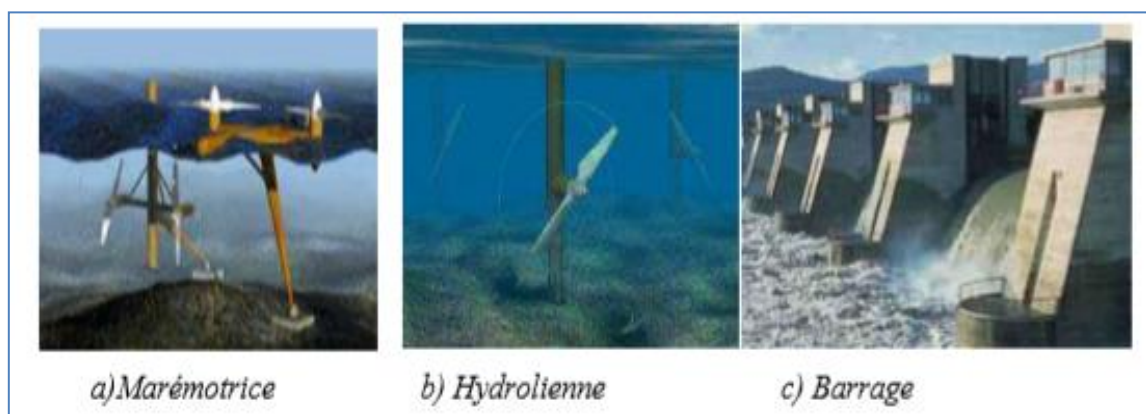


Figure. I.2. Différents types d'énergie hydraulique [2]

I.3.3. La géothermie

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [12].

(La figure I.3. montre une source d'énergie géothermique)

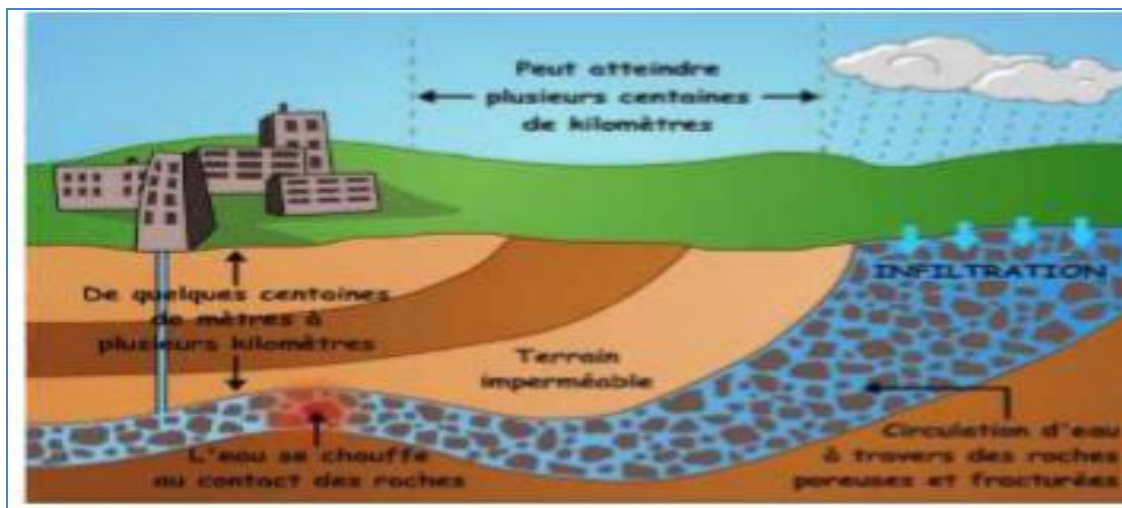


Figure. I.3. Une source d'énergie géothermique [5]

I.3.4. l'hydrogène

L'hydrogène pourrait constituer un vecteur énergétique de l'avenir. En effet, d'une part les réserves de carburants fossiles ne sont pas éternelles et d'autre part on sait que le moteur à hydrogène est beaucoup plus respectueux de l'environnement que le moteur thermique, puisqu'il permet d'éviter les émanations de gaz carbonique et l'effet de serre. Le cœur du moteur à hydrogène est une pile à combustible qui fonctionne suivant le modèle d'une centrale électrique, avec un apport d'hydrogène et d'oxygène, l'oxygène étant prélevé directement dans l'air extérieur. Au contact chimique de l'oxygène, l'hydrogène produit de l'eau. Ce processus dégage de l'énergie sous forme d'électricité qui fait tourner le moteur [14].

I.3.5. Le solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [15].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique
- L'énergie solaire photovoltaïque
- L'énergie solaire passive

(La figure I.4. montre Énergie solaire thermique).



Figure. I.4. Énergie solaire thermique [7]

I.3.5.1. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et

présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [13]. (La figure I.5. montre un système photovoltaïque).

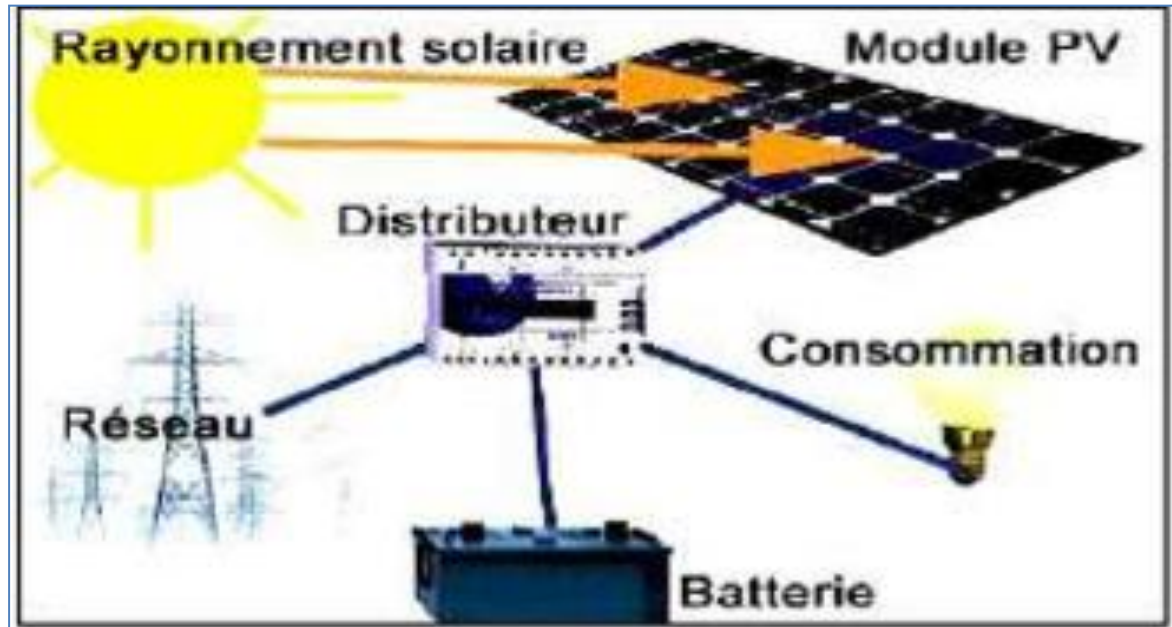


Figure. I.5. Système Photovoltaïque [12]

I.3.6. L'éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement...

L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus « prometteuses » à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental.

Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser [9].

(La figure I.6. montre un schéma des différents éléments de l'éolien).

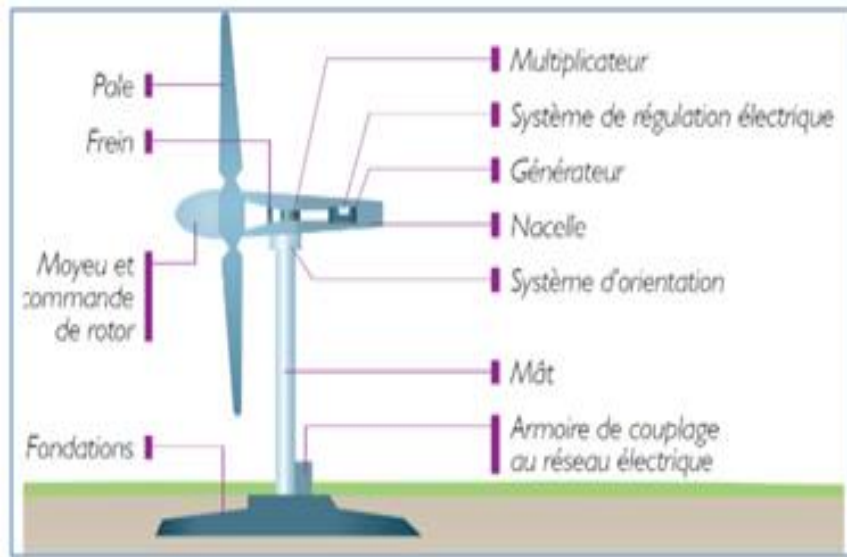


Figure. I.6. Schéma des différents éléments de l'éolien [3]

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description générale sur les différents moyens de production d'énergie électrique d'origine renouvelables.

Nous avons présenté aussi les différentes notions qui entrent dans la conception des plusieurs énergies : solaire photovoltaïque et éolienne hydraulique fossile..... Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des systèmes les énergies renouvelables, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à l'analyse du système éolienne formé par ces les différences types d'éolienne au chapitre II.

Chapitre II

Etude d'éolienne

II.1. Introduction

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable favorisant la diversification et l'indépendance énergétique. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement.

C'est une énergie décentralisée et plus proche des consommateurs. Il ya un potentiel immense et une source inépuisable en énergie renouvelable dans le monde qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques.

C'est la raison pour laquelle ce type d'énergie est devenu actuellement une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable pour un futur très proche, et une stratégie alternative pour les énergies fossiles.

II.2. Généralités sur un système éolien

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre, l'énergie éolienne est, une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Elle peut être utilisée de deux manières, directe ou indirecte [15].

A. Direct

L'énergie mécanique est conservé ainsi on utilise le vent pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail).

B. Indirect

Pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, une éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

La représentation dans la figure suivante (Figure. II.1) représente un ensemble des éoliens.



Figure. II.1. Ensemble d'éoliens [8]

II.2.1. Définition de l'éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et rentrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

La représentation dans la figure II.2 donne un modèle de petit réseau caractérisant la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique [6].

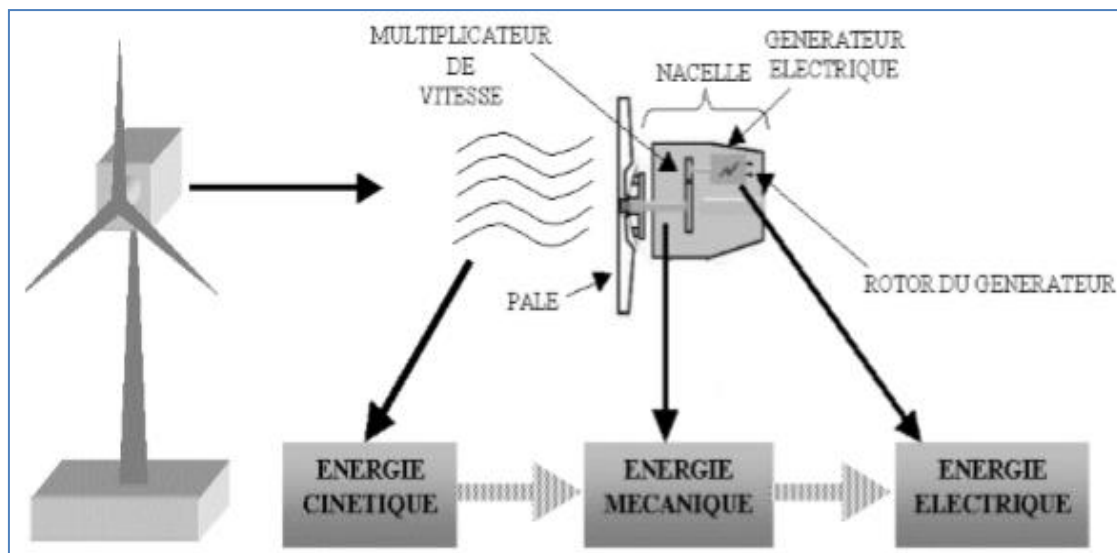


Figure. II.2. procédure de production d'énergie éolien [6]

II.2.2. Gisement éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien ; entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [19] l'air le plus froid (le plus lourd).

La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre. On estime la valeur moyenne de la vitesse de vent en Algérie à 10 m/s.

La représentation dans la figure suivante (Figure. II.3) montre la distribution de vent en Algérie.

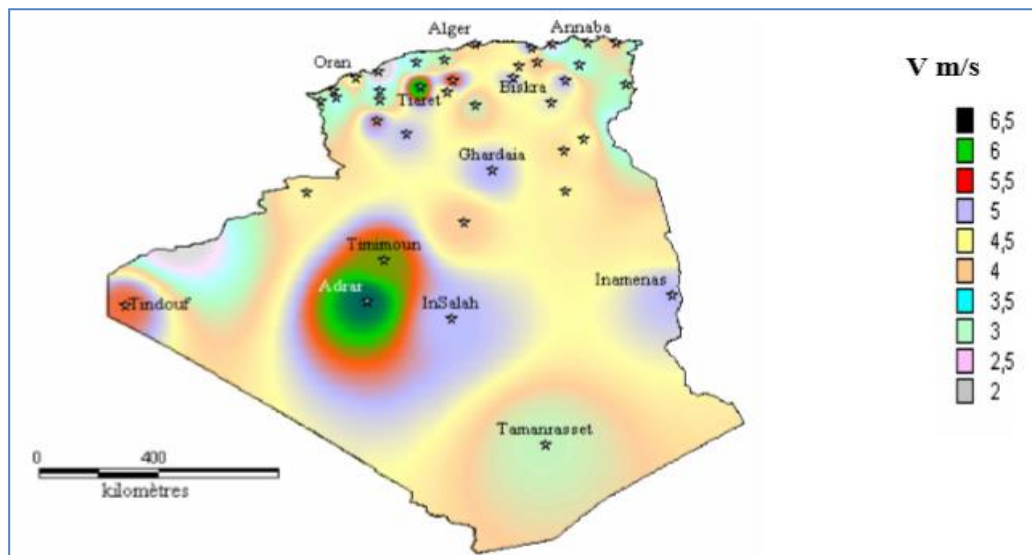


Figure. II.3. Distribution de vent en Algérie [11]

II.2.3. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [19].

a) Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur la base du nombre de pâles que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

1. les éoliennes à rotation lente "multiples"

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

2. Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant « d'aérogénérateurs ». Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent » [20].

La représentation dans la figure suivante (Figure. II.4) montre des éoliennes amont et aval.

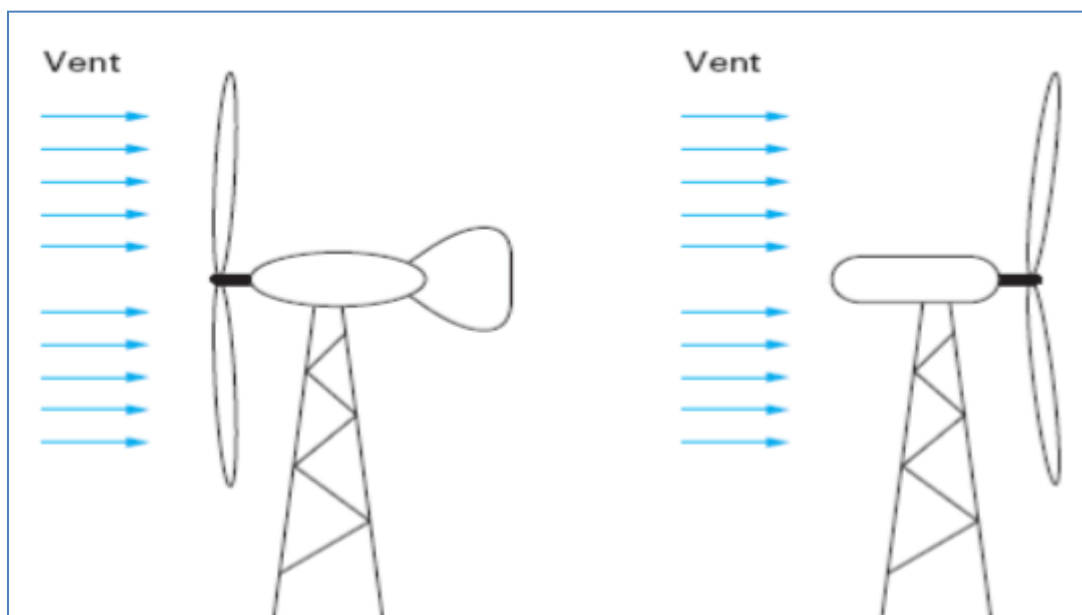


Figure. II.4. éoliennes amont et aval [10]

b) Les éoliennes à axe vertical [16]

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc celles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Darrieus et Savonius

- L'éolienne inventée par le Français Darrieus (Figure. II.5.a) est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité.

Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

- L'éolienne Savonius (Figure. II.5.b) comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s



a



b

Figure. II.5. Eoliennes à axe vertical : Darrieus (a) et Savonius (b) [13]

II.2.4. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette Conversion se fait en deux étapes : Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques.

Le flux d'air crée autour du profil, une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [15].

II.2.5. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [17].

La représentation dans la figure suivante (Figure. II.6) montre les éléments constitutifs d'un aérogénérateur.

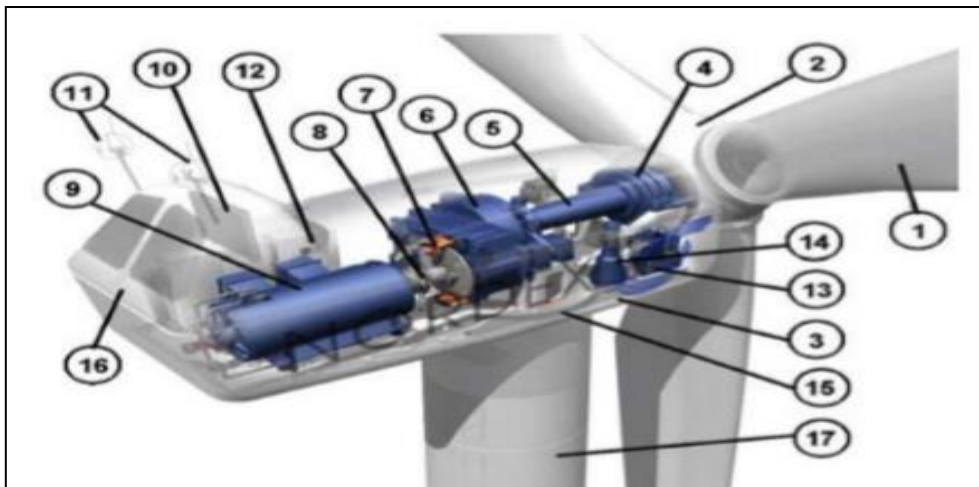


Figure. II.6. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur [1]

- 1. Pâles :** en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stal (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
- 2. Moyeu :** du rotor en fonte.
- 3. Structure de la turbine :** en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4. Paliers :** du rotor à double rangée de billes.
- 5. Arbre lent :** du rotor en acier haute résistance.

- 6. Multiplicateur :** de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7. Frein à disque :** sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8. Accouplement :** avec la génératrice de type flexible.
- 9. Génératrice :** (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
- 10. Radiateur de refroidissement :** intégré au système multiplicateur générateur.
- 11. Système de mesure du vent :** (anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12. Système de contrôle :** surveille et pilote la turbine.
- 13. Système hydraulique :** pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 14. Entraînement d'orientation :** de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15. Paliers du système d'orientation :** équipés d'un frein à disque.
- 16. Capot de la nacelle :** en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 17. Tour :** en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

I.3. L'éolien dans le monde

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes s'émettent pas de dioxyde de carbone.

Trois facteurs sont contribués à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance,
- l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes.
- le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes [10].

La représentation dans la figure suivante (Figure. II.7) montre l'éolien dans le monde.

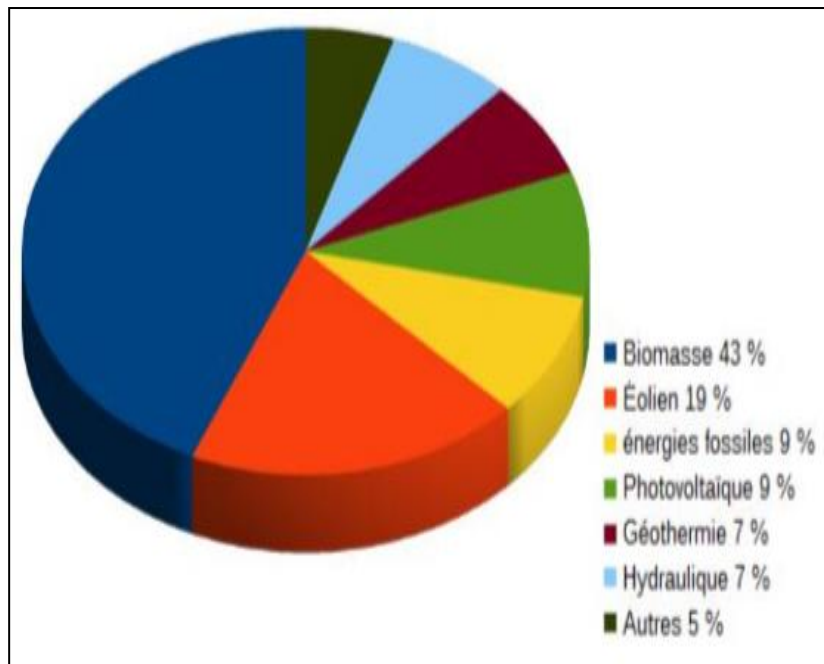


Figure. II.7. L'éolien dans le monde [4]

II.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des dés avantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

II.4.1. Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- Bien que ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.

- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchet stoïque ou radioactif.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importants pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [11].

II.4.2. Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques avantages : L'impact visuel, c'est-à-dire moins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.

* Les bruits mécaniques ou aérodynamiques sont réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc... , et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer un bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense, plus ce risque n'est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux. La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmentée par suite, les contraintes des gestionnaires du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [11].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on présente les énergies renouvelables dites décentralisées. On donne des généralités sur un système éolien en mettant en exergue les types des éoliennes utilisées. On a vu le programme national algérien sur les énergies renouvelables. Puis on cite les avantages et les inconvénients quant à l'exploitation de l'énergie éolienne.

Chapitre III

Matériaux utilisés dans l'industrie d'éolienne

III.1. Introduction

Dans l'industrie des énergies renouvelables, la conception des matériaux d'éoliennes doit répondre aux nouvelles réglementations mises en vigueur en terme du respect de l'environnement et de la protection de la santé et ce, en parallèle de l'assurance qualité. Avec cette idée comme objectif, la présente étude a pour but, d'une part, la modernisation du procédé de fabrication des matériaux d'éoliennes avec la prise en compte des aspects d'éco-conception, et d'autre part, le développement et l'amélioration des procédures de qualification, de réparation et de recyclage après la fin de vie de ces matériaux.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents composants de l'éolienne, et nous concentrerons sur les matériaux qui composent le mât étudié.

III.2. Classification des matériaux

Les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles selon leurs compositions chimiques et structures atomique (la nature des liaisons entre les atomes) [21].

On peut distinguer :

- Les métaux et alliages ;
- Les céramiques et les verres ;
- Les polymères ;
- Les matériaux composites.

La Figure.III.1. Présente les principales familles de matériaux.

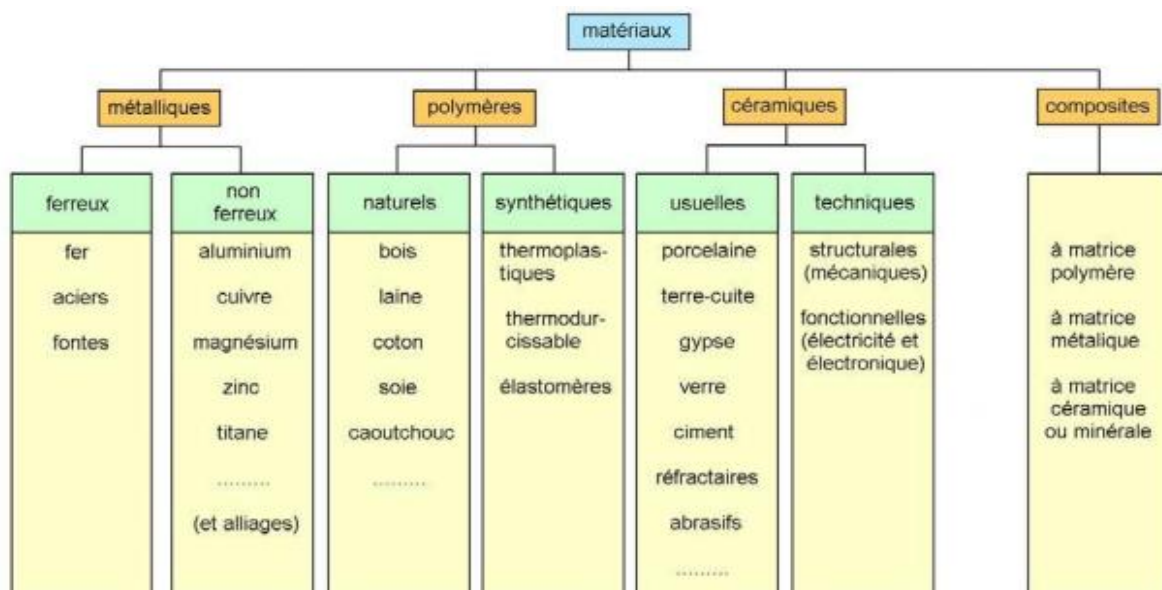


Figure.III.1. principales familles de matériaux [21]

III.3. Matériaux pour fabrication du mat et nacelle

III.3.1. Les métaux et alliages

Les matériaux métalliques, faisant intervenir une liaison métallique : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement [21]. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques : fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc. Les métaux et leurs alliages sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité, opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent. On les obtient soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium).

Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, clivage...). Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques [22].

III.3.1.1. Aciers

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone) [23]. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers, comme les fontes et les ferroalliages. Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 1,7%, limite courante qui distingue les fontes.

La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers : les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6% ; sauf 1,65% pour Mn (Manganèse)), les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés (aciers inoxydables). De prix compétitif, mieux adaptées au moulage que les fontes, du fait d'une plus grande fluidité à chaud et de températures de fusion inférieures (1200°C contre 1500°C), les fontes sont régulièrement utilisées. Le tableau III.1.Résume les symboles chimiques et les symboles métallurgiques ainsi que la densité des métaux.

Tableau III.1. Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels [22]

<i>Corps</i>	<i>Symbole chimique</i>	<i>Symbole métallurgique</i>	<i>Densité</i>	<i>Corps</i>	<i>Symbole chimique</i>	<i>Symbole métallurgique</i>	<i>Densité</i>
<i>Aluminium</i>	<i>Al</i>	<i>A</i>	<i>2,7</i>	<i>Manganèse</i>	<i>Mn</i>	<i>M</i>	<i>7,2</i>
<i>Béryllium</i>	<i>Be</i>	<i>Be</i>	<i>1,85</i>	<i>Molybdène</i>	<i>Mo</i>	<i>D</i>	<i>10,2</i>
<i>Bore</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>2,35</i>	<i>Nickel</i>	<i>Ni</i>	<i>N</i>	<i>8,9</i>
<i>Cadmium</i>	<i>Cd</i>	<i>Cd</i>	<i>8</i>	<i>Phosphore</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>1,88</i>
<i>Carbone graphite</i>	<i>C</i>	<i>-</i>	<i>2,24</i>	<i>Platine</i>	<i>Pt</i>	<i>-</i>	<i>21,5</i>
<i>Carbone diamant</i>	<i>C</i>	<i>-</i>	<i>3,5</i>	<i>Plomb</i>	<i>Pb</i>	<i>Pb</i>	<i>11,3</i>
<i>Chrome</i>	<i>Cr</i>	<i>C</i>	<i>7,1</i>	<i>Silicium</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>4</i>
<i>Cobalt</i>	<i>Co</i>	<i>K</i>	<i>8,9</i>	<i>Soufre</i>	<i>S</i>	<i>F</i>	<i>2,4</i>
<i>Cuivre</i>	<i>Cu</i>	<i>U</i>	<i>9</i>	<i>Titane</i>	<i>Ti</i>	<i>T</i>	<i>4,5</i>
<i>Etain</i>	<i>Sn</i>	<i>E</i>	<i>6 à 7,5</i>	<i>Tungstène</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>19,3</i>
<i>Fer</i>	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	<i>7,8</i>	<i>Vanadium</i>	<i>V</i>	<i>V</i>	<i>5,9</i>
<i>Lithium</i>	<i>Li</i>	<i>L</i>	<i>0,53</i>	<i>Zinc</i>	<i>Zn</i>	<i>Z</i>	<i>7,15</i>
<i>Magnésium</i>	<i>Mg</i>	<i>G</i>	<i>1,75</i>	<i>Zirconium</i>	<i>Zr</i>	<i>Zr</i>	<i>6,5</i>

III.3.1.2. Fontes

La fonte est un alliage de fer, de silicium et de plus de 1,7 % de carbone. Le pourcentage élevé de carbone dépasse la limite de solubilité dans le fer.

La fonte est utilisée essentiellement pour la réalisation de pièces moulées.

Les fontes ADI (Austempered Ductile Irons) constituent une famille de matériaux technologiques qui peuvent être employés avec succès dans beaucoup d'applications.

Les excellentes propriétés mécaniques des fontes ADI, en particulier la combinaison favorable de la résistance à la traction, la résistance à l'usure et la ductilité élevée, prédestinent cette fonte pour agir en tant que produit de remplacement pour les matériaux forgés, la fonte malléable, l'acier cémenté et trempé ou comparables à celles de certains aciers à haute résistance [31]. Des études ont montré que ces matériaux offrent également un grand potentiel pour les pièces moulées pour des applications impliquant des charges d'impact combinées avec l'usure. Beaucoup d'applications des ADI ont été rapportées plus tôt.

L'intérêt croissant pour l'étude et le développement des fontes ADI peut être attribué à la combinaison remarquable des propriétés mécaniques résultantes de leurs microstructures. La microstructure de l'ADI peut être affectée par l'addition des éléments d'alliage par le changement du pourcentage de chaque phase et par la formation de l'austénite non

transformée. Ainsi la résistance à la traction et la ductilité des fontes ADI peuvent être changées pendant le procédé de traitement thermique bain tique [31].

La fonte ADI est donc une occasion de répondre à la demande industrielle croissante du coût et de densité des matériaux. Les avantages sont bien connus et les larges champs des demandes de cette fonte se développent rapidement. Le développement des fontes à graphite sphéroïdal de type ADI est une avancée importante dans la technologie des fontes ductiles. Dernièrement, en raison de leurs propriétés importantes, elles trouvent aujourd'hui une place prépondérante dans de nombreuses applications [31].

Les progrès considérables des propriétés mécaniques produits par les fontes ADI offrent aux fonderies des possibilités importantes, parmi lesquelles on trouve le développement d'un marché pour ces fontes, dans lequel les fontes GS classiques ont perdu leur place, en raison de leurs faibles propriétés mécaniques. Durant ces dernières années, la fonte ADI fait l'objet d'études très variées tant sur la théorie de la transformation, que sur les domaines d'application et sur les propriétés mécaniques. Pourtant, il reste des problèmes à étudier, tels que : la stabilité thermique et thermomécanique de la structure austénite-ferritique, l'influence des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques, la cinétique de la transformation bain tique, l'influence des paramètres de traitement thermique sur la structure, sur l'état des contraintes résiduelles, etc... [31]. Actuellement, les efforts de recherche sur ce nouveau matériau sont principalement concentrés sur des améliorations possibles de ses propriétés mécaniques. C'est dans cette optique que s'inscrit l'objectif de notre étude qui est l'amélioration des propriétés mécaniques de la fonte GS destinée à la coulée des pièces de tracteur agricoles tels que têtes d'articulation, pédales de couplage, tendeurs, bielles, etc.

III.3.2. Classification des fontes

- La fonte grise ;
- La fonte GS (fonte ductile) ;
- La fonte blanche ;
- La fonte malléable ;
- Fonte ADI.

A. La fonte grise (GL)

Famille des fontes où le carbone se trouve sous forme de graphite. Fonte grise lamellaire : le graphite se trouve sous forme de lamelle. Matériau peu dur, à très bonnes coulabilités et usinabilité.

Excellent coefficient de frottement : forte capacité d'absorption des vibrations

La fonte grise a une résistance à la compression de trois à cinq fois plus élevée que sa résistance à la traction.

C'est une matière qui subit peu de retrait après le moulage au sable.

Elle est utilisée pour les blocs-moteur et les bâtis de machine de toutes les dimensions.

La corrosion en surface de la fonte crée une couche protectrice. Ainsi, même si c'est un matériau qui prend rapidement un aspect rouillé, la fonte grise résiste bien à la corrosion.

B. La fonte GS (fonte ductile)

Graphite sous forme de nodules sphériques.

Elles ont, en traction, un comportement élastique analogue à celui de l'acier.

Meilleure ténacité que les fontes grises à graphite lamellaire.

Coût un peu plus élevé que les fontes grises à graphite lamellaire.

La fonte GS (à graphite sphéroïdal appelé aussi ductile) a une ductilité considérablement améliorée.

Elle est utilisée pour les vilebrequins, les engrenages ainsi que les pièces soumises à des chocs [24].

Comme pour la fonte grise, c'est un matériau facile à mouler et résistant à la corrosion.

C'est cependant un matériau plus cher que la fonte grise.

Consultez le site de « Sorel métal » (www.sorelmetal.com) pour plus d'information sur ce type de fonte en particulier et sur les autres types de fonte en général.

C. Fonte ADI

Les fontes ADI (Austempered Ductile Irons) constituent une famille de matériaux technologiques qui peuvent être employés avec succès dans beaucoup d'applications. Les excellentes propriétés mécaniques des ADI, en particulier la combinaison favorable de la résistance à la traction, la résistance à l'usure et la ductilité élevée, prédestinent cette fonte pour agir en tant que produit de remplacement pour les matériaux forgés, fonte malléable, l'acier cémenté et trempé ou comparables à celles de certains aciers à haute résistance.

III.3.3. Comparaison avec l'acier

Par rapport à l'acier, la fonte est un matériau économique, mais elle peut uniquement être mise en forme par fonderie (et usinage de finition) parce qu'elle ne peut pas subir de déformation plastique.

La fonte résiste bien à la corrosion (mieux que l'acier), car les surfaces oxydées forment une couche protectrice.

La fonte est moins ductile que l'acier mais elle résiste mieux à l'usure.

Le tableau III.2. Présente les propriétés mécaniques des fontes.

Tableau III.2. Propriétés mécaniques de fonte [24]

Contrainte de traction σ (Mpa)	Module d'élasticité longitudinal (fonte classique) E(Mpa)	Module d'élasticité longitudinal (fonte grise/malléable) E(Mpa)	Coefficient de poisson γ (fonte malléable)	Coefficient de poisson γ (fonte grise)	Coefficient de poisson (fonte grise)
150 à 600	90000 à 120000	170000 à 190000	0.17	0.29	600 à 2000

III.4. Matériaux pour fabrication des pales

III.4.1. Aluminium

L'aluminium est un métal de structure cubique à faces centrées, donc intrinsèquement ductile ($A\% = 40\%$ pour l'aluminium pur recuit). Cela permet d'avoir des pièces de forme complexe par laminage et extrusion, notamment des profilés (barres ayant une section de forme complexe). Par ailleurs, il a une faible température de fusion (660°C), ce qui permet d'avoir facilement des pièces moulées. Par contre, comme tous les cristaux CFC, il ne présente pas de limite d'endurance en fatigue et a une faible résistance à l'usure. Outre sa bonne formabilité, l'aluminium est un métal léger ($\rho = 2700\text{ kg/m}^3$, $d = 2,7$), résistant à la corrosion atmosphérique et aqueuse, il réagit avec le dioxygène de l'air pour former une couche d'oxyde Al_2O_3 protectrice et bon conducteur d'électricité ($\sigma_e = 38 \times 10^6\text{ S/m}$ pour l'aluminium pur). Mais son coût est élevé : les ressources en minerai sont peu abondantes, et le procédé métallurgique est très gourmand en électricité. L'aluminium est utilisé lorsque l'on désire avoir des pièces légères (aéronautique, cadre de vélo haut de gamme, automobile) ou bien lorsque l'on veut une bonne résistance à la corrosion (alimentaire, menuiserie : portes, fenêtres, véranda). On l'utilise également comme conducteur d'électricité pour les forts courants : sa conductivité est moins bonne que celle du cuivre donc il faut un conducteur de plus forte section, mais la pièce finale est plus légère et moins chère. Des ajouts de cuivre, silicium et zinc forment des précipités durcissant (durcissement structural) [24].

Ces alliages sont dits « trempant », pourtant, ce n'est pas la trempe elle-même qui provoque le durcissement, mais la maturation lors du revenu qui forme les précipités. Les alliages avec

le manganèse et le magnésium ne sont pas trempant, mais le magnésium améliore le durcissement par le silicium [24].

Les alliages non trempant peuvent être durcis par écrouissage. On effectue parfois une anodisation : il s'agit d'une oxydation de surface faite par électrolyse, et destinée à avoir une couche d'oxyde plus épaisse. Cela renforce la protection contre la corrosion et durcit la surface (anodisation dite « dure ») ; par ailleurs, la surface obtenue est poreuse et peut être teintée (anodisation esthétique) [24].

On distingue deux types d'alliage : les alliages pour corroyage (laminage, tréfilage), et les alliages de fonderie, ou fonte d'aluminium [24].

III.4.2. Les céramiques et les verres

Les matériaux minéraux ou céramiques – liaison ionique et liaison covalente : Ce sont les matériaux inorganiques les plus anciens et les plus couramment utilisés en Génie Civil (pierre, brique, verre...), souvent les mettre en œuvre à l'état pâteux. Ils ne deviennent fragiles qu'après la prise. Ces matériaux sont caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires), résistants à l'abrasion, mais pas aux chocs, moins denses que les métaux, isolants thermique et électrique [26].

Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. généralement poreux et fragiles.

III.4.3. Les polymères

Les matériaux organiques ou polymères organiques – liaison covalente et liaison secondaire : matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone, matériaux faciles à mettre en forme, ils supportent rarement des températures supérieures à 200 °C. Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétique : bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc. Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique [27].

Ces matériaux sont récents. Ce sont de larges macromolécules organiques, comme par exemple le polyéthylène (C_2H_4)_n dont le nombre de monomères *n* varie entre 100 et 1000 et la masse molaire de $M=100..10^3$ kg/mol. Les matières plastiques ont l'avantage de pouvoir être mises en forme par déformation plastique ou injection à l'état liquide. Elles peuvent être thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ou thermodurcissables. Elles sont en général mauvais conducteurs thermique et électrique et très peu denses.

III.4.4. Les matériaux composites

Les matériaux composites sont des assemblages (des combinaisons hétérogènes) d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles, mais dont la structure est définie en fonction de l'application : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone, contreplaqué, béton, béton armé. Ou bien se développe naturellement sous l'effet des sollicitations mécaniques ou thermique (ex. bois : fibres de lignine dans une matrice de cellulose, ou métaux texturés par déformation plastique intense) [24].

Le tableau III.3. Présente quelques ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux.

Tableau III.3. Ordres de grandeurs de propriétés selon la famille de matériau [24]

Propriété	Métaux	Céramiques	Polymères
Densité ρ [kg/m ³]	8000 (2000..22000)	4000 (2000..18000)	1000 (900..2000)
Dilatation thermique α [1/K]	$10 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $100 \cdot 10^{-6}$)	$3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $20 \cdot 10^{-6}$)	$100 \cdot 10^{-6}$ ($50 \cdot 10^{-6}$.. $500 \cdot 10^{-6}$)
Capacité calorifique c_p [J/(kg·K)]	500 (100..1000)	900 (500..1000)	1500 (1000..3000)
Conductivité thermique k [W/(m·K)]	100 (10.. 500)	1 (0.1.. 20)	1 (0.1.. 20)
Température de fusion ou de transition vitreuse T_m [K]	1000 (250..3700)	2000 (1000..4000)	400 (350..600)
Module d'élasticité, module de Young E [GPa]	200 (20..400)	200 (100..500)	1 (10^{-3} ..10)
Coefficient de Poisson	0.3 (0.25..0.35)	0.25 (0.2..0.3)	0.4 (0.3..0.5)
Contrainte à rupture σ_Y [MPa]	500 (100..3500)	100 (10..400 tract.) (50..5000 compr.)	50 (10..150 tract.) (10..350 compr.)
Dureté	Moyenne	Haute	Basse
Usinabilité	Bonne	Très mauvaise	Très Bonne
Résistance à l'impact	Bonne	Mauvaise	Très Mauvaise
Résistance au fluage thermique	Moyenne	Excellente	Très mauvaise
Conductivité électrique	Haute	Très faible	Très faible
Résistance à la corrosion	Moyenne	Excellente	Bonne

III.5. Propriétés mécaniques des matériaux

Les propriétés mécaniques sont définies par les propriétés des matériaux qui reflètent le mécanisme de leur interaction et de leur interaction avec les charges et les forces qui leur sont appliquées.

Elles permettent de déterminer la durée de vie du matériau et son efficacité tout au long de la phase de post-fabrication. Les propriétés mécaniques permettent également de classer les matériaux et de donner leur identité. Lorsque les propriétés mécaniques des matériaux sont connues pour être variables et non fixes, car elles changent en fonction de la situation environnante.

Par exemple, un changement de température ambiante entraîne une modification des propriétés des matériaux mécaniques.

Par conséquent, les essais de caractérisation sont effectués à une certaine température standard [28].

Les propriétés mécaniques des matériaux sont les suivantes :

Durabilité : C'est la capacité d'un matériau à résister et à résister aux contraintes et aux chocs.

L'élasticité : (en anglais : ductilité) est la capacité d'un matériau à s'étirer lorsqu'il est affecté par une force de tension, formant des fils ou des cordes minces.

Dureté : c'est la capacité d'un matériau à résister et à résister aux rayures ou à la pénétration.

Déformation : est le taux de changement des dimensions et de la forme d'une substance en fonction de la quantité de stress qui lui est exposée.

La charge dynamique : est la capacité d'un matériau à résister à une certaine quantité de forces qui lui sont appliquées instantanément ou de manière répétée.

Fatigue : La dégradation et la déformation d'un matériau après une application répétée d'une grosseur.

Soumission : La résistance est la capacité d'un matériau à résister à la force qui lui est appliquée avant que des changements ne se produisent.

Fragilité : (fragilité) est la capacité d'un matériau à se casser lorsqu'il est soumis à une contrainte sans passer par la phase d'expansion.

La plasticité : est le changement permanent et continu de la forme d'une substance après l'application d'une force.

La rigidité : est la résistance du matériau à la flexion.

Conformité : la malléabilité est la quantité de réponse d'une substance lorsqu'elle est soumise à une pression ou à un choc dessus.

Des études, ont montré que ces matériaux :

- Matériaux métalliques (bons conducteurs électriques et thermiques, dureté et rigidité élevées, déformation plastique importante) ;
- Matériaux céramiques (durs et fragiles, résistances mécaniques et thermiques élevées, isolants thermiques et électriques) ;
- Matériaux polymères (isolants thermiques et électriques, légers et faciles mettre en œuvre, peu rigides, utilisation à des températures inférieures à 200 °C) ;
- Matériaux composites (combinaison de matériaux de familles différentes, propriétés améliorées par rapport aux propriétés de chaque matériau).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les différents matériaux qui composent l'éolienne, où nous avons conclu que la pale est en matériaux composites, et aussi la nacelle est faite dans tous les cas des mêmes matériaux fabriqués pour le mât ou des matériaux composites tels que La pale à partir de laquelle la pale est fabriquée. Le mât est en acier ou en fonte ADI, qui fait l'objet d'étude pour cette mémoire.

Chapitre IV

Résultats numériques

et

Interprétation

IV.1. Introduction

Dans cette étude on a exploité les propriétés structurales et mécaniques à partir des résultats déjà étudiés à partir de la bibliographie. Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique ANSYS [30], qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis, parmi les plus utilisés dans le monde.

Le code «ANSYS» comprend plusieurs composantes. Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (type d'élément, conditions aux limites, tracés etc.).

Dans cette étude on utilise la composantes sont : pour désigne a la géométrie Nous avons utilisé des logiciels commerciaux «solidworks», pour la génération de maillage et l'application de force et fixation et condition inertiel dans la composant **M** (Mechanical) et pour entre les conditions aux limites et conditions initiale et défieront paramètre de problème, et la simulation solide fluide avec affiche le résultat dans le composant **FLUENT**.

Nous on utilise la programme **ANSYS** pour la simule chaque cas étude de parte solide fluide et simule la parte de solide étude statique et Modal.

IV.2. Caractéristiques du matériau étudié

IV.2.1. Composition chimique

L'analyse chimique de la fonte utilisée est déterminée à l'aide d'un spectromètre à fluorescence X. Les résultats de cette analyse sont représentés dans le tableau 1 (en pourcentage massique) [31].

Tableau IV.1. Composition chimique de la fonte expérimentée

Fonte	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Mo, %	Cr, %	V, %
teneur	3.50	2.175	0.930	0.349	0.211	0.055	0.108

IV.2.2. Propriétés structurelle

IV.2.2.1. Diffraction des rayons X

Un diffractomètre de type "BRUKER D8 ADVANCE" est utilisé avec une anode en cuivre de longueur d'onde 0.15406 nm avec un voltage de 40 kV et un courant de 40 mA. Pour l'analyse quantitative des spectres de diffraction, le logiciel High Score est utilisé [31].

L'analyse du spectre de diffraction des rayons X obtenu permet d'identifier les différentes phases des fontes ADI à savoir l'austénite et la ferrite. L'analyse quantitative des phases dans la fonte est présentée par la (Figure IV.1). Ce spectre montre uniquement les différents pics de ferrite dont le pourcentage est de 97.0% [31].

La figure. IV.1. Présente Spectre de diffraction X de la fonte étudiée.

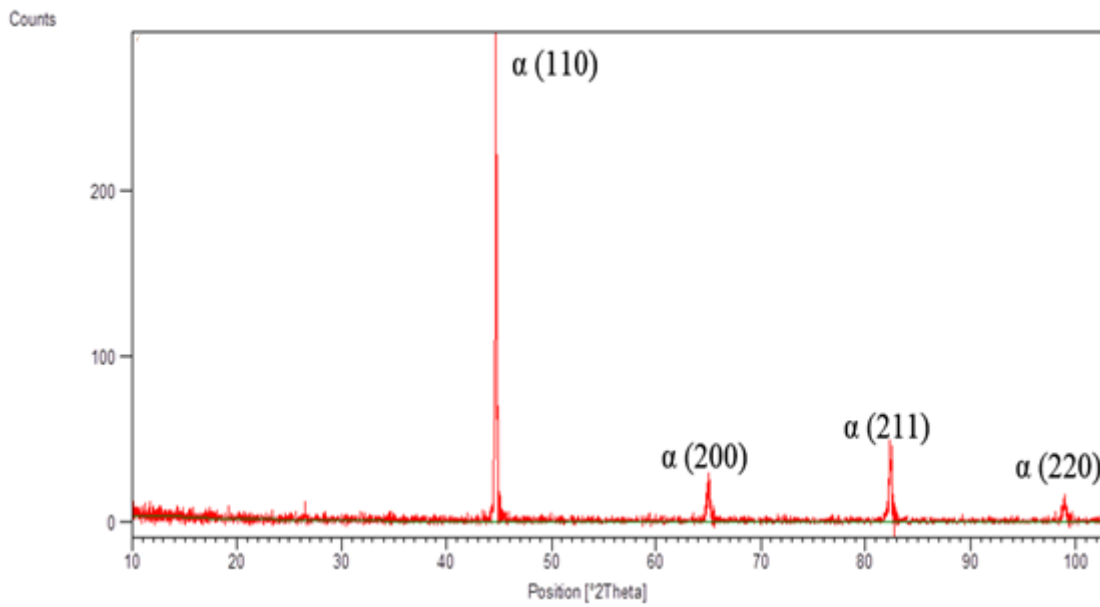


Figure IV.1. Spectre de diffraction X de la fonte étudiée [31]

IV.2.2.2. Structure métallographique

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les structures métallographiques obtenues après polissage sur un jeu de papier émeri de différente granulométrie par la méthode classique. Après polissage, tous les échantillons sont attaqués au natal à 4 %. L'étude métallographique est réalisée sur un microscope optique équipé d'une caméra de type "LEICA" relié à un microordinateur [31].

La structure de la fonte alliée à l'état brut de coulée (Figure IV.2.a) est formée de ferrite et de perlite où la quantité de perlite est plus élevée que celle de ferrite. Ceci est dû à l'action des éléments ajoutés sur la formation de la structure où le Mn (0.5 %) et le Ni (0.25 %), éléments fortement gamma gènes, ont agi d'une manière plus forte sur la transformation de l'austénite que les éléments alpha gènes, Mo (0.2 %) et V (0.1 %). L'introduction de ces éléments a conduit à la formation d'une structure fine.

A l'état traité, la structure de cette fonte (Figure IV.2.b) est formée de ferrite bain tique en grande quantité avec la présence d'austénite supérieure sous forme de petites plages allongées et dispersées dans la ferrite bain tique [31].

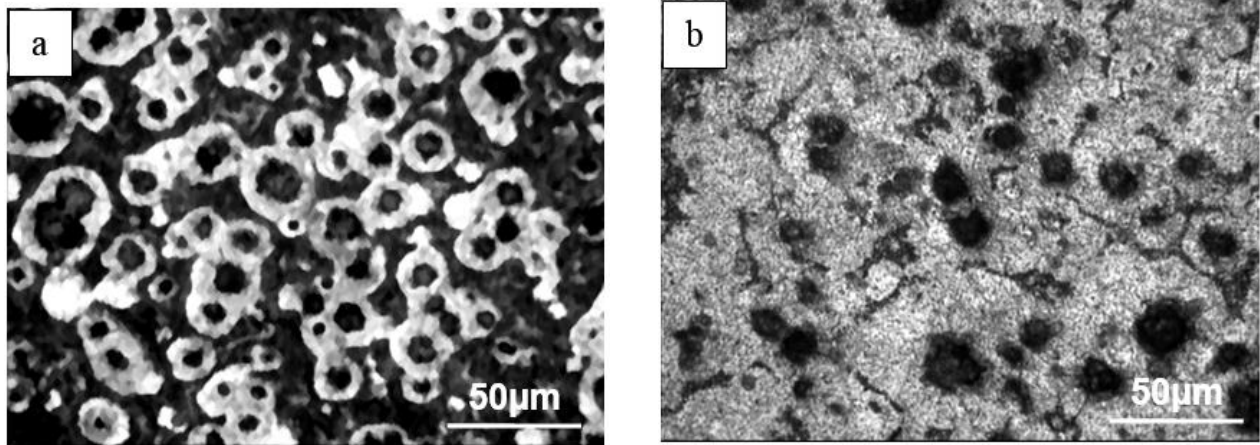


Figure IV.2. Microstructure de la fonte alliée ; a : à l'état brut de coulée, b : à l'état traité [31].

IV.2.3. Propriétés mécaniques

La méthode utilisée pour déterminer la dureté est HRC. La détermination de la résistance à la traction du matériau étudié est réalisée sur une machine de traction de type "ZWICK/ROELL Z100" à une vitesse de $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et à une température de 20°C.

Le résultat de dureté obtenue 29 HRC (Tableau IV.2) montre l'effet certain des éléments d'alliages sur la fonte élaborée [31].

La limite élastique de la fonte est de 601 MPa. La résistance à la traction de la fonte est de 756 MPa. Cet accroissement est lié au durcissement structural provoqué par la dissolution des éléments ajoutés dans la solution solide de la fonte. Il est remarqué que l'allongement de la fonte est 3.6. Les résultats de ces essais sont présentés dans le tableau IV.2 Le module de Young est de 6.47 [31].

Tableau IV.2. Composition chimique de la fonte expérimentée [31]

propriétés	Module de Yong	Limite élastique (MPa)	Resistance à la traction(MPa)	allongement (MPa)	dureté (HRC)
valeurs	6.47	601	756	3.6	29

IV.3. SOLIDWORKSET M (Mechanical)

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en CFD (Computational Fluid Dynamics). Il est utilisé pour construire une géométrie simple ou complexe dans **SOLIDWORKS**.

Les options de génération de maillage de **M** offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposée en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon **M** génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

Dans le présent travail, **SOLIDWORKS** et **M** offre cette possibilité de définir un mat d'éolienne, créer un volume représentant le domaine d'étude et générer son maillage.

IV.3.1. Géométries du mât d'éolienne

Les configurations géométriques traitées sont présentées ci-dessous. L'écoulement autour d'un mat isolé 3D, le mat, de la dimension Figure (IV.3), a été simulé à l'aide du code Fluent. Le domaine de calcul est une surface de dimensions 40000mm x50000mm x20000mm avec une entrée, une sortie et 4 cotés latéraux, Figure (IV.4).

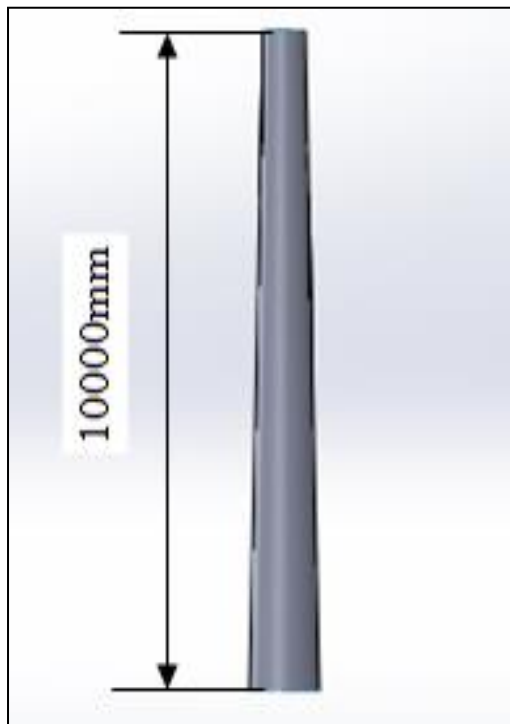


Figure IV.3. Dimension du mât 3D

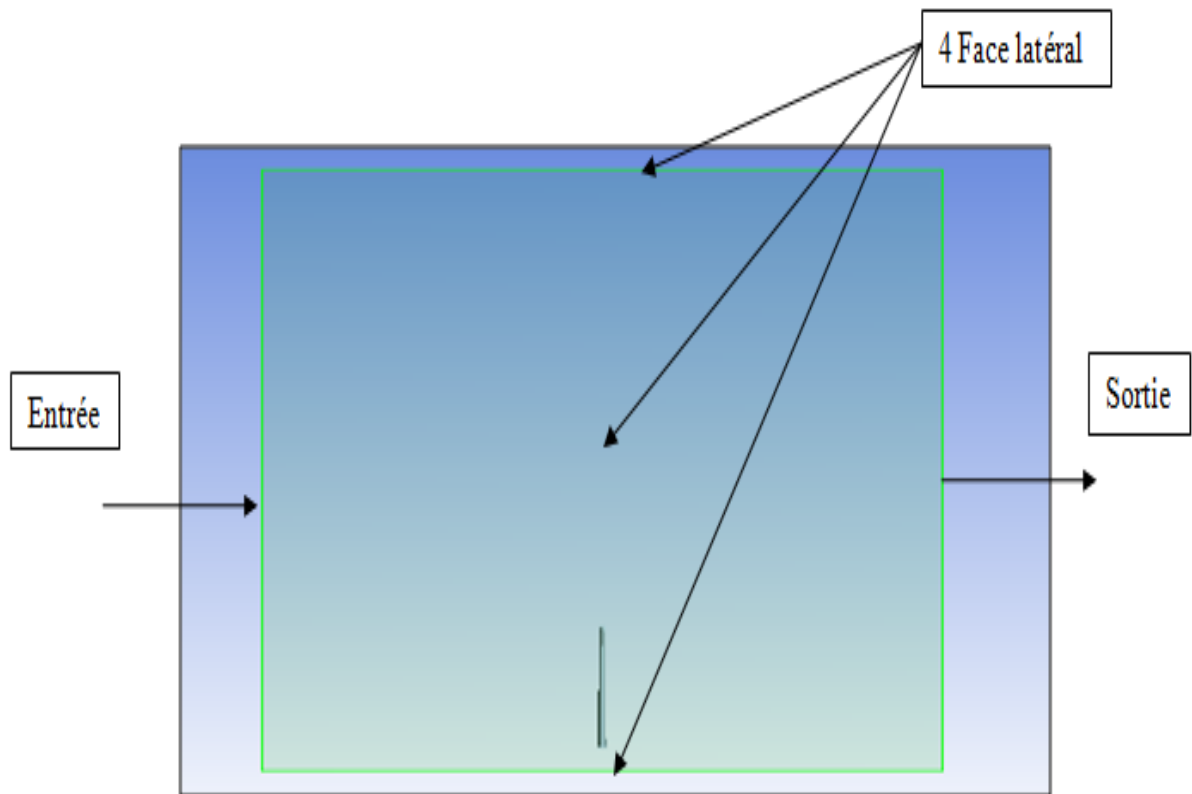


Figure IV.4. Domine de travail simulation 3D

IV.3.2. Maillage

Avoir une meilleure précision des résultats par le solveur FLUENT nécessite un maillage suffisamment raffiné de sorte que la solution soit indépendante du maillage. Un test de l'effet du maillage sur la solution a été effectué en utilisant différents nombres de cellules.

Il a été opté pour un maillage quadrilatéral dans le cas du mat isolé 3D (Figure III.5).

Les nombres de Maillage quadrilatéral mat isolé 3D est : **54264** Nœud cellules et **49075** éléments.

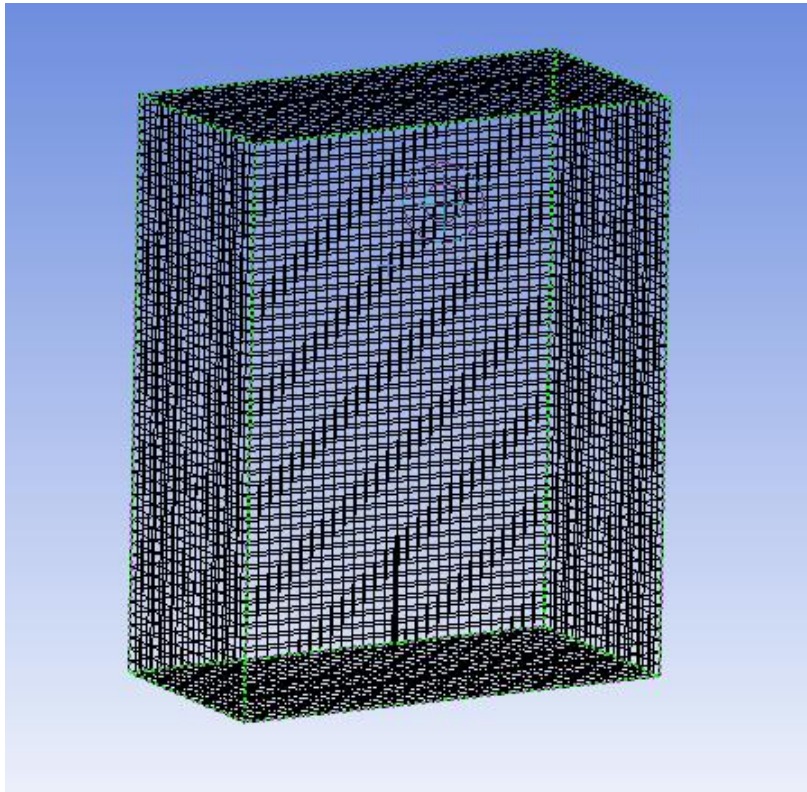


Figure IV.5. Maillage du mât isolé 3D

IV.4. FLUENT

FLUENT est un programme de simulation numérique des écoulements de fluide compressibles, incompressibles, stationnaires ou instationnaires impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les réactions chimiques, les écoulements dans les machines tournantes, moteurs thermiques, et ce pour des géométries industrielles très complexes.

FLUENT permet aussi le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cette capacité est particulièrement utile surtout dans les régions à gradients importants comme les couches limites ou zone de mélange. Enfin toutes les fonctions exigées pour calculer une solution et pour manifester les résultats sont accessibles par une interface pilotée par le menu.

IV.4.1. Choix des types de frontières

Les types de frontières entourant le domaine et considérés dans chaque cas étudié dans ce travail sont résumés dans le tableau. IV.3 ci-dessous.

Tableau IV.3. Types De Frontières

Géométries	mat isolé 3D
Région	
Entrée	Vélocité in let
Sortie	Out flow
Paroi	Wall

IV.4.2. Les conditions aux limites

Elles dépendent du type de phénomène physique à étudier, permettant d'identifier les positions des frontières (entrées, sorties, symétrie.....) et spécifier les variables aux frontières (vitesse, pression,.....).

- le fluide considéré est de l'air, le nombre de mach à l'entrée est égal à 0,1.
- Le nombre de Reynolds est de $2,4 \cdot 10^4$
- les conditions d'entrée de vitesse : Nous avons choisi la région de EL OUED avec une vitesse maximale de 31m/s de : 28/01/2020
- A la sortie on a imposé le rapport de débit entrant au débit sortant égal à 1 et Le code considère une condition de régime établi :

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \frac{\partial K}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

IV.4.3. Choix des schémas de discrétisation

Les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail sont résumés comme suit (tableau. IV.4) :

Tableau. IV.4. Les schémas de discrétisation

Pression	Standard
Quantité de mouvement	Second ordre up Wind
Couplage vitesse-pression	Simple
Energie cinétique turbulente	Second ordre up Wind
Taux de dissipation	Second ordre up Wind

IV.4.4. Sous relaxation

Lors de la résolution, le contrôle du changement du scalaire Φ est nécessaire. La sous relaxation réduit justement ce changement pendant chaque itération. La nouvelle valeur dépend donc de la valeur précédente et de l'écart entre les deux : $\Phi = \Phi_{old} + \alpha \Delta \Phi$

Dans le présent travail, les facteurs de sous relaxation sont présentés dans le tableau. IV.5. :

Tableau. IV.5. les facteurs de sous relaxation

Pression	Quantité de mouvement	Energie cinétique turbulente k	Taux de Dissipation
0.3	0.7	0.8	0.8

IV.5. Résultats et interprétation

L'objectif de cette étude est de déterminer les effets de la vitesse sur la surface du mat et représente les différents paramètres dans le cas statique, avec détermination des fréquences et les modes propre de mat.

IV.5.1. analyse dynamique de solide/fluide

Détermine dans ce résultat l'effet de la vitesse sur la surface de mat et représente l'effet de géomètre sur l'écoulement de fluide, en plus nous offrons les graphs de moment et coefficient de portance et traine, et la pression.

IV.5.1.1. l'effet de vitesse

La figure IV.6. Présente les contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s).

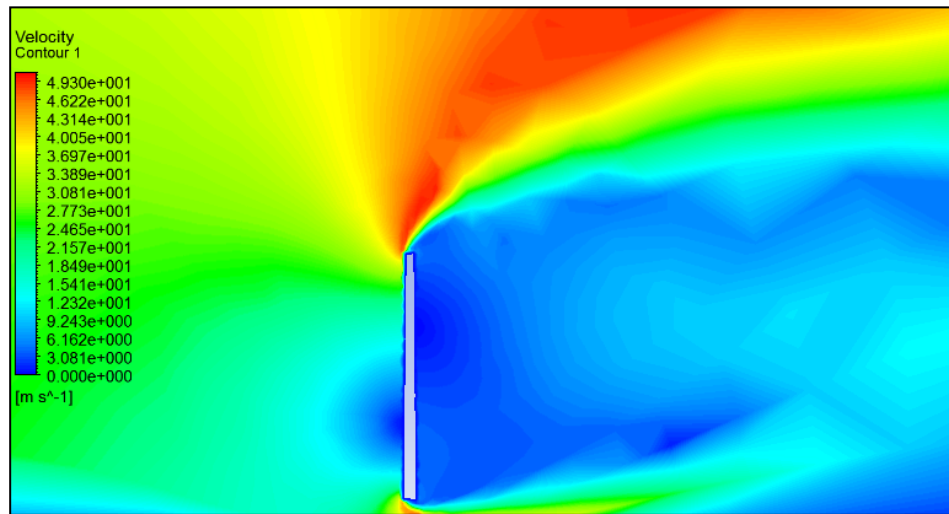


Figure IV.6. Contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s)

La Figure IV.7. présente les vecteurs de la grandeur de vitesse résultante.

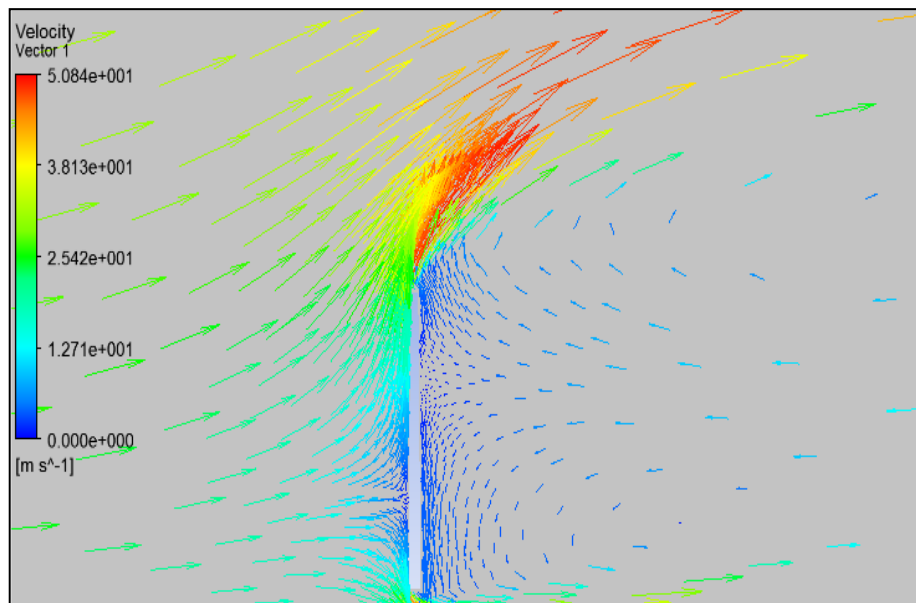


Figure IV.7. Vecteurs de la grandeur de vitesse résultante

Dans cette simulation, nous observons la loi de Bernoulli est vérifiée, le effet de vitesse sur la géomètre du mât et celle qui a transformé à pression (Figure .IV.8.)

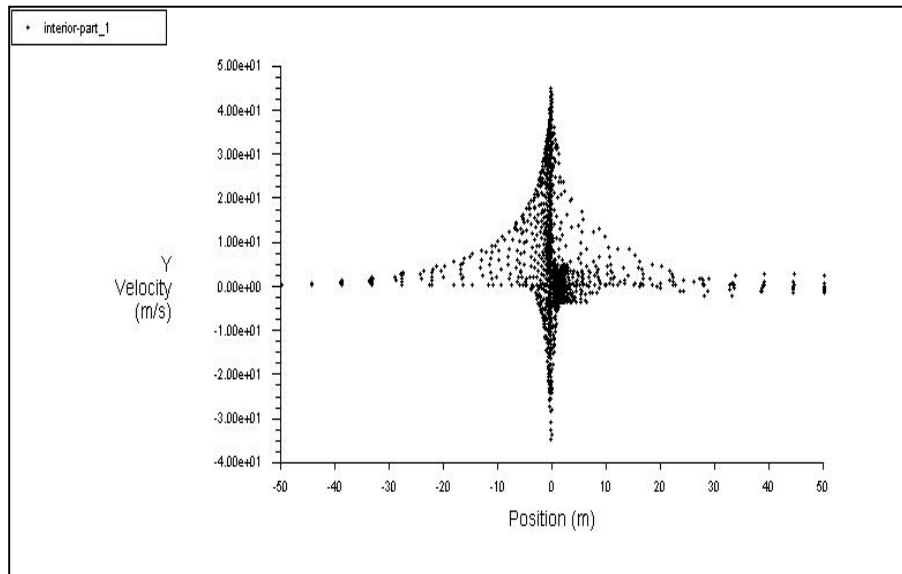


Figure .IV.8. Effet de mât sur le volume interné

Dans ce diagramme nous notons l'effet de la géométrie du mat sur la vitesse du milieu extérieur où nous remarquons avant que le mat la vitesse est constant, m'en étant effectué par lieu au mat et essayons de revenir à la stabilité après.

IV.5.1.2. Effet de la pression sur le mât

La figure IV.9. Présente les contours de pression totale (Pa).

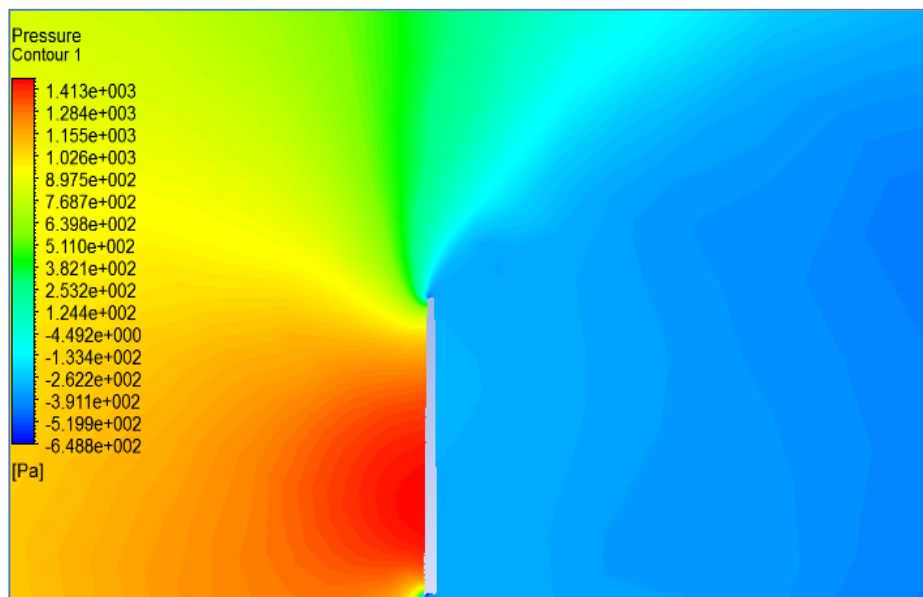


Figure IV.9. Contours de pression totale (Pa)

La figure IV.10 représente l'effet de la vitesse sur la surface de la mat et transformation la vitesse vers pression une grande application de pression sur La partie inférieure de la mât.

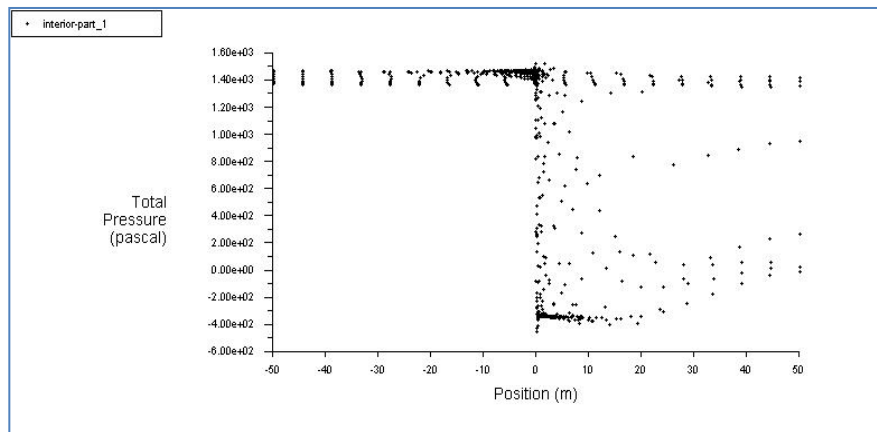
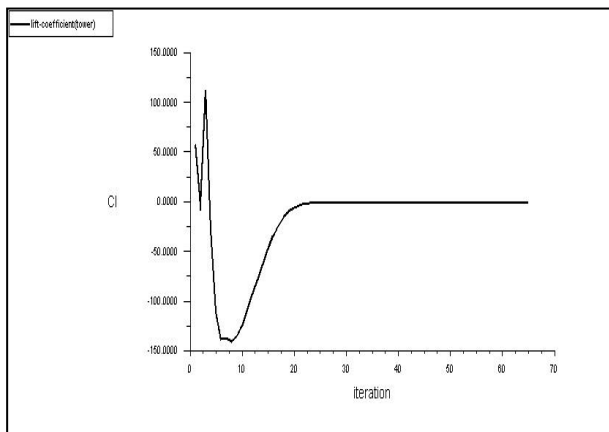
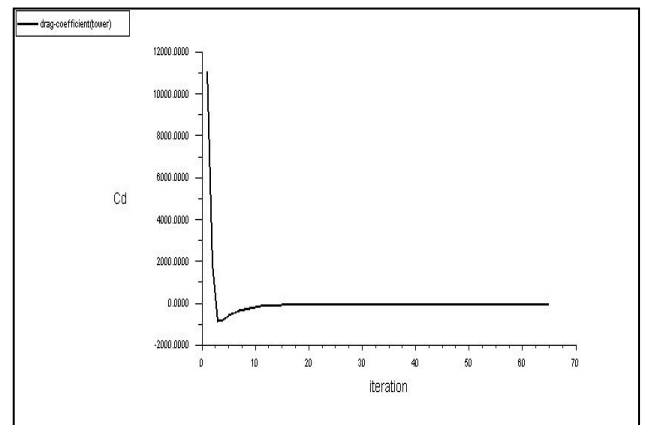


Figure IV.10. L'effet de pression totale sur la longueur de mât

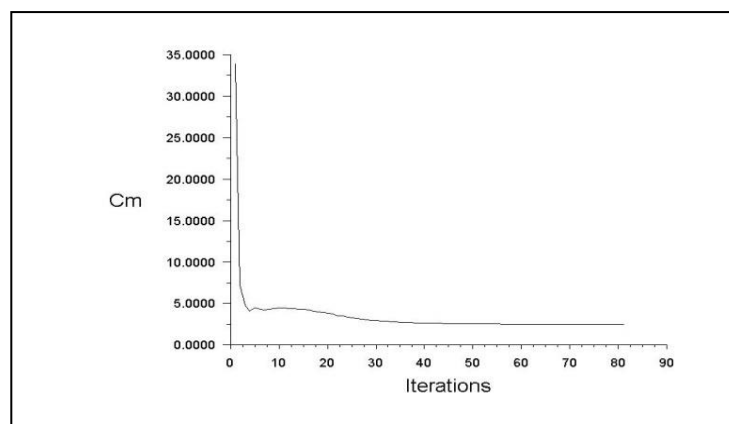
La Figure. IV.11. Présente Les valeurs C_d , C_l et C_m .



(a)



(b)



(c)

Figure IV.11. Les valeurs C_d , C_l et C_m

Le Tableau IV.6. Présente les valeurs de coefficients de trainée (C_d), de portance (C_l) et de moment (C_m).

Tableau IV.6. Valeurs des coefficients de trainée, de portance et de moment

	C_d	C_l	C_m
Valeur	0.92	1.02	2.48

IV.5.2. Analyse modale

IV.5.2.1. les fréquences naturelles du mât

Les fréquences du mat sont présentées dans les tableaux ci-dessous (Tableau IV.7)

Tableau IV.7. Les fréquences naturelles du mat.

Numéro de mode	Fréquence [Hz] Font (ADI)
1	6.1579
2	6.1658
3	26.517
4	26.582
5	65.394
6	65.459

Les fréquences de matériau fonte ADI minimal par rapport à l'autre matériau isotrope grand fréquences.

La figure IV.12. Présente la fréquence en fonction du numéro de mode.

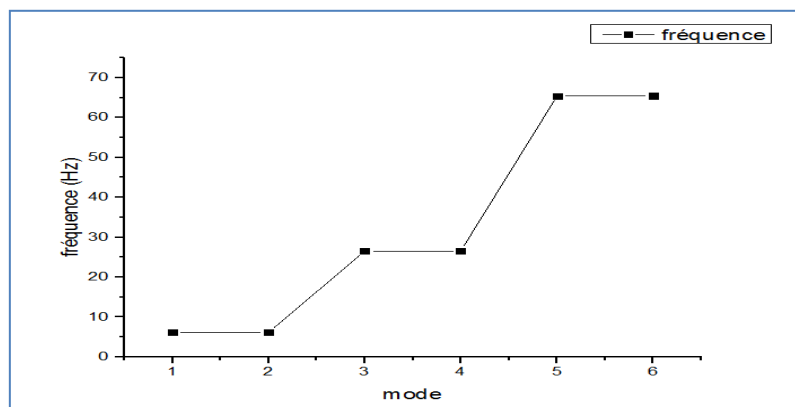


Figure IV.12. La fréquence en fonction du numéro de mode

IV.5.2.2. Les déformées modales

Les Figures (IV.13, 14, 15, 16, 17, 18) suivantes présentent quelque déformées modales.

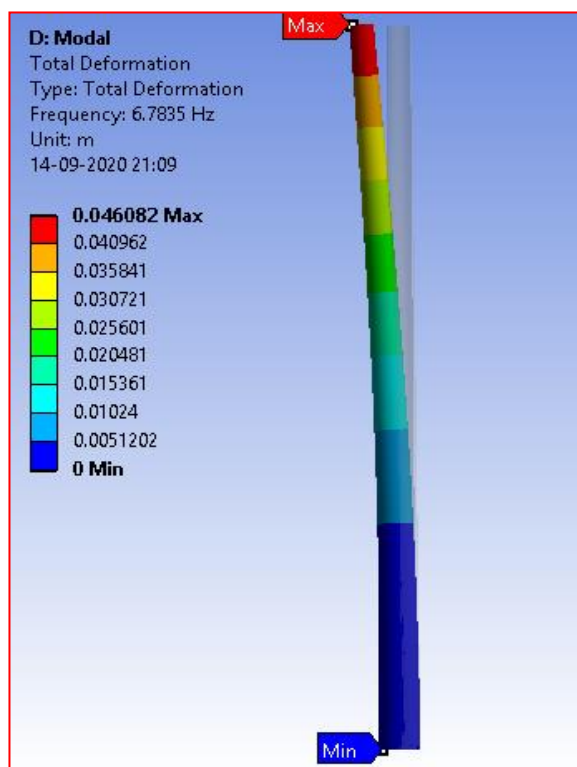


Figure IV.13. Mode de 1^{ère} déformée

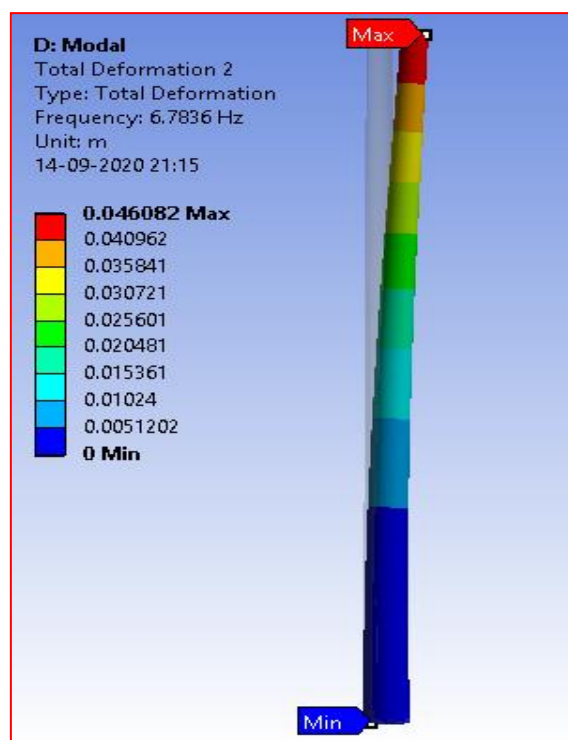
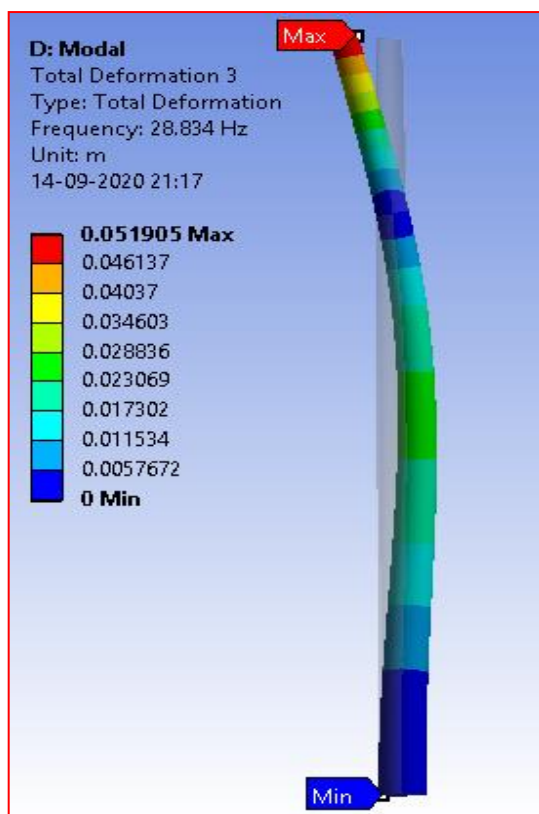
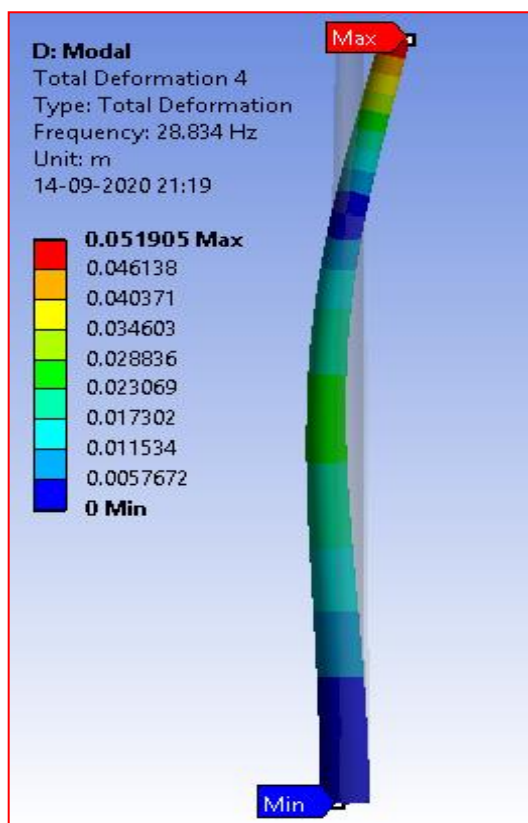
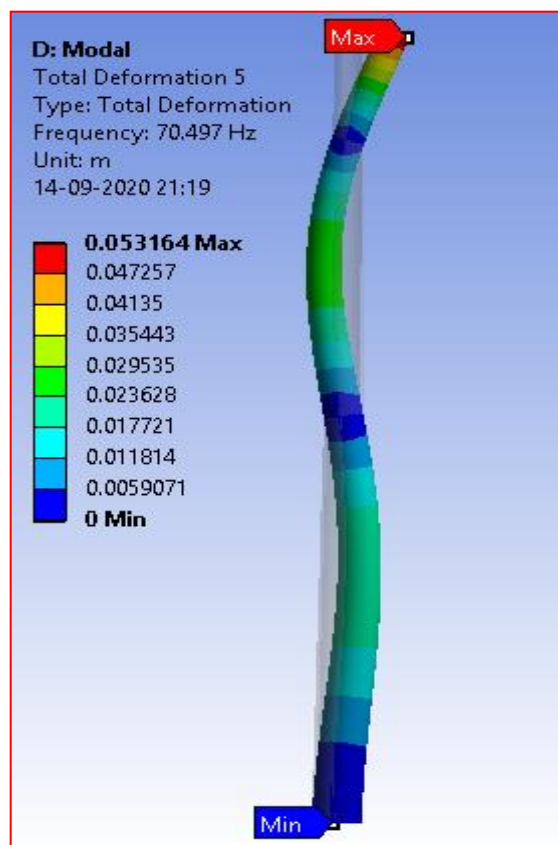
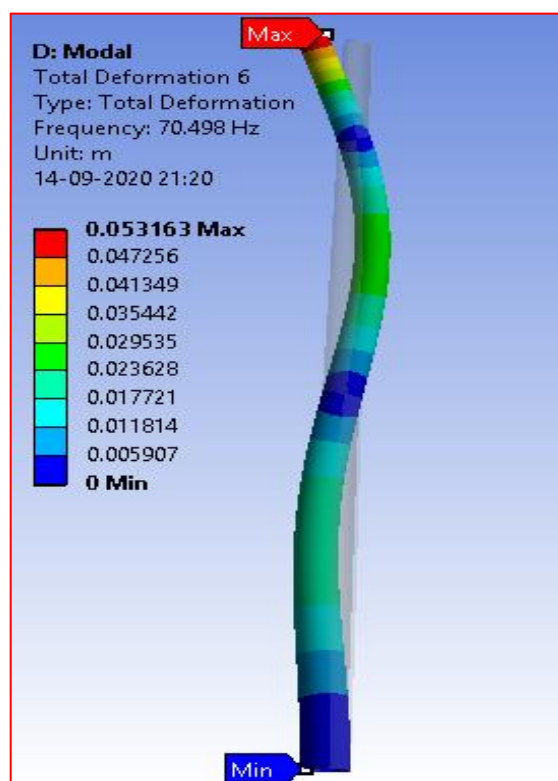


Figure IV. 14. Mode de 2^{ème} déformée

Figure IV.15. Mode de 3^{ème} déforméeFigure IV.16. Mode de 4^{ème} déformée

Figure IV.17. Mode de 5^{ème} déforméeFigure IV.18. Mode de 6^{ème} déformée

Le tableau IV.8. suivant présente les déformations Max du mât.

Tableau IV.8. Les déformations Max du mat

Numéro de mode	Déformation Max [m] Font ADI
1	0.046082
2	0.046082
3	0.051905
4	0.051905
5	0.053164
6	0.053163

La figure IV.19. suivante présent courbe de max déformation du mât.

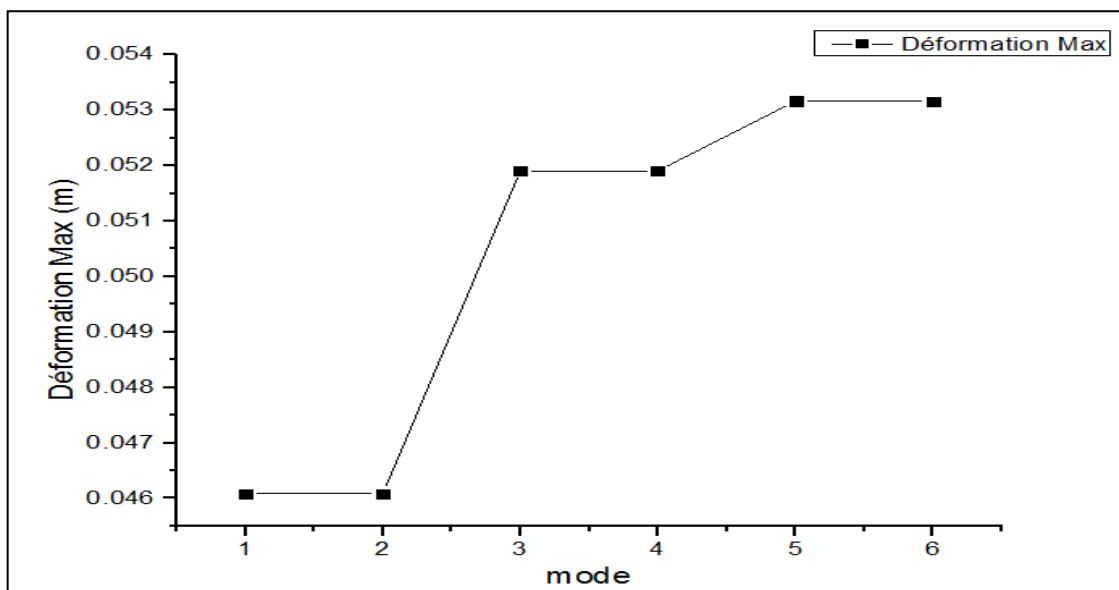


Figure IV.19. Les Max déformation du mât

IV.5.3. Analyse statique

La force aérodynamique applique sur la géomètre du mat Importé à partir d'une simulation réalisée par CFD.

La figure IV.20. Suivante présente la position de force aérodynamique sur le mât.

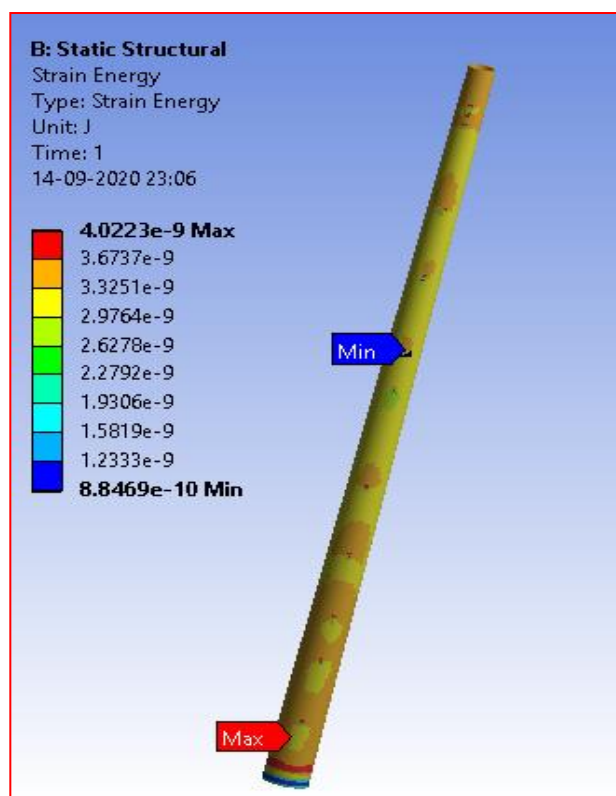
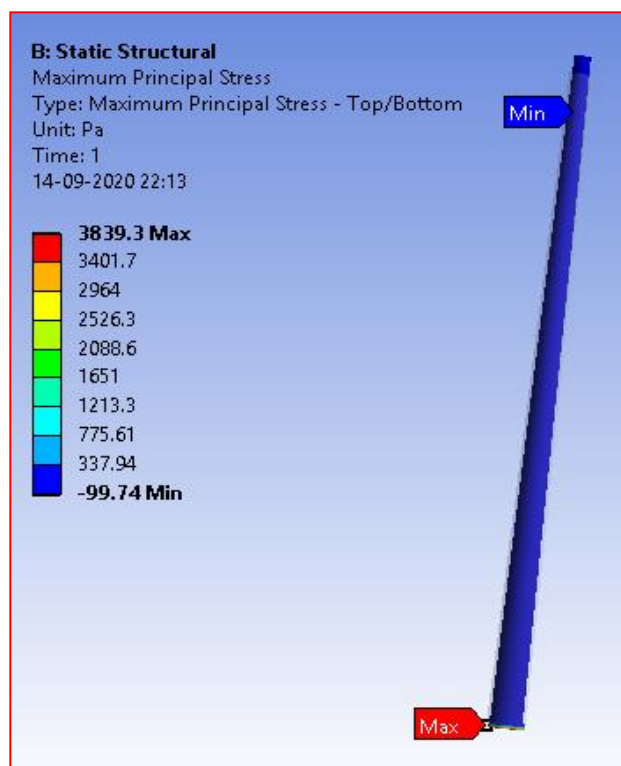


Figure IV.20. Position de force aérodynamique sur le mât

IV.5.3.1. Les contraintes du mât

La figure IV.21. suivante présente la contrainte Max du mât.



Figures IV.21. La contrainte Max du mât

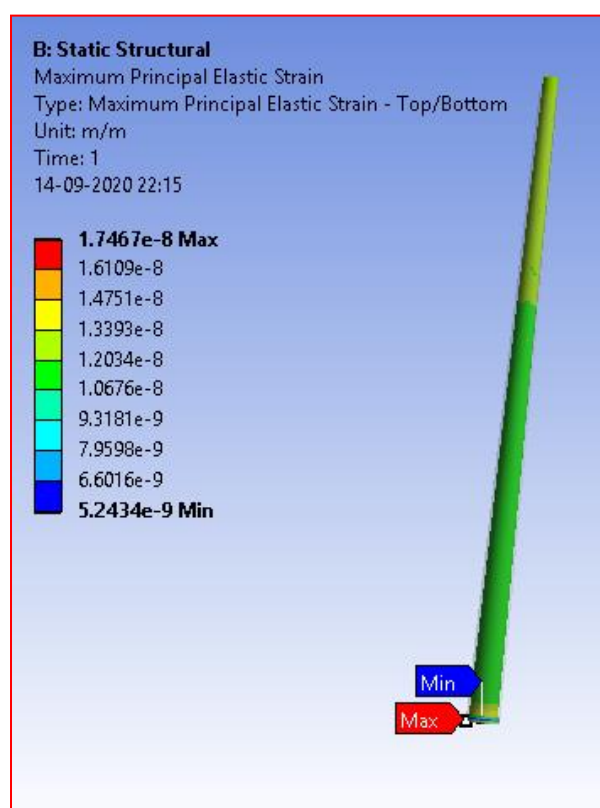
Le tableau IV.9. suivant présente la valeur max de contrainte.

Tableau IV.9. Valeur max de contrainte

La contrainte Max	3839.3 [Pa]
-------------------	-------------

IV.5.3.2. Les déformation du mât

La figure IV.22. suivante présente la déformation Max du mât.



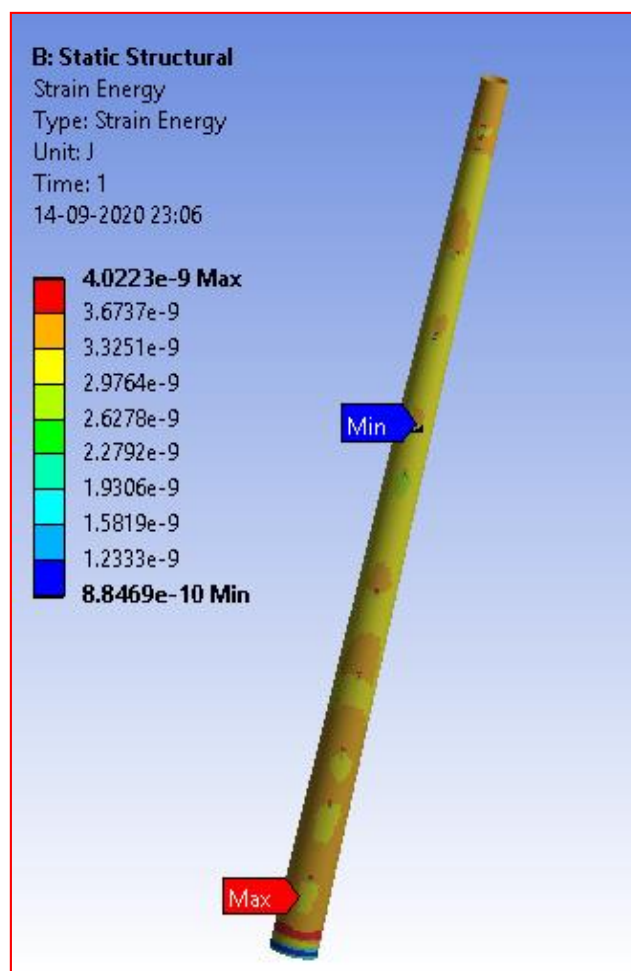
Figures IV.22. La déformation Max du mât

Le tableau IV.10. suivant présente la valeur max de déformation du mât.

Tableau IV.10. Valeur max de déformation

la déformation Max	1.746e-8
--------------------	----------

La figure IV.23. suivante présente l'énergie de déformation du mât.



Figures IV.23. L'énergie de déformation

Le tableau IV.11. suivant présente la valeur max d'énergie de déformation.

Tableau IV.11. Valeur max d'énergie de déformation

l'énergie de déformation Max	4.0223e-9[J]
------------------------------	--------------

IV.5.3.3. Déplacement de la mât

Les figures suivant (VI.24, VI.25, VI.26) présentent le déplacement du mat suivant x, y, z.

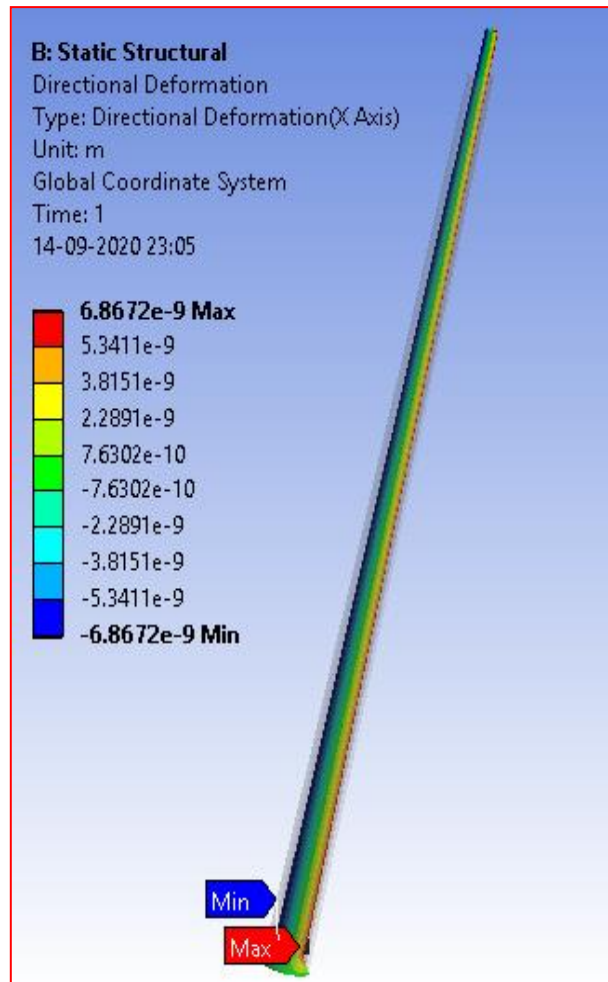
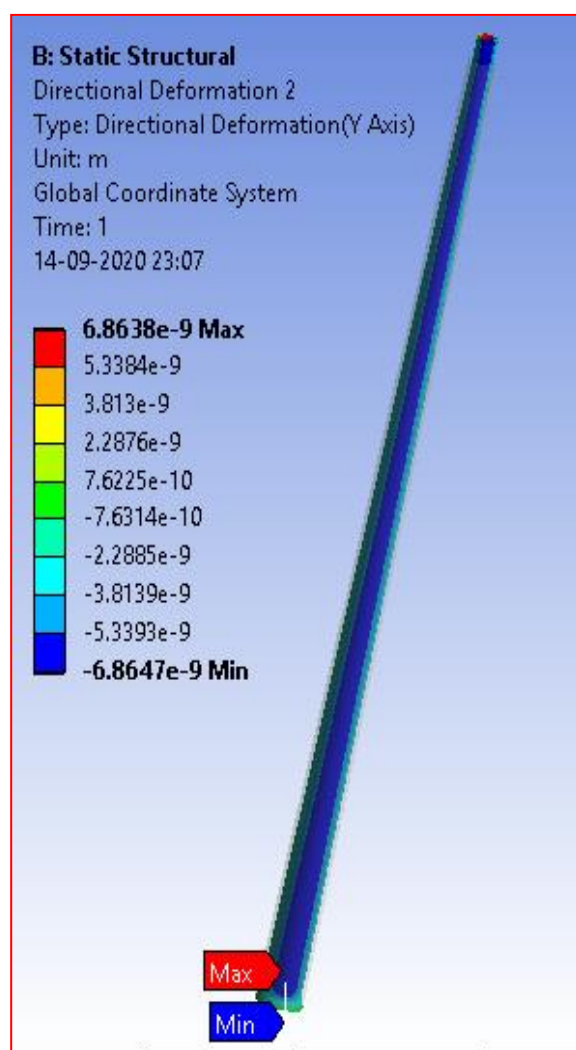


Figure IV.24. Déplacement suivant x

Le tableau IV.12. suivant présente la valeur max de déplacement suivant X

Tableau IV.12. Valeur max de déplacement suivant X

$D_{\max}(\text{m})$	6.867e-9
----------------------	----------

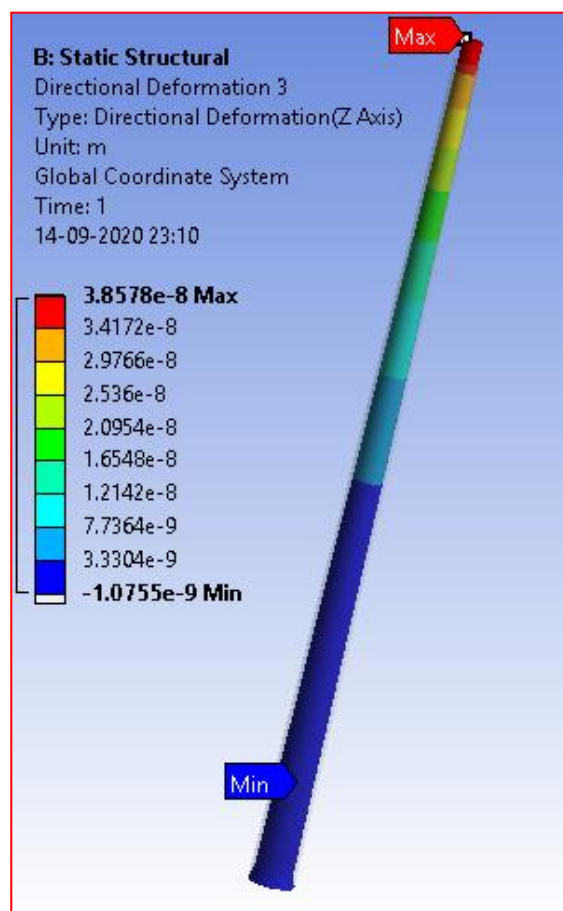


Figures IV.25. Déplacement suivant Y

Le tableau IV.13. suivant présente la valeur max de déplacement suivant Y

Tableau IV.13. Valeur max de déplacement suivant Y

$D_{\max}(m)$	6.867e-9
---------------	----------



Figures IV.26. Déplacement suivant Z

Le tableau IV.14. suivant présente la valeur max de déplacement suivant Z

Tableau IV.14. Valeur max de déplacement suivant Z

$D_{\max}(\text{m})$	3.8578e-8
----------------------	-----------

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a représenté les résultats numériques de l'effet de vitesse de vent sur la géométrie du mât d'éolienne obtenus par la méthode des éléments finis, les différents modes du mât et les distributions de contraintes dans son corps sont représentés dans le but de déterminer les zones de fonctionnement critique du mât. Le modèle éléments finis du mât a été conçu à partir d'une géométrie bien déterminée. Une extraction efficace des fréquences et des déformées modales du modèle a été effectuée du mât.

L'injection des charges aérodynamiques dans le modèle éléments finis de la mat permet de déterminer les fréquences et les contraintes et déformation des modes du mat en battement, traînée et torsion pour les matériaux font ADI. Les résultats montrent que les différentes sollicitations et les déplacements maximaux sont localisés à l'extrémité du mat.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire se rapporte à l'évaluation des propriétés structurales et mécaniques d'un matériau métallique (fonte ADI) destiné à l'industrie d'éolienne.

L'étude aérodynamique des Poutre dans lequel les forces aérodynamiques sont calculées. Afin de voir le comportement du mat d'éolienne on a développé un modèle éléments finis du mat pour extraire ses fréquences et modes propres, les résultats montrent que l'extrémité du mat est la zone la plus sollicitée par les déformations.

Pour mieux interpréter les phénomènes qui gèrent le comportement dynamique du mat d'éolienne, une modélisation est proposée via des approches analytiques et numériques, les calculs des différentes énergies et travaux virtuels du mat ont été développés. Aussi nous avons développé un modèle simple qui a été obtenu à l'aide de la méthode d'Hamilton, il est utilisé pour mettre en évidence les phénomènes de base en raison de sa simplicité, mais l'inconvénient de ce modèle c'est qu'il considère le mat comme poutre rigide.

La méthode des éléments finis est employée pour modéliser les systèmes réels, car elle est précise, la précision de calcul augment avec le raffinement de maillage, mais ce dernier entraîne des coûts de calculs additionnels très importants.

Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique ANSYS, qui est l'un des codes de calcul basé sur la méthode des éléments finis.

Dans notre analyse, on a utilisé l'analyse Structural dans ANSYS Structural, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique des solides et Fluent qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique de fluide. Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et en trois dimensions.

Au futur, on souhaite pour approfondir la recherche sur ce sujet à considérer la différence entre le défient type de géométrie et la force aérodynamique non linéaire distribuée sur la surface de défient mat sans oublier l'écoulement de l'air, cela ouvre la voie à la continuation de cette recherche dans le domaine d'aérodynamique du mât d'éolienne.

Références Bibliographiques

- [1] K. FERKOUS, "Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri Constantine, 2009.
- [2] E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2^{ème}ed. Springer, Berlin, Heidelberg (Allemande), 2006.
- [3] D. A. Spera, Wind turbine technology, 2^{ème} ed.: Asme Press, 2009.
- [4] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained, 2^{ème} ed.: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] I. Graham, L'énergie éolienne : les énergies en questions, 2000.
- [6] B. Lester and R. Brown, "Le développement de l'éolien dans le monde," France Energies éolienne, Global Wind Energy Council (GWEC), 2011.
- [7] Agli and maklid, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.
- [8] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entrainement d'une pompe à piston simple Effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [9] T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6^{ème} ed. Cepadues, Collection Fact, 2010.
- [10] D. A. Spera, Wind turbine technology, 2^{ème} ed.: ASME Press, 2009.
- [11] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained, 2^{ème} ed.: John Wiley & Sons, 2009.
- [12] S. Bencharif. Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement D'une éolienne, mémoire Master, université Mohamed Khider de Biskra, Algérie juin 2013.
- [13] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entrainement d'une pompe à piston Simple effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [14] M. Debbache. De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites. Mémoire Magistère. Algérie 2012.
- [15] D. L. Gourières, Les éoliennes : Théorie, conception et calcul pratique, 2^{ème} ed. Moulin Cadiou, 2008.
- [16] G. D. H. N. Bazeos, I. D. Hondros, H. Karamaneas, D. L. Karabalis, and D. E. B. "Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower," Engineering
- [17] G. N. I. Lavassas, P. Zervas, E. Efthimiou, I. N. Doudoumis, and C. C. Baniotopoulos, "Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower," Engineering Structures no. 25 pp. 1097–1106, February 2003.
- [18] P. E. Uys, J. Farkas, K. J'armai et al., "Optimization of a steel tower for a wind turbine

Structure,” Engineering Structures no. 29 pp. 1337–1342, 2007.

[19] S. Cicero, and R. L., R. Cicero, “Estimation of the maximum allowable lack of Penetration defect sincircum ferential butt welds of structural tubular towers,” Engineering Structures, vol. 2009, no. 31 pp. 2123–2131, 2009.

[20] J.-S. Chou and W.-T. Tu, “Failure analysis and risk management of a collapsed large Wind turbine tower,” Engineering Failure Analysis, vol. 2011, no. 18, pp. 295–313, 2009.

[14] A. Quilligan, A. O. C., and V. P. , “Fragility analysis of steel and concrete wind Turbine towers,” Engineering Structures, vol. 2012, no. 36 pp. 270–282, 2012.

[21] CSA, "Design of Steel Structures," CAN/CSA-S16-09, Canadian Standards Association (CSA), Canada, 2009.

[22] P.A. Blackmore, R.A. Harding, the Effects of Metallurgical Process Variables on The Properties of Austempered Ductile Irons, Proc. 1st Int. Conf. on ADI, 1984, pp. 117- 134

[23] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, the Relationship between Microstructure and Tensile Properties in ADI, AFS Trans., 1987, pp. 765-774

[24] J. Aranzabal, I. Gutierrez, J.M. Rodriguez babe, J.J. Urcola, Mater. Sci. Technol. 8 (1992) 263-273

[25] R.B. Gundlach, J.F. Janowak, Austempered Ductile Iron Combines Strength With Toughness and Ductility, Met. Prog. 1988, pp. 19-26

[26] R. Neugebauer, A. Stoll, H.-J. Roscher, Ultras challunterst ̄uzungver bessert Tiefbohren Inhoch festen Guss, MM Das Industrie Magazin 28 (2009) 24-27

[27] Y.V.R.K. Prasad, H.L. Gegel, S.M. Doraivelu, J.C. Malas, J.T. Morgan, K.A. Lark, D.R. Barker, Metall. Trans. A 15 (1984) 1883-1892

[28] B.V. Radha Krishna Bhat, Y.R. Mahajan, H.M. Roshan, Y.V.R.K. Prasad, Metall. Trans.

A 23 (1992) 2223-2230

[29] Yoon-Jun Kim, Hocheol Shin, Hyounsoo Park, Jong Dae Lim, Mater. Lett. 62 (2008) 357-360

[30]ANSYS WORKBENCH [On-line]. <https://www.ansys.com/user>, manual.

[31]Mohammed Iliasse Boulifa et Ali Hadji. Effet des éléments d’alliage sur la structure et les propriétés mécaniques des fontes ADI. Metall. Res. Technol. 112, 404 (2015)

Résumé

Cette étude concerne le comportement dynamique du mât d'éolienne. L'objet principal de ce travail de recherche est de mettre en œuvre un modèle permettant de simuler le comportement dynamique d'un mât. Une étude de l'aérodynamique des l'éolienne a été faite pour la détermination des charges aérodynamiques appliquées sur le mât d'éolienne. Ce qui a permis de développer un modèle d'éléments finis du mât et d'en déduire leurs fréquences et les modes. L'analyse des réactions agissant sur le mât a été faite. Les calculs des différentes énergies et des travaux virtuels du mât ont été développés. Ce modèle permet d'extraire les fréquences et les déformés modales du mât, et de calculer les contraintes agissant sur la structure pour les différents modes. L'étude du mât parte (solide/fluide) en représente le effet de vitesse de le vent sur la géomètre du mât après la transformation de pression dans les lieux de collision avec la surface.

Mots clés : mât, dynamique, éléments finis, éolienne, aérodynamique.

Abstract

This study concerns the dynamic behavior of a wind turbine mast. The main purpose of this research is to implement a model to simulate the dynamic behavior of a mast. A study of the aerodynamics of the wind turbine was carried out to determine the aerodynamic loads applied to the wind turbine mast. This made it possible to develop a finite element model of the mat and to deduce their frequencies and modes. The reactions acting on the mat were analyzed. The calculations of the different energies and the virtual mast work have been developed. This model makes it possible to extract the frequencies and modal deformities of the mast, and to calculate the stresses acting on the structure for the different modes. The study of mat parte (solid / fluid) represents the effect of wind speed on the geometer of the harsh mat the pressure transformation in places of collision with the surface.

Keywords: Tower, dynamics, finite elements, wind turbine, aerodynamics.

ملخص

تتعلق هذه الدراسة بالسلوك الديناميكي لصاري توربينات الرياح. الغرض الرئيسي من هذا البحث هو تنفيذ نموذج لمحاكاة السلوك الديناميكي للصاري. تم إجراء دراسة للديناميكا الهوائية لتوربين الرياح لتحديد الأحمال الديناميكية الهوائية المطبقة على صاري التوربينات الهوائية. هذا جعل من الممكن تطوير نموذج العناصر المحدودة للخلفية واستنتاج تردداتها وأنماطها. تم تحليل ردود الفعل التي تعمل على الصاري. تم تطوير حسابات الطاقات المختلفة وعمل الصاري الافتراضي. هذا النموذج يجعل من الممكن استخراج الترددات والتشوهات النمطية للصاري، وحساب الضغوط التي تعمل على الهيكل للأوضاع المختلفة. تمثل دراسة الصاريالجزء (صلب / مائع) تأثير سرعة الرياح على شكلالصاريوكذا كتحويل السرعة إلى ضغط في أماكن الاصطدام بالسطح.

الكلمات المفتاحية: صاري، ديناميكي، عناصر منتهية، عنة رياح، حركة هوائية.