

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique
Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Génie Mécanique

Thème

***Conception d'un mât d'une éolienne à axe horizontal de 1KW
de puissance***

Proposé par :

Mr.A.SMAILI Professeur à l'ENP

Dirigé par :

Mr.A.AMMICHE M. Assistant à l'ENP

Présenté par :

LAZOUNI Abdelaziz

ABDI Aboubekour

Promotion juin 2014

*Ecole Nationale Polytechnique, 10 Avenue Pasteur Hassen Badi BP 182 El Harrach
16200 Alger (ALGERIE)*

Remerciements

Nous remercions **ALLAH** le tout Puissant qui nous a éclairé le bon chemin

Nous remercions Monsieur **A. AMMICHE** pour son aide, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de notre travail.

Nous remercions Monsieur **A. SMAILI** pour son aide, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de notre travail.

Nous remercions **Mr BELKACEMI** et **Mr BELHADEF** et **Mr RIACHE** membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail

Nous remercions tous les enseignants du département de génie mécanique et tous nos amis ainsi que à tous ce qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A Mes très chers parents en signe de reconnaissance pour
leur soutien moral et matériel durant mes études

Ainsi qu'à mes frères

A toute la famille ABDI

A ma fiancée

A tous mes amis

Aboubekkeur

Je dédie ce modeste travail

A Mes très chers parents en signe de reconnaissance pour
leur soutien moral et matériel durant mes études

Ainsi qu'à mes frères

A toute la famille LAZOUNI

A tous mes amis

Abdelaziz

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تصميم برج توربينة رياح ذات محور أفقي من 1 كيلواط باستخدام البرنامج الحاسوبي سوليد ووركس. يتم إنجاز العمل وفق ثلاث مراحل رئيسية. الأولى تتمثل في جمع معلومات عن الرياح و مختلف التقنيات المستعملة في الانجازات السابقة لتوربينات الرياح ، ويستند أساسا على أنواع مختلفة من الأبراج. المرحلة الثانية هي حساب ساكن و ديناميكي للبرج الذي تم اختياره، آخر مرحلة تتمثل في المحاكاة باستخدام البرنامج الحاسوبي أنسيس لتأكد من النتائج الحسابية و الحصول على الشكل النهائي للتصميم.

كلمات مفتاحية:

تصميم, توربينة رياح, حساب ديناميكي, حساب ساكن, محاكاة.

Résumé:

Le but principal de ce travail est la conception d'un mât pour une Eolienne à axe horizontale fonctionnel de 1 KW à l'aide du logiciel SolidWorks. Ce travail se fera en trois parties principales, la première consiste à rassembler des informations sur le vent et les différentes technologies éoliennes et basé surtout sur les différents types du mât. La deuxième étant un calcul statique et dynamique sur le mat qui a été choisi, La dernière phase étant une simulation par le logiciel ANSYS pour la confirmation les résultats analytiques et obtenir la forme finale de la conception.

Les mots clés :

Conception, mat de l'éolienne, calcul dynamique, calcul statique, simulation.

Abstract:

The aim of this work is the design of the tower for a horizontal axis wind turbine of 1 KW using SolidWorks software. This work consists of three main steps. The first one is the collection of information on wind and the related technologies of wind turbines and is mainly based on the different types of towers. The second is the static and dynamic calculation for the tower that has been selected, the last is the simulations using the software ANSYS in order to verify the analytics results and obtain the final shape of the conception.

Keywords:

Design, tower of wind turbine, Dynamic calculation, static calculation, simulation.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	3
I.1. Généralités sur les éoliennes.....	4
I.1.1.Introduction.....	4
I.1.2.L'éolien dans le monde	4
I.1.3. Classification des éoliennes	4
I.1.3.1. Selon l'utilisation	4
I.1.3.2.Selon le principe de fonctionnement	5
I.1.3.3.Selon l'orientation de l'axe de rotation	6
I.1.3.3.1.Eolienne à axe verticale	6
I.1.3.3.2. Eolienne à axe horizontale	7
I.1.3.4. Selon la taille de turbine	7
I.1.4.Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal ...	8
I.1.5.Caractéristiques technologiques des éoliennes	9
I.1.5.1.La nacelle	9
I.1.5.2.Le mât	10
I.1.5.3.La fondation	11
I.1.6.Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	11
I.1.6.1.Les avantage	11
I.1.6.2.Les inconvénients	12
I.2.Généralités sur le vent.....	12
I.1.2.Définition du vent	12
I.1.3. Vitesse et direction du vent	12
I.1.5. Vitesse des vents soufflants en Algérie	12
I.1.6. Energie du vent	13

I.1.3. Conclusion	14
-------------------------	----

Chapitre II : Ruvue des différents types du mât et le choix

convenable	15
-------------------------	----

II.1. Introduction	16
--------------------------	----

II.2. Le mat	16
--------------------	----

II.3. Les différents types du mât	16
---	----

II.3.1. Les mâts autoporteurs	16
-------------------------------------	----

II.3.1.1. Treillis métallique	16
-------------------------------------	----

II.3.1.2. tubulaires en acier	16
-------------------------------------	----

II.3.1.3. tubulaire en béton	16
------------------------------------	----

II.3.2. Les mâts haubanés	17
---------------------------------	----

II.3.2.1. Treillis métallique	17
-------------------------------------	----

II.3.2.2. Tubulaires.....	17
---------------------------	----

II.3.3. Les mât hybride	18
-------------------------------	----

II.4. Comparaison entre un mat tubulaire et un mat en treillis	19
--	----

II.4.1. Mat en treillis	19
-------------------------------	----

II.4.2. Mat tubulaire	19
-----------------------------	----

II.5. Hauteur de tour l'éolienne	20
--	----

II.6. Conclusion	21
------------------------	----

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour	22
--	----

III.1. Introduction	23
---------------------------	----

III.2. Etude d'un mât haubanée	23
--------------------------------------	----

III.2.1. Les différentes charges appliques sur le mât	23
---	----

III.2.2. Vérification au flambement	24
---	----

III.2.2.1. Force critique d'Euler	25
---	----

III.2.2.2. Contrainte critique	26
--------------------------------------	----

III.2.3. calculs statiques	27
----------------------------------	----

III.2.3.1. Contrainte due à la flexion	27
III.2.3.2. Contrainte de compression (normale)	28
III.2.3.3. Contrainte de comperssio(normale).....	29
III.2.4. Calcul de la flèche	30
III.2.4.1. La charge répartie	30
III.2.4.2. La charge concentrée	31
III.2.5. Calculs du diamètre extérieur et la flèche en fonction de la variation de la vitesse.....	32
III.2.6. Calculs du diamètre et tension des câbles de soutien :	34
III.2.7. Calcul dynamique.....	36
III.2.7.1. Vibration libre.....	36
III.2.7.1.1. Méthode analytique.....	37
III.2.7.1.2. Méthode Rayleigh-Ritz.....	40
III.2.7.2. Vibration forcée	41
III.3. Etude d'un mât autoporteur (mât cylindro-conique)	48
III.3.1. calculs statiques	48
III.3.1.1. Contrainte total de Flexion et compression	49
III.3.2. Calcul de la flèche	51
III.4. Conclusion	52
Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS.....	53
IV.1. Introduction	54
IV.2. modélisation d'un mât haubanée	54
IV.2.1. Calculs statiques	54
IV.2.2. Vibration transversal	60
IV.2.2.1. Vibration libre.....	60
IV.2.2.2. Vibration forcée	64
IV.3. modélisation d'un mât autoporteur (conique)	66
IV.3.1. Calculs statiques	66
IV.3.2. Vibration transversal	67
IV.4. Conclusion	69

Chapitre V : conception et installation du mât haubané	70
V.1. Dessin des différents accessoires du mât haubané	71
V.2. Les étapes d'installations de l'éolienne	75
V.2.1. Choix approprié du site d'installation	75
V.2.2. Choix du mât	75
V.2.3. l'analyse et le calcul des multiples contraintes agissant sur le mât.....	75
V.2.4. Conception et vérification de la fondation	76
V.2.5. Ancrage des haubans	76
V.2.5.1. Configuration des points d'ancrage	76
V.2.5.2. Réalisation des points d'ancrage	76
V.2.6. Techniques mise en œuvre pour le soulèvement du mât	77
V.2.6.1. Procédure avant la montée	77
V.2.6.2. Ajustement du mât	77
Conclusion générale :	78
VI. Annexe :	80
VII. Bibliographie :	86

Listes des figures

Figure 1.1: Eolien de production électrique	5
Figure 1.2: Moulin à vent (Allemagne du Nord)	5
Figure 1.3: Distribution de la pression autour d'un profil d'aile	6
Figure 1.4: Schéma de principe du rotor de savonius	6
Figure 1.5: Technologie d'éoliennes à axe vertical	7
Figure 1.6: Principaux élément d'une éolienne à axe horizontal.....	8
Figure 1.7: Les principales composantes de la nacelle	9
Figure 1.8: Rotor d'une turbine	10
Figure 1.9: Le mât autoporteur d'une éolienne.....	10
Figure 1.10: Les fondations des grandes éoliennes.....	11
Figure 1.11: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	13
Figure 2.1: De différents types du mât.....	18
Figure 2.2: Mât hybride.....	19
Figure 2.3: Le mât en treillis et le mât tubulaire	20
Figure 3.1: Différent charge applique sur le mât.....	23
Figure 3.2: Différent valeur de μ pour différent mode de fixation	26
Figure 3.3: Schématisation du chargement répartie	30
Figure 3.4: Schématisation du chargement concentrée.....	31
Figure 3.5: La flèche en fonction de la longueur de la longueur du mât.....	33
Figure 3.6: Schématisation du chargement de la tour haubanée.....	34
Figure 3.7: Excitation aléatoire (action du vent).....	43
Figure 3.8: Déplacement du mât en fonction e temps (premier mode) ..	44
Figure 3.9: Déplacement du mât en fonction de temps (deuxième mode).....	44
Figure 3.10: Déplacement du mât en fonction de temps (troisième mode).....	45
Figure 3.11: Déplacement du mât en fonction de temps (quatrième mode).....	46
Figure 3.12: Déplacement du mât en fonction de temps (cinquième mode).....	46
Figure 3.13: Déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation aléatoire.....	47
Figure 3.14: La forme d'un mât autoporteur.....	48
Figure 4.1: Distribution des contraintes de vont mises sur la tour non	

haubanée.....	54
Figure 4.2: Distribution des déformations sur la tour non haubanée.....	55
Figure 4.3: Distribution des déplacement sur la tour non haubanée.....	55
Figure 4.4: Forme de déformation de la tour non haubanée.....	56
Figure 4.5: L'évolution des déplacements du mât non haubanée en fonction de ces nœuds.....	56
Figure 4.6: Distribution des contraintes de vent mises sur la tour haubanée.....	57
Figure 4.7: Distribution des déformation de vont mises sur la tour haubanée.....	58
Figure 4.8: Distribution des déplacement sur la tour haubanée.....	58
Figure 4.9: Forme de déformation de la tour haubanée.....	59
Figure 4.10: L'évolution des déplacements du mât haubanée en fonction de ces nœuds.....	59
Figure 4.11: Premier mode de vibration libre.....	60
Figure 4.12: Deuxième mode de vibration libre.....	61
Figure 4.13: Troisième mode de vibration libre.....	61
Figure 4.14: Quatrième mode de vibration libre.....	62
Figure 4.15: Cinquième mode de vibration lib.....	62
Figure 4.16: Déformé modale des cinq modes du mât.....	63
Figure 4.17: Déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t=T_0$	64
Figure 4.18: Déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t=\frac{T_0}{2}$	65
Figure 4.19: Déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t=\frac{T_0}{4}$	65
Figure 4.21: Distribution des déformations sur le mât autoporteur.....	66
Figure 4.22: Distribution des déplacements sur le mât autoporteur.....	66
Figure 4.23: Premier mode de vibration d'un mât autoporteur.....	67
Figure 4.24: Deuxième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.....	67
Figure 4.25: Troisième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.....	68
Figure 4.26: Quatrième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.....	68

Figure 5.1: Le mât avec la base.....	71
Figure 5.2: Assemblage mât avec le sol par tiges filetées.....	71
Figure 5.3: Assemblage mât _ câbles par des manchons et serre câble.....	72
Figure 5.4: Assemblage câble _sol par des tendeurs et serre câble.....	72
Figure 5.5: Manchon.....	73
Figure 5.6:Tendeur.....	73
Figure 5.7: Serre câble.....	74
Figure 5.8: Câble.....	74
Figure:5.9:L'insert.....	75
Figure 5.9: Conception de la fondation et pression sur le sol.....	76
Figure 5.10: Vue dessus du mât avec les haubanes.....	77

Liste des tableaux

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes	5
Tableau III.1: Information techniques de l'éolienne	23
Tableau III.2: Tableau de différentes caractéristiques	23
Tableau III.3: Tableau de différente valeur de la flèche en fonction de variation de la vitesse.....	32
Tableau III.4: différent valeur de la flèche en fonction de variation de la vitesse et de diamètre intérieure et extérieure.....	33
Tableau III.5: tableau de différentes caractéristiques du câble d'acier.....	35
Tableau III.6: les cinq premières fréquences propres de vibration libre dans le cas d'un mât encastree avec masse attaché à l'extrémité.....	39
Tableau III.7: les cinq premières fréquences propres de vibration libre dans le cas d'un mât encastree-libre.....	40
Tableau III.8: Tableau de différentes caractéristiques.....	48
Tableau III.9 : différents valeurs des diamètres en fonction d'épaisseurs.....	49
Tableau III.10 : différents diamètres de sommet en fonction de variation de b.....	51
Tableau IV.1: Valeurs des contraintes ,déformation et déplacements dans les zones les plus sollicitées dans le cas d'un mât non haubanée.....	57
Tableau IV.2: Comparaison des contraintes, déformations et déplacements dans les zones les plus sollicitées du mât haubanée et non haubanée.....	60
Tableau IV.3: Valeur de différente composante de réaction au niveau de l'encastrement.....	60
Tableau IV.4: Valeurs des fréquences propres pour les cinq modes premiers.....	63
Tableau IV.5: Comparaison de résultat analytique et résultat par ANSYS de déplacement maximal du mât.....	64
Tableau IV.6: Valeurs des contraintes, déformations et déplacements dans les zones les plus sollicitées d'un mât autoporteur.....	67
Tableau IV.7: Valeurs des fréquences propres pour les cinq modes premiers d'un mât autoporteur.....	69

NOMENCLATURE

Symbole	Unité	Signification
A	[m ²]	Surface de balayage de rotor
U	[m/s]	Vitesse
P	[W]	Puissance
F	[N]	La force du vent
T	[N]	La tension du câble
ρ	[kg/m ³]	Masse volumique
E _c	[J]	L'énergie cinétique
D	[m]	Diamètre
P	[N]	poids
q	[N/m]	la charge du vent appliqué sur le mât
E	[N/m ²]	Module de Yong
ν	sans unité	Coefficients de poisson
I	[m ⁴]	Moment quadratique
L	[m]	hauteur du mât
μ	sans unité	Coefficient numérique
i _{min}	[m]	Rayon de giration
λ	sans unité	L'élancement limite
σ_{cr}	[N/m ²]	Contrainte critique
P _{cr}	[N]	Force critique d'Euler
F _S	sans unité	Coefficient de sécurité
n _s	sans unité	Coefficient de stabilité
σ_f	[N/m ²]	Contrainte de flexion
M _f	[N .m]	Moment de flexion
σ_c	[N/m ²]	Contrainte de compression
S	[m ²]	Section du mât
σ_e	[N/m ²]	Limite élastique
d _i	[m]	Diamètre intérieur
d _e	[m]	Diamètre extérieur
e	[m]	Epaisseur
f	[m]	La flèche
A'	[m ²]	La section du câble de soutien

R_e	[N/m ²]	La limite élastique du câble d'acier
d'	[m]	Diamètre du câble de soutien
f	[Hz]	Fréquence propre
M	[Kg]	Masse rotor +nacelle
m	[Kg/s]	Débit massique
ξ	sans unité	Facteur d'amortissement

Introduction générale :

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la demande de la production d'énergie durable a conduit à une multitude de solutions technologiques innovantes. La pénurie prévisible de carburants conventionnels dans un avenir proche combiné aux impacts négatifs sur l'environnement causés par les techniques traditionnelles de production d'électricité, a créé une situation qui a forcé les acteurs impliqués dans le domaine de la production d'énergie à explorer de nouveaux horizons pour la production d'énergie. Ils se sont donc penchés surtout sur des sources dites propres, en l'occurrence le solaire et l'éolien qui sont devenus les sources de substitution par excellence dans ces recherches.

La conversion de ces nouvelles sources d'énergies nécessite l'utilisation de certaines installations spécifiques. Dans le cas d'éoliennes la partie fonctionnelle étant la turbine composée d'un certain nombre de pales. Cette turbine doit être placée à une certaine hauteur garantissant une vitesse de vent plus forte et plus régulière, d'où l'utilisation d'une tour. Le coût d'une tour dans l'investissement total d'une éolienne est aux alentours de 30%, ce qui représente une marge importante. Toute tentative de réduction du coût total de l'installation doit considérer une étude d'optimisation du coût de la tour. Cette minimisation de coût nécessite la compréhension des éléments technologiques et la réalisation des calculs nécessaires pour de telles recherches. En effet, plusieurs études récentes sont consacrées à l'étude approfondie de tours d'éoliennes. Ces tours sont construites en général soit en béton armé ou en acier. Il convient de souligner que l'utilisation de l'acier pour la construction de tours d'éoliennes a augmenté très rapidement au cours de ces dernières années [1].

Le présent travail propose une démarche dans le calcul d'une tour en acier d'éolienne d'une puissance de 1 KW, ce qui nous permettra de déterminer les forces agissant sur le mât. Une vérification aux états limites ultimes de résistance sera alors effectuée.

Le présent manuscrit est développé en cinq chapitres, d'une introduction et d'une conclusion générale.

Le chapitre 1 est consacré à des généralités sur les éoliennes. Il décrit les différents types d'éoliennes selon différents critères et une description détaillée du fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal, ainsi que nous exposerons des généralités sur le vent, basé sur les caractéristiques du vent (la vitesse et la direction).

Le chapitre 2, est consacré sur les différents types de tour utilisés pour les éoliennes à axe horizontal, et les critères de choix du mât convenable.

Dans le chapitre 3, nous appliquerons les lois de résistance des matériaux (RDM) pour le calcul statique et le choix et le dimensionnement de la tour d'éolienne, ainsi que les lois de la dynamique des structures pour le calcul dynamique sur le mat, ces lois consistent en un calcul analytique approché.

Le chapitre 4 est la simulation de la tour par le logicielle ANSYS. Les résultats obtenus nous permettrons de conclure et de valider nos modèles.

Le chapitre 5 est la conception de la tour d'éolienne et les différents accessoires par le logicielle SolidWorks, ainsi que les étapes d'installation de l'éolienne.

Chapitre I : Généralités

I.1. Généralités sur les éoliennes :

I.1.1. Introduction :

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique (moulin à vent) ou électrique à l'aide d'un aérogénérateur (éolienne). C'est une énergie renouvelable qui tire son nom d'Éole, Dieu du vent dans la Grèce antique. [2]

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine.

A l'aube du XXème siècle, les premières éoliennes rapides entraînant des générateurs électriques font leur apparition en France puis se répandent dans le monde. Leur invention est l'œuvre de l'Académicien français Darrieux. [3]

Ce n'est qu'à la fin du XIXème siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas.

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution D'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur français ANDREAU.

La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 215 GW en juin 2011 [4].

I.1.2.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.

Trois facteurs ont contribué 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.

I.1.3. Classification des éoliennes :

Les éoliennes sont classées selon leurs utilisations, selon l'orientation de l'axe de rotation ou bien selon le principe de fonctionnement et selon la taille de la turbine.

I.1.3.1. Selon l'utilisation :

On distingue les éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique et les éoliennes qui fournissent de l'énergie mécanique.

Chapitre I : Généralités

➤ Les éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique

Elles sont dénommées aussi aérogénérateur, elles produisent soit un courant électrique continu dans des installations reliées à des batteries ou bien un courant électrique alternatif dans des installations reliées au réseau.

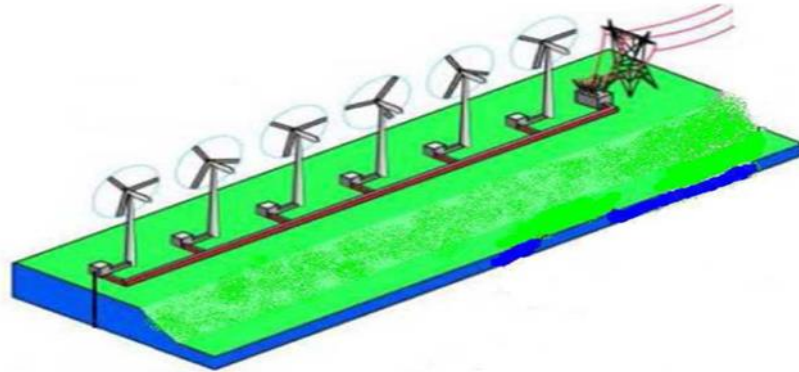


Figure 1.1 : Eolien de production électrique

➤ Les éoliennes qui fournissent de l'énergie mécanique

Celles-ci représentent l'ancêtre des éoliennes elles servent principalement pour moulin le blé ou bien pour le pompage de l'eau.



Figure 1.2 : Moulin à vent (Allemagne du Nord)

I.1.3.2. Selon le principe de fonctionnement :

On distingue deux types, les machines à portance et les machines à trainée.

➤ **Machine à portance**

La force de portance fait tourner le rotor de l'éolienne avec un principe identique à celui de la sustentation pour les avions, la pale subit une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados. Cette dépression génère une force aérodynamique de portance importante qui dépend du profil de pale et d'angle d'incidence.

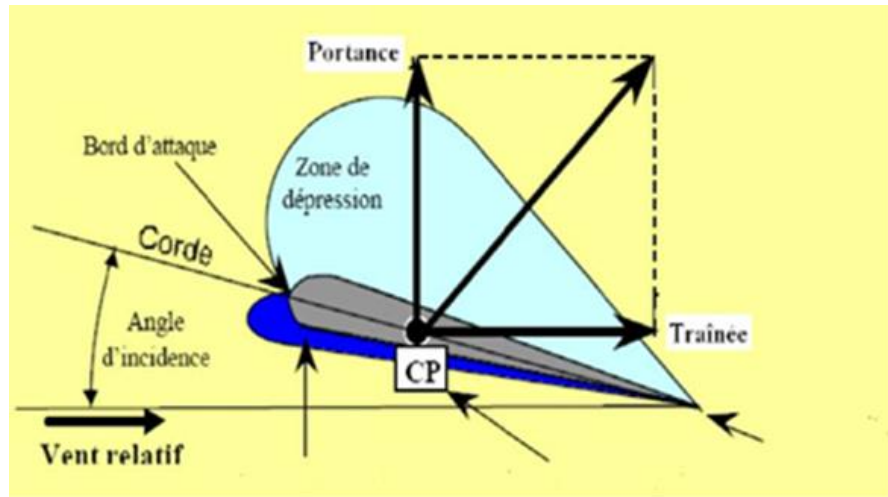


Figure 1.3 : Distribution de la pression autour d'un profil d'aile

➤ Machine à traînée :

Dans ce type de machine le mouvement de rotation est provoqué par la force de traînée.

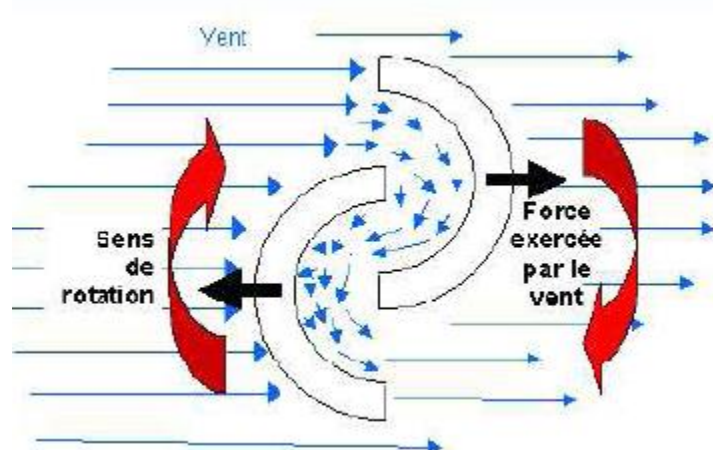


Figure 1.4: Schéma de principe du rotor de Savonius

I.1.3.3.Selon l'orientation de l'axe de rotation :

On distingue les éoliennes à axe verticale et les éoliennes à axe horizontal.

I.1.3.3.1.Eolienne à axe verticale :

L'axe de rotation est perpendiculaire à la direction de la vitesse du vent, Il existe plusieurs types d'éoliennes utilisant cette technologie, les principaux sont représentés par le rotor de Savonius et de Darrieus à 2 ou 3 pales. La machinerie de ce type d'éolienne est au sol, ce qui facilite les opérations de maintenance. Par contre, les efforts supportés par les palies sont importants du fait que le point de l'éolienne soit placé juste au-dessus.

- Rotor Savonius
- Rotor Darrieus

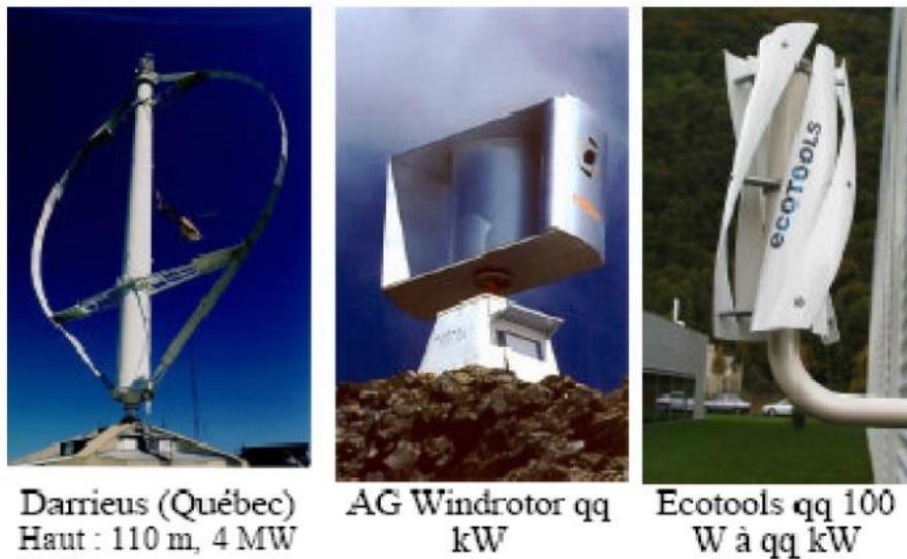


Figure 1.5: Technologies d'éoliennes à axe vertical [5]

I.1.3.3.2. Eolienne à axe horizontale :

L'axe de rotation est parallèle à la direction de la vitesse du vent, Ce sont actuellement les machines les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.

On distingue trois types :

- Les moulins à vent
- Les éoliennes lentes
- Les éoliennes rapides

I.1.3.4. Selon la taille de turbine :

On distingue trois types, petite éolien, moyenne, et grande éolienne, Le tableau suivant présente une classification des turbines éoliennes.

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes

ECHALLE	DIMETRE DE L'HELICE	PUISSANCE DELIVREE
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW et plus

I.1.4.Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal :

Un design typique d'éolienne à axe horizontal est représenté à la Figure (1.6). La tour supporte la nacelle et les pales de la turbine et, dépendamment du type de turbine considérée, elle peut être placée soit en amont soit en aval des pals par rapport au sens de l'écoulement. Les pales de la machine ont un mouvement de rotation autour de moyeu de l'éolienne et extraient l'énergie cinétique du vent incident. Les profils utilisés sur une pale sont déterminés par des critères aérodynamiques et de structure, et ils sont assemblés entre le moyeu et le bout de la pale avec des angles de calage décroissant. Pour la plupart des éoliennes, l'énergie extraite du vent est transmise au générateur par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse tandis que la vitesse de rotation de l'arbre est imposée par les caractéristiques du générateur et par le réseau distributeur d'électricité.

L'ensemble du système convertisseur d'énergie est finalement placé dans la nacelle, qui abrite aussi les dispositifs de freinage, de variation de l'angle de calage global de la pale, etc. Dans le cas où la tour est placée en amont des pales, la nacelle s'oriente et se stabilise naturellement par rapport au vent. Dans le cas où la tour est placée en aval des pales, un ensemble servomécanique permet de placer la nacelle parallèlement au vent [6].

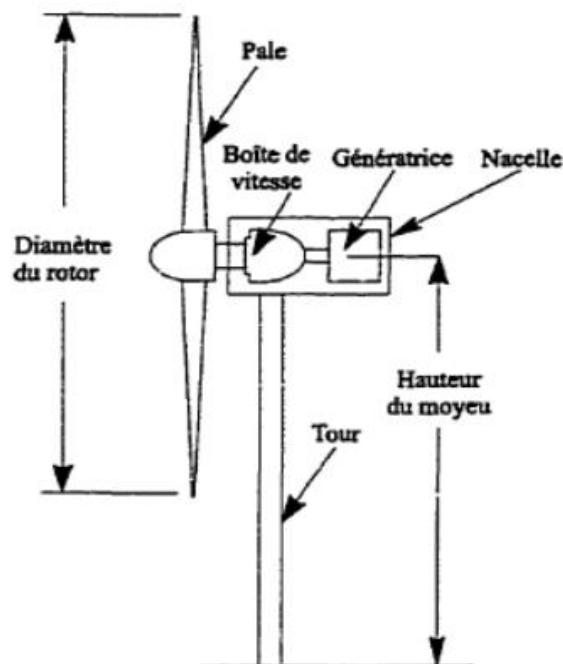


Figure 1.6 : Principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal [7].

Chapitre I : Généralités

I.1.5. Caractéristiques technologiques des éoliennes :

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, Nous présentons dans ce qui suit dans l'ordre de construction les différentes parties d'une éolienne :

I.1.5.1. La nacelle :

Contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur se trouvent : la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse [1].

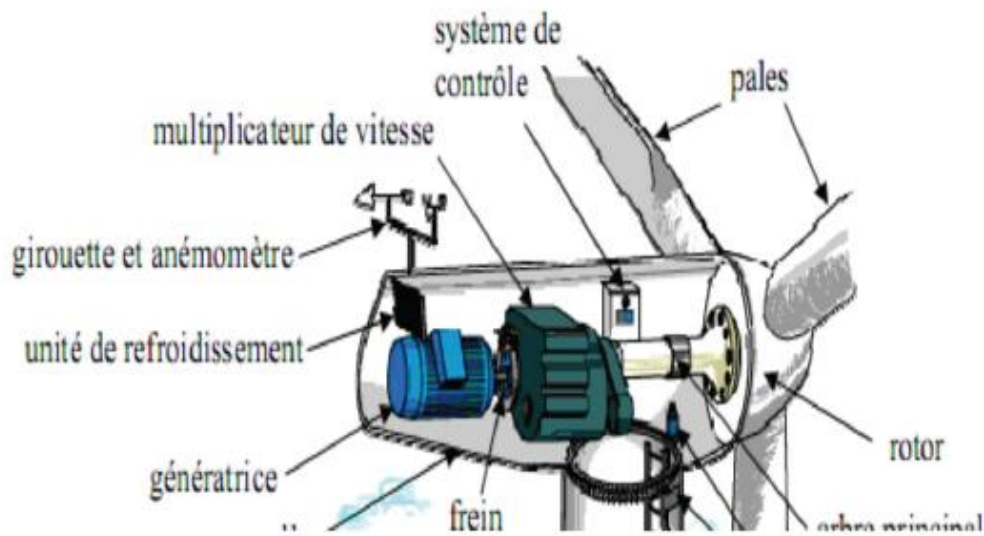


Figure 1.7: les principales composantes de la nacelle [1].

Elle comporte donc les éléments suivants :

- Le rotor



Figure 1.8: Rotor d'une turbine [1].

- La girouette et l'anémomètre
- Le dispositif d'orientation
- Le système de freinage
- L'arbre principal
- Le multiplicateur
- L'arbre secondaire
- La génératrice

I.1.5.2. Le mât :

Permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.



Figure 1.9: le mât autoporteur d'une éolienne

I.1.5.3. La fondation :

Les fondations standard sont de type dalle avec bride d'attache.



Figure 1.10 : Les fondations de grandes éoliennes [1].

I.1.6. 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 désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.1.6.1. Les avantages :

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- 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 que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes 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.

I.1.6.2. Les inconvénients:

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Cela reste néanmoins 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.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel.
- 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.
- 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 [8].

I.2. Généralité sur le vent :

I.2.1. Définition du vent :

Le vent est une masse d'air en mouvement qui transforme l'énergie thermique que cette masse a retiré du rayonnement solaire en énergie cinétique.

Deux paramètres essentiels caractérisent le vent. Il s'agit de la vitesse du vent et de la direction de son déplacement [9].

I.2.2. Vitesse et direction du vent :

La direction et la vitesse du vent sont des grandeurs mesurables dont la connaissance est nécessaire à l'étude cinématique et dynamique des masses d'air.

La direction du vent indique d'où souffle le vent et se détermine à l'aide d'une girouette ou d'une manche à air.

La vitesse est mesurée à l'aide d'un anémomètre. La vitesse du vent s'exprime en mètre par seconde (m/s), en kilomètre par heure (km/h) ou en nœud (kt).

I.2.3. Vitesse des vents soufflants en Algérie :

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent [10], a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, à deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative des ressources à travers l'Algérie.

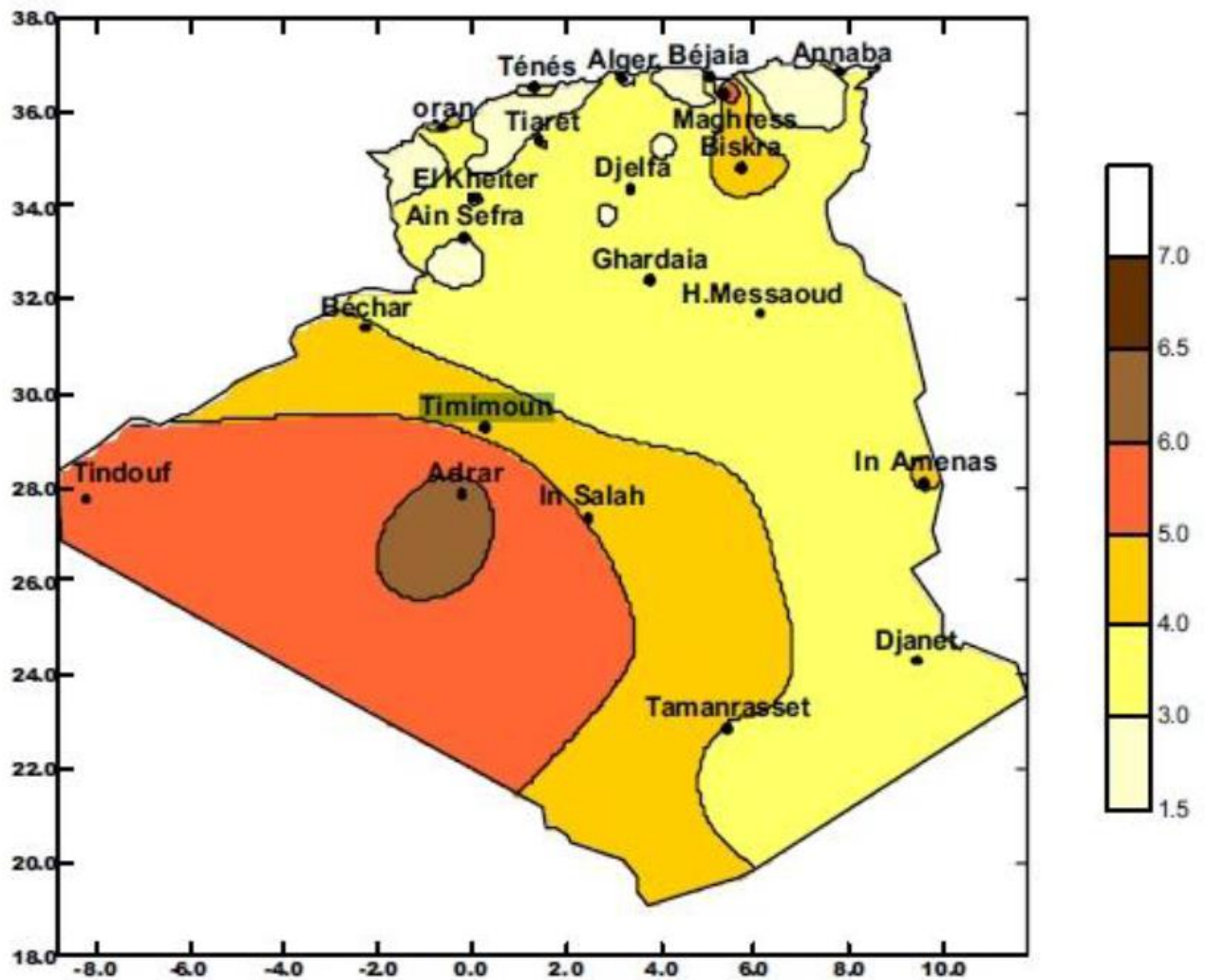


Figure 1.11 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) [11].

I.2.4 Energie du vent :

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique dans une veine d'air, elle est en fonction de la masse et du volume d'air, si on considère que la masse volumique de l'air est constante, l'énergie fournie est fonction de sa vitesse.

L'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement est égale à :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (I.1)$$

Comme $m = \rho_a A V_0 t$

$$E_c = \frac{1}{2} (\rho_a A V_0 t) V_0^2 \quad (I.2)$$

Finalement

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_a A t V_0^3 \quad (I.3)$$

Chapitre I : Généralités

On en déduit la valeur de la puissance P délivrée par le vent qui est le rapport de l'énergie cinétique par le temps :

$$p = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho_a A V_0^2 \quad (\text{I.4})$$

I.3. Conclusion :

On peut dire que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.

La carte de la vitesse du vent établie, permette l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne.

Pour qu'un site soit jugé exploitable avec une petite éolienne, il faut disposer au minimum d'une vitesse de l'ordre de 6 m/s.

Toutefois, une fois les zones ventées identifiées, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Par ailleurs, étant donné que généralement les différentes mesures prélevées, se font à 10 mètres du sol et que les formules empiriques d'extrapolations ont été établies pour des climats différents du notre, une étude expérimentale détaillée, doit être établie pour la correction de ces dernières.

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable

II.1.Introduction :

La présente étude s'intéresse à une partie importante de l'éolienne qui est la tour ou appelé aussi le mât. La tour permet de placer le rotor de l'éolienne à une certaine hauteur garantissant une vitesse du vent plus forte et plus régulière [12].

II.2.Le mât :

La fonction première du mât est de soutenir la nacelle. Il est constitué de trois parties constituant une tour généralement conique et en acier afin d'optimiser la résistance face à des vents forts ou du givre par exemple.

Le mât est relié à la nacelle par le pivot d'orientation qui permet à la machine de présenter l'hélice face au vent quel que soit sa direction.

La seconde fonction du mât est de protéger les câbles reliés depuis le générateur jusqu'à l'armoire de couplage située à la base du mât.

II.3.Les différents types du mât :

On distingue trois grandes catégories des mâts

II.3.1.Les mâts autoporteurs :

II.3.1.1.Treillis métallique :

Les mâts en treillis métalliques semblables à ceux utilisés pour le transport de l'énergie électrique sont très robustes mais ils sont coûteux et long à monter. Il faut éviter de les utiliser avec un aérogénérateur dont l'hélice tourne sous le vent du mât, car leur traînée est très grande. Leur entretien n'est pas aisé et une plateforme de service devra être prévue à cet effet [13].

II.3.1.2.Tubulaires en acier :

Les mâts tubulaires autoporteurs seront utilisés lorsque la taille de la machine le permettra (masse < 1000kg) et qu'il sera impossible d'utiliser un support haubané à cause du relief. Ces supports autoporteurs doivent être bien dimensionnés de façon:

- à Résister au moment dû à la traînée en tête du support pour des vents les plus forts.
- à ce que ses fréquences propres soient bien découplées des fréquences dues à l'aérogénérateur [13].

II.3.1.3.Tubulaire en béton :

Les mâts en béton, d'un coût plus réduit, présentent une traînée plus faible que celle du mât en treillis métallique. Ils sont également longs à mettre en œuvre, de plus ils ne sont pas réutilisables si on déplace ou on supprime l'aéromoteur [13].

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable

II.3.2. Les mâts haubanés :

II.3.2.1. Treillis métallique

II.3.2.2. Tubulaires

Ces mâts sont maintenus par des câbles appelés “haubans” qui les relient au sol. Chaque fois que le relief le permet, il est préférable d'utiliser un support haubané basculant qui permet de faire sans danger l'entretien de la machine et du mât, en plus la construction de celui-ci est simple et moins coûteuse que celle du mât autoporteur. Un haubanage à 4 haubans inclinés à 45° dont le point d'ancrage sur le pylône dégagera la hauteur nécessaire à la rotation de l'hélice sera réalisée en câble d'acier galvanisé. La liaison entre les ancrages au sol et le câble se fera par des ridoirs à lanternes pour le réglage de la tension des haubans [13].

Remarque :

Les mâts tubulaires haubanés sont seulement utilisés pour les petites éoliennes.

Le mât autoporteur (tubulaire ou treillis) nécessite une fondation robuste.

D'un coût à hauteur égale ou inférieur à celui du support autoporteur, permet un meilleur accès à la nacelle pour entretien. La dimension du tuyau d'acier est surtout fonction du poids de l'éolienne, car ce sont les haubans qui assurent la stabilité de l'ensemble. Si le haubanage permet de réduire les dimensions du mât, plus il y a de haubans et de structure porteuse, plus le bruit est élevé dans les grands vents. Ce type de mât augmente l'occupation au sol ainsi que l'impact visuel. Cette structure est la plus couramment utilisée dans le cas du petit éolien [14].

Composition :

Un mât haubané est composé des tubes en acier assemblés entre-eux à l'aide de brides boulonnées ou de manchons. Les quatre haubans sont fixés au niveau des jonctions et rattachés au sol sur les massifs d'ancrages [14].

Avantages

- intéressant économiquement
- facilité de transport (légèreté)
- facilité d'installation (car ne nécessite pas l'utilisation d'une grue)
- facilite la maintenance et la protection de la turbine en cas de tempête (permet de descendre la turbine au sol) [14]

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable



Mât haubané



Treillis haubané



Mât en treillis



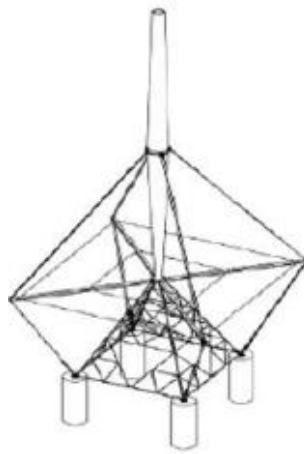
Mât tubulaire

Figure 2.1 : de différents types du mât [15]

II.3.3. Les mât hybride :

La tour hybride combine différentes configurations de la tour de l'éolienne. La tour hybride illustrée à la figure (2.2) est un exemple. Pour cette conception, les haubans peuvent être utilisés sans nécessiter de fondations supplémentaires [16].

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable



Mat hybride

Figure 2.2 : mat hybride [16]

II.4. Comparaison entre un mât tubulaire et un mât en treillis:

II.4.1. Mât en treillis:

Une tour en treillis est fabriquée à partir de fermes (morceaux de cornières ou de barres) ou des cadres qui sont boulonnés ou soudés ensemble comme le montre la figure (2.3). En général, le coût initial de construction d'une tour en treillis est inférieur à la tour tubulaire, car il nécessite moins des matériaux pour une rigidité similaire. Bien que le coût des matériaux de départ puisse être plus faible pour la tour en treillis, les coûts d'assemblage et de maintenance peuvent être plus élevés car chaque boulon doit correspondre à un cahier des charges et doit être vérifié périodiquement. Contrairement à la tour tubulaire, la dimension de base n'est pas retenue par la limite de la taille. En outre, le coût de fondation peut être inférieur à la tour tubulaire en raison des fondations sur pied peu coûteuses à chaque pied châssis utilisé. Esthétiquement, la tour en treillis est moins attrayante. Ce qui représente un facteur important.

Actuellement les mâts en treillis sont rejetés pour leur encombrement, leur poids excessif, l'inconvénient de leur apparence visuelle et surtout leur difficulté de mise en œuvre [16].

II.4.2. Mat tubulaire :

La tour tubulaire est illustrée à la figure (2.3) Il s'agit d'un tuyau de section transversale circulaire. De nombreuses tours tubulaires sont soit effilées (conique) ou gradin qui a un diamètre augmentant vers le bas. En outre, l'épaisseur de la paroi peut varier le long de la hauteur de la tour afin de sauver du matériau tout en satisfaisant les exigences structurelles. Des flasques boulonnées sont couramment utilisées pour joindre les sections de la tour et de garantir la fixation de la tour à la fondation.

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable

La tour tubulaire possède de nombreux avantages sur la tour en treillis. La zone fermée de la cavité tour tubulaire est utile. Premièrement, il fournit un couvert, aire protégée pour l'escalade pour accéder à l'éolienne dans de mauvaises conditions météorologiques. En outre, il fournit une surface couverte pouvant accueillir de nombreux composants électriques. Dans un climat, zone froide venteux ou humide, il s'agit d'une caractéristique importante. Il fournit un certain niveau de sécurité en limitant l'accès à la turbine contrairement à la tour en treillis. En outre, il est plus facile d'entretien. Bien que le coût matériau de départ puisse être supérieur à la tour en treillis, il ne repose pas sur de nombreuses connexions boulonnées qui ont besoin d'être vérifiées périodiquement. Esthétiquement, elle est plus attrayante que la tour en treillis.

Les mâts tubulaires haubanés présentent par contre de nombreux avantages et la meilleure solution du fait surtout de leur facilité de montage et d'entretien ; on gagne également grâce à une réduction significative en poids et donc en coût de la structure portante [17].



Figure 2.3 : le mât en treillis le mât tubulaire et [16]

II.5. Hauteur de tour l'éolienne :

La hauteur de la tour est un paramètre dépendant du site car il est fonction des caractéristiques du vent qui est fonction du site. L'optimisation de conception pour le moindre coût pourrait favoriser les hautes tours dans les zones de vents faibles et les courtes tours dans les zones de vent fort. Cependant, s'il ya des obstacles comme les arbres ou les objets de grande taille qui peuvent rendre l'écoulement du vent plus turbulent, une plus haute tour sera nécessaire.

Chapitre II : Revue des différents types du mât et le choix convenable

En outre, de hautes tours peuvent protéger la turbine de l'effet de cisaillement du vent si le site est souvent le siège d'un important taux de cisaillement du vent.

En général, plus grande est la tour, plus puissante est l'énergie produite par le système.

II.6. Le choix d'hauteur :

La hauteur est choisie en fonction de l'environnement. En présence d'obstacles, le mât doit les dépasser pour pouvoir éviter une grande partie des turbulences. Ces dernières nuisent gravement au bon fonctionnement de l'éolienne à axe horizontal.

Elle est choisie également en fonction de la vitesse moyenne du vent du lieu. En région peu venteuse comme la nôtre, elle va déterminer le fonctionnement correct d'une éolienne domestique, d'où on choisit un mât de 15 m proposé par le professeur monsieur A.SMAILI.

II.7. Conclusion :

À l'heure actuelle, le type le plus commun est la tour autoportante tubulaire pour les grandes éoliennes et il devrait être plus populaire dans l'avenir. Pour les petits tours d'éoliennes, l'utilisation de haubans sur le mât tubulaire est largement considérée.

Donc à cause des raisons données si dessus le choix convenable est le mât tubulaire haubané.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va faire l'étude statique et dynamique du mât de notre éolienne pour ce faire, on doit connaître les caractéristiques de l'éolienne et les forces appliquées sur le mât.

Tableau III.1 : Informations techniques de l'éolienne.

Nom de l'éolienne	WHISPER 100
puissance nominale	1 KW
Diamètre du rotor	D=2.10 m.
Poids de (rotor+ nacelle)	M=21 kg

Tableau III.2 : tableau de différentes caractéristiques.

Type du matériau utilisé pour le mât	acier de construction S235 JRH
Module du Young	$E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
La limite élastique du matériau	$\sigma_e = 235 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
Le coefficient de sécurité	$F_s = 1.7$
La masse volumique de l'air	$\rho_{\text{air}} = 1.25 \text{ kg/m}^3$
La hauteur du mât	L=15m

III.2. Etude d'un mât haubanée :

III.2.1. Les différentes charges appliquées sur le mât :

Le mât est soumis au poids P du rotor et de la nacelle, la force de poussée F du rotor et la charge du vent q . Le mât est considéré comme une poutre encastree cylindrique, pour la sécurité on doit considérer le cas le plus défavorable.

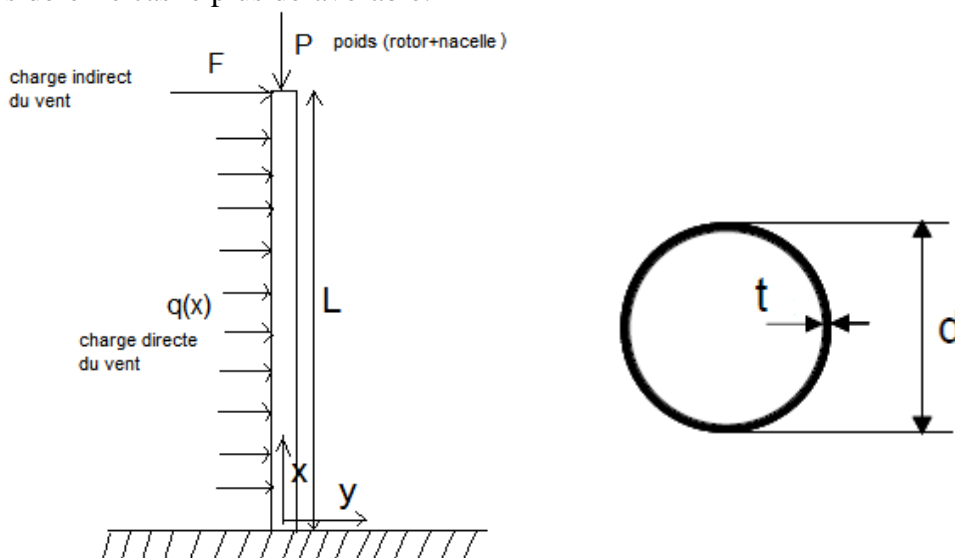


Figure 3.1 : différentes charges appliquées sur le mât.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

- Force axial appliquée sur le mât (Poids du rotor et la nacelle) :

$$P = M g \quad (III.1)$$

$$P = 210 \text{ N}$$

Avec :

M: Masse du (rotor+ nacelle).

g : Accélération de pesanteur.

- Effort exercé par le vent sur le rotor et la nacelle :

$$F = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A U_{\text{max}}^2 \quad (III.2)$$

$$F = 1351.56 \text{ N}$$

Effort exercé par le vent sur le rotor et la nacelle est le rapport de la puissance du vent par la vitesse [3].

ρ_{air} : La masse volumique de l'air.

A : Surface de balayage du disque elle est exprimée sous la forme :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (III.3)$$

D : Diamètre du rotor.

U_{max} : vitesse maximal du vent, elle est égale à $U_{\text{max}} = 25 \text{ m/s}$.

- Force du vent appliqué sur la surface latérale du mât :

$$F_q = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A' U_{\text{max}}^2 \quad (III.4)$$

A' : Surface projeté elle est exprimée sous la forme :

$$A' = d_{\text{ext}} L \quad (III.5)$$

$$q = \frac{F_q}{L} \quad (III.6)$$

q : est la charge du vent par unité de longueur

III.2.2 .Vérification au flambement :

L'étude du flambement permet de vérifier si le mât est stable ou non. Pour faciliter l'analyse, nous allons modéliser le mât de l'éolienne comme une poutre de longueur L ou seul le poids de l'éolienne est appliqué sur l'axe du mât, c'est-à-dire la charge axiale ne provoque pas la flexion.

L'équation différentielle de flambement est développée dans l'**annexe A** est:

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$EI_z \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (\text{III.7})$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$y = A \sin kx + B \cos kx + Cx + D \quad (\text{III.8})$$

Pour trouver les constantes A, B, C, D on doit appliquer les conditions aux limites

$$\begin{cases} y(0)=0 \rightarrow B=-D \\ y'(0)=0 \rightarrow C=-Ak \\ y''(L)=0 \rightarrow A \sin kL + B \cos kL \\ \frac{d^3 y}{dx^3} + k^2 \frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow C=0 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Donc : } A = 0 \text{ et } B \neq 0 \quad \begin{matrix} \rightarrow \\ \rightarrow \end{matrix} \cos kL = 0 \quad (\text{III.10})$$

$$kL = \frac{(2n-1)\pi}{2} \quad (\text{III.11})$$

Finalement :

$$y = B \cos \frac{(2n-1)\pi}{2L} x \quad (\text{III.12})$$

Par identification :

$$\frac{P}{EI} = \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{(2L)^2} \quad \rightarrow \quad P = \frac{(2n-1)^2 EI_z \pi^2}{(2L)^2} \quad (\text{III.13})$$

La plus petite valeur est pour $n = 1$.

III.2.2.1. Force critique d'Euler:

La force critique d'Euler est exprimée ce forme :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{eff}^2} \quad (\text{III.14})$$

Avec L_{eff} est la longueur effective de la poutre qui égale a $L_{eff} = \mu l$

μ Est le coefficient numérique dépendant de la condition aux limites

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

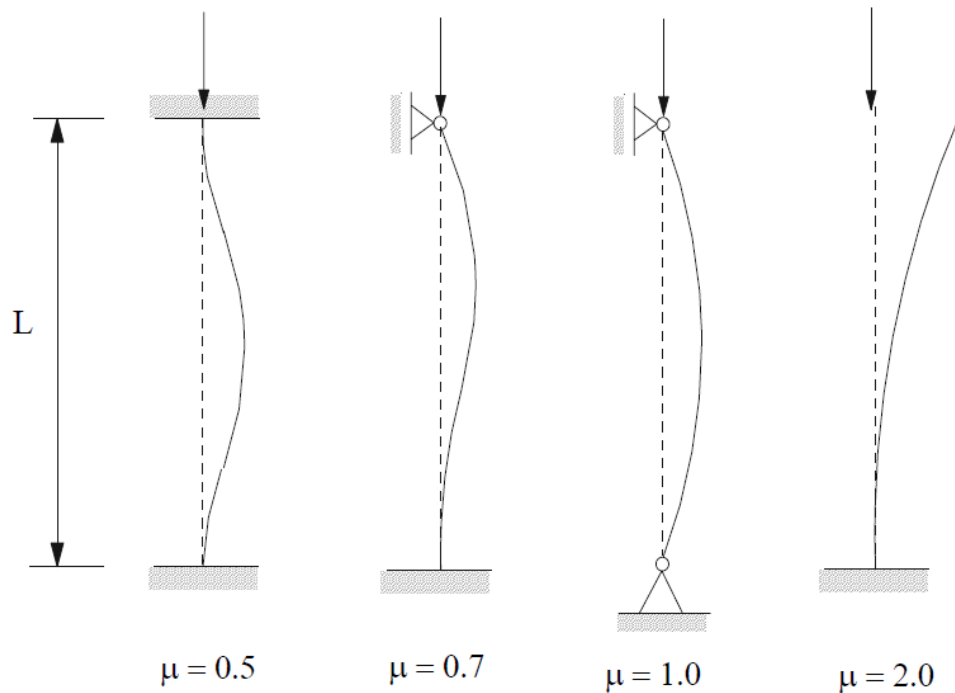


Figure 3.2 : différent valeur de μ pour différent mode de fixation

Dans notre cas $\mu = 2$

Le système est en équilibre stable (stabilité élastique) si seulement si $P < P_{cr}$

III.2.2.2. Contrainte critique :

La contrainte critique est exprimée ce forme :

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{S} = \frac{\pi^2 EI}{S L_{eff}^2} \quad (III.15)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_z}{S}} \quad (III.16)$$

$$I_z = \frac{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{64} \quad \text{et} \quad S = \frac{\pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4}$$

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{i_{min}} \quad \text{et} \quad \lambda_{lim} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}} \quad (III.17)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E (d_{ext}^2 + d_{int}^2)}{64 L^2} \quad (III.18)$$

On suppose que $\lambda \geq \lambda_{lim}$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

D'après le critère de stabilité on a :

$$P \leq \frac{P_{cr}}{n_s} \quad \rightarrow \quad P \quad n_s \leq \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

I_z : Moment d'inertie de la poutre.

S : La section de la poutre.

i_{\min} : Plus petit rayon de giration.

λ_{\lim} : L'élancement limite de la poutre, est égale à 93.9.

n_s : Le coefficient de stabilité est pris toujours supérieur au coefficient de sécurité: Acier 1.8 à 3 [18].

On prend une valeur égal à $n_s = 3$

F_s : Le coefficient de sécurité (pour les pièces de structure, un coefficient allant, selon les cas de service (sans vent, avec vent, sollicitations exceptionnelles), de 1,1 à 1,7 pour les pièces en acier de construction, et un coefficient plus élevé pour les pièces en acier à haute limite d'élasticité,[23].

On prend : $F_s = 1.7$

III.2.3. calculs statiques :

On applique le principe de superposition, pour déterminer la contrainte maximal le mât est soumis à une flexion et une compression ;

III.2.3.1. Contrainte due à la flexion :

Cette contrainte est donnée par :

$$\sigma_f = \frac{M_f}{I_z} y \quad (\text{III.20})$$

M_f : Moment de flexion.

$$M_f = [F(L - x) + q \frac{(L-x)^2}{2}] \quad (\text{III.21})$$

La zone la plus sollicitée est :

$$\text{à } x = 0 \quad M_f = [FL + q \frac{L^2}{2}]. \quad (\text{III.22})$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.2.3.2. Contrainte de compression (normale) :

Elle donnée par :

$$\sigma_c = \frac{p}{S} \quad (\text{III.23})$$

La contrainte totale est donnée par :

$$\sigma_{11} = \sigma_f + \sigma_c = \frac{|M_f|}{I_z} y + \frac{p}{S} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{Avec : } y = \frac{d_{\text{ext}}}{2}$$

Pour calculer le diamètre du mât on utilise le critère de résistance :

$$\sigma_{11} = \frac{|M_f|}{I_z} y + \frac{p}{S} \leq \frac{\sigma_e}{F_s} \quad (\text{III.25})$$

$$\text{Avec : } |M_f| = FL + q \frac{L^2}{2}$$

$$q = 390.62 d_{\text{ext}} \text{ N/m}$$

Pour le passage libre et facile des câbles on pose le diamètre intérieur :

$$d_{\text{int}} = 0.18 \text{ m}$$

➤ **1^{ère} cas** : la masse du mât est négligeable.

L'équation (III.25) devient :

$$\frac{[FL + q \frac{L^2}{2}]}{\frac{\pi(d_{\text{ext}}^4 - d_{\text{int}}^4)}{64}} \frac{d_{\text{ext}}}{2} + \frac{p}{\frac{\pi(d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{int}}^2)}{4}} \leq \frac{\sigma_e}{F_s} \quad (\text{III.26})$$

Après simplification on trouve :

$$-7.38 \cdot 10^8 d_{\text{ext}}^4 + 2392053 d_{\text{ext}}^2 + 1102872.96 d_{\text{ext}} + 774769.15 \leq 0 \quad (\text{III.27})$$

On résout l'inégalité précédente, on trouve:

$$d_{\text{ext}} \geq 19.57 \text{ cm}$$

On prend une valeur proche, donc :

$$d_{\text{ext}} = 20 \text{ cm} \quad (\text{III.28})$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

D'après l'équation de vérification au flambement (III.19), on calcule le diamètre

$$P \leq \frac{P_{cr}}{n_s} \quad \rightarrow \quad P \quad n_s \leq \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$$

Après calcul on trouve :

$$d_{ext} \geq 18.02 \text{ cm}$$

D'après l'équation (III.27) pour un diamètre $d_{ext} = 20 \text{ cm}$ le critère de stabilité est purement vérifié.

On prend $d_{ext} = 20 \text{ cm}$ pour le calcul

➤ **2^{ème} cas** : on tient compte de la masse du mât

III.2.3.3. Contrainte de compression (normale) :

Cette contrainte est donnée par :

$$\sigma_c = \frac{p}{S} + \rho g L \quad (III.29)$$

La contrainte totale est donnée par :

$$\sigma_{11} = \frac{|M_{fl}|}{I_z} y + \frac{p}{S} + \rho g L \quad (III.30)$$

On utilise la condition de résistance, l'équation (III.29) devient :

$$\frac{[FL + q \frac{L^2}{2}]}{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)} \frac{d_{ext}}{2} + \frac{p}{\pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)} + \rho g L \leq \frac{\sigma_e}{F_s}$$

Après simplification on trouve :

$$-7.32 \cdot 10^8 d_{ext}^4 + 2392053 d_{ext}^2 + 1102872.96 d_{ext} + 768170.89 \leq 0$$

On résout l'inégalité précédente, on trouve:

$$d_{ext 1} = -0.1728 \text{ m}$$

$$d_{ext 2} = 0.1957 \text{ m}$$

Donc :

$$d_{ext} \geq 19.57 \text{ cm}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Par conséquent, le poids du mât n'a pas d'influence sur le calcul de diamètre.

Donc on prend $d_{\text{ext}} = 20 \text{ cm}$

La charge du vent sur la tour	$q = 78.12 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Force du vent appliqué sur la surface latérale du mât	$F_q = 1171.86 \text{ N}$
Moment d'inertie de la section de la poutre	$I = 2.7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
La section de la poutre	$S = 5.97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

$$|M_f| = 29061.9 \text{ N.m}$$

$$|\sigma_{11}| = 1.08 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

III.2.4. Calcul de la flèche :

Pour trouver la flèche maximale, on applique aussi le principe de superposition.

III.2.4.1. La charge répartie :

Calcul de la flèche due à la charge répartie

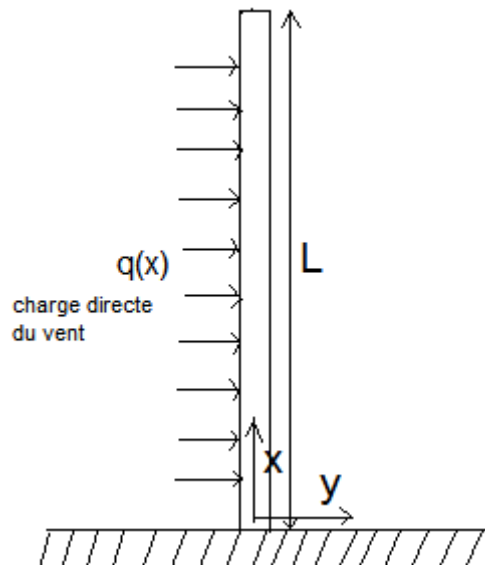


Figure 3.3 : Schématisation du chargement réparti.

Le moment de flexion est exprimé ce forme :

$$M = -q \frac{(L-x)^2}{2} \quad (\text{III.31})$$

équation de la flèche est :

$$EIy''(x) = -M \quad (\text{III.32})$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Par intégration :

$$y(x) = \frac{qL^2}{4EI}x^2 - \frac{qL}{6EI}x^3 + \frac{q}{24EI}x^4 + c_1x + c_2 \quad (\text{III.33})$$

Pour trouver les constantes, on applique les conditions aux limites :

$$y(0) = 0 \rightarrow c_2 = 0$$

$$y'(0) = 0 \rightarrow c_1 = 0$$

Alors l'équation (IV.32) devient:

$$y(x) = \frac{qx^4}{24EI} - \frac{qL}{6EI}x^3 + \frac{qL^2}{4EI}x^2 \quad (\text{III.34})$$

La flèche maximale est à $x = L$

$$y_{max}(L) = f_q = \frac{qL^4}{8EI} \quad (\text{III.35})$$

AN :

$$f_q = 0.087 \text{ m}$$

f_q : est la flèche maximale de poutre.

III.2.4.2. La charge concentrée :

Calcul de la flèche due à la charge concentrée

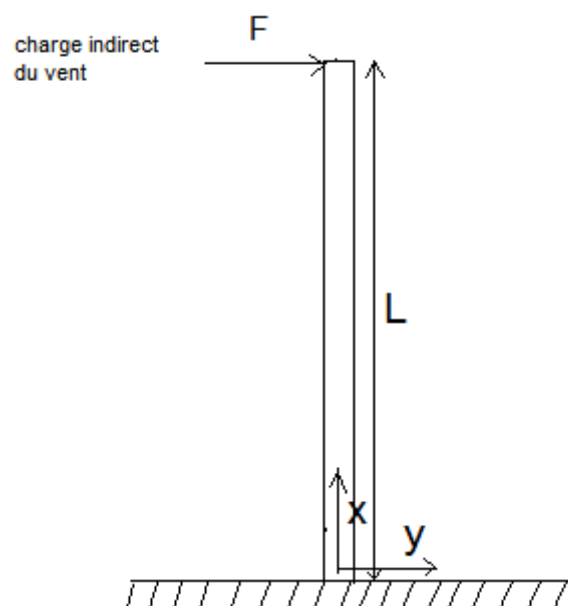


Figure 3.4 : Schématisation du chargement concentrée.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Le moment de flexion est exprimé ce forme :

$$M = -F(L - x) \tag{III.36}$$

Équation de la flèche est :

$$EIy''(x) = -M$$

$$-EIy'' = -F(L - x)$$

$$\rightarrow y'' = \frac{FL}{EI} - \frac{Fx}{EI} \tag{III.37}$$

$$y(x) = -\frac{Fx^3}{6EI} + \frac{FLx^2}{2EI} + c_1x + c_2 \tag{III.38}$$

Pour trouver les constantes, on applique les conditions aux limites :

$$\begin{cases} y(0) = 0 \rightarrow c_2 = 0 \\ y'(0) = 0 \rightarrow c_1 = 0 \end{cases} \tag{III.39}$$

$$y(x) = -\frac{Fx^3}{6EI} + \frac{FLx^2}{2EI} \tag{III.40}$$

$$y_{max}(L) = f_F = \frac{FL^3}{3EI} \tag{III.41}$$

$$f_F = 0.26 \text{ m}$$

Donc la flèche maximal totale est :

$$f_{max} = f_q + f_F = \frac{qL^4}{8EI} + \frac{FL^3}{3EI} \tag{III.42}$$

$$f_{max} = 0.35 \text{ m}$$

III.2.5. Calcul du diamètre extérieur et la flèche en fonction de la variation de la vitesse :

Nous avons obtenu ce tableau à partir de l'inégalité (III.27) pour trouver le diamètre extérieur, en suite par l'équation (III.42) pour trouver la flèche maximale.

Tableau III.3 : Tableau de différente valeur de la flèche en fonction de variation de la vitesse

V (m/s)	d _{int} (cm)	d _{ext} (cm)	f _{max} (m)
10	10	d _{ext} ≥ 10.7 choisit(d _{ext} = 16cm)	0,05366991
15	10	d _{ext} ≥ 11.55 choisit(d _{ext} = 16cm)	0,12075679
20	10	d _{ext} ≥ 12.6 choisit(d _{ext} = 16cm)	0,21467962
25	10	d _{ext} ≥ 13.86 choisit(d _{ext} = 16cm)	0,33543642
30	10	d _{ext} ≥ 15.21 choisit(d _{ext} = 16cm)	0,48302915

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

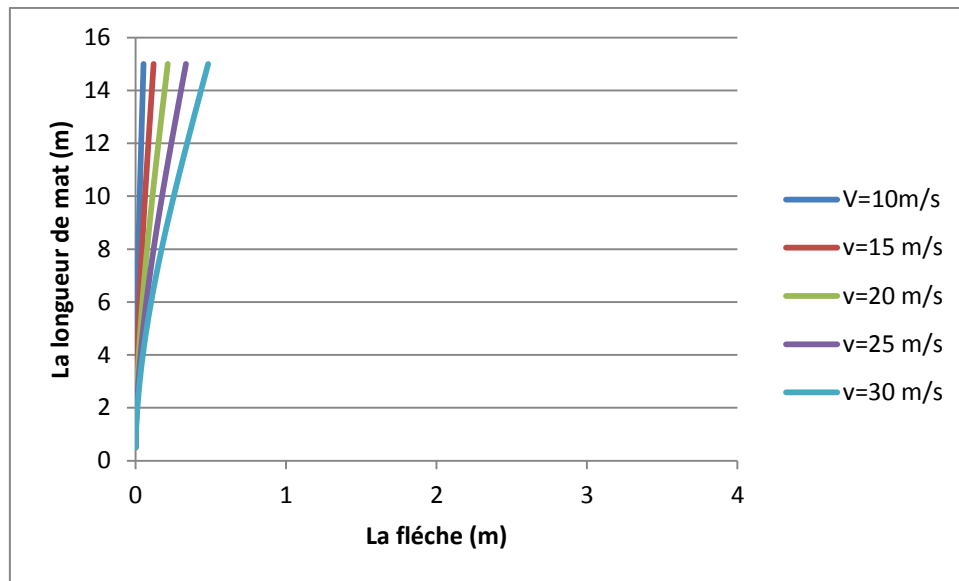


Figure 3.5 : La flèche en fonction de la longueur du mât

Interprétation :

Cette figure représente la flèche en fonction de la longueur du mât, en remarquant que la flèche est liée au vent c'est-à-dire la flèche augmente par l'augmentation de la vitesse du vent.

Tableau III.4 : différentes valeurs de la flèche en fonction de la variation de la vitesse et de diamètre intérieure et extérieure

V (m/s)	d _{int} (cm)	d _{ext} (cm)	f _{max} (m)
10	10	dext ≥ 10.7 choisit(dext = 11cm)	0.6
15	10	dext ≥ 11.55 choisit(dext = 12cm)	0.59
20	10	dext ≥ 12.6 choisit(dext = 13cm)	0.62
25	10	dext ≥ 13.86 choisit(dext = 14cm)	0.64
30	10	dext ≥ 15.21 choisit(dext = 16cm)	0.48

Même chose que le tableau précédent sauf dans ce cas nous avons calculé la flèche maximale à des diamètres extérieurs différents.

Le diamètre extérieur joue un rôle important dans les calculs de la flèche.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.2.6. Calculs du diamètre et tension des câbles de soutien :

Comme la tour sera installée sur un toit de bâtiment, nous ne pouvons pas utiliser un mât autoporteur car il nécessite une fondation robuste.

Pour cela nous fixerons la tour au sol par boulons et nous ajouterons trois câbles, nous allons présenter la méthode de calcul du diamètre du câble.

Note : Pour simplifier les calculs, nous allons considérer seulement 1 hauban par ancrage. En réalité, il y a 3 haubans par ancrage soit 4 haubans par joint de section du mât pour un total de 12 câbles. En simplifiant ainsi, nous rendons le design plus critique ce qui permet de trouver des valeurs de tension plus importantes que la réalité (La tension maximal est sur le câble supérieur).

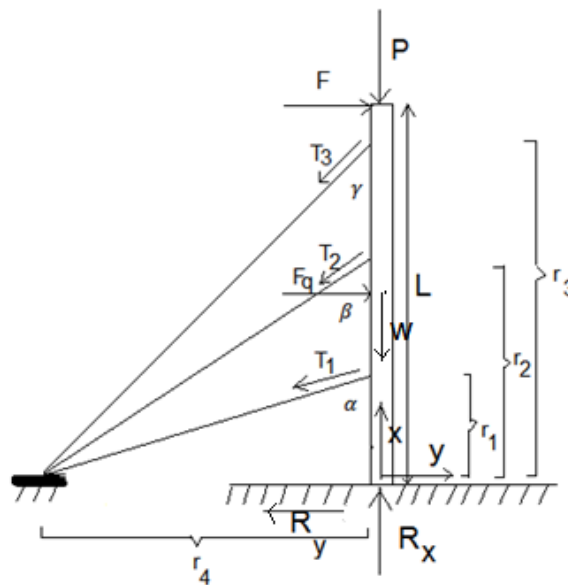


Figure 3.6 : Schématisation du chargement de la Tour haubanée

La détermination du diamètre des câbles passe par le calcul des tensions T_1 qui est due aux forces :
 $w = \rho g L S$ Avec w est le poids du mât

$$\sum F_x = 0 \quad , \quad \sum F_y = 0 \quad , \quad \sum M|_0 = 0 \tag{III.43}$$

$$\begin{cases} R_x - P - w - T_3 \cos \gamma = 0 \\ R_y - F - F_q + T_3 \sin \gamma = 0 \\ M_0 - FL - F_q \frac{L}{2} + T_3 \sin \gamma (r_3) = 0 \end{cases} \tag{III.44}$$

Quatre inconnues et trois équations, le problème devient un système hyperstatique, on applique le théorème de castigliano, on a besoin d'une équation pour résoudre le problème, on doit ajouter L'équation de l'énergie de déformation élastique du système est développée dans l'annexe B est:

$$E_t = 2.9 \cdot 10^{-5} T_3^2 + \left(\frac{9.84 \cdot 10^{-11}}{A'} - 0.19 \right) T_3 + 362.64 \tag{III.45}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

T_3 : La tension du câble situe au sommet.

A' : La section du câble de soutien.

ρ : La masse volumique de l'acier ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$)

On a : $r_1 = 7\text{m}$ et $r_2 = 10\text{m}$ et $r_3 = 13\text{m}$ et $r_4 = 7\text{m}$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{7}{13} = 28.30^\circ$$

$$l = \frac{13}{\cos 28.3} = 14.76 \text{ m}$$

Tableau III.5 : tableau de différentes caractéristiques du câble d'acier.

Module du Young du câble de soutien.	$E' = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
La limite élastique du câble d'acier	$R_e = 1.62 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Hypothèse :

- On suppose que le câble est indéformable.

$$\frac{\partial E_t}{\partial T_3} = 0 \tag{III.46}$$

$$5.8 \cdot 10^{-5} T_3 + \left(\frac{9.84 \cdot 10^{-11}}{A'} - 0.19 \right) = 0$$

D'où :

$$T_3 = - \frac{9.84 \cdot 10^{-11} - 0.19A'}{A' \cdot 5.8 \cdot 10^{-5}} \tag{III.47}$$

➤ Calcul du diamètre du câble

1^{er} cas : La contrainte de traction du câble ne dépasse pas la limite élastique (condition de résistance du câble):

$$\frac{T_3}{A'} \leq \frac{R_e}{F_S} \tag{III.48}$$

Après l'introduction de l'équation(III.47) dans l'équation (III.48), on trouve :

$$A' \geq 3.44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$d' \geq 0.21 \text{ cm}$$

d' : Diamètre du câble de soutien.

2^{ème} cas : calcul le diamètre du câble à partir de limitation de la flèche :

$$\frac{T_3}{k} \leq \delta_{\text{lim}} \tag{III.49}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Avec : $k = \frac{E'A'}{l}$

Après l'introduction de l'équation(III.47) dans l'équation (III.49), on trouve :

$$-\frac{9.84 \cdot 10^{-11} - 0.19A'}{A'^2 E' 5.8 \cdot 10^{-5}} l \leq \delta_{lim}$$

➤ Limiter la flèche à $\frac{1}{10}$ de f_{max} :

$$\delta_{lim} = \frac{f_{max}}{10} = \frac{0.35}{10} = 0.035 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} -304500 A'^2 + 2.8 A' - 1.45 \cdot 10^{-9} &\leq 0 \\ A' &\geq 9.19 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \\ d' &\geq 0.34 \text{ cm} \end{aligned}$$

➤ Limiter la flèche à $\frac{1}{100}$ de f_{max} :

$$\begin{aligned} \delta_{lim} = \frac{f_{max}}{100} = \frac{0.35}{100} &= 0.0035 \text{ m} \\ A' &\geq 9.19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \\ d' &\geq 1.08 \text{ cm} \end{aligned}$$

III.2.7. Calcul dynamique :

Cette étude vise à caractériser les différentes fréquences et modes propres d'une petite structure à une éolienne. Celle-ci est soumise à des sollicitations aérodynamiques que l'on suppose aléatoire. Il est donc utile de mener ce type d'étude dans le but de prévenir toute résonance pouvant engendrer, au pire, la ruine de la structure. Nous nous concentrerons en particulier sur ses modes de flexion, que nous supposons prépondérants, donc de basse fréquence, pour une structure élancée de ce type.

III.2.7.1. Vibration libre:

L'équation différentielle de la vibration libre est développé dans l'annexe C est:

$$c^2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \tag{III.50}$$

Avec $c = \sqrt{\frac{EI}{\rho s}}$

III.2.7.1.1.Méthode analytique :

➤ **Calcul des fréquences propres :**

On effectue une séparation de variable :

$$v(x, t) = Y(x) T(t) \tag{III.51}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

On dérive l'équation (III.51), et on remplace dans l'équation (III.50).

$$\frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} = \frac{\partial^4 Y(x)}{\partial x^4} T(x)$$

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} V(x)$$

$$\frac{EI}{\rho S} \frac{d^4 Y}{dx^4} = - \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = \text{cst}$$

$$\frac{EI}{\rho S} \frac{d^4 Y}{dx^4} = - \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = \omega^2 \quad (\text{III.52})$$

La constante ω^2 est choisi positive pour assurer la stabilité de solution.

$$\frac{d^4 Y}{dx^4} - \beta^4 Y = 0 \quad (\text{III.53})$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (\text{III.54})$$

La solution de deux équations différentielles (III.53) et (III.54) est :

$$Y(x) = A \cosh \beta x + B \sinh \beta x + C \cos \beta x + D \sin \beta x \quad (\text{III.55})$$

$$T(t) = E \sin \omega t + F \cos \omega t \quad (\text{III.56})$$

$$\text{Avec : } \beta^4 = \frac{\rho S}{EI} \omega^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$$

Alors :

$$\omega_i = (\beta_i L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S L^4}} \quad (\text{III.57})$$

A, B, C, D, E, F : sont des constantes déterminées à partir des conditions aux limites et des conditions initiales.

❖ Modélisation d'un mât : **encastrée-masse attaché**

$$\left\{ \begin{array}{l} v(0, t) = 0 \\ v'(0, t) = 0 \\ V(L, t) = -M\ddot{v} \\ M(L, t) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.58})$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$\begin{cases} A + C = 0 \\ B + D = 0 \\ \frac{d^3 Y}{dx^3} \Big|_{x=L} = -\frac{M}{\rho s L^4} (\beta L)^4 Y(x) \Big|_{x=L} \\ -EI v'' = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A+C=0 \\ B+D=0 \\ A \sinh \beta L + B \cosh \beta L + C \sin \beta L - D \cos \beta L = -\frac{M\beta}{\rho s} [A \cosh \beta L + B \sinh \beta L + C \cos \beta L + D \sin \beta L] \\ -A \beta^2 \cosh \beta L - B \beta^2 \sinh \beta L + C \beta^2 \cos \beta L + D \beta^2 \sin \beta L = 0 \end{cases}$$

Ces quatre équations peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \sinh \beta L + \frac{M\beta}{\rho s} \cosh \beta L & \cosh \beta L + \frac{M\beta}{\rho s} \sinh \beta L & \sin \beta L + \frac{M\beta}{\rho s} \cos \beta L & -\cos \beta L + \frac{M\beta}{\rho s} \sin \beta L \\ -\beta^2 \cosh \beta L & -\beta^2 \sinh \beta L & \beta^2 \cos \beta L & \beta^2 \sin \beta L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.59})$$

$$a * b = 0$$

Avec :

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad \text{et} \quad \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

La solution non-triviale (vecteur $[A, B, C, D]^T$ non nul) s'obtient en trouvant la solution de l'équation (III.59) , $\det(a) = 0$

$$2(\beta L)^2 + 2(\beta L)^2 \cos \beta L \cosh \beta L + \frac{2M(\beta L)^3}{\rho s L} \cos \beta L \sinh \beta L - \frac{2M(\beta L)^3}{\rho s L} \sin \beta L \cosh \beta L = 0 \quad (\text{III.60})$$

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda + 0.03 \lambda \cos \lambda \sinh \lambda - 0.03 \lambda \sin \lambda \cosh \lambda = 0$$

On résout cette équation par la méthode numérique de Newton Raphson :

(Le code Matlab est disponible dans **l'annexe D**).

On trouve les cinq premiers modes

$$\lambda_1 = (\beta_1 L) = 1.8226, \lambda_2 = (\beta_2 L) = 4.5745, \lambda_3 = (\beta_3 L) = 7.6698$$

$$\lambda_4 = (\beta_4 L) = 10.7563, \lambda_5 = (\beta_5 L) = 13.8516$$

On remplace les λ_i dans l'équation (III. 57), on trouve les fréquences propres

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Tableau III.6 : les cinq premières fréquences propres de vibration libre dans le cas d'un mât encastré avec masse attaché à l'extrémité.

Mode	λ_j	$\omega_j(\text{rad/s})$	$f_j(\text{Hz})$
1	1.8226	5.11	0.8132
2	4.5745	32.22	5.128
3	7.6698	90.60	14.42
4	10.7563	128.17	28.35
5	13.8516	295.47	47.05

➤ **Déterminé les déformées modales**

Pour obtenir les déformées modales, il faut utiliser les relations entre différents coefficient, A, B, C, D , la condition pour $x = 0$ conduit à

$$A + C = 0 \text{ et } B + D = 0$$

En utilisant ces équations dans la deuxième et la troisième condition, on obtient :

$$B = - \frac{\sinh \beta_i L + \frac{M\beta_i}{\rho S} \cosh \beta_i L - \sin \beta_i L - \frac{M\beta_i}{\rho S} \cos \beta_i L}{\cosh \beta_i L + \frac{M\beta_i}{\rho S} \sinh \beta_i L + \cos \beta_i L - \frac{M\beta_i}{\rho S} \sin \beta_i L} = - \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L}$$

$$Y_i(x) = A \left[\cosh \beta_i x - \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L} \sinh \beta_i x - \cos \beta_i x + \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L} \sin \beta_i x \right]$$

On normalise les modes à $A = 1$

Donc les déformées modales sont :

$$\phi_i(x) = \cosh \beta_i x - \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L} \sinh \beta_i x - \cos \beta_i x + \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L} \sin \beta_i x \quad (\text{III.61})$$

L'équation de déplacement est :

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} [E_i \sin \omega_i t + F_i \cos \omega_i t] \phi_i(x) \quad (\text{III.62})$$

❖ Modélisation d'un mât : **encastré-libre**

$$\begin{cases} v(0, t) = 0 \\ v'(0, t) = 0 \\ V(L, t) = 0 \\ M(L, t) = 0 \end{cases}$$

L'équation caractéristique est :

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$1 + \cosh \beta L \cos \beta L = 0 \quad (\text{III.63})$$

On résout cette équation par la méthode numérique de Newton Raphson :

On trouve :

Tableau III.7 : les cinq premières fréquences propres de vibration libre dans le cas d'un mât encastrée-libre.

Mode	$\beta_i L$	ω_i (rad/s)	f_i (Hz)
1	1.873	5.47	0.87
2	4.69	34.31	5.46
3	7.86	96.38	15.34
4	10.99	188.42	30.00
5	14.13	311.46	49.59

III.2.7.1.2. Méthode de Rayleigh-Ritz :

$$\left\{ [k_{ij}] - \left[[M_{ij}] + M \left\{ Q_i(x) Q_j(x) \Big|_1 \right\} \right] \omega_j^2 \right\} \{ a_j \} = 0 \quad (\text{III.64})$$

avec :

$$k_{ij} = \int_0^1 EI Q_{i,xx}(x) Q_{j,xx}(x) dx \quad (\text{III.65})$$

et :

$$M_{ij} = \int_0^1 \rho s Q_i(x) Q_j(x) dx \quad (\text{III.66})$$

Le nombre de fréquence dépend du nombre de fonction admissible.

On pose trois fonctions admissibles, elles doivent vérifier les conditions géométriques aux limites:

$$\begin{cases} Q_1(x) = x^2 \\ Q_2(x) = x^3 \\ Q_3(x) = x^4 \end{cases} \quad (\text{III.67})$$

D'où les éléments de $[k]$ est :

$$k_{11} = 4EIL, \quad k_{12} = 6EIL^2, \quad k_{13} = 8EIL^3, \quad k_{22} = 12EIL^3$$

$$k_{23} = 18EIL^4, \quad k_{33} = 29EIL^5$$

D'où les éléments de $[M]$ est :

$$M_{11} = \frac{\rho s l^5}{5}, \quad M_{12} = \frac{\rho s l^6}{6}, \quad M_{13} = \frac{\rho s l^7}{7}, \quad M_{22} = \frac{\rho s l^7}{7}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$M_{23} = \frac{\rho s l^8}{8}, M_{33} = \frac{\rho s l^9}{9}$$

On remplace les éléments $[k_{ij}]$ et $[M_{ij}]$ dans l'équation (IV.64), on trouve les ω_j :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{20EI}{\rho s L^4 + 5ML^3}} = 6.45 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{84EI}{\rho s L^4 + 7ML^3}} = 12.88 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{261EI}{\rho s L^4 + 9ML^3}} = 22.17 \text{ rad/s}$$

L'erreur commise pour la fréquence fondamentale totale est 11.4%

III.2.7.2. Vibration forcée :

Excitation synchrone due à la rotation du rotor n'existe pas, on suppose que le moteur est en marche stable et l'installation de l'éolienne sur le mât est parfaite (aucune excentricité de rotor+ nacelle avec le mât), la seule excitation est due aux effets aérodynamiques (excitation aléatoire : action du vent).

Si la sollicitation extérieure à la même fréquence que l'une des fréquences propres associées à la flexion de l'éolienne, une résonance se produit et l'éolienne subira de grands efforts de flexion qui pourraient aller jusqu'à la ruine de la structure. Pour cela nous nous sommes intéressés particulièrement aux modes de flexion.

L'équation différentielle de la vibration forcée est :

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho s \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (\text{III.68})$$

On cherche une solution décomposée sous la forme :

$$v(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} G_m(t) \phi_m(x) \quad (\text{III.69})$$

Donc :

$$EI \sum_{m=1}^{\infty} G_m(t) \frac{d^4 \phi_m(x)}{dx^4} + \rho s \sum_{m=1}^{\infty} \ddot{G}_m(t) \phi_m(x) = q(x, t) \quad (\text{III.70})$$

En multipliant les deux membres par $\phi_i(x)$ puis on intégrant les deux membres

$$\int_0^L EI \sum_{m=1}^{\infty} G_m(t) \frac{d^4 \phi_m(x)}{dx^4} \phi_i(x) dx + \int_0^L \rho s \sum_{m=1}^{\infty} \ddot{G}_m(t) \phi_m(x) \phi_i(x) dx = \int_0^L q(x, t) \phi_i(x) dx \quad (\text{III.71})$$

La relation d'orthogonalité est vérifiée pour $m \neq i$

Quand $m = i$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

La raideur généralisée est :

$$K_i = \int_0^L EI \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx \quad (\text{III.72})$$

La masse généralisée est :

$$M_i = \int_0^L \rho s \phi_i^2(x) dx \quad (\text{III.73})$$

La force généralisée est :

$$F_i(t) = \int_0^L q(x, t) \phi_i(x) dx \quad (\text{III.74})$$

$$M_i \ddot{G}_i(t) + K_i G_i(t) = F_i(t) \quad (\text{III.75})$$

Il s'agit d'un système à 1 DDL dont $G_i(t)$ est la solution du déplacement en coordonnées pour le mode i , elle s'exprime selon la nature du signal de la force $F_i(t)$.

La structure est excitée par une force quelconque, la forme de cette force est :

$$G_i(t) = B_i e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \varphi_i) + F_i(t) * h_i(t) \quad (\text{III.76})$$

$B_i e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \varphi_i)$: Réponse libre du système B_i et φ_i dépend des conditions initiales a $t = 0$

$F_i(t) * h_i(t)$: Réponse forcé représentée par le produit de convolution de la force par la réponse impulsionnelle

$$F_i(t) * h_i(t) = \int_0^t F_i(\tau) h_i(t - \tau) d\tau = \frac{e^{-\xi_i \omega_i t}}{M_i \omega_{di}} \int_0^t F_i(\tau) e^{\xi_i \omega_i \tau} \sin \omega_{di} (t - \tau) d\tau \quad (\text{III.77})$$

$$G_i(t) = B_i e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \varphi_i) + \frac{e^{-\xi_i \omega_i t}}{M_i \omega_{di}} \int_0^t F_i(\tau) e^{\xi_i \omega_i \tau} \sin \omega_{di} (t - \tau) d\tau \quad (\text{III.78})$$

Avec : $B_i e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_{di} t + \varphi) = 0$

$$\text{Avec : } \xi_i = \frac{C_i}{2M_i \omega_i}$$

$$\text{et : } \omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (\text{III.79})$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

➤ Calcul du déplacement

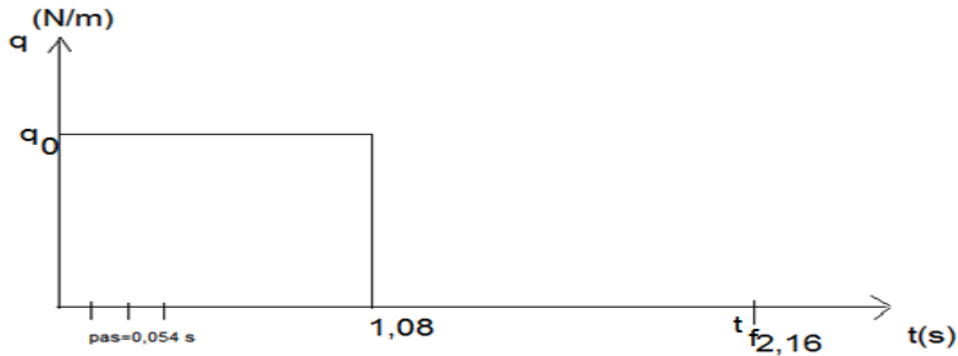


Figure 3.7 : excitation aléatoire (action du vent)

$$T_0 = 1.08 \text{ s}$$

$$q(t) = \begin{cases} q_0 & 0 \leq t \leq T_0 \\ 0 & t > T_0 \end{cases} \quad (\text{III.80})$$

Pour l'acier : $\xi = 0.004$

On divise l'intervalle de $[0 \ t_f]$ avec pas de 0.054 s .

$$M_1 = \int_0^L \rho s \phi_1(x) \phi_1(x) dx \quad \text{et} \quad F_1(t) = \int_0^{L=15} q(x,t) \phi_1(x) dx$$

Avec :

$$\phi_1(x) = \cosh 0.121x - \frac{\cosh 1.8226 + \cos 1.8226}{\sinh 1.8226 + \sin 1.8226} \sinh 0.121x - \cos 0.121x + \frac{\cosh 1.8226 + \cos 1.8226}{\sinh 1.8226 + \sin 1.8226} \sin 0.121x$$

$$\begin{cases} M_1 = 636.42 \text{ kg} \\ M_2 = 655.17 \text{ kg} \\ M_3 = 662.51 \text{ kg} \\ M_4 = 668.76 \text{ kg} \\ M_5 = 673.44 \text{ kg} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} F_1(\tau) = 871.58 \text{ N} \\ F_2(\tau) = 582.45 \text{ N} \\ F_3(\tau) = 249.08 \text{ N} \\ F_4(\tau) = 269.76 \text{ N} \\ F_5(\tau) = 120.83 \text{ N} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \omega_{d1} = 5.1 \text{ rad/s} \\ \omega_{d2} = 32.21 \text{ rad/s} \\ \omega_{d3} = 90.59 \text{ rad/s} \\ \omega_{d4} = 178.16 \text{ rad/s} \\ \omega_{d5} = 295.46 \text{ rad/s} \end{cases}$$

On intégré $G_i(t)$ par partie dans l'intervalle $[0 \ t_f]$ on obtient :

Pour le mode 1 :

$$0 \leq t \leq 1.08$$

$$G_1(t) = 0.0103e^{-0.02t} ([-0.02 \sin 5.10t] + 5.10[e^{0.02t} \cos 5.10t])$$

$$t > 1.08$$

$$G_1(t) = 0.0103e^{-0.02t} ([0.02e^{0.022} \sin 5.10(t - 1.08) - 0.02 \sin 5.10t] + 5.10[e^{0.022} \cos 5.10(t - 1.08) - \cos 5.10t])$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$V(L, t)_1 = \phi_1(L)G_1(t)$$

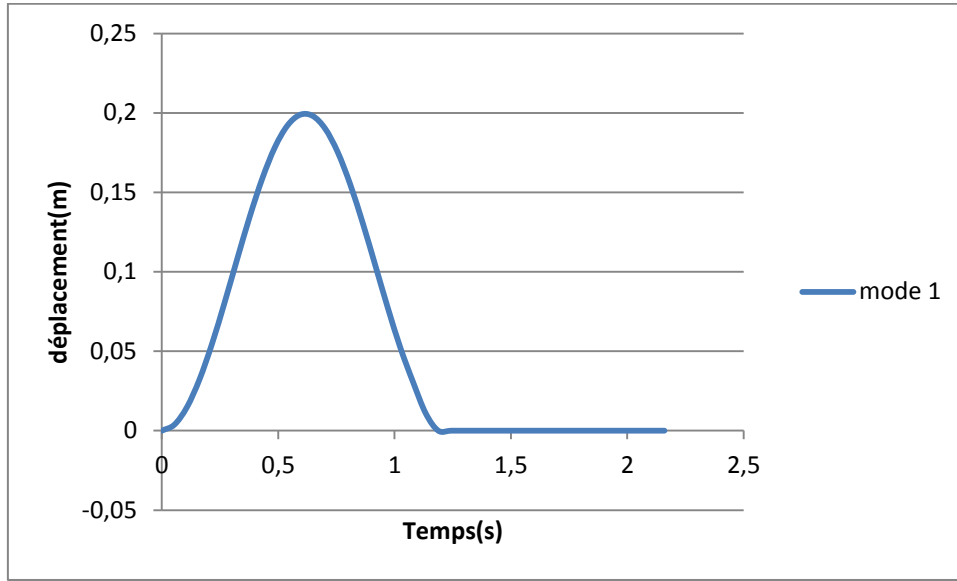


Figure 3.8 : déplacement du mât en fonction de temps (mode 1)

Pour le mode 1+2 :

$$0 \leq t \leq 1,08$$

$$G_2(t) = 2,66 * 10^{-5} e^{-0,128t} ([-0,128 \sin 32,21t] + 32,21[e^{0,128t} \cos 32,21t])$$

t > 1,08

$$G_2(t) = 2,66 * 10^{-5} e^{-0,128t} ([0,128 e^{0,139} \sin 32,21(t - 1,08) - 0,128 \sin 32,21t] + 32,21[e^{0,139} \cos 32,21(t - 1,08) - \cos 32,21t])$$

$$V(L, t)_2 = \phi_1(L)G_1(t) + \phi_2(L)G_2(t)$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

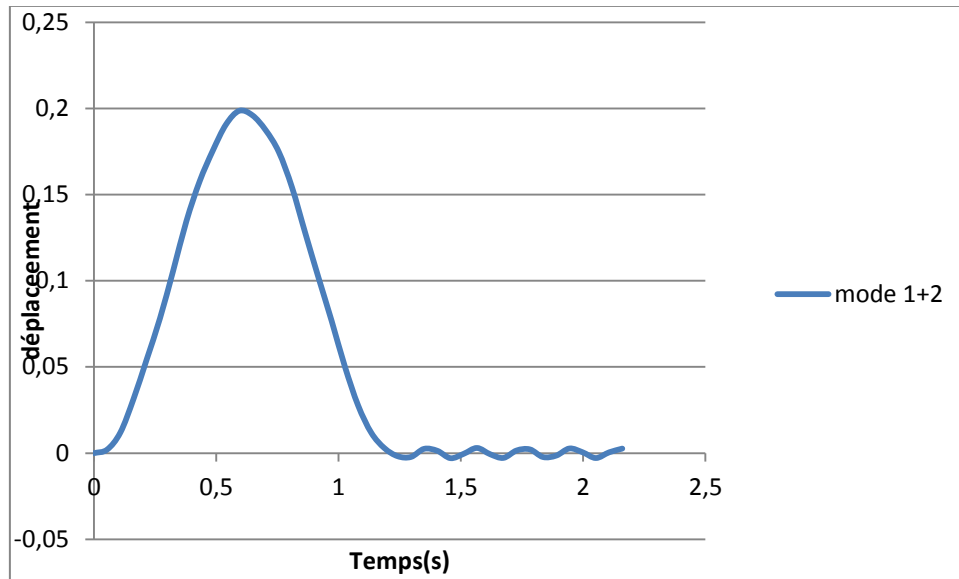


Figure 3.9 : déplacement du mât en fonction de temps (mode 1+2)

Pour le mode 1+2+3 :

$$0 \leq t \leq 1,08$$

$$G_3(t) = 5,05 * 10^{-7} e^{-0,362t} ([-0,362 \sin 90,59t] + 90,59[e^{0,362t} \cos 90,59t])$$

$$t > 1,08$$

$$G_3(t) = 5,05 * 10^{-7} e^{-0,362t} ([0,362e^{0,39} \sin 90,59(t - 1,08) - 0,362 \sin 90,59t] + 90,59[e^{0,39} \cos 90,59(t - 1,08) - \cos 90,59t])$$

$$V(L, t)_3 = \phi_1(L)G_1(t) + \phi_2(L)G_2(t) + \phi_3(L)G_3(t)$$

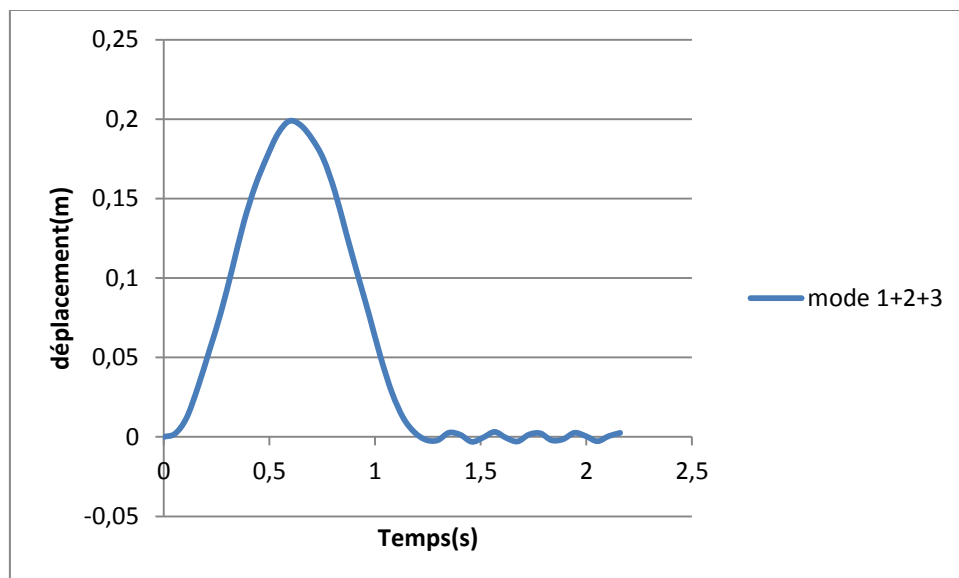


Figure 3.10 : déplacement du mât en fonction de temps (mode 1+2+3)

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

Pour le mode 1+2+3+4 :

$$0 \leq t \leq 1.08$$

$$G_4(t) = 7.13 * 10^{-8} e^{-0.712t} ([-0.712 \sin 178.16t] + 178.16[e^{0.712t} \cos 178.16t])$$

$$t > 1.08$$

$$G_4(t) = 7.13 * 10^{-8} e^{-0.712t} ([0.712e^{0.77} \sin 178.16(t - 1.08) - 0.712 \sin 178.16t] + 178.16[e^{0.77} \cos 178.16(t - 1.08) - \cos 178.16t])$$

$$V(L, t)_4 = \phi_1(L)G_1(t) + \phi_2(L)G_2(t) + \phi_3(L)G_3(t) + \phi_4(L)G_4(t)$$

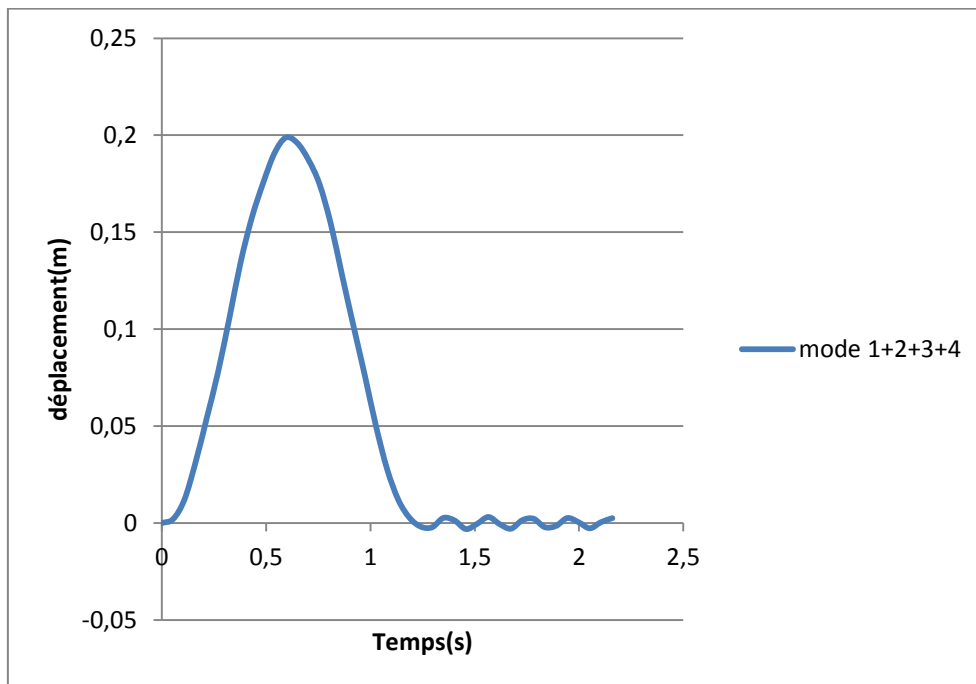


Figure 3.11 : déplacement du mât en fonction de temps (mode 1+2+3+4)

Pour le mode 1+2+3+4+5 :

$$0 \leq t \leq 1.08$$

$$G_5(t) = 6.95 * 10^{-9} e^{-1.18t} ([-1.18 \sin 295.46t] + 295.46[e^{1.18t} \cos 295.46t])$$

$$t > 1.08$$

$$G_5(t) = 6.95 * 10^{-9} e^{-1.18t} ([1.18e^{1.276} \sin 295.46(t - 1.08) - 1.18 \sin 295.46t] + 295.46[e^{1.276} \cos 295.46(t - 1.08) - \cos 295.46t])$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

D'après l'équation (III.69) on a :

$$V(L, t)_5 = \phi_1(L)G_1(t) + \phi_2(L)G_2(t) + \phi_3(L)G_3(t) + \phi_4(L)G_4(t) + \phi_5(L)G_5(t)$$

Le déplacement total maximal est :

Avec :

$$\begin{aligned}\phi_1(L = 15\text{m}) &= 1.91 \\ \phi_2(L = 15\text{m}) &= -1.74 \\ \phi_3(L = 15\text{m}) &= 1.59 \\ \phi_4(L = 15\text{m}) &= -1.47 \\ \phi_5(L = 15\text{m}) &= 1.34\end{aligned}$$

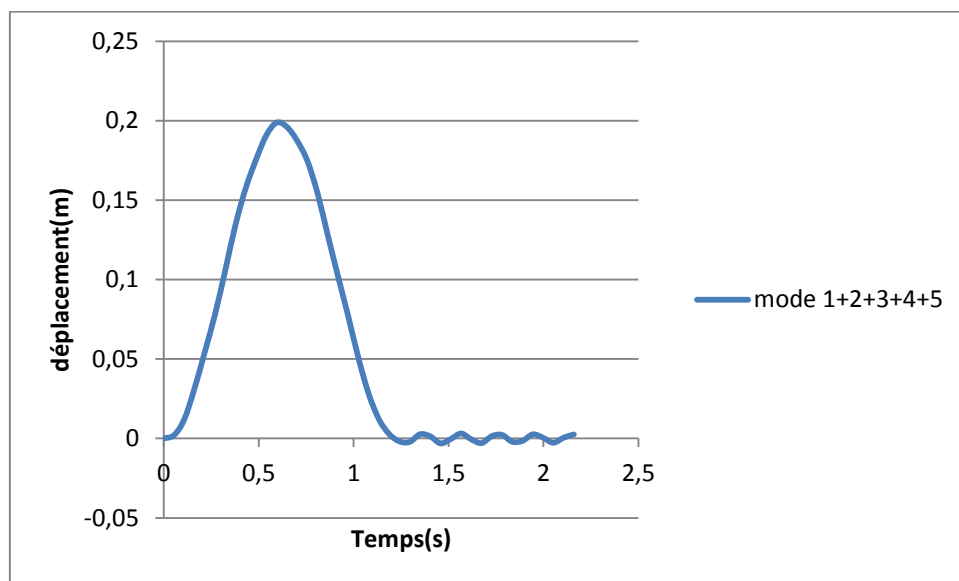


Figure 3.12 : déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation aléatoire.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.3. Etude d'un mât autoporteur (mât conique) :

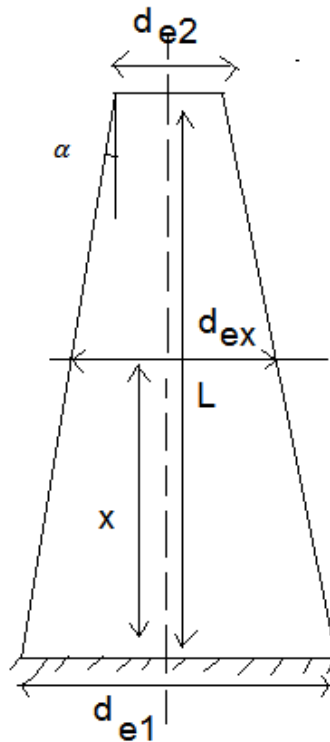


Figure 3.14 : La forme d'un mât autoporteur

Tableau III.8 : tableau de différentes caractéristiques.

Type du matériau utilisé	acier de construction S235 JRH
Module du Young	$E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
La limite élastique du matériau	$\sigma_e = 235 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
Le coefficient de sécurité	$F_s = 1.7$
Moment d'inertie de la section de la poutre	$I(x) \text{ (m}^4\text{)}$
La section de la poutre	$S(x) \text{ (m}^2\text{)}$
La vitesse maximale du vent	$U_{\max} = 50 \text{ m/s}$
La masse volumique de l'air	$\rho_{\text{air}} = 1.25 \text{ kg/m}^3$
Effort exercé par le vent sur le rotor et la nacelle	$F = 5406.25 \text{ N}$
La hauteur du mât	$L=30 \text{ m}$
Surface de balayage du disque	$A = 3.46 \text{ m}^2$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.3.1. calculs statiques :

Pour calculer le diamètre du mât on a supposé que le diamètre est constant puis après le calcul du diamètre de la base on calcule le diamètre au sommet à condition qu' il y'a une certaine conicité.

$$q = \frac{1}{2} * \rho_{\text{air}} * U_{\text{max}}^2 * d_{e1} = 1562.5 d_{e1} \text{ N/m}$$

q : est la charge du vent appliqué sur la tour.

III.3.1. 1. Contrainte total de flexion et compression :

D'après la condition de résistance, l'équation (III.26), on a :

$$\frac{[FL + q \frac{L^2}{2}]}{\frac{\pi(d_{e1}^4 - d_{i1}^4)}{64}} \frac{d_{e1}}{2} + \frac{p}{\frac{\pi(d_{e1}^2 - d_{i1}^2)}{4}} \leq \frac{\sigma_e}{F_s}$$

$$-\sigma_e \pi d_{e1}^4 + F_s(16qL^2 + 840)d_{e1}^2 + 32F_sFLd_{e1} + d_{i1}^2(\pi d_{i1}^2 \sigma_e + F_s 840) \leq 0 \quad (\text{III.81})$$

Tableau III.9 : différents valeurs des diamètres en fonction d'épaisseurs

d_{i1} (mm)	d_{e1} (mm)	t (mm)
180	≥ 316.7	≥ 68.35
300	≥ 375.8	≥ 37.9
500	≥ 539	≥ 19.5
700	≥ 725	≥ 12.5
800	≥ 821	≥ 10.5
900	≥ 919	≥ 9.5
1000	≥ 1016	≥ 8

Nous avons obtenu ce tableau par la résolution de l'équation (III.81) pour trouver le diamètre extérieur, nous avons modifié à chaque fois le diamètre intérieur jusqu'à de trouvé l'épaisseur de 8mm.

Le diamètre choisi dans la base :

$$d_{e1} = 101.6 \text{ cm}$$

$$d_{i1} = 100 \text{ cm}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

D'après l'équation de vérification au flambement (III.19),

$$P \leq \frac{P_{cr}}{n_s} \rightarrow P n_s \leq \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$$

Le critère de stabilité est vérifié pour chaque variation de diamètre.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

➤ Calcul diamètre du mât au sommet :

$$\tan \alpha = \frac{d_{e1} - d_{e2}}{2L} = \frac{d_{ex} - d_{e2}}{2(L-x)} \quad (\text{III.81})$$

$$d_{ex} = d_{e1} - \frac{x}{L}d_{e1} + \frac{x}{L}d_{e2} \quad (\text{III.82})$$

$$d_{ex} = d_{e1} + (d_{e2} - d_{e1})\frac{x}{L} \quad (\text{III.83})$$

$$d_{ex} = d_{e1} \left(1 - \left(1 - \frac{d_{e2}}{d_{e1}}\right)\frac{x}{L}\right) \quad (\text{III.84})$$

$$d_{ex} = d_{e1}(1 - bx) \quad (\text{III.85})$$

$$\text{Tel que :} \quad b = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{d_{e2}}{d_{e1}}\right) \quad (\text{III.86})$$

$$\rightarrow S(x) = S_1(1 - bx)^2 \quad (\text{III.87})$$

Pour avoir une certaine conicité il faut donc $bL \leq 1$:

On prend :

$$b = 0.02$$

$$S_1 = \frac{\pi(d_{e1}^2 - d_{i1}^2)}{4}$$

$$S_1 = 2.53 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$S(x = L) = 4.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S(x = L) = \frac{\pi(d_{e2}^2 - (d_{e2} - 2t)^2)}{4}$$

$$4.05 \cdot 10^{-3} = \frac{\pi(d_{e2}^2 - (d_{e2} - 2t)^2)}{4}$$

$$d_{e2} = 16.92 \text{ cm}$$

Donc le diamètre du sommet :

$$d_{e2} = 16.92 \text{ cm}$$

$$d_{i2} = 15.32 \text{ cm}$$

Par la même méthode on fait varier b et on calcule les diamètres.

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

III.3.2. Calcul de la flèche :

équation de la flèche est :

$$Ely'' = -M$$

$$de_x = d_{e1} - 2x \tan \alpha$$

$$I(x) = \frac{\pi((d_{e1} - 2x \tan \alpha)^4 - (d_{e1} - 2x \tan \alpha - 2t)^4)}{64}$$

$$S(x) = \frac{\pi((d_{e1} - 2x \tan \alpha)^2 - (d_{e1} - 2x \tan \alpha - 2t)^2)}{4}$$

$$y'' = \frac{\frac{q(L-x)^2}{2} + F(L-x)}{E \frac{\pi((d_{e1} - 2x \tan \alpha)^4 - (d_{e1} - 2x \tan \alpha - 2t)^4)}{64}}$$

La flèche a été calculée dans le chapitre IV par élément fini (ANSYS).

Avec : $q = 1562.5 \frac{d_{e1} + d_{e2}}{2} \text{ N/m}$

Tableau III.10 : différents diamètres de sommet en fonction de variation de b .

b	A(x = L) (m ²)	d _{e2} (x = L) (cm)	d _{i2} (x = L) (cm)
0.02	4.05 10 ⁻³	16.92	15.32
0.01	1.24 10 ⁻²	50.15	48.55
0.005	1.83 10 ⁻²	73.61	72.01

Le diamètre choisi au sommet est :

$$d_{e2} = 50.15 \text{ cm}$$

$$d_{i2} = 48.55 \text{ cm}$$

$$q = 1185.55 \text{ N/m}$$

$$|M_f| = [FL + q \frac{L^2}{2}]$$

$$|M_f| = \left[5406.25 * 30 + 1185.55 \frac{30^2}{2} \right] = 695685 \text{ N.m}$$

$$|\sigma_{11}| = \frac{[FL + q \frac{L^2}{2}]}{\frac{\pi(d_{e1}^4 - d_{i1}^4)}{64}} \frac{d_{e1}}{2} + \frac{p}{\frac{\pi(d_{e1}^2 - d_{i1}^2)}{4}}$$

Chapitre III : Etude statique et dynamique de la tour

$$|\sigma_{11}| = \frac{695685}{3.22 \cdot 10^{-3}} \frac{1.016}{2} + \frac{210}{2.53 \cdot 10^{-2}} = 1.09 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

Vérification de la condition de résistance :

$$|\sigma_{11}| \leq \frac{\sigma_e}{F_s}$$

Donc : $1.09 \cdot 10^8 \leq 1.38 \cdot 10^8$

III.4. Conclusion :

Le mât doit supporter la nacelle et le rotor en toute sécurité. Il doit être vérifié par les études: statique, fréquentielle, au flambement.

Les calculs de la RDM et l'étude au flambement nous ont permis de déterminer les dimensions du mât.

Puis, on a déterminé les distributions des contraintes, des déplacements, et des déformations des éléments principaux étudiés. Cela nous a permis de vérifier l'état de la structure. Les résultats auxquels nous sommes parvenus ont démontrés la fiabilité et les bonnes performances de la structure de notre éolienne.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

IV.1. Introduction :

ANSYS : est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures, thermique. Ses principales capacités sont :

- l'analyse statique
- l'analyse modale
- l'analyse harmonique (réponse forcée)
- l'analyse temporelle
- la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).
- modélisation du rayonnement.

IV.2.modélisation d'un mât haubanée :

IV.2.1. Calculs statiques :

Nous avons modélisé deux cas: un mât non haubané et un autre haubané, dont nous montrons la description et les résultats de la version haubanée, compte tenu de l'amélioration prouvée au niveau des contraintes, déformations et déplacements.

Voici les principaux résultats:

➤ mât non haubané

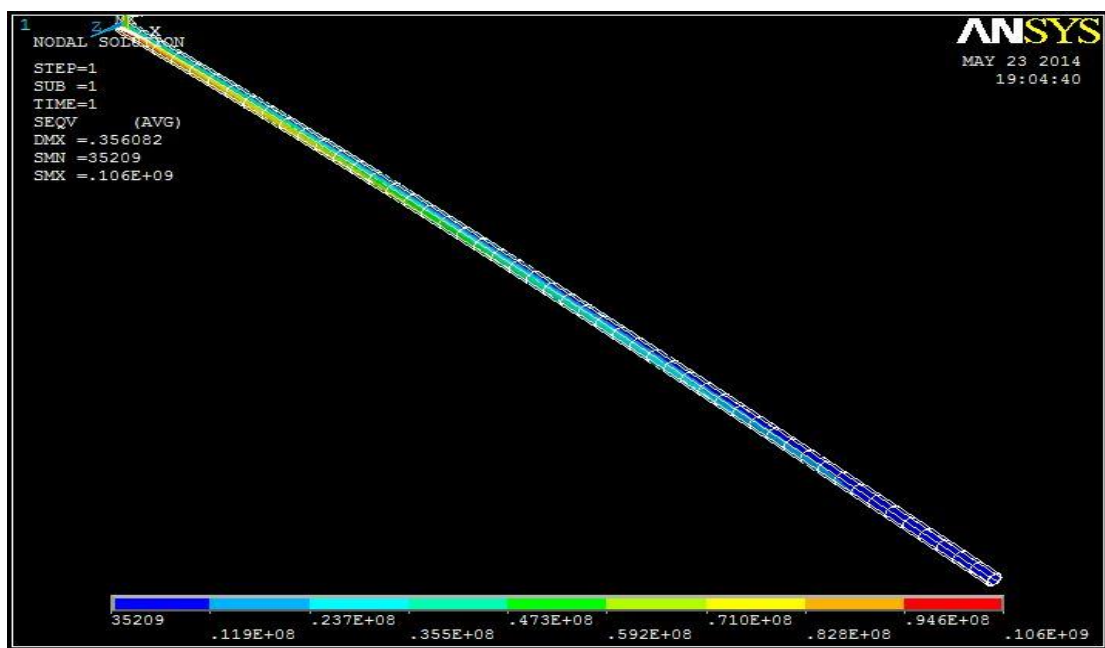


Figure 4.1 : Distribution des contraintes de von mises sur la tour non haubanée.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

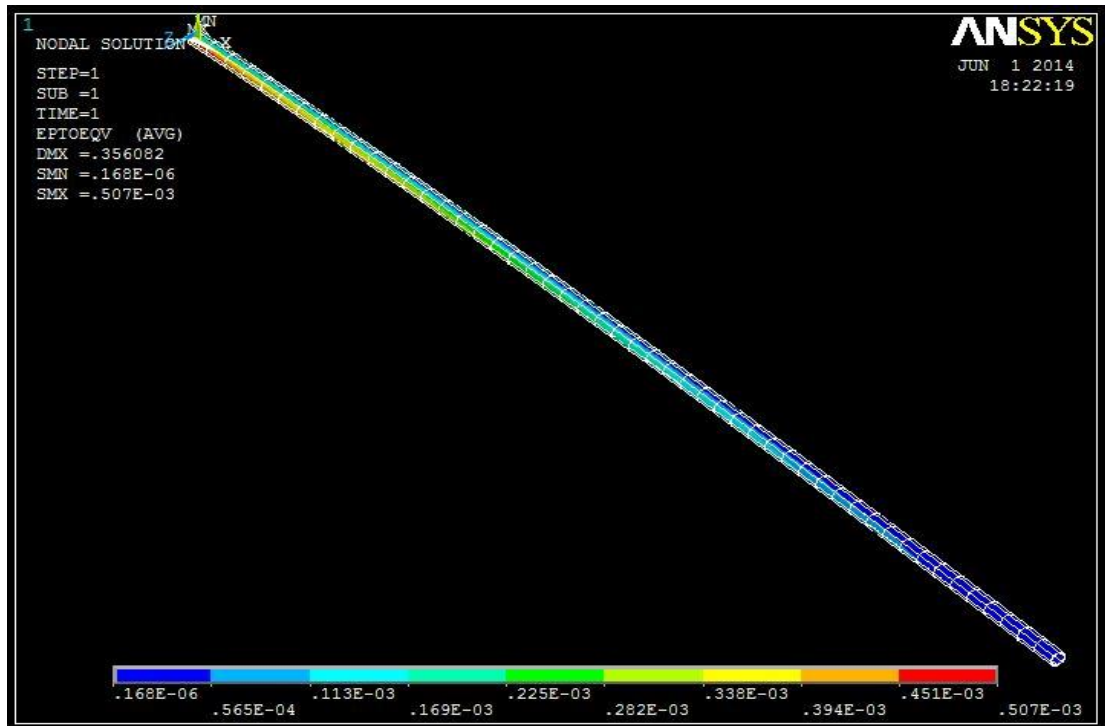


Figure 4.2 : Distribution des déformations sur la tour non haubanée.

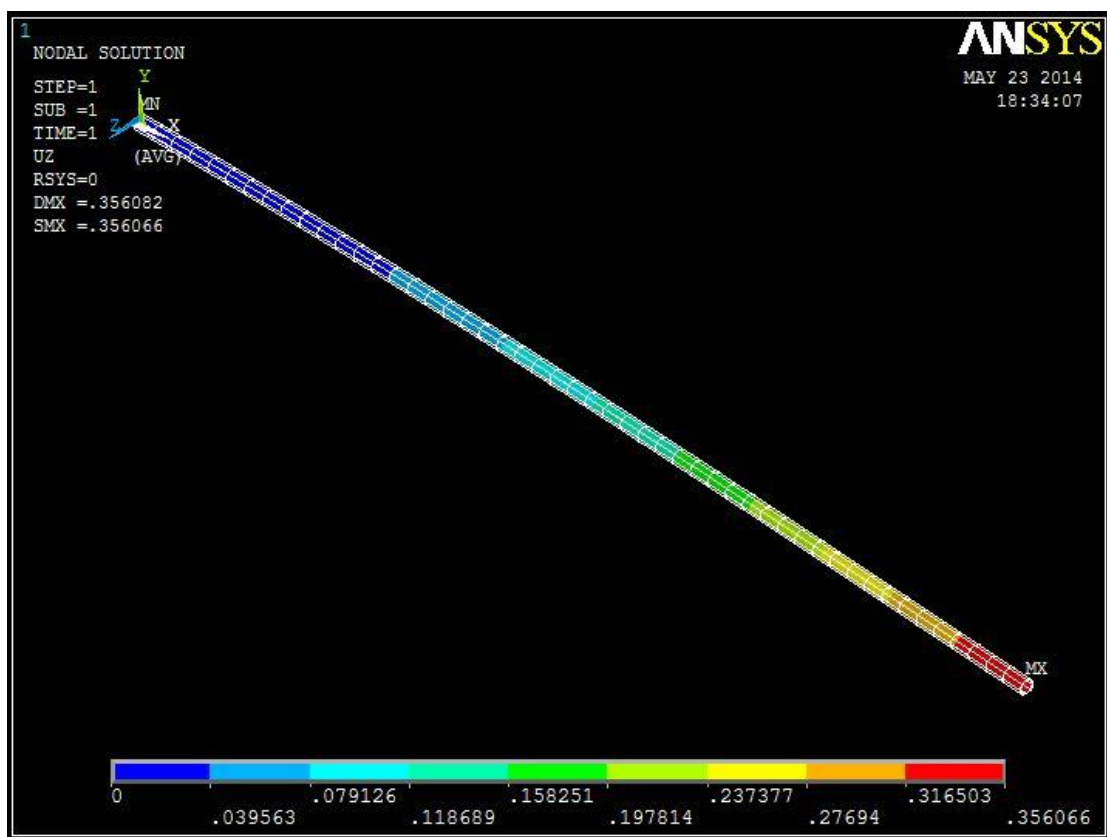


Figure 4.3 : Distribution des déplacements sur la tour non haubanée.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

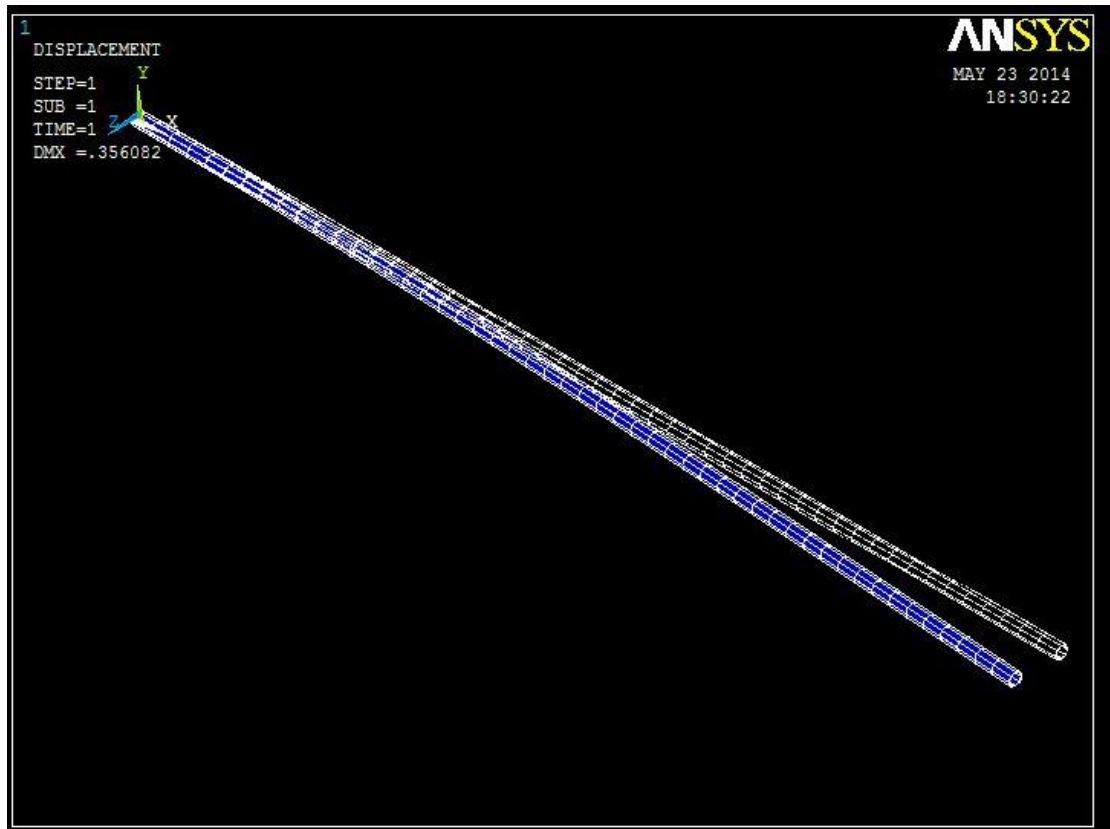


Figure 4.4 : forme de déformation de la tour non haubanée.

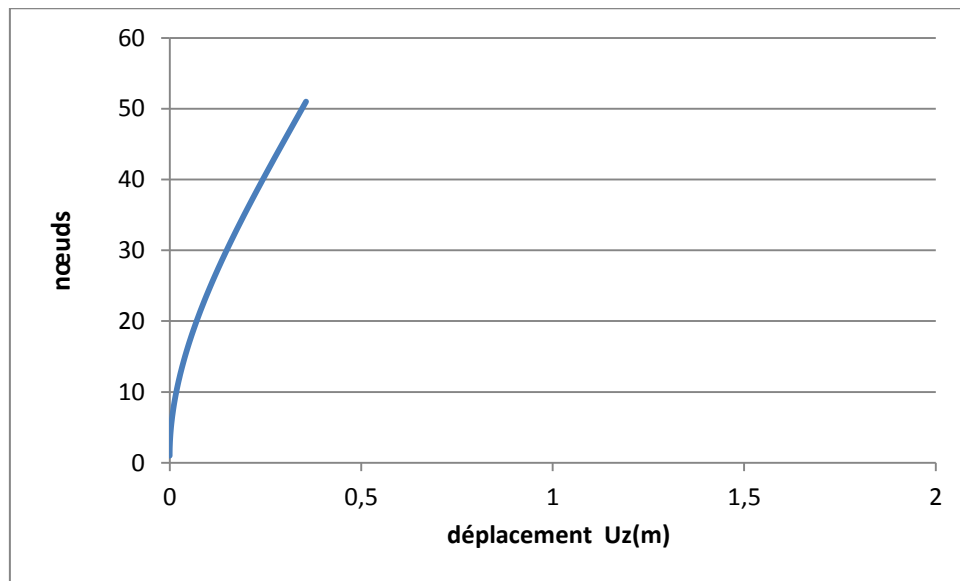


Figure 4.5 : L'évolution des déplacements du mât non haubané en fonction de ces nœuds

Interprétation des résultats :

D'après les résultats, les contraintes maximales se situent au niveau de la partie inférieure de la tour près du sol, par contre les déplacements se situent au sommet de la tour, et dépassent pas la limite élastique du matériau utilisé.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

Tableau IV.1: Valeurs des contraintes, déformations et déplacements dans les zones les plus sollicitées dans le cas d'un mât non haubanée.

Résultat Sollicitation	résultat analytique	résultat par ANSYS	% erreur
Contrainte (N/m ²)	$1.08 \cdot 10^8$	$1.06 \cdot 10^8$	1.85
déformation	$5.14 \cdot 10^{-4}$	$5.07 \cdot 10^{-4}$	1.36
Déplacement(m)	0.35	0.356066	1.73

➤ **mât haubané :**

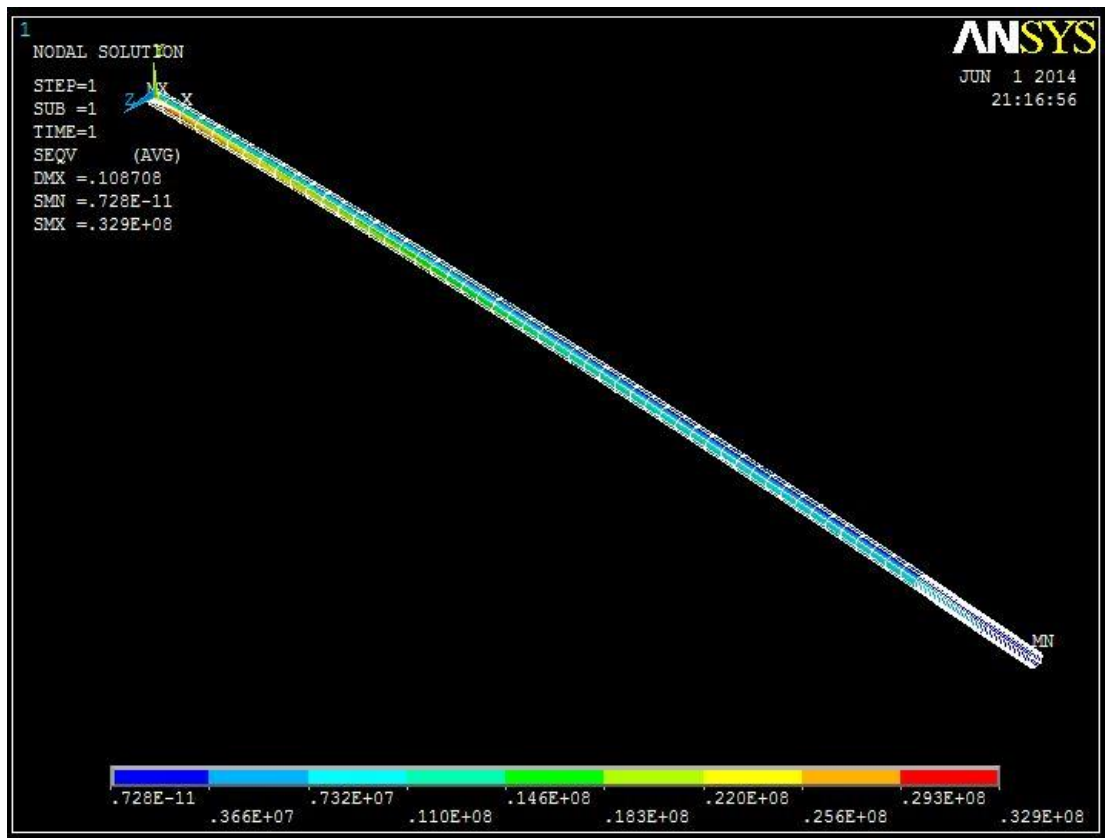


Figure 4.6 : Distribution des contraintes de von mises sur la tour haubanée.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

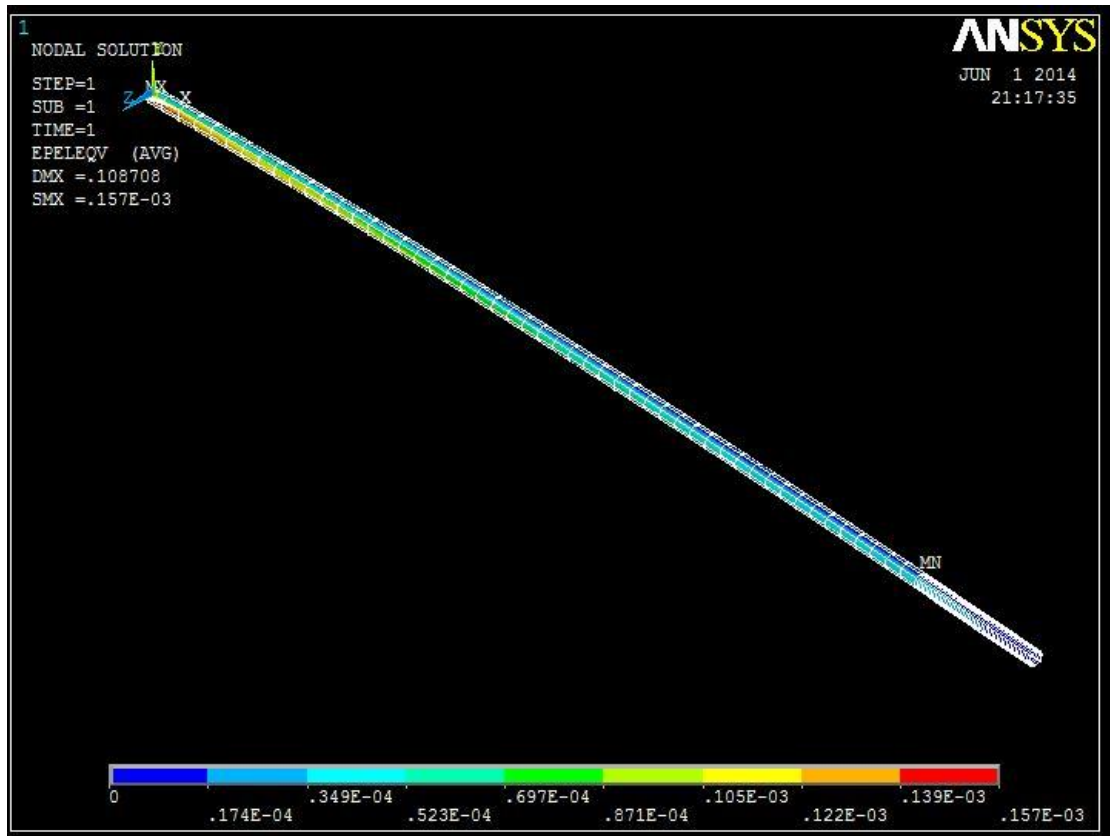


Figure 4.7 : Distribution des déformations de von mises sur la tour haubanée.

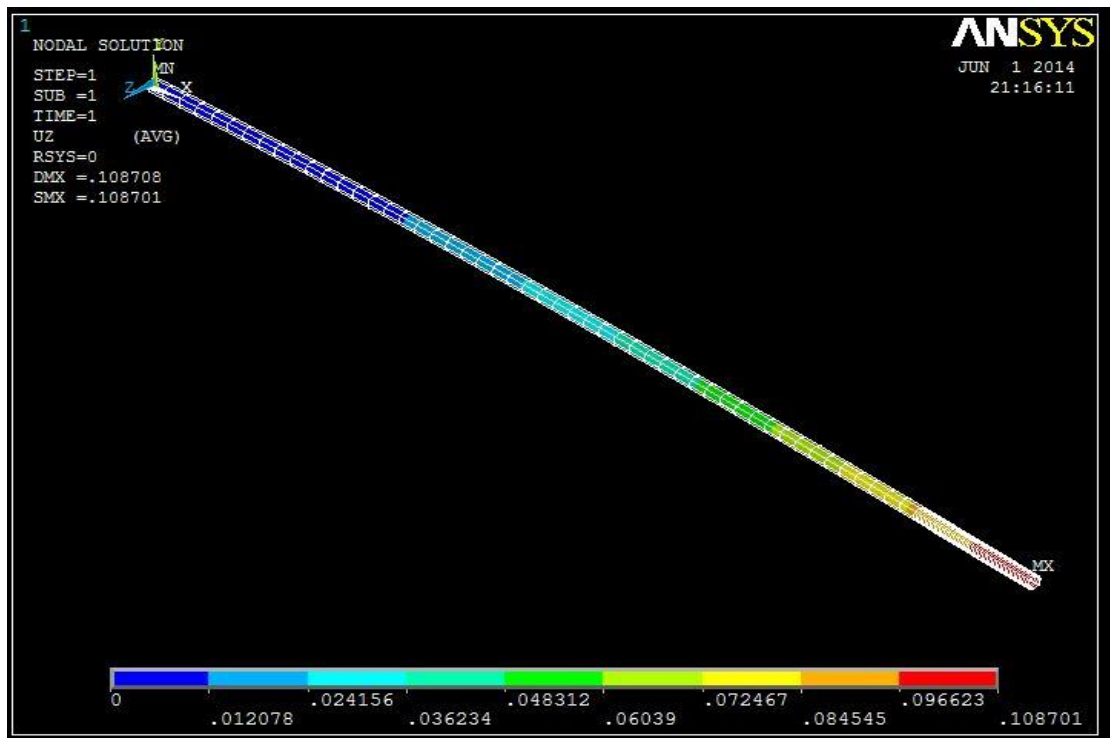


Figure 4.8 : Distribution des déplacements sur la tour haubanée.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

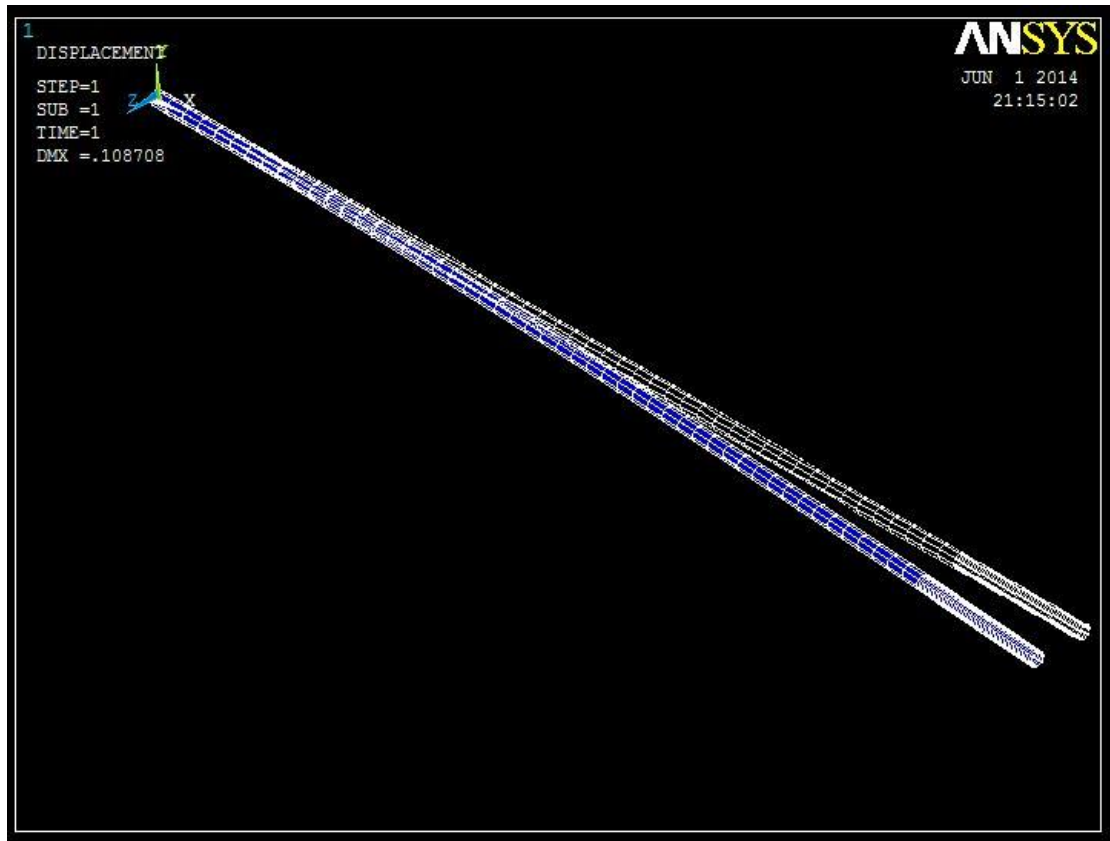


Figure 4.9 : forme de déformation de la tour haubanée.

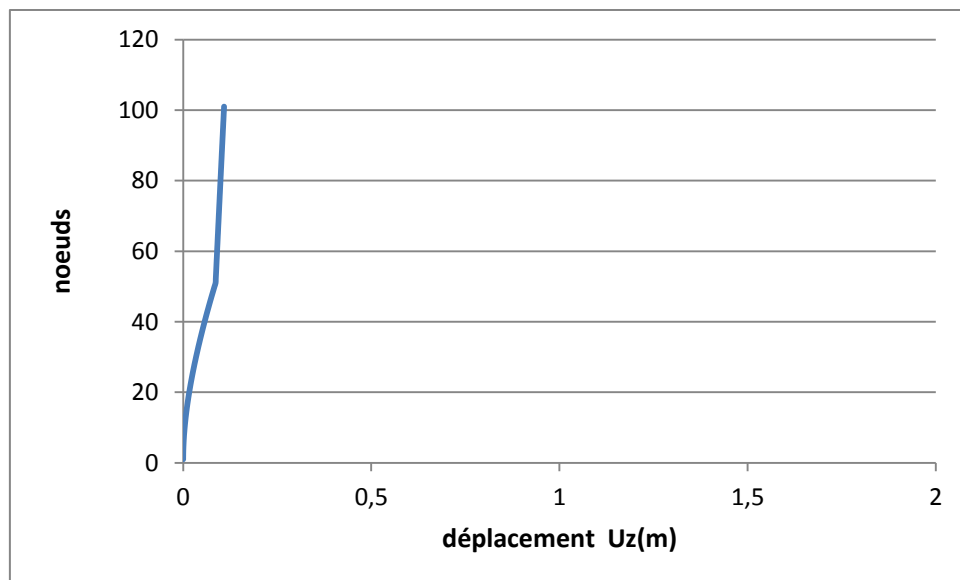


Figure 4.10 : L'évolution des déplacements du mât haubanée en fonction de ces nœuds.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

➤ Comparaison entre un mât non haubanée et un mât haubanée :

- Action :

Tableau IV.2: comparaison des contraintes, déformations et déplacements dans les zones les plus sollicitées de mât haubané et non haubané.

Modèle sollicitations	Mât non haubané	Mât haubané	Amélioration
Contrainte (N/m ²)	1.06 10 ⁸	0.329 10 ⁸	7.31 10 ⁷
déformation	5.07 10 ⁻⁴	1.57 10 ⁻⁴	3.5 10 ⁻⁴
Déplacement(m)	0.356066	0.108708	0.247358

- Réaction :

Tableau IV.3: Valeur de différente composante de réaction au niveau de l'encastrement.

Modèle réaction	Mât non haubané	Mât haubané	Amélioration
R _x (N)	0	-2884.3	2884.3
R _z (N)	2523.4	970.32	1553.08
M _y (N.m)	-29062	-8872.4	-20189.6

IV.2.2. Vibration transversal :

IV.2.2.1. Vibration libre:

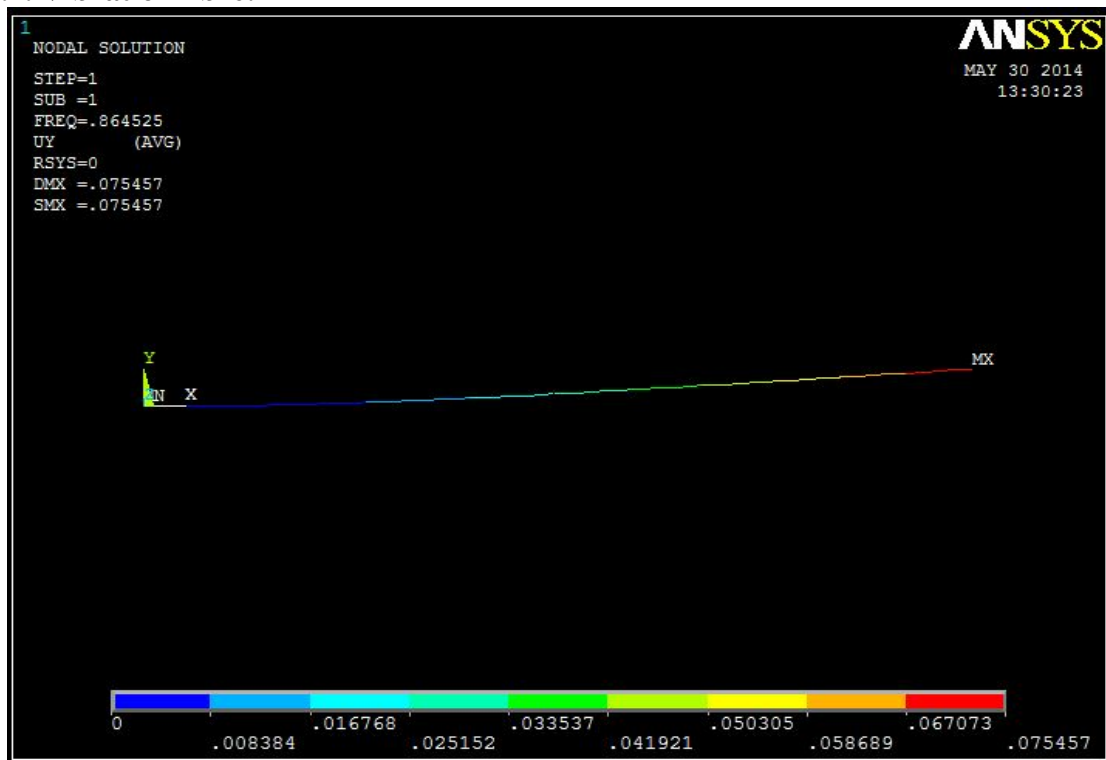


Figure 4.11 : premier mode de vibration libre.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

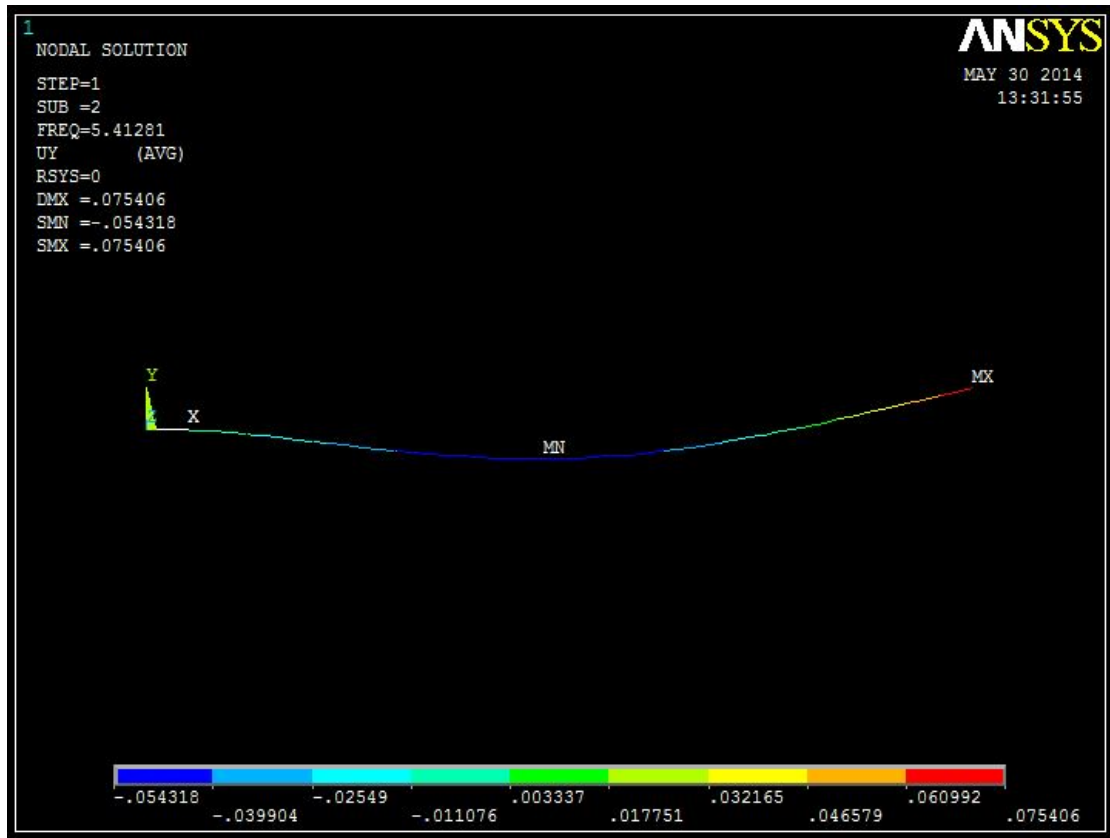


Figure 4.12 : deuxième mode de vibration libre.

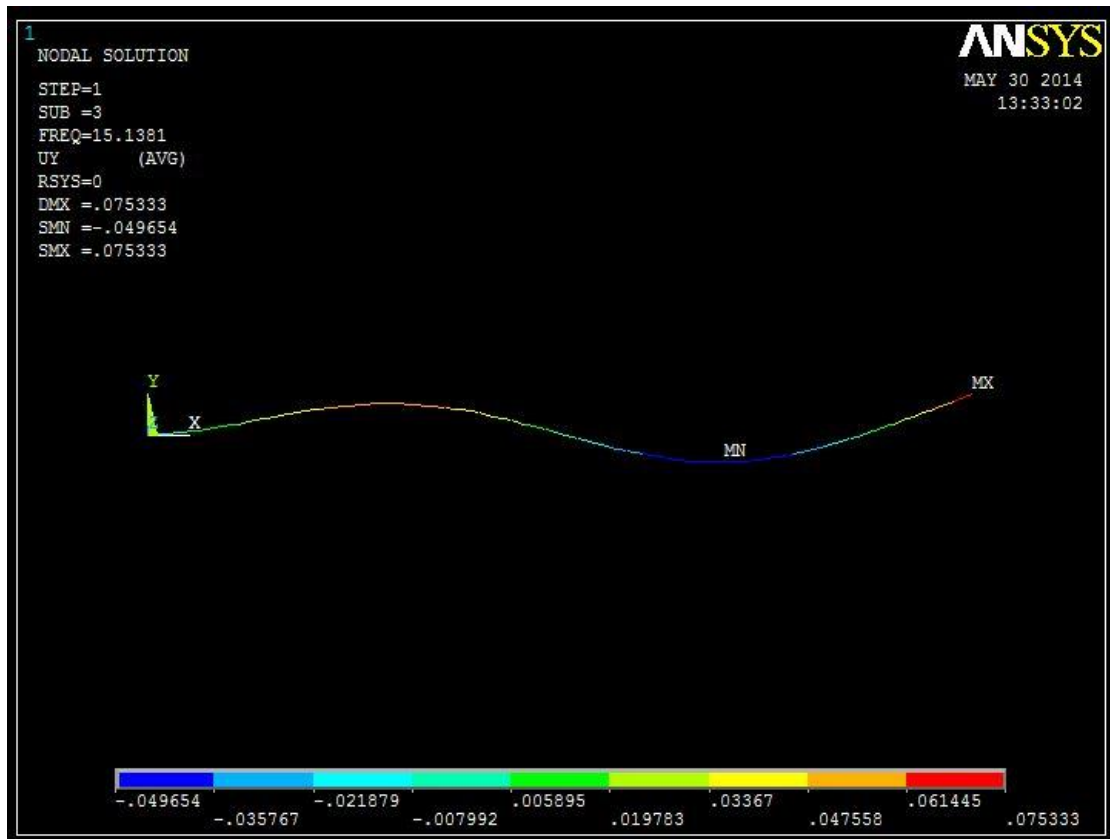


Figure 4.13 : troisième mode de vibration libre.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS



Figure 4.14 : quatrième mode de vibration libre.

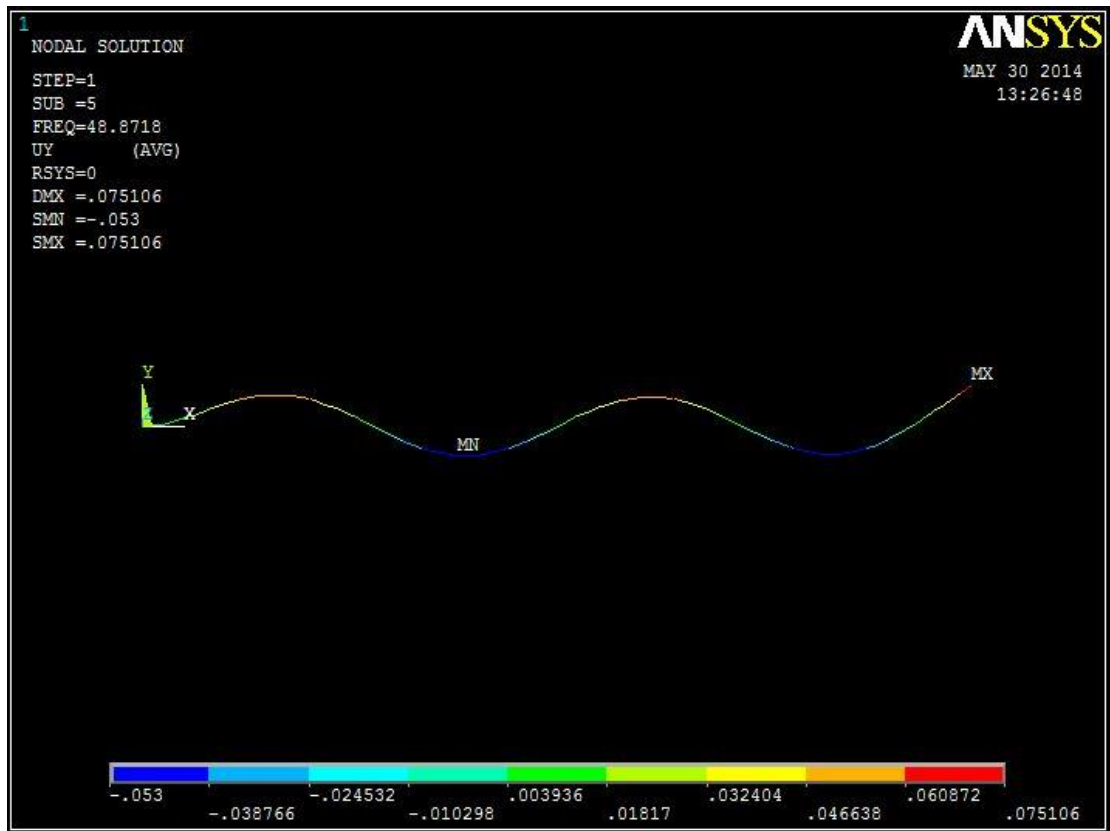


Figure 4.15 : cinquième mode de vibration libre.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

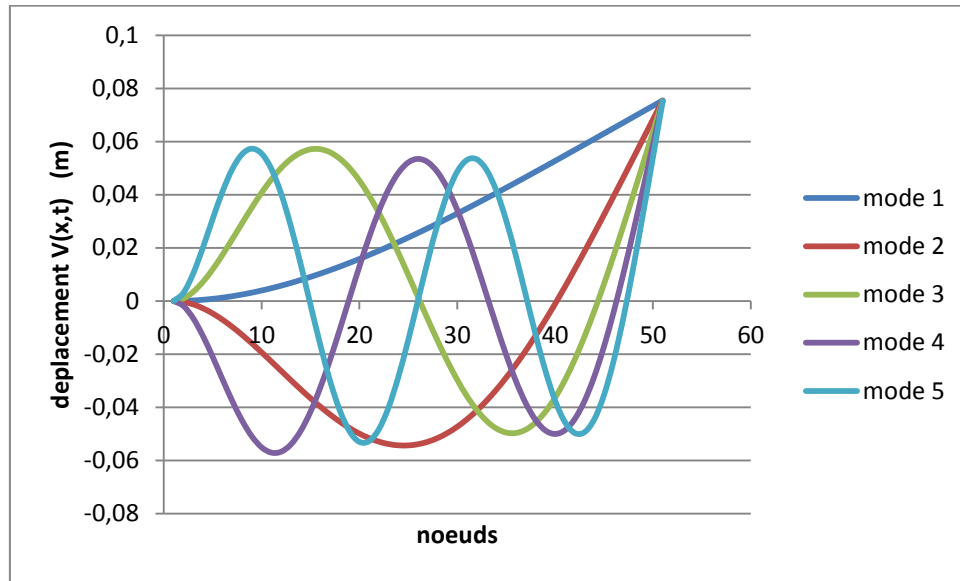


Figure 4.16 : Déformé modale des cinq premiers modes du mât.

Tableau IV.4: Valeurs des fréquences propres pour les cinq premiers modes.

Résultat mode	Analytique mât encastrée-masse attaché f(Hz)	Par ANSYS mât encastré e masse attaché f(Hz)	% erreur	Analytique mât encastrée-libre f(Hz)	Par ANSYS mât encastrée libre f(Hz)	% erreur Avec masse – sans masse
1	0.8132	0.81691	0.455	0.87	0.86453	5.83
2	5.128	5.1412	0.257	5.46	5.4128	5.28
3	14.42	14.438	0.1248	15.34	15.138	4.84
4	28.35	28.354	0.014	30.00	29.619	4.46
5	47.05	46.939	0.236	49.59	48.872	4.11

Interprétation des résultats :

D'après le tableau précédent les résultats calculés analytiquement et les résultats obtenus par ANSYS sont presque identique.

On constat que l'influence de la masse de rotor et la nacelle est négligeable devant la masse du mât.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

IV.2.2.2. Vibration forcée :

Entre l'instant $t=0s$ et $t = T_0 = 1.08s$ le déplacement est maximale à cause de la présence de l'excitation, à partir de l'instant $t=1.08s$ le déplacement est diminué jusqu'à à avoir une valeur nul.

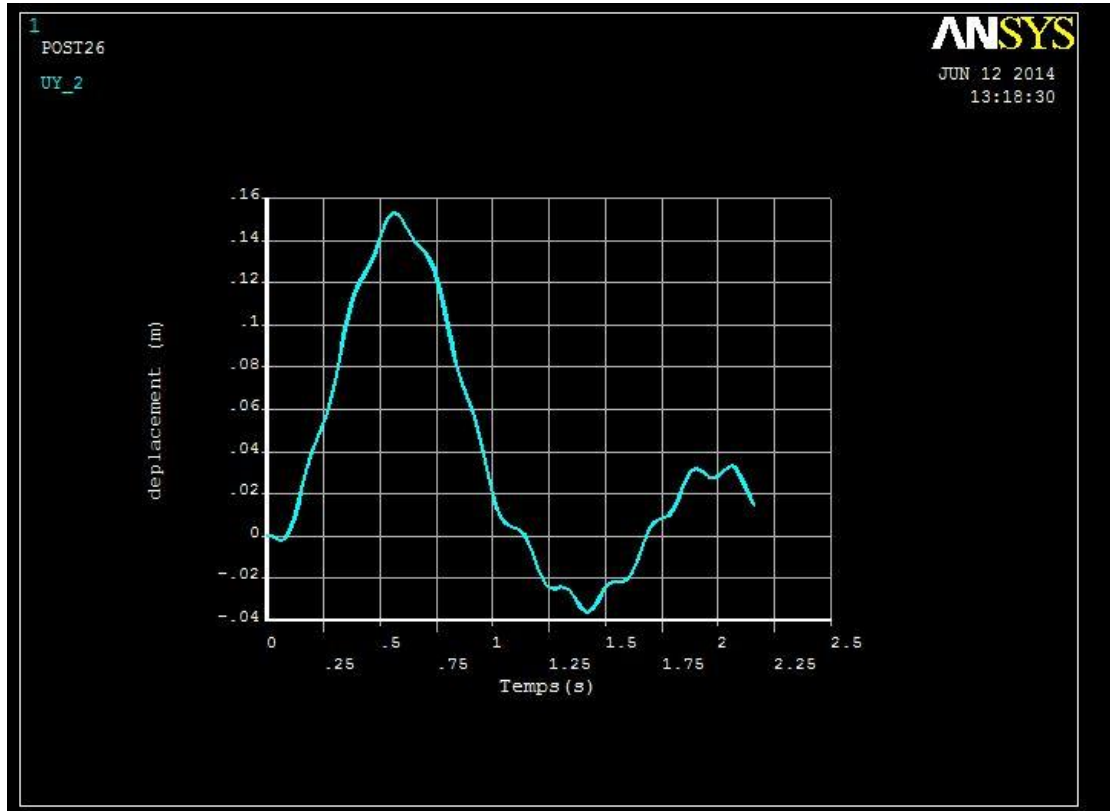


Figure 4.17 : déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t = T_0$.

Tableau IV.5: Comparaison des résultats de déplacement maximal analytique et par ANSYS.

résultat	analytique	Par ANSYS	%erreur
Déplacement maximal (m)	0.1575	0.15	4.76

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

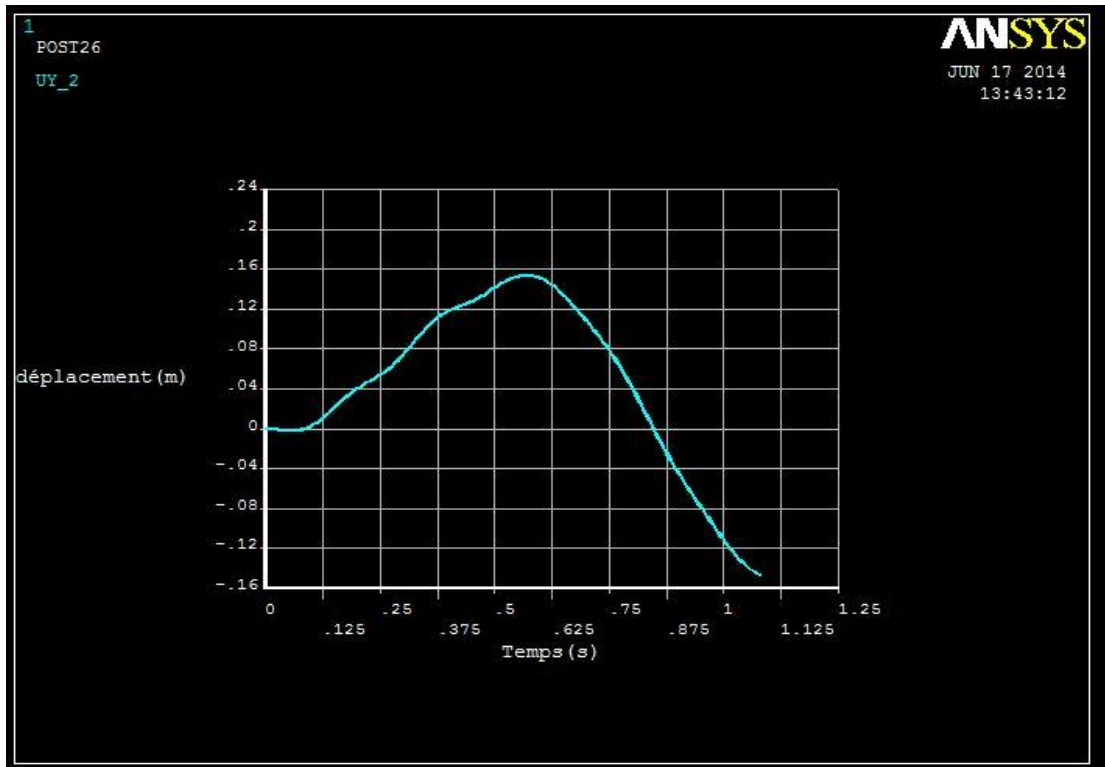


Figure 4.18 : déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t = \frac{T_0}{2}$.

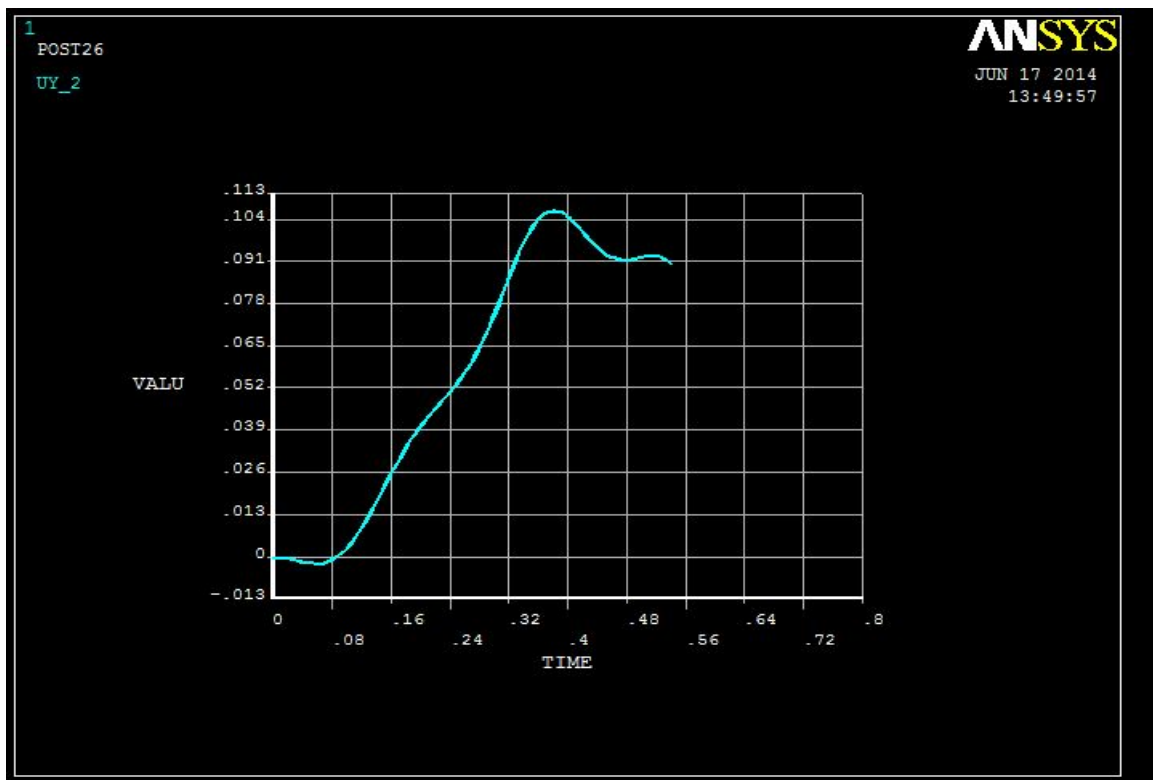


Figure 4.19 : déplacement du mât en fonction de temps dans le cas d'une excitation quelconque avec un temps d'application $t = \frac{T_0}{4}$.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

IV.3. modélisation d'un mât autoporteur (conique) :

IV.3.1. Calculs statiques :

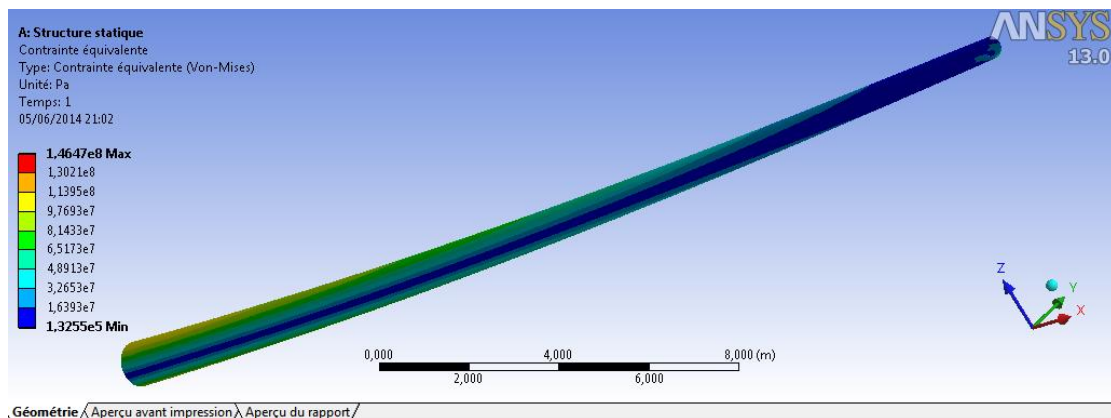


Figure 4.20 : Distribution des contraintes de vont mises sur le mât autoporteur.

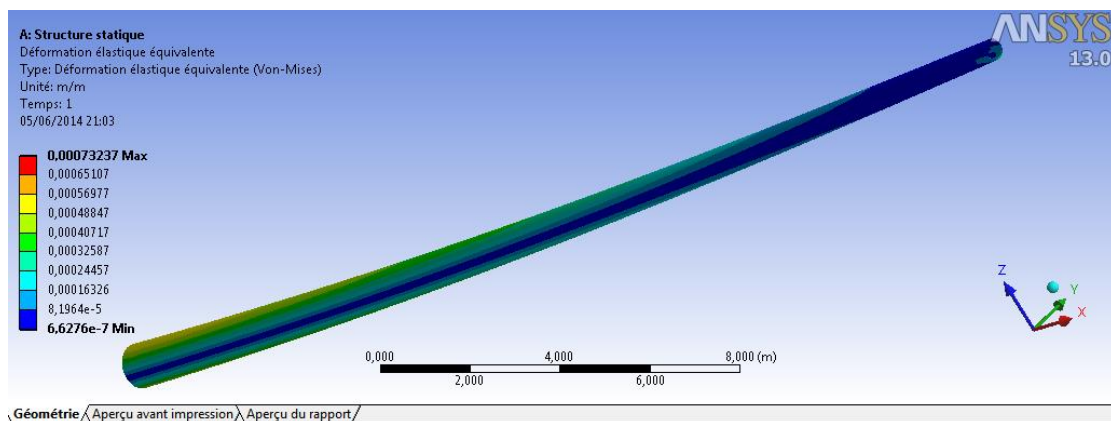


Figure 4.21 : Distribution des déformations sur le mât autoporteur.

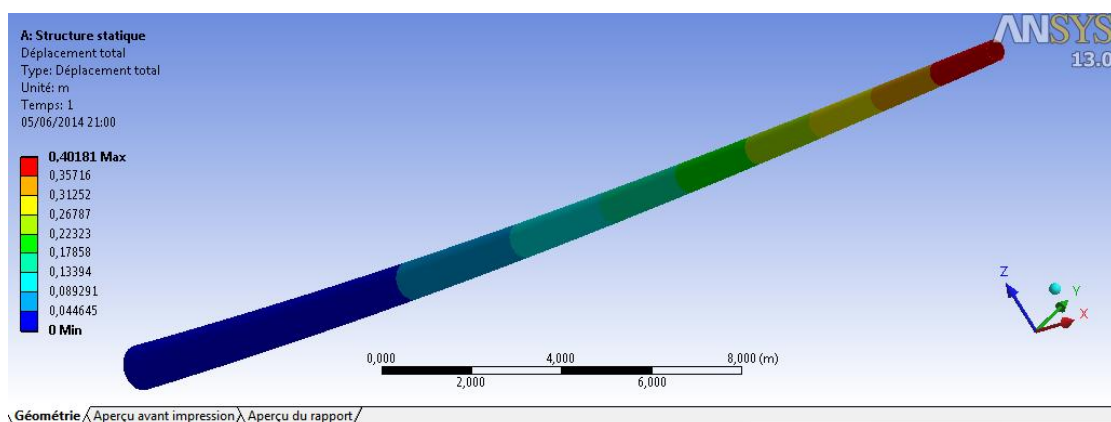


Figure 4.22 : Distribution des déplacements sur le mât autoporteur.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

Interprétation des résultats :

D'après les résultats, les contraintes maximales se situent au niveau de la partie inférieure de la tour près du sol, par contre les déplacements se situent au sommet de la tour, et dépassent pas la limite élastique du matériau utilisé.

Tableau IV.6: Valeurs des contraintes, déformations et déplacements dans les zones les plus sollicitées d'un mât autoporteur.

Résultat	résultat analytique	résultat par ANSYS
Sollicitation		
Contrainte (N/m ²)	$1.09 \cdot 10^8$	$1.46 \cdot 10^8$
déformation	$5.19 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-4}$
Déplacement(m)	/	0.40181

IV.3.2. Vibration transversal :

❖ Vibration libre:

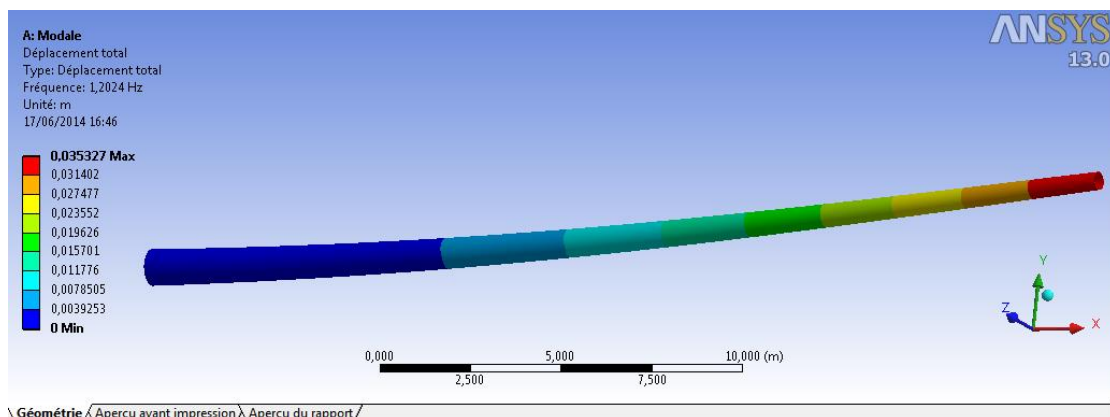


Figure 4.23: premier mode de vibration libre d'un mât autoporteur.

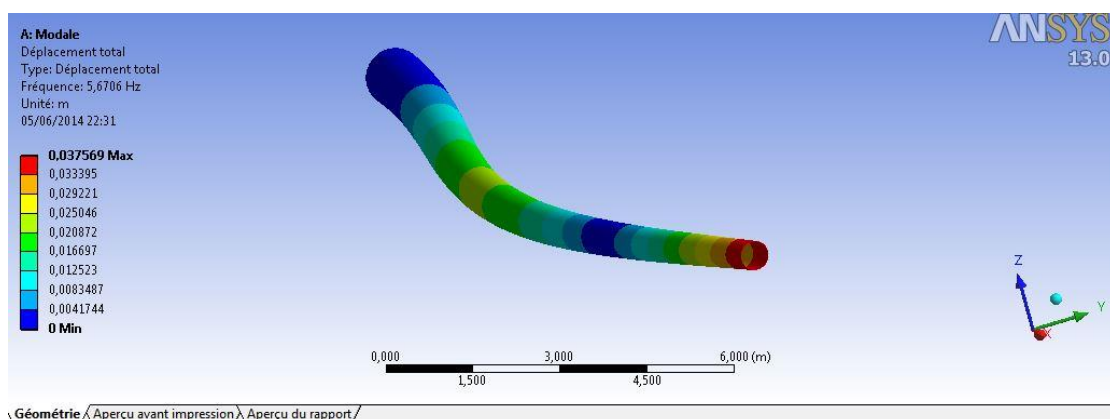


Figure 4.24 : deuxième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

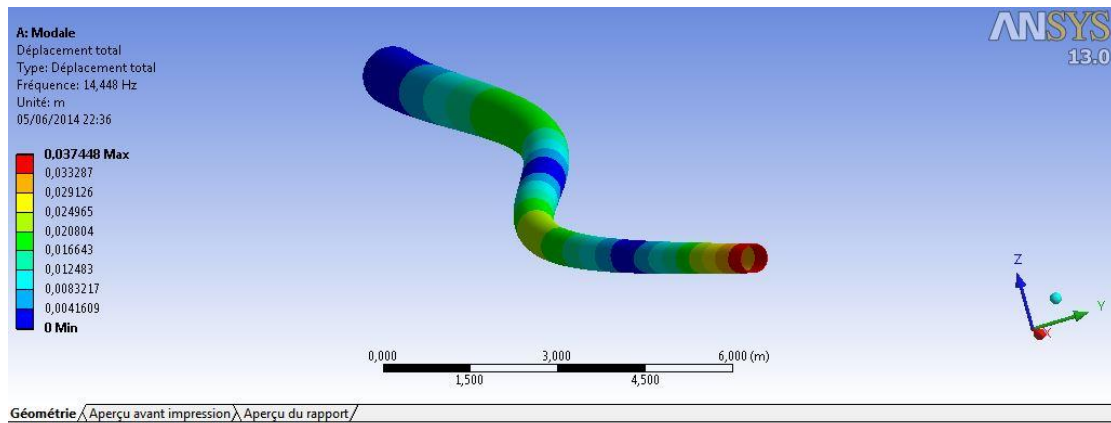


Figure 4.25 : troisième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.

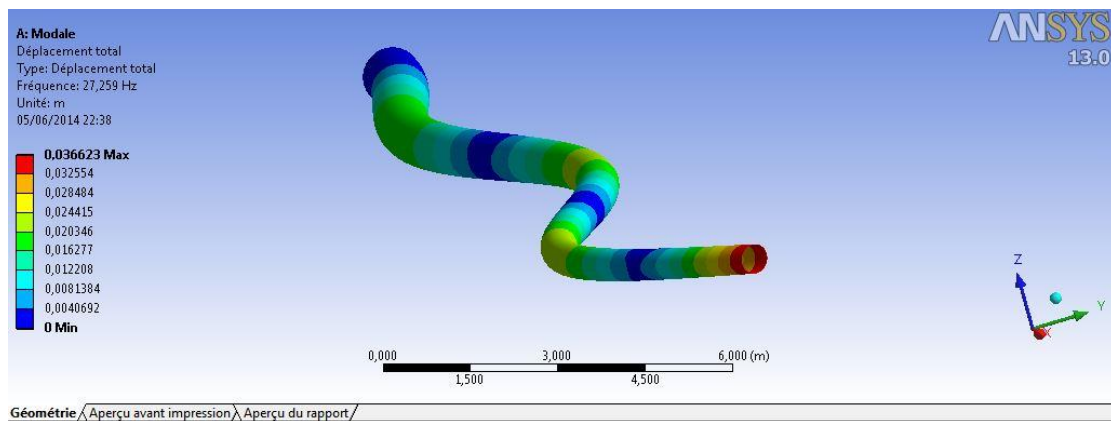


Figure 4.26: quatrième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.

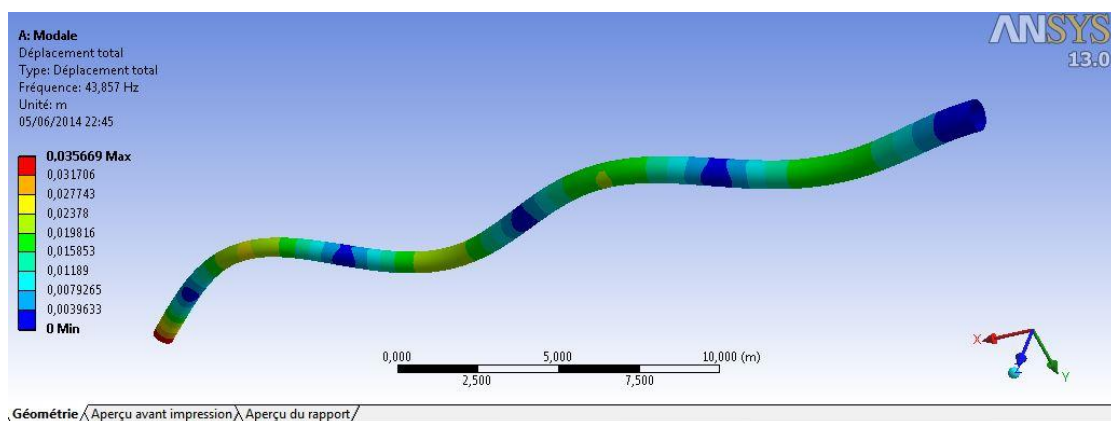


Figure 4.27: cinquième mode de vibration libre d'un mât autoporteur.

Chapitre IV : Résultat Par La Simulation ANSYS

Tableau IV.7: Valeurs des fréquences propres pour les cinq modes premiers d'un mât autoporteur.

Résultat mode	Par ANSYS f(Hz)
1	1.2
2	5.7
3	14.4
4	27.3
5	43.6

IV.4. Conclusion :

Les simulations par le logiciel ANSYS nous ont permis d'effectuer les corrections nécessaires et de valider les calculs analytiques, ces derniers, nous ont permis d'économiser la matière, ne montre aucune contrainte et déplacement dangereux, à l'aide du logiciel « ANSYS » nous avons pu voir les différents organes de mât en mouvement 3D.

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

V.1.Dessin des différents accessoires du mât haubané :

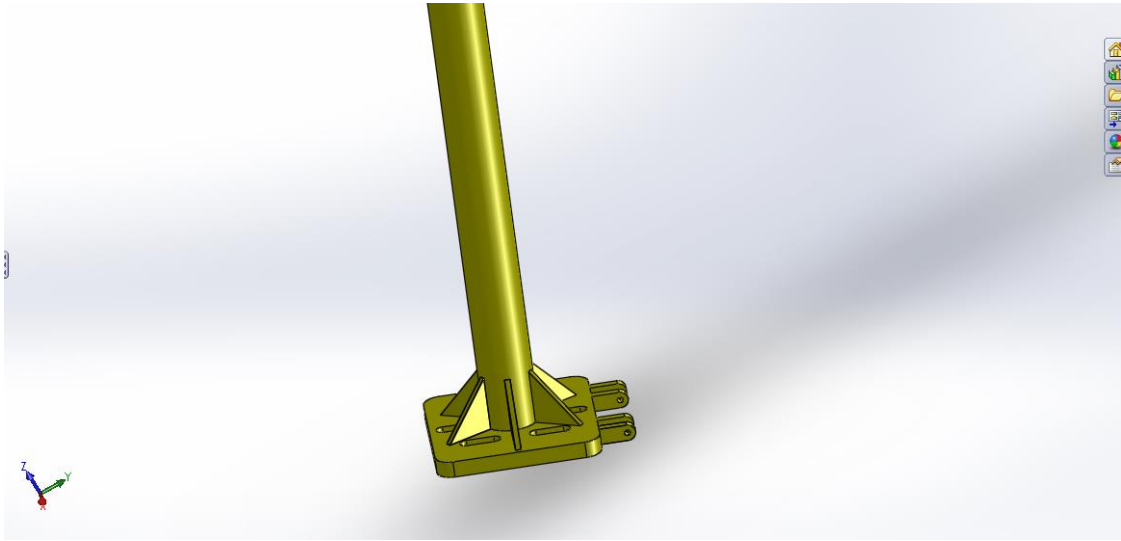


Figure 5.1 : le mât avec la base

Cette figure représente le mât tubulaire de notre éolienne du diamètre constant soudé avec les nervures et la Base qui contienne des rainures.

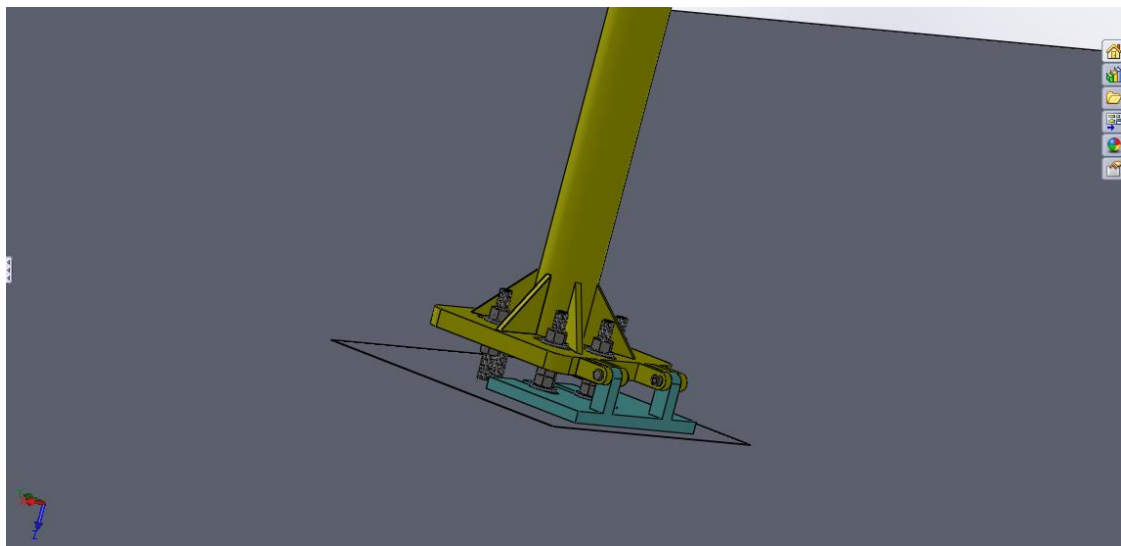


Figure 5.2 : Assemblage mât avec le sol par des tiges filetées.

Cette figure représente la fixation du mât avec la fondation et kit charnière à l'aide des tiges filetées et des écrous.

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

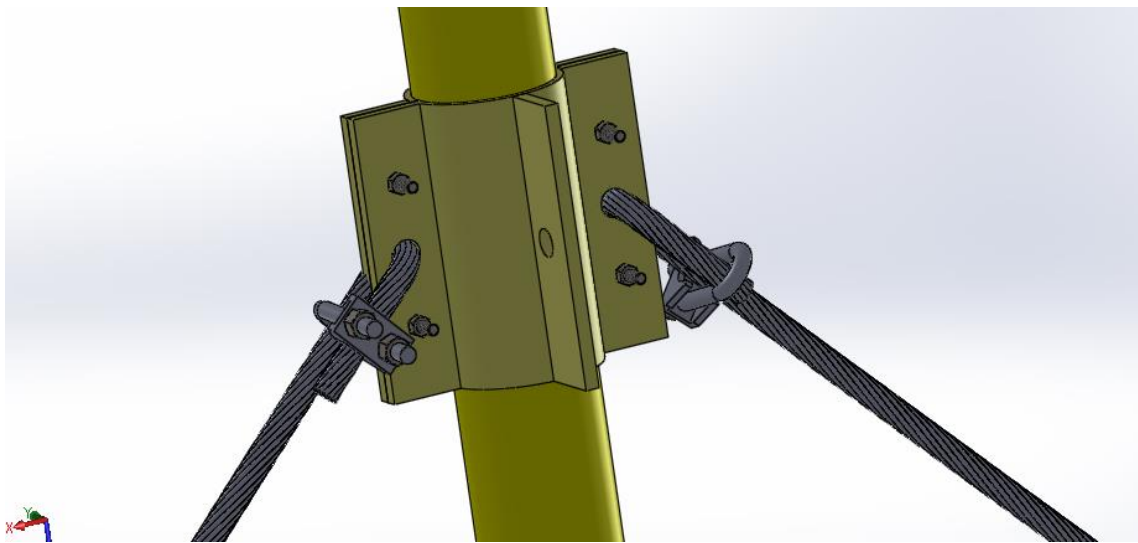


Figure 5.3 : Assemblage mât – câbles par des manchons et serre câble.

Cette figure représente la fixation de manchon avec le mât à l'aide des vis-écrou et aussi par le soudage dans les deux parties supérieur et inférieur entre le mât et le manchon pour éviter le glissement.

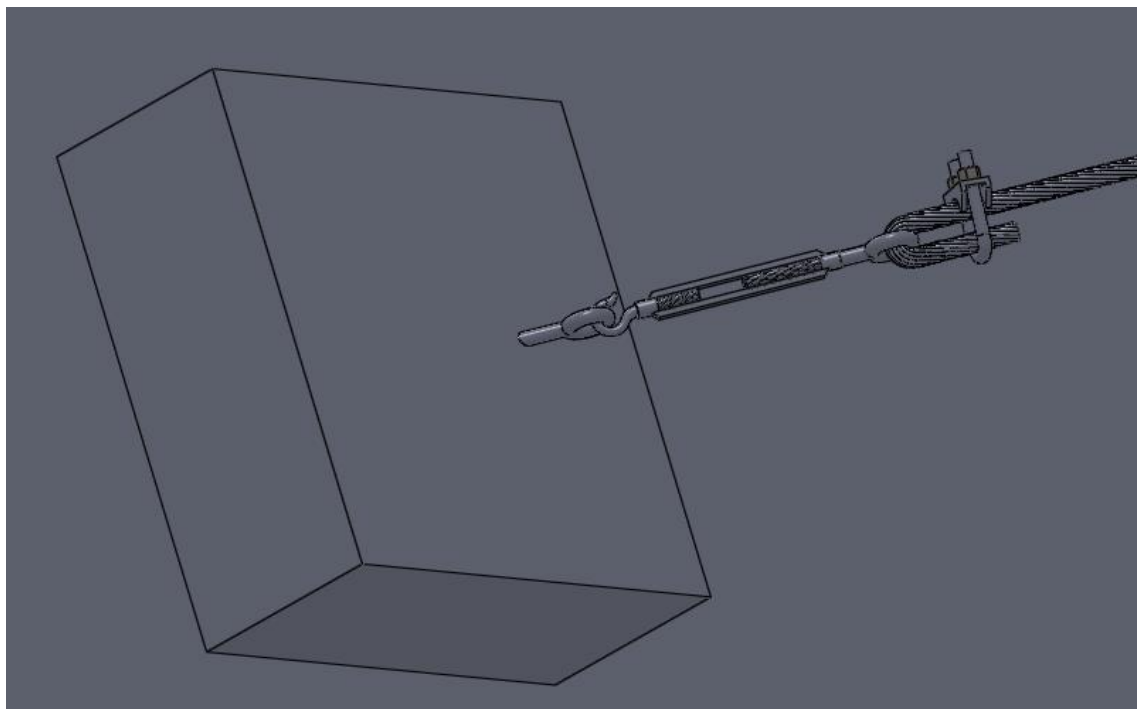


Figure 5.4 : Assemblage câble –sol par des tendeurs et serre câble.

Cette figure représente la fixation du mât avec l'encrage à l'aide de tendeur.

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

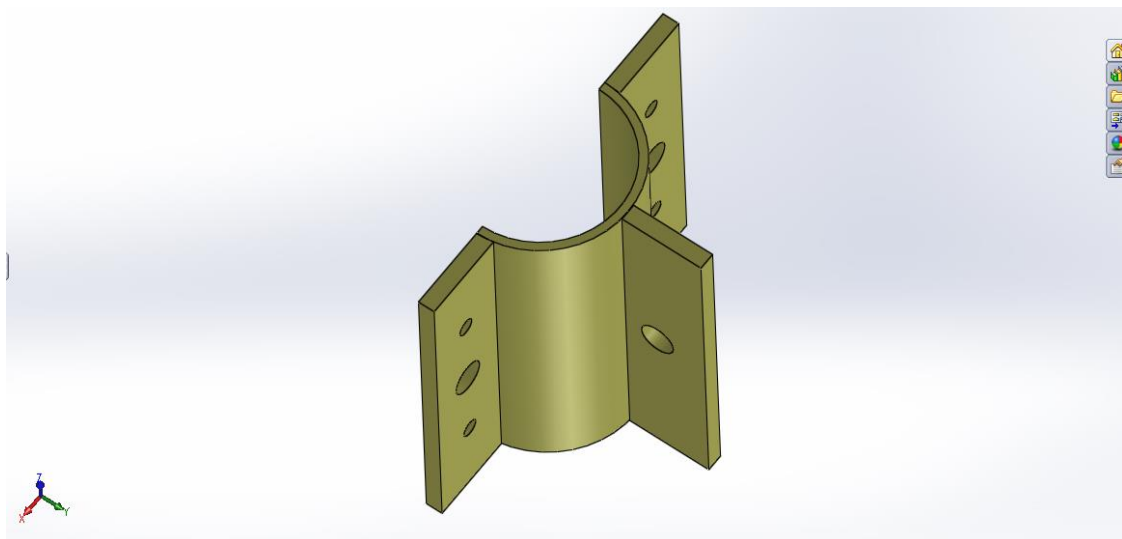


Figure 5.5 : manchon

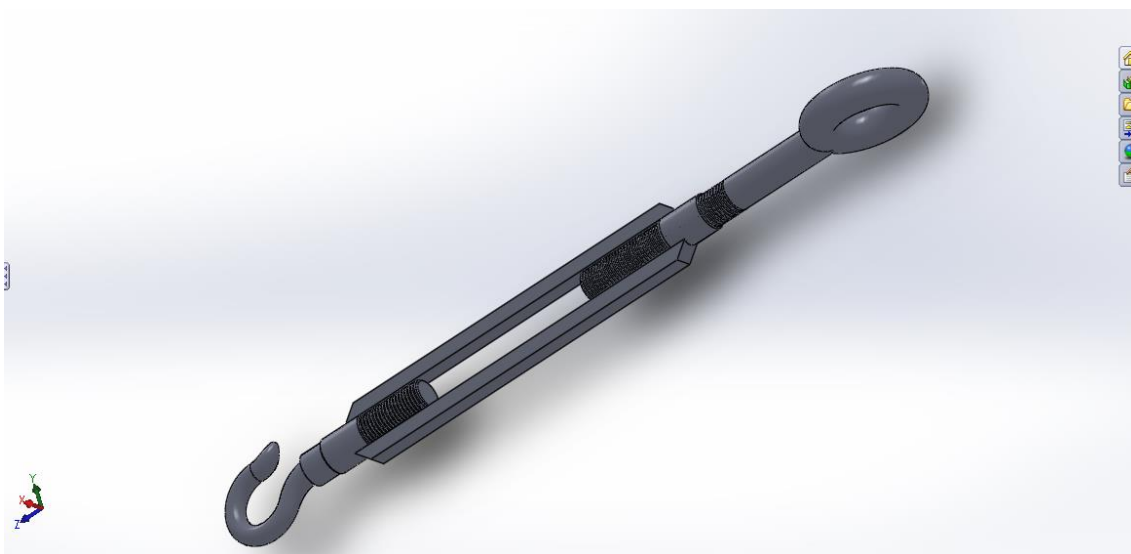


Figure 5.6 : tendeur

Chapitre V : conception et installation du mât haubané



Figure 5.7 : serre câble

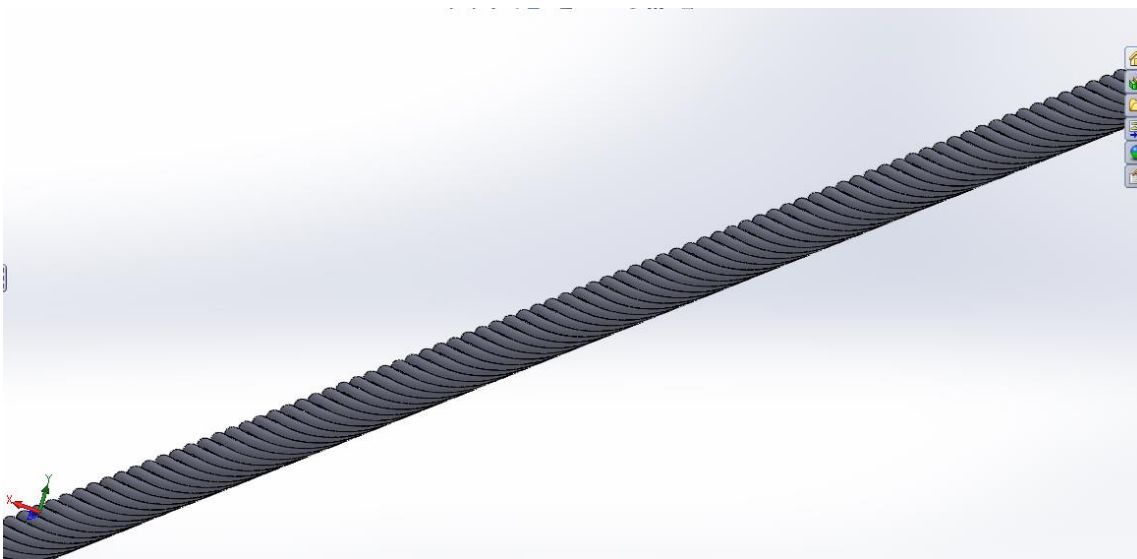


Figure 5.8:câble

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

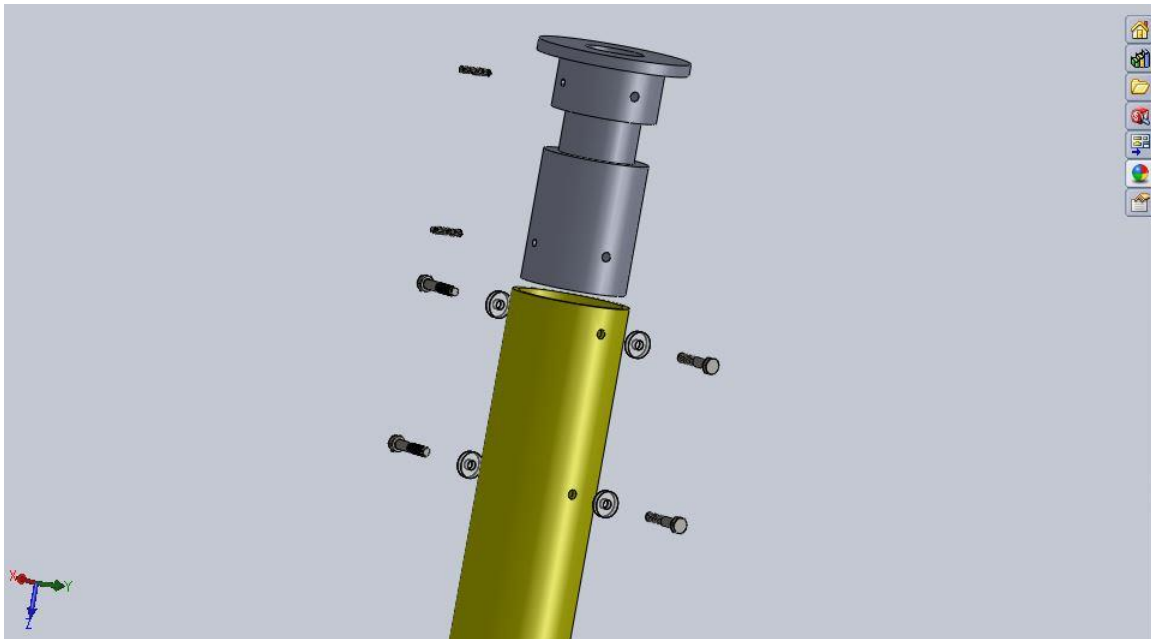


Figure 5.9 : l'insert

Cette figure représente la fixation du rotor d'éolienne avec le mât à l'aide de l'insert.

V.2. Les étapes d'installations de l'éolienne :

Pour assurer la réussite d'un projet d'installation d'une éolienne, il est fortement recommandé de respecter rigoureusement les étapes chronologiques suivantes :

1. le choix approprié du site d'installation ;
2. le choix du type du mât;
3. l'analyse et le calcul des multiples contraintes agissant sur le mât
4. l'étude et le dimensionnement de la fondation ;
5. l'équilibrage judicieux des haubans ;
6. la répartition rigoureuse des points d'ancrage au sol ;
7. l'étude du montage rapide du mât ;

V.2.1. Choix approprié du site d'installation :

Les performances énergétiques d'une éolienne dépendent dans une très large mesure du « gisement éolien » du site sur lequel il sera installé. Les caractéristiques principales de ce gisement éolien sont données par la régularité et la vitesse du vent à différentes altitudes.

Ces caractéristiques permettent de quantifier ce gisement énergétique grâce à un travail d'analyse et de traitement statistique des données sur une longue période. [17].

V.2.2. Choix du mât :

Parce que la vitesse du vent augmente avec l'altitude, l'éolienne est montée sur un mât, plus le mât est haut et plus grande sera la puissance récupérée. Il existe donc plusieurs alternatives pour le choix des mâts qui sont situés dans le chapitre II.

V.2.3. L'analyse et le calcul des multiples contraintes agissant sur le mât :

L'analyse statique d'un mât haubané consiste à identifier en priorité d'abord l'ensemble des efforts agissant sur celui-ci.

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

V.2.4. Conception et vérification de la fondation :

La fondation d'un mât peut être de forme carrée, rectangulaire ou circulaire. Cette forme est généralement la plus utilisée car elle s'adapte à la forme du mât et présente une symétrie dans tous les sens. Il faut toujours vérifier la capacité portante du sol sous l'effet de la pression développée par le mât au droit de la fondation [17]. La pression sur le sol est la réaction due au vent sur le mât et le poids total cumulé sur la fondation.

Cette étape nécessite des gens spécialisés dans le domaine de génie civil.

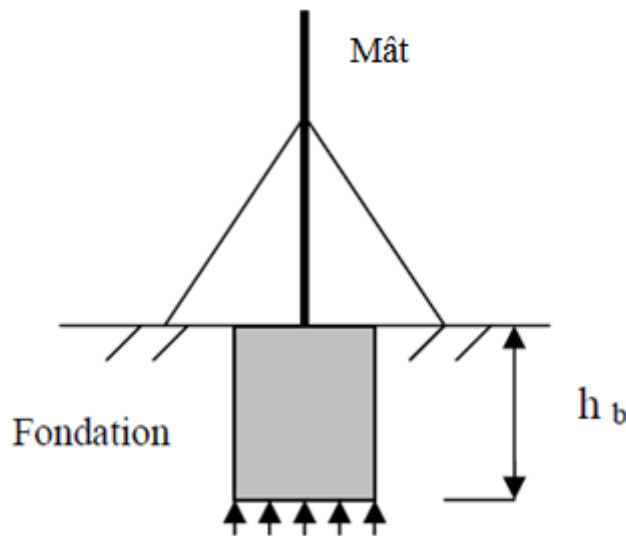


Figure 5.9 : Conception de la fondation et pression sur le sol

V.2.5. Ancrage des haubans :

Cette section permet d'évaluer les types d'ancrages nécessaires pour fixer solidement l'éolienne au sol. Cette section est importante, car les ancrages devront être dimensionnés de manière à ce que l'éolienne puisse résister pendant sa vie aux conditions naturelles.

V.2.5.1. Configuration des points d'ancrage :

La configuration des points d'ancrage est telle qu'elle permet d'assurer un équilibre statique du mât qui représente le facteur essentiel de conception d'une éolienne.

Tout déséquilibre du mât peut causer des dégâts humains et matériels importants. Selon la hauteur du mât, on peut être amené à utiliser 2, 4, 6, 8 etc. dont les points d'ancrage sont répartis sur un cercle d'une façon équidistante.

V.2.5.2. Réalisation des points d'ancrage :

Il existe plusieurs types d'ancrage utilisés pour assurer la fixation des haubans assurant l'équilibre du mât, le type choisi est fonction du support destiné à recevoir le mât. Le tableau 1 suivant montre les différentes alternatives possibles.

Chapitre V : conception et installation du mât haubané

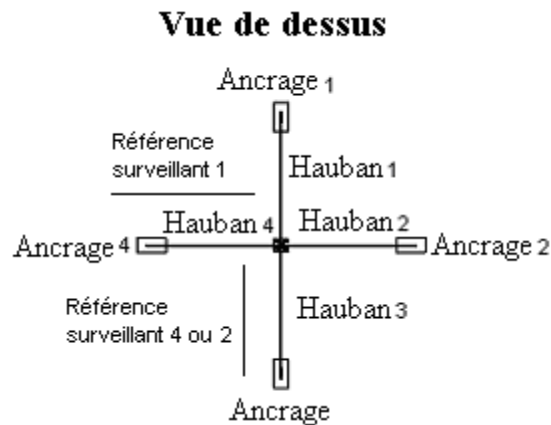


Figure 5.10 : vue dessus du mât avec les haubanes

V.2.6. Techniques mise en œuvre pour le soulèvement du mât :

La levée du mât est l'étape la plus dangereuse et critique du projet de l'éolienne. Si cette étape est faite à la légère, des accidents et des pertes matérielles risquent d'advenir. C'est pourquoi il est impératif de suivre cette procédure attentivement. Avant même de commencer d'assembler le mât, il faut que les ancrages aient été conformément installés.

V.2.6.1. Procédure avant la montée:

Une fois le mât assemblé avec l'éolienne installée au bout du mât, il est important d'installer les haubans (3 câbles par ancrage) des ancrages 2, 3 et 4 sur leurs points d'attache respectifs (joint des sections du mât). Installez les haubans de l'encrage 1 sur l'extrémité du bras de levée de manière à ce que les 3 haubans puissent supporter le poids du mât. Pour déterminer la longueur de câble correspondant pour chaque hauban, il suffit d'utiliser une relation de Pythagore. Chaque câble devra être installé selon les normes de sécurité en vigueur et avoir des tendeurs à la base de chaque ancrage.

V.2.6.2. Ajustement du mât :

Lorsque les haubans des quatre ancrages sont solidement installés, il reste à ajuster l'inclinaison de l'éolienne. Pour ce faire, on doit utiliser les tendeurs de câbles installés pour cette étape.

Conclusion générale :

Conclusion générale

Le but du présent projet est la conception d'un mât éolien d'une puissance de 1 KW.

Dans ce travail, nous avons étudié l'état statique et dynamique du mât.

L'étude est basée sur une procédure analytique validée par l'utilisation de logiciel ANSYS.

Le logiciel SolidWorks est utilisé pour dessiner et concevoir les éléments du mât.

L'important élancement de la tour nécessite impérativement la vérification de sa résistance et de son intégrité structurale. L'effort de ce travail s'inscrit dans le cadre de la maîtrise des technologies des éoliennes.

C'est pourquoi de nombreuses simplifications ont été faites en vue de rédiger ce travail sur le pré dimensionnement du mât pour ce type particulier de structure.

Les résultats obtenus nous donnent cependant des dimensions de structures comprises dans la fourchette de celles usuellement obtenus.

Tout au long de ce rapport, nous nous sommes efforcés de mettre en place une méthodologie en vue de prévoir les charges induites par le vent dans la tour.

Puisque le mât est un élément très important pour les éoliennes on propose une suite de cette étude :

- Etude des vibrations forcées du mât dues aux défaut des rotors et pales
- Une étude à la fatigue.

VIII. Annexe :

ANNEXE A: DIMENSIONNEMENT AU FLAMBAGE

Les équations de flambage pour l'étude des poutres soumises à des forces normales et transversales peuvent être déduites en considérant la poutre de la figure suivante. La poutre est soumise à une force axiale de compression P et à une force latérale répartie q qui varie avec la distance x le long de la poutre. Un élément de longueur dx entre deux sections droites prises normales à l'axe initiale de la poutre est montré sur la figure.

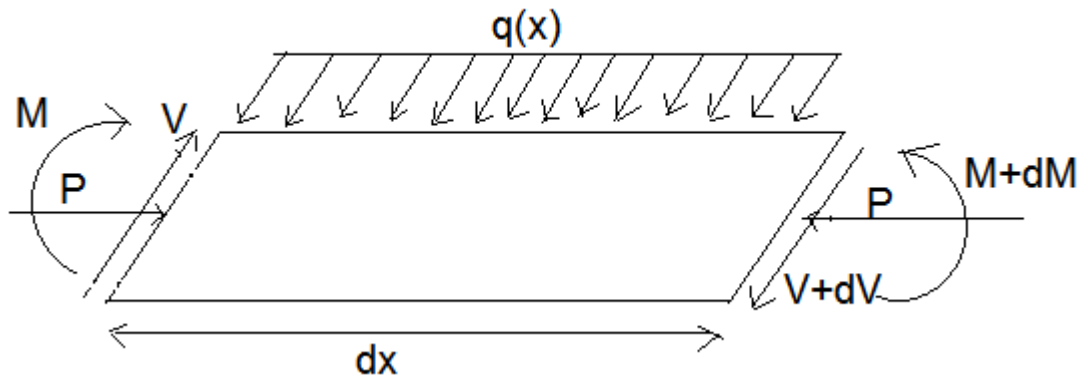


Figure A.1 : l'équilibre d'un élément de longueur soumise à des forces axiale et latérale

L'équilibre des forces parallèles à l'axe des y donne :

$$-V + qdx + (V + dV) = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$q = -\frac{dV}{dx} \quad (\text{A.2})$$

L'équilibre des moments donne :

$$M + q dx \frac{dx}{2} + (V + dV)dx - (M + dM) + P \frac{dy}{dx} dx = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$V = \frac{dM}{dx} - P \frac{dy}{dx} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{dV}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} - P \frac{d^2y}{dx^2} \quad (\text{A.5})$$

L'équation de la courbure de la ligne moyenne de la poutre est

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (\text{A.6})$$

La combinaison des équations (A.2), (A.5), (A.6) donne :

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + P \frac{d^2y}{dx^2} = q \quad \text{Avec : } k^2 = \frac{P}{EI} \quad (\text{A.7})$$

Les forces latérales n'entrent pas en ligne de compte pour déterminer la charge critique,

L'équation devient :

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (\text{A.8})$$

ANNEXE B: CALCULS DU DIAMETRE ET TENSION DES CABLES DE SOUTIEN

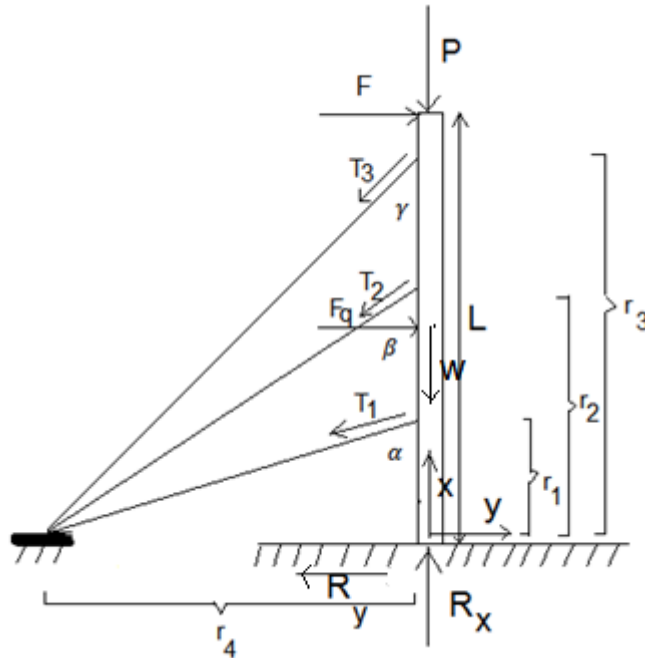


Figure B.1 : Schématisation du chargement de la Tour haubanée

La détermination du diamètre des câbles passe par le calcul des tensions T_1 qui est due aux forces :
 $w = \rho g L S$ Avec w est le poids du mât

$$\sum F|_x = 0 \quad , \quad \sum F|_y = 0 \quad , \quad \sum M|_0 = 0 \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{cases} R_x - P - w - T_3 \cos \gamma = 0 \\ R_y - F - F_q + T_3 \sin \gamma = 0 \\ M_0 - FL - F_q \frac{L}{2} + T_3 \sin \gamma (r_3) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

04 inconnues et 03 équations, le problème devient un système hyperstatique, on applique le théorème de castigliano

$$\begin{cases} M_1 = -Fx \quad , \quad N_1 = P + \rho g s . x & \text{pour } 0 \leq x < L - r_3 \\ M_2 = -Fx + T_3 \sin \gamma (x - L + r_3) = 0 \quad , \quad N_2 = P + \rho g s . x + T_3 \cos \gamma & \text{pour } L - r_3 \leq x < L \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

➤ L'énergie de la déformation de flexion E_f

$$E_f = \int_0^{L-r_3} \frac{M_1^2}{EI} dx + \int_{L-r_3}^L \frac{M_2^2}{EI} dx \quad (\text{B.4})$$

$$E_f = \frac{1}{EI} \int_0^{L-r_3} F^2 x^2 dx + \frac{1}{EI} \int_{L-r_3}^L [F^2 x^2 + T_3^2 \sin^2 \gamma (x - L + r_3)^2 - 2Fx T_3 \sin \gamma (x - L + r_3)] dx \quad (B.5)$$

$$E_f = \frac{8F^2}{3EI} + \frac{3367F^2}{3EI} + \frac{2197T_3^2 \sin^2 \gamma}{3EI} - \frac{5408FT_3 \sin \gamma}{3EI} \quad (B.6)$$

➤ **L'énergie de la déformation de compression E_n**

$$E_n = \int_0^{L-r_3} \frac{N_1^2}{ES} dx + \int_{L-r_3}^L \frac{N_2^2}{ES} dx \quad (B.7)$$

$$E_n = \frac{1}{ES} \int_0^{L-r_3} (P^2 + (\rho g s)^2 x^2 + 2P\rho g s \cdot x) dx + \frac{1}{ES} \int_{L-r_3}^L (P^2 + (\rho g s \cdot x + T_3 \cos \gamma)^2 + 2P(\rho g s \cdot x + T_3 \cos \gamma)) dx \quad (B.8)$$

$$E_n = \frac{2P^2}{ES} + \frac{8(\rho g s)^2}{ES} + \frac{4\rho g s}{ES} + \frac{13P^2}{ES} + \frac{13(T_3 \cos \gamma)^2}{ES} + \frac{3367(\rho g s)^2}{3ES} + \frac{221T_3 \cos \gamma \rho g s}{ES} + \frac{26 P T_3 \cos \gamma}{ES} + \frac{221P \rho g s}{ES} \quad (B.9)$$

➤ **L'énergie de la déformation du câble v_c**

$$E_c = \frac{T_3 \cdot l}{E' A'} \quad (B.10)$$

T_3 : La tension du câble qui situe au sommet.

A' : La section du câble de soutien.

l : La longueur du câble de soutien situe au sommet.

E' : module du Young câble de soutien.

L'énergie de déformation maximale est :

$$E_{\max} = E_f + E_n + E_c \quad (B.11)$$

ANNEXE C: VIBRATION TRANSVERSALE

Le déplacement transversal $v(x, t)$ est l'amplitude du mouvement de flexion. L'équilibre de l'effort tranchant et des moments sur un élément de poutre dx est décrit par le schéma ci-dessous.

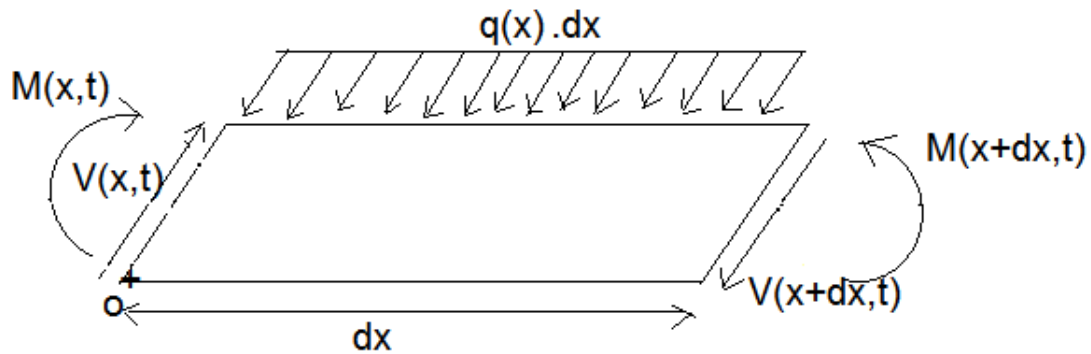


Figure C.1 : Equilibre d'un élément de poutre dx

$$\sum M/o = 0 \quad (C.1)$$

$$M(x, t) + q(x) \frac{(dx)^2}{2} - (M(x + dx, t)) + V(x + dx, t)dx = 0 \quad (C.2)$$

$$V(x, t) = \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \quad (C.3)$$

$$\sum F/o = 0 \quad (C.4)$$

$$q(x, t)dx + V(x + dx, t) - V(x, t) = \rho s dx \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (C.5)$$

$$q(x, t)dx + \frac{\partial V}{\partial x} dx = \rho s dx \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (C.6)$$

$$-\frac{\partial V}{\partial x} + \rho s \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (C.7)$$

$$-\frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + \rho s \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (C.8)$$

$$M(x, t) = -EIv''$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho s \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (C.9)$$

$$c^2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \text{ Avec } c = \sqrt{\frac{EI}{\rho s}} \quad (C.10)$$

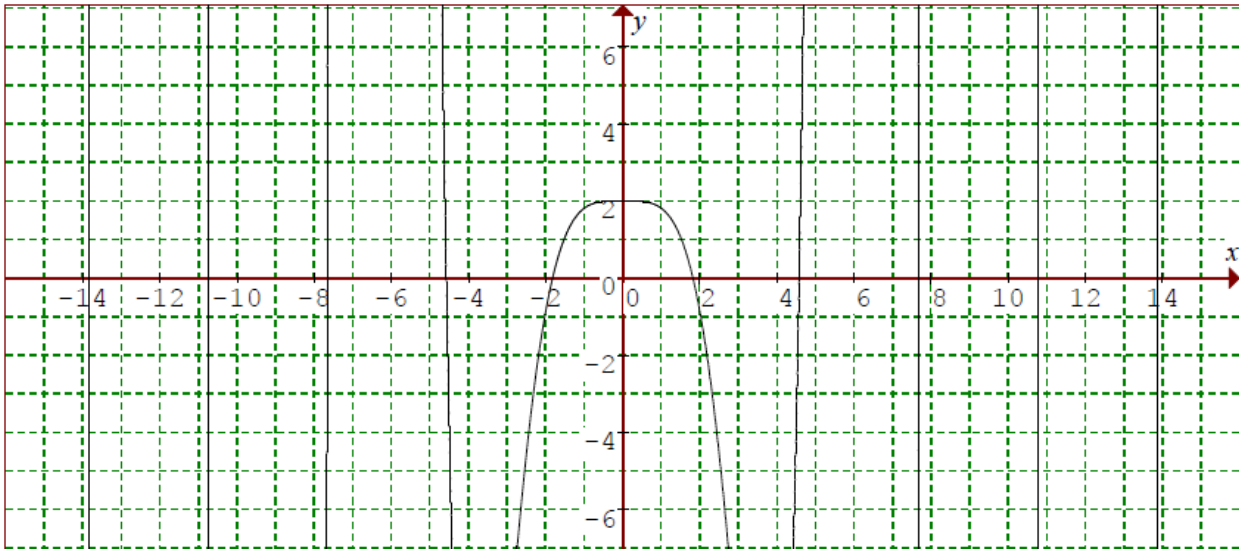
Pour une vibration libre :

$$q(x, t) = 0$$

$$c^2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{C.11})$$

ANNEXE D: RESULTAT DU CALCUL DYNAMIQUE.

Figure D.1 : Représentation des solutions de l'équation caractéristique de vibration libre.



CODE MATLAB :

```

%***** programme matlab pour methode de newton raphson*****!
%-----formule de methode newton raphson -----!
% x(n+1) = x(n) - (f(x)/f'(x))

close all

clc

clear all

syms x

f= 1+(cos(x))*cosh(x)+0.03*x*(cos(x))*(sinh(x))-0.03*x*(sin(x))*cosh(x)

fdash=diff(f);

x=input('Entrer la valeur de x0, x0=');

e=input('Entrer la valeur de erreur, e=');

iteration=0;

error=1;

```

```

while (error>e)

iteration=iteration+1;

fprintf('*****Iteration no.
%0.0f*****',iteration)

error=abs(x);

x=x-subs(f/fdash)

error=abs(x-error)

if(iteration>100)
    break

end

end

fprintf('*****RESULTAT*****');

if(iteration>100)

    fprintf('\nSOLUTION NON CONVERGENT !\n TRY WITH DIFFERENT INITIAL
SOLUTION/ERROR')

else

    fprintf('\nSolution x= %0.20f\n nombre de Iteration= %0.0f',x,iteration);

end

fprintf('\n*****');

```

VII. Bibliographie :

- [1] ZERROUKI.F, and GANA.A, “Etude et analyse de la pertinence de l’implantation des éoliennes dans la région de Tizi-Ouzou,” département de génie mécanique, université de Tizi Ouzou, 2010.
- [2] http://www.espace-eolien.fr/Eolien/kesaco_tech.htm.
- [3] D.LE GOURIERE, Energie éolienne théorie, conception et calcul pratique des installations, EYROLLES, Paris 1982.
- [4] The World Wind Energy Association, Half-year Report 2011.
- [5] B.MULTON, O.GERGAUD, H.BEN AHMED (LÉSIR Antenne de Bretagne de l’École Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker Lann 35170 BRUZ), X.ROBOAM, S.ASTIER (LEEI ENSEIHT Toulouse), B.DAKYO, C.NICHITA (GREAH Université du Havre), Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L’Electronique de Puissance Vecteur d’Optimisation Pour les Energies Renouvelables », Paris, 2002.
- [6] L. Christophe, Simulation numérique de l’écoulement tridimensionnel turbulent dans un parc éolien. Mémoire de maîtrise en science appliquées à l’institut polytechnique de Montréal, Septembre, 1998.
- [7] I. Ammara. Modélisation aérodynamique tridimensionnelle d’un parc d’éolienne à axe horizontal. Mémoire de maîtrise en science appliquées à l’institut polytechnique de Montréal, Aout, 1998.
- [8] REDJEM. R, “ Étude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne ”, PFE Département d’Electrotechnique Université de Constantine 2009.
- [9] : J.C.DUPLETTY & MOREL. « Gros temps sur la planète ». Odile Jacob, Paris 1990.
- [10] : J.BESSEMOULKIN & R.CLAUSSE. « Vents, nuages et tempêtes ». Edition Maritimes et d’Outre-mer, Paris, 1978.
- [11] : R. Hammouche, ‘Atlas Vent de l’Algérie’, Publication Interne de l’ONM, Office National de Météorologie, Alger, 1990.
- [12] <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne.25/03/2014>.
- [13] GRAIT Karim « mémoire fin d’étude Etude de faisabilité et conception d’une éolienne pour le pompage de l’eau dans les régions microclimat en Algérie 2011 ».
- [14] http://eolienne.f4jr.org/pylone_support.05/04/2014.

- [15] M. Khechana*, M. Nadjah, L. Laiche†, T. Ouksel et C. Mahfoudi « Etude de la nacelle et du mat d'une éolienne de faible puissance, Département de Génie Mécanique, Institut des Sciences Technologiques, Ain Beïda Centre Universitaire Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie ».
- [16] HARARA. Z. E, "Proposition d'une conception et calcul d'un mat d'éolienne ", Département de génie mécanique Université Biskra 2012.
- [17] F. Belhamel*, S. Moussa**, K. Benfarhat** et F. Kharchi*** « Analyse des Contraintes Mécaniques Agissant sur un mât Haubané d'Aérogénérateur et Technologies Mises en OEuvre pour son Installation ».
- [18] S.P.TIMOSHENKO, théorie de stabilité élastique.
- [19] WILLIAM T.THOMSON, theory of vibration with applications.
- [20] TIANYOU ZHOU , FABIEN BERNAELY, YI DING, dynamique des constructions projet éolienne.
- [21] JEAN CLAUDE PASCAL, vibration et acoustique 2.
- [22] NOUREDINE BOURAHLA, résistance des matériaux de base.
- [23] IVAN CORMIN BOEUFING.ETS/EPF, résistance des matériaux, Ecole Technique de La Construction Fribourg.