

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

BAHLOUL Ouassila
BOUKARDOUN Aziz

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Structure**

Thème :

**Elaboration d'un programme EF pour le calcul de la fréquence naturelle
d'une turbine à vent sur la base des éléments poutres**

Devant le jury composé de :

Mr : OMRACI Kamel
Mr : BAKHTI Rachid
Mr : Aouari Aissam
Mme : AIT AHMED Fatiha

UAMOB
UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examinateur
Examinatrice

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel nous avons bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes à qui nous tenons à dire profondément et sincèrement merci.

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, également nous remercions nos parents pour leur encouragement et leur soutien.

Tous nos infinis remerciements à notre encadreur Mr : **Rachid BAKHETI** pour son aide, sa patience, ses conseils et ses remarques qui nous ont permis de présenter notre travail dans sa meilleure forme.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du département Génie Civil qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin nous remercions tous nos proches, nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de notre travail trouvant ici l'expression de notre profonde gratitude et profonds respects.

Merci à tous et à toutes.





Dédicace

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelques choses à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti d'effort rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.

Je dédie ce modeste travail

- 🌹 A mes très chers parents pour leur soutien et encouragement durant toutes mes années d'études et sans lesquels je n'aurais jamais réussi.
- 🌹 A mon frère Hicham et sa femme Hanane et ma nièce Eliyah.
- 🌹 A ma chère sœur Siham.
- 🌹 A toute ma grande famille.
- 🌹 A tous mes ami(e)s surtout (Anis, Samia, Sarah et Khalida).
- 🌹 A mon binôme Aziz et sa famille
- 🌹 A tous ceux que j'aime et je respecte
- 🌹 A tous mes enseignants de département Génie Civil pour leurs soutiens et encouragements et tous le groupe GC promotion 2018-2019









Ouassila



Dédicace

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelques choses à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti d'effort rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.

Je dédie ce modeste travail

-  A mes très chers parents pour leur soutien et encouragement durant toutes mes années d'études et sans lesquels je n'aurais jamais réussi.
-  A mes frères Karim, Azeddine et Abdelkadar.
-  A ma chère sœur Sarah.
-  A toute ma grande famille.
-  A tous mes ami(e)s surtout (Mohmed, Kaci et Hakim).
-  A mon binôme Ouassila et sa famille
-  A tous ceux que j'aime et je respecte
-  A tous mes enseignants de département Génie Civil pour leurs soutiens et encouragements et tous le groupe GC promotion 2018-2019

Aziz

Résumé

Résumé

Aujourd'hui, les éoliennes sont l'une des ressources les plus importantes pour la production d'électricité à partir d'énergie propre, la nouvelle génération d'éoliennes est plus grande, plus haute et plus efficace que jamais, c'est-à-dire qu'elle devient de plus en plus réactive et par conséquent, afin d'éviter des dommages catastrophiques à la structure. Il est nécessaire de veiller à ce que la première fréquence naturelle de l'éolienne ne corresponde pas aux fréquences d'excitation.

Dans la littérature, l'estimation de la fréquence naturelle des Turbine à vent sur la base de plusieurs formules données pour déterminer la fréquence naturelle de base fixe des éoliennes dans lesquelles l'éolienne est remplacée par une poutre de masse supérieure égale à la masse de la nacelle et le rotor assemblée.

En fait, dans des cas simples, ces méthodes peuvent être efficaces et fournir des résultats avec une bonne précision, mais pour les turbines modernes telles que les turbines à modèle complexe, il est très difficile d'estimer la fréquence naturelle à l'aide de ces méthodes, pour une raison tout à fait simple, il est difficile de trouver le faisceau correspondant.

Dans le présent travail, la méthode des éléments finis a été utilisée pour fournir un code in-formatique appelé «TURbeam» qui permet d'évaluer la fréquence naturelle des turbine à vent. L'élément poutre à deux nœuds a été utilisé dans TURbeam pour modéliser le système en calculant la matrice de rigidité, la matrice de masse et enfin la fréquence naturelle du système.

Mots clés : Élément finis, Turbine à vent, Élément poutre, Fréquence naturelle, Matrice de masse, Matrice de rigidité.

Abstract

Today, wind turbines (WTs) are one of the most important resources for producing electricity from clean energy, the new generation of wind turbines is larger, higher and more effectively than ever, that is to say, they are becoming more and more dynamically reactive and therefore, in order to avoid catastrophic damage to the structure. It is necessary to ensure that the first natural frequency of the wind turbine should be not coalesced with the excitation frequencies.

In the literature, the estimation of the natural frequency of WTs based on several formulas given to determine the fixed base natural frequency of the wind turbines in which the turbine is replaced by a cantilever beam with a top mass equal to the mass of the rotor nacelle assembly.

In fact, in simple cases, these methods can be efficient and provide re-sults with good accuracy, but for modern turbines such as turbines with complex pattern, it is very difficult to estimate the natural frequency by these methods, for a simply reason, it very difficult to find the corresponding beam.

In the present work, the finite element method has been used to provide a computer code called "TURbeam" which can be evaluate the naturel frequency of WTs. The two nodes beam element has been employed in TURbeam to model the system with computing the stiffness matrix, the mass matrix and finally the natural frequency of the system.

Key words : Finite element, Wind turbine, Beam element, natural frequency, mass matrix, stiffness matrix.

ملخص

اليوم، توربينات الرياح هي واحدة من اهم الموارد المنتجة للكهرباء من الطاقة النظيفة، الجيل الجديد من توربينات الرياح أكبر و أعلى و أكثر فعالية من أي وقت مضى، وهذا يعني أنها أصبحت أكثر تفاعلية ديناميكية وبالتالي من أجل تجنب الأضرار الكارثية للهيكل من الضروري التأكد من عدم تكرار التردد الطبيعي الأول لتوربين الرياح مع ترددات الإثارة.

في الأدب ، يتم تقدير التردد الطبيعي للوزن على أساس العديد من الصيغ المعطاة لتحديد التردد الطبيعي الأساسي الثابت لتوربينات الرياح التي يتم فيها استبدال التوربين بشعاع مع كتلة عليا تساوي تجمع كتلة الكنة ودوار.

في الواقع ، في الحالات البسيطة ، يمكن أن تكون هذه الطرق فعالة وتقدم نتائج بدقة جيدة ، ولكن بالنسبة للتوربينات الحديثة مثل التوربينات ذات النمط المعقد ، من الصعب للغاية تقدير التواتر الطبيعي بهذه الطرق ، لسبب بسيط هو أنه صعب للغاية العثور على شعاع المقابلة.

في العمل الحالي ، تم استخدام طريقة العناصر المنتهية لتوفير كود كمبيوتر يسمى «TURbeam» والذي يمكن تقييم تردده الطبيعي في توربينات الرياح. تم استخدام عنصر شعاع العقدتين في TURbeam لتصميم النظام باستخدام حساب مصفوفة الصلابة ، مصفوفة الكتلة ، وأخيرا التردد الطبيعي للنظام.

الكلمات المفتاحية: العناصر المنتهية، توربينات الرياح، عنصر شعاع، التردد (التواتر) الطبيعي، مصفوفة الكتلة، مصفوفة الصلابة.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Introduction Générale	1

Chapitre I Les énergies renouvelables

I.1	Introduction	3
I.2	Définition des énergies renouvelables	3
I.3	Les types des énergies renouvelables	4
I.3.1	L'énergie éolienne	4
I.3.2	L'énergie solaire	5
I.3.3	L'énergie hydraulique	6
I.3.4	L'énergie de la biomasse	7
I.3.5	L'énergie géothermique	8
I.4	Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables	8
I.4.1	Avantages	8
I.4.2	inconvénients	9
I.5	Notions et principes sur les énergies renouvelables	9
I.6	Conclusion	10

Chapitre II La turbine à vent

II.1	Introduction	11
II.2	Historique	11
II.3	Définition	12
II.4	Capacité mondiale des éoliennes	13
II.5	Capacité des éoliennes en Algérie	14
II.6	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	15

II.6.1	Les avantages	16
II.6.2	Les inconvénients	17
II.7	La taille des éoliennes	18
II.8	Les différents types des turbines à vent	18
II.8.1	Les turbines à vent à axe vertical	19
II.8.1.1	Le rotor de SAVONIUS	19
II.8.1.2	Le rotor de DARRIEUS	20
II.8.2	Les turbines à vent à axe horizontal	20
II.8.2.1	Architecture d'une turbine à vent a axe horizontal	22
II.8.2.1.1	Le rotor et ses pales	23
II.8.2.1.2	La nacelle	23
II.8.2.1.3	La tour	23
II.9	Applications des éoliennes	24
II.10	Conclusion	24

Chapitre III La fréquence naturelle d'une turbine à vent

III.1	Introduction	25
III.2	Caractéristique de la turbine	25
III.3	Les bases de la dynamique	28
III.4	Doux à Raide	31
III.4.1	Les charges	32
III.5	La structure	34
III.6	Limitation des options	36
III.6.1	Vitesse variable	37
III.6.2	Turbines plus grandes :	37
III.7	Indemnisation	39
III.7.1	Amortissement aérodynamique	39
III.7.2	Saut de fréquence de vitesse variable :	40
III.8	Conclusion	41

Chapitre IV Calcul par élément finis la fréquence naturelle

IV.1	Introduction	42
IV.2	Définition de la méthode des éléments finis	42
IV.3	Historique de la méthode	42
IV.4	Hypothèses d'application de la méthode des éléments finis	43

IV.5	Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	44
IV.6	Les éléments proposés par le code DNV	44
IV.7	La procédure de calcul	45
IV.7.1	Discrétisation	46
IV.7.1.1	Les éléments poutre à deux nœuds	47
IV.7.2	Matrice de rigidité et de masse élémentaire	49
IV.7.3	Assemblage et résolution de système global	51
IV.7.4	Les conditions aux limites	53
IV.7.5	Résoudre le système	53
IV.7.5.1	Matrice de rigidité dynamique	53
IV.8	Conclusion	53

Chapitre V Présentation du programme avec des exemples de calcul

V.1	Présentation du programme de calcul	55
V.2	Architecture du programme	55
V.2.1	Interface	56
V.2.1.1	Fenêtre principale du programme	56
V.2.1.2	Barre de menu de programme	56
V.3	Exemples de calcul	58
V.4	Conclusion	59
	Conclusion Générale	60
	Bibliographie	61
	Annexes	64

Liste des figures

Chapitre I Les énergies renouvelables

I.1	Schéma de différentes énergies renouvelables.	4
I.2	Énergie éolienne.	5
I.3	Énergie solaire.	6
I.4	Énergie hydraulique.	6
I.5	Énergie de la biomasse	7
I.6	Énergie géothermique	8
I.7	Production mondiale d'électricité renouvelable par région.	10

Chapitre II La turbine à vent

II.1	Moulins à vent (éoliennes classique).	12
II.2	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	13
II.3	Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.	14
II.4	Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).	15
II.5	Taille des hélices en m et puissances en KW.	18
II.6	Éolienne de type Savonius.	19
II.7	Éolienne de type Darrieus.	20
II.8	Éolienne de type Darrieus.	21
II.9	Configuration à axe horizontal.	22
II.10	Architecteur d'une turbine à vent a axe horizontal.	22
II.11	Éléments attachés à une nacelle.	23

Chapitre III La fréquence naturelle d'une turbine à vent

III.1	Approche de modélisation basée sur les parties physiques du système d'éoliennes.	26
III.2	Approche de modélisation basée sur les caractéristiques fonctionnelles.	27
III.3	Les types des réponses.	30

III.4	Système masse-ressort-amortisseur à un seul degré de liberté.	31
III.5	Fonction de réponse en fréquence.	31
III.6	Lame tournant dans un courant de turbulence.	32
III.7	Spectre de vitesse d'un point de rotation statique et tournant, rotor à deux pales.	33
III.8	Intervalles de fréquence souples à raides pour la turbine Opti-OWECS à vitesse constante.	33
III.9	Les modèles analytiques (a) : Les composants principaux (b) : modèle arany (c) : modèle de poutre	34
III.10	Intervalles de fréquence pour un système de turbine à vitesse variable.	37
III.11	Courbe typique $C_p - \lambda$	38
III.12	Les fréquences 1P et 3P pour 80, 100, et 120 m diamètre du rotor fonctionnant à la vitesse de rotation constante.	39
III.13	Occurrence de fréquences d'ondes avec les fréquences 1P et 3P tracées.	40

Chapitre IV Calcul par élément finis la fréquence naturelle

IV.1	Étapes générales de la méthode des éléments finis.	45
IV.2	Le modèle de poutre (a) : Composants principaux (b) : Modèle De Hani M. N et Karam (c) : maille d'éolienne.	47
IV.3	Élément poutre à deux nœuds.	48
IV.4	Fonctions de forme d'un élément poutres et leurs dérivées.	49
IV.5	Deux éléments de poutre 1 et 2 avec L_1 et L_2	52

Chapitre V Présentation du programme avec des exemples de calcul

V.1	Fenêtre principale du programme.	56
V.2	Barre de menu du programme.	56
V.3	Sous menu Données.	57
V.4	Boite de dialogue des données générale.	57
V.5	Sous menu Calcul.	57
V.6	Sous menu Sortie.	57

Liste des tableaux

Chapitre III La fréquence naturelle d'une turbine à vent

III.1	Caractéristiques Opti-OWECS.	27
III.2	Caractéristiques Utgrunden.	28
III.3	Blyth caractéristiques.	28
III.4	Diamètres de tour requis pour la fréquence propre centrée sur les valeurs indiquées.	36

Chapitre IV Calcul par élément finis la fréquence naturelle

IV.1	Les éléments proposés par DNV pour analyser les éoliennes.	44
------	--	----

Chapitre V Présentation du programme avec des exemples de calcul

V.1	Liste du nom et de l'emplacement de la ferme éolienne.	58
V.2	Les paramètres d'entrée pour les éoliennes choisies pour cette application.	58
V.3	Les résultats de la fréquence naturelle d'un éolienne à basse fixe.	59

Introduction Générale

Introduction Générale

Le plus grand défi auquel sont confrontés aujourd'hui l'humanité et notre planète est le réchauffement de la planète, en fait, ce problème en raison de notre consommation d'énergie non renouvelable comme le charbon et le pétrole. D'une part, l'énergie renouvelable comme l'énergie solaire et l'énergies éolienne peuvent être la solution parfaite pour une simple raison, il n'y a plus de gaz CO₂, mais d'autre part le coût des technologies des énergies renouvelables encore moins compétitifs, donc, pour assurer le succès des énergies renouvelables, de nombreux programmes de recherche et de développement ont été abordés depuis la crise pétrolière de 1973, en raison de la compétitivité des coûts de production d'énergie renouvelable a atteint des niveaux historiques.

Comme exemple, les turbine à vent peuvent maintenant fournir de l'électricité, la concurrence par rapport à la production d'électricité à combustible fossile tiré.

Une nouvelle génération de turbines éoliennes a été mis au point les mêmes caractéristiques avec une grande capacité de production d'énergie, ils sont plus grands et plus, la plus grande ont plus de 200 m de hauteur et de produire 8 MW d'énergie, le coût de chaque éolienne relevée en fonction de la hauteur, donc, pour réduire la valeur monétaire, le constructeur réduit le poids de la turbine et augmente la puissance productive, qui est signifiée que le système de turbine devient plus flexible avec une activité plus dynamique. Pour vous assurer que l'activité dynamique n'influent pas la turbine négativement, le constructeur construit la turbine de telle sorte que la fréquence naturelle de la turbine éolienne doit être suffisamment séparée de la fréquence de fonctionnement de la turbine.

Dans les modèles d'analyse, l'estimation de la fréquence naturelle de base fixe basée sur les théories de poutre d'Euler-Bernoulli et Timoshenko où la turbine à vent est considérée comme une poutre avec une masse supérieure égal à l'assemblage de la masse de la nacelle et de rotor (ARN) , et par conséquent, on peut observer que la poutre correspondante de la turbine éolienne

est la clé de cette technique, en effet, de nos jours, les éoliennes ont généralement une forme complexe et par conséquent, l'estimation de la poutre correspondante avec les méthodes d'analyse devient de plus en plus difficile et pour cette raison les solutions numériques deviennent de plus en plus nécessaire.

Cette étude fournit une solution simple élément finis où la fréquence naturelle de base fixe des éoliennes est estimée par le modèle de poutre. Un code informatique appelé TURbeam a été écrit spécifiquement pour calculer la fréquence naturelle de base fixe des éoliennes.

Ce travail est organisé de telle sorte une brève description du domaine des énergies renouvelables sera présentée dans le chapitre I, dans le chapitre 2 on parle sur les turbines à vent ,les solutions analytiques seront proposées dans le chapitre3, nous décrit les solutions numériques dans le chapitre 4 ,On présente notre code informatique et le modèle élément finis utilisée dans TURbeam et une application de TURbeam dans lequel la fréquence naturelle de base fixe de six éoliennes sont calculées dans le chapitre 5.

CHAPITRE

I

Les énergies renouvelables

Chapitre I

Les énergies renouvelables

I.1 Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (photovoltaïque), le vent (éolien), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisés de manière auto gérée (puisqu'elles peuvent être utilisés dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles.

En fin de 2009, les énergies renouvelables représentaient 16% de la consommation finale d'énergie dans le monde et un peu moins de 20% de la production mondiale d'électricité, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, la force de l'eau et les végétaux. Les énergies renouvelables sont inépuisables. On les qualifie d'énergies "de flux" par rapport aux énergies "de stock" constituées de gisement limités de combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz [3].

I.2 Définition des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres [3].

Les énergies renouvelables sont issues de l'activité du soleil, sous forme de rayonnement direct (énergie solaire), et par les cycles renouvelés de l'eau (énergie hydraulique), du vent (énergie éolienne) ou de la biomasse (bois, biogaz, biocarburants...).

I.3 Les types des énergies renouvelables

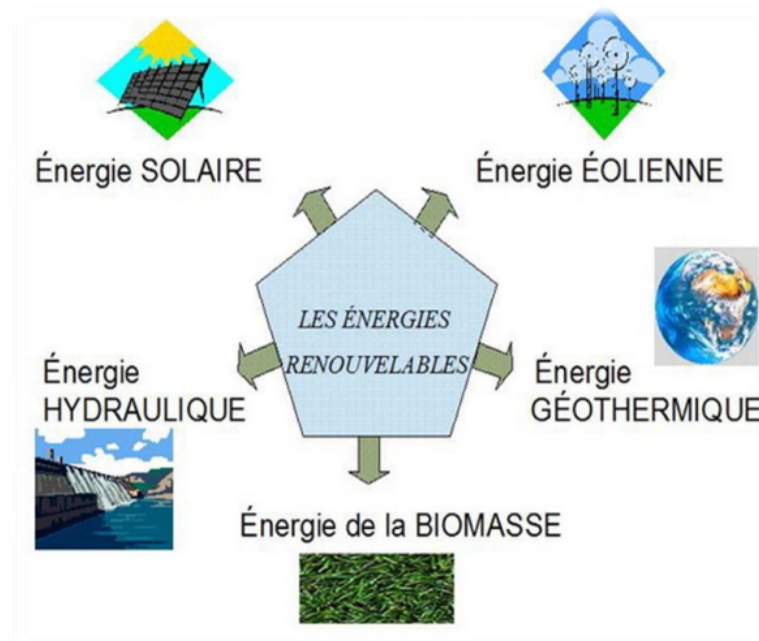


FIGURE I.1 – Schéma de différentes énergies renouvelables.

I.3.1 L'énergie éolienne

Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice, est montée sur un arbre qui est relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinier le grain ou à pomper de l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [27].

Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Une importante évolution 1970-2000. Une éolienne qui est un dispositif pour extraire de l'énergie cinétique du vent en la transformant en énergie mécanique ou en énergie électrique. En enlevant une certaine partie de son énergie cinétique le vent doit ralentir mais seulement cette masse d'air qui traverse le disque

du rotor sera affectée [27].

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- **Conservation de l'énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule pour pomper de l'eau (éolienne de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- **Transformation en force motrice :** : pompage de liquide, compression de fluides.
- **Production de l'énergie :** l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer des courants continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un électrogène) [3].



FIGURE I.2 – Énergie éolienne.

I.3.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Bien sûr, le soleil nous chauffe et nous éclaire. Alors cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires [16].



FIGURE I.3 – Énergie solaire.

On distingue deux types d'énergie solaire :

- **Les technologies solaires thermiques :** (chauffe-eau, cuisinières, distillateurs, séchoirs solaires) qui utilisent directement le rayonnement solaire.
- **Les cellules solaires photovoltaïques :** qui convertissent l'énergie solaire en électricité par exemple pour pomper l'eau ou pour alimenter de petits réseaux électriques [26].

I.3.3 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité (Marémotrice, Hydrolienne et Barrage) [24].

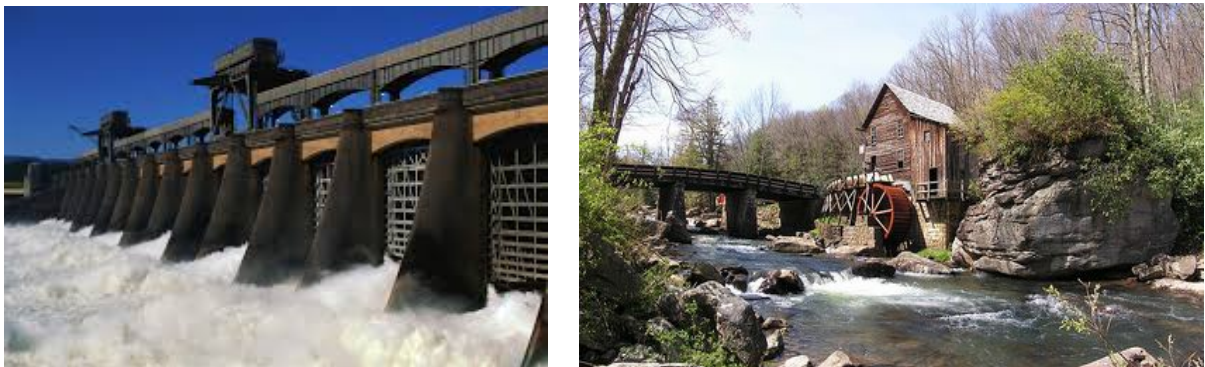


FIGURE I.4 – Énergie hydraulique.

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité dans la centrale hydro-électrique grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales au

fil de l'eau). L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans [23].

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- Le barrage qui retient l'eau.
- La centrale qui produit l'électricité.
- Lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

I.3.4 L'énergie de la biomasse

Énergie produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimique [16].

On distingue deux types de biomasse :

- **Biomasse sèche** : le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie ».
- **Biomasse humide** : les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agro-alimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement [26].



FIGURE I.5 – Énergie de la biomasse .

I.3.5 L'énergie géothermique

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur, en fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température [3].



FIGURE I.6 – Énergie géothermique.



On distingue trois types d'énergie :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie à basse énergie.
- La géothermie à très basse énergie.

I.4 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables

I.4.1 Avantages

- Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée.
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.
- Pas d'émission de CO₂.
- Pour la plupart des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable.

- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

I.4.2 inconvénients

- Investissement important.
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire.
- Projets de longue durée.
- Le stockage de l'électricité [20].

Il ne faut pas oublier qu'il faut commencer par l'optimisation des consommations, ceci se réalise par une conception architecturale bioclimatique accompagnée par des équipements ménagers économes.

Une fois les consommations diminuées mais pas le confort, nous pouvons envisager d'investir dans des systèmes de production d'énergie.

I.5 Notions et principes sur les énergies renouvelables

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire[16].

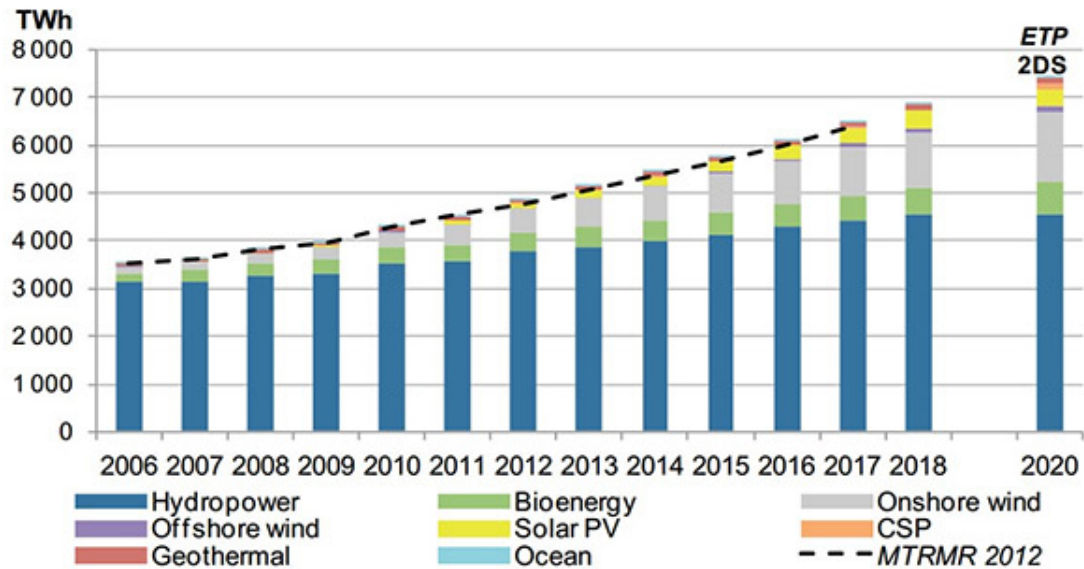


FIGURE I.7 – Production mondiale d’électricité renouvelable par région.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée, on a parlé sur différents types des énergies renouvelables ainsi que ses avantages et inconvénients, Nous avons établi quelques notions et principales au sujet des énergies renouvelables.

Dans le chapitre qui suit, On parle sur la turbine à vent.

CHAPITRE

———— II ————
La turbine à vent
————

Chapitre II

La turbine à vent

II.1 Introduction

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde. Suite à la crise pétrolière mondiale des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, ceci est dû à une topographie et un climat très diversifié [25].

II.2 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du moyen âge. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de « moulins », ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et

deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIXe siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. À l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 1940 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 1960, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [22] [4].



FIGURE II.1 – Moulins à vent (éoliennes classique).

II.3 Définition

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur électrique [11].

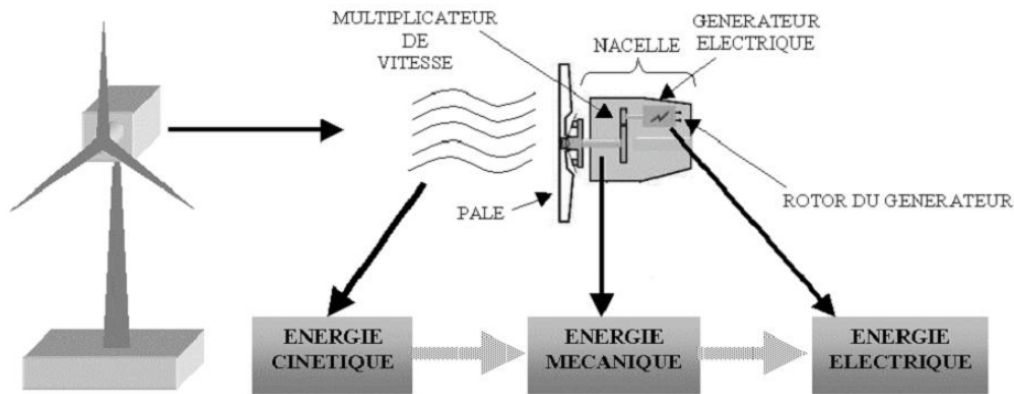


FIGURE II.2 – Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [11].

II.4 Capacité mondiale des éoliennes

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde. La figure (II.3) représente l'évolution de la capacité mondiale de production d'énergie éolienne de 2002-2018. C'est le secteur électrique dynamisé qui enregistre la croissance la plus forte augmentation en termes de capacité. Des installations record d'énergie éolienne dans le monde ont été effectuées en 2018.

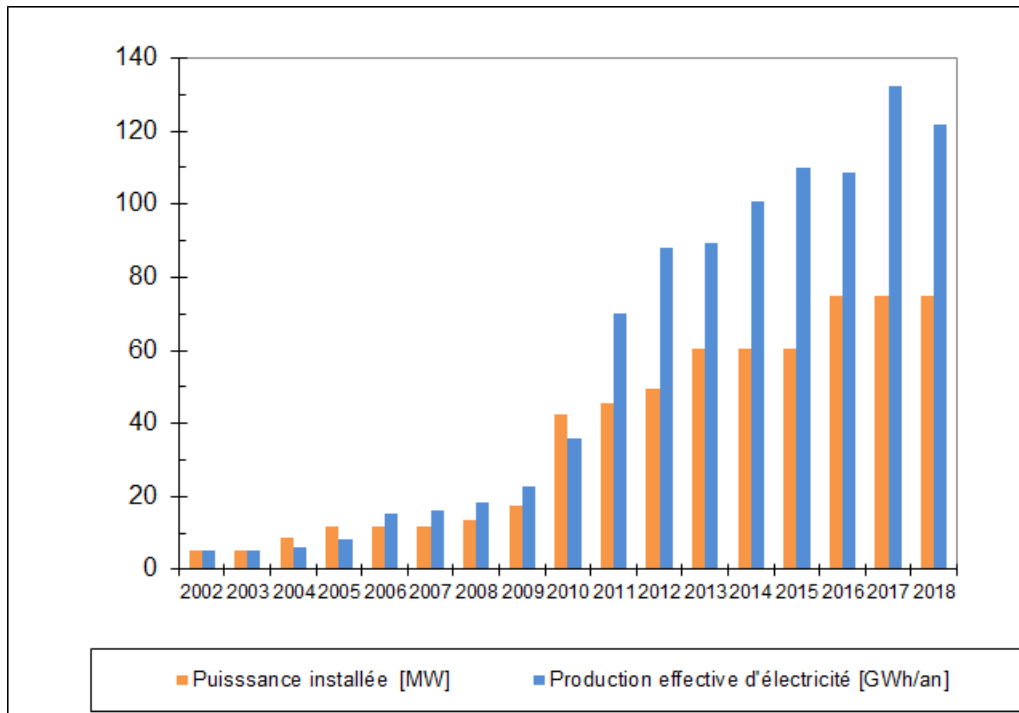


FIGURE II.3 – Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.

Bien devant les installations photovoltaïques et les centrales à charbon les installations d'énergie éolienne constituent près de 44,2% du total des nouvelles capacités électriques installées dans l'Union électrique. Fin 2015 l'énergie éolienne installée constitue près de 432.4 GW plus de 63.0 GW par rapport à l'année 2014. Avec en tête la Chine, les États-Unis et l'Allemagne, dont 33.6% en Chine, 17,2% aux États-Unis et 10,4% en Allemagne [25].

II.5 Capacité des éoliennes en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder des 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. Ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Electricité et Gaz d'Algérie. La deuxième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fus en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 mètres avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie éo-

lienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables.

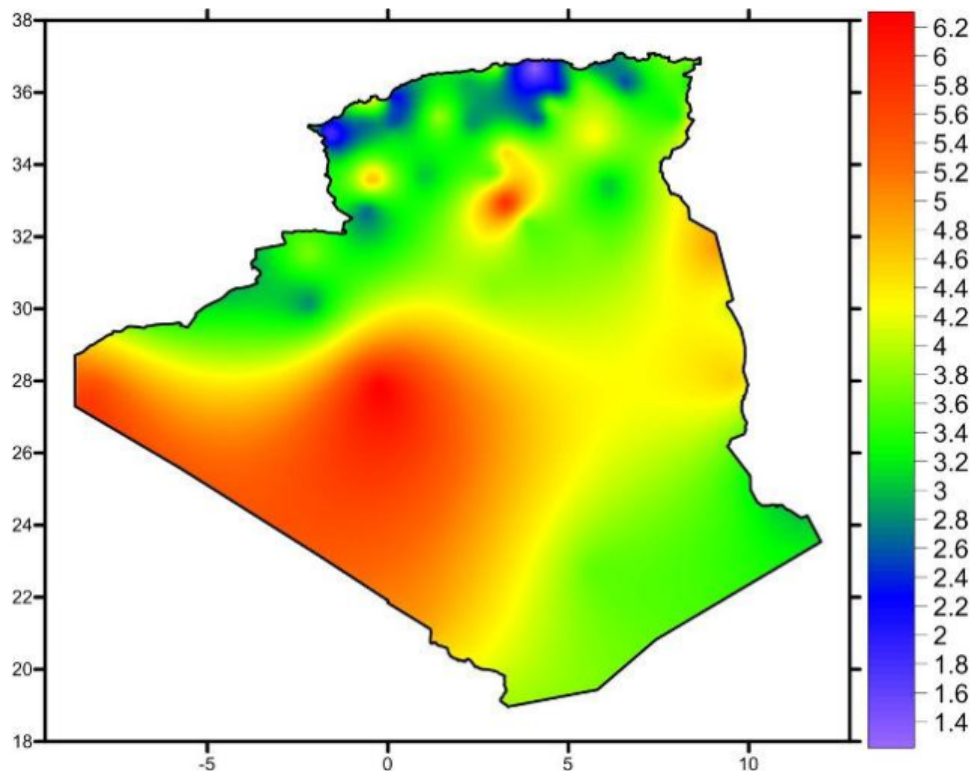


FIGURE II.4 – Carte annuelle des vents à 100m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).

Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée 5010 MW pour l'éolien pour la période 2015-2020, il est programmé de réaliser 1GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux fermes éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre de 20MW à Khenchela. Le nouvel Atlas éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un important potentiel. Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m [28].

II.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.

II.6.1 Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- Bien que ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- 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, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type

d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [19].

II.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 ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [19].

II.7 La taille des éoliennes

Afin de répondre à la demande croissante de l'énergie électrique, les constructeurs et les chercheurs ont mis le point sur la taille des éoliennes, et cela pour pouvoir utiliser le maximum de la force du vent, tout en cherchant à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. La figure suivante présente la taille des hélices en m et puissance en KW qu'on peut trouver sur le marché des éoliennes. Actuellement les grandes éoliennes commercialisées possèdent une hélice de plus de 100m, donc elle est perchée en haut à plus de 100m de hauteur pour produire 4.5 MW [18].

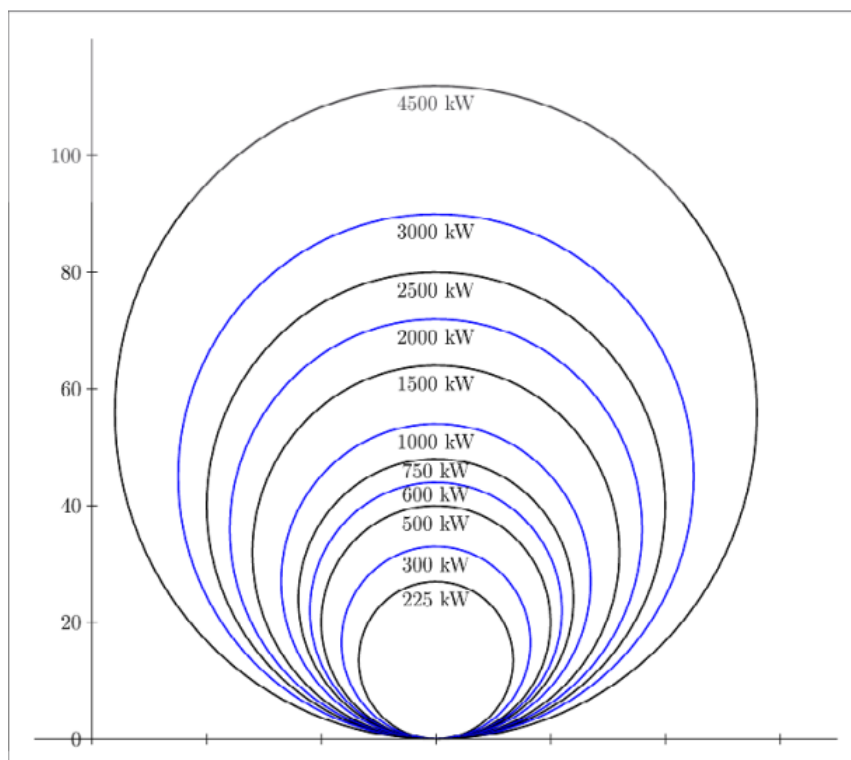


FIGURE II.5 – Taille des hélices en m et puissances en KW.

II.8 Les différents types des turbines à vent

Généralement, on classe les turbines à vent suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles [1] :

- Les turbines à vent à axe horizontal.
- Les turbines à vent à axe vertical.

II.8.1 Les turbines à vent à axe vertical

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins sensibles à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés).

En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais s'adapte bien aux besoins des consommateurs d'un logement social. Elles trouvent donc leur place dans le milieu urbain.

Les principaux aérogénérateurs à axe vertical sont le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS [1].

II.8.1.1 Le rotor de SAVONIUS

Ce type d'aérogénérateur utilise la traînée et est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain [1].

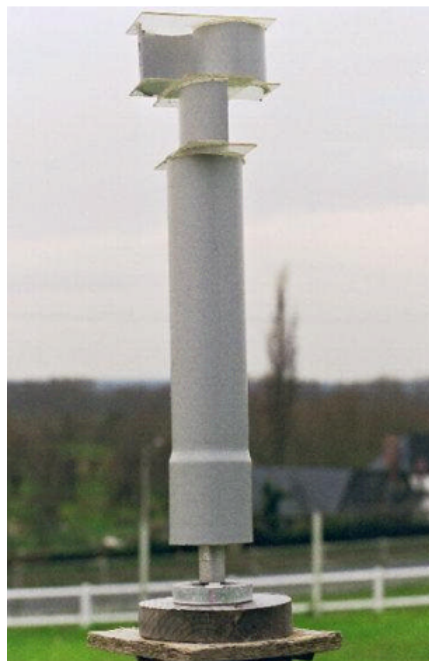


FIGURE II.6 – Éolienne de type Savonius.

II.8.1.2 Le rotor de DARRIEUS

Inventé par l'académicien français DARRIEUS au cours des années 1920- 1935 repose sur l'effet de traînée d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de DARRIEUS : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique [1].



FIGURE II.7 – Éolienne de type Darrieus.

II.8.2 Les turbines à vent à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect d'équilibrage de la machine par rapport au bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important [12].



Éolienne trois pales.



Éolienne deux pales.

FIGURE II.8 – Éolienne de type Darrieus.

Deux types de configurations peuvent être rencontrés :

Eoliennes sous le vent (aval) :

Dans ce type d'éoliennes le vent souffle derrière les pales comme le montre la figure (II.5). L'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales de rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône ; par fort vent la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Ces éoliennes ont donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit plus petit constitue un obstacle au vent ce qui augmente le risque de rupture de la pale et génère une production fluctuante d'électricité.

Eoliennes face au vent (amont) :

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône. A l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône. Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent [12].

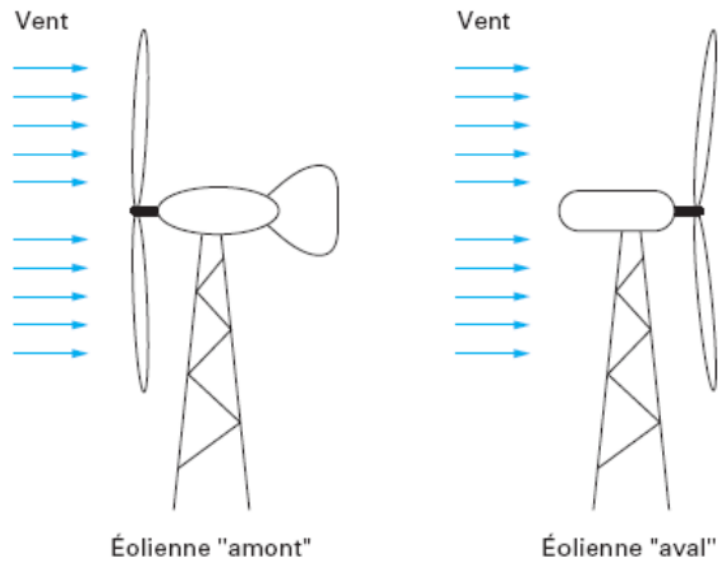


FIGURE II.9 – Configuration à axe horizontal.

II.8.2.1 Architecture d'une turbine à vent a axe horizontal

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple ou vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire. Nous présentons dans ce qui suit dans l'ordre de construction les différentes parties d'une éolienne :

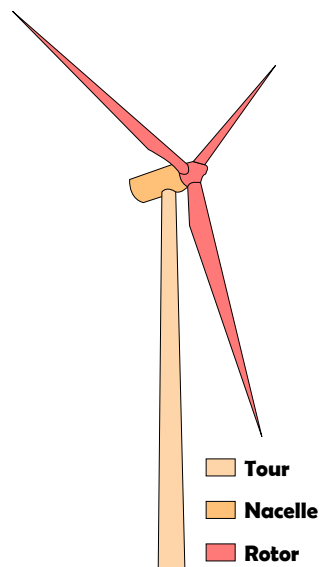


FIGURE II.10 – Architecture d'une turbine à vent a axe horizontal.

II.8.2.1.1 Le rotor et ses pales Le rotor est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. C'est un ensemble constitué des pales avec un nombre variable et de l'arbre primaire. La liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Quant aux pales, elles sont en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De leurs performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine [17].

II.8.2.1.2 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. La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol [12].

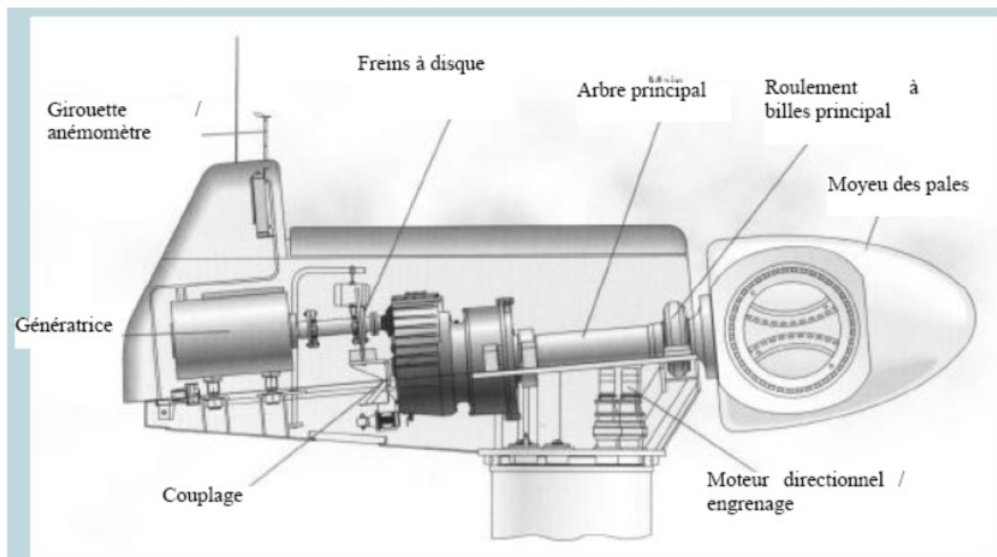


FIGURE II.11 – Éléments attachés à une nacelle.

II.8.2.1.3 La tour Le mât doit être le plus haut possible de manière à sortir le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Il existe sur le marché trois grands types de tour, elle peut être haubanée, à treillis ou bien tubulaire. Cette dernière reste la plus répandue car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle. Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne. Néanmoins, sa réalisation reste assez complexe par rapport aux deux autres types de mât [17].

II.9 Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [17].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a parlé sur les énergies éoliennes, les différents types des turbines à vent ainsi que ses avantages et ses inconvénients et on a terminé avec les applications des éoliennes.

Dans le chapitre qui vient, on parle sur la fréquence naturelle d'une turbine à vent (approche analytique et numérique).

CHAPITRE

III

La fréquence naturelle d'une turbine à vent

Chapitre III

La fréquence naturelle d'une turbine à vent

III.1 Introduction

Toutes les éoliennes nouvellement développées partagent les mêmes caractéristiques, elles sont plus grandes que leurs prédécesseurs et du concept de vitesse variable [13]. « Multi-mégawatt » est maintenant synonyme de « Plus de 2 MW » avec une portée de 5 MW, alors que le rendement des turbines est augmenté avec rotors plus grands et générateurs plus puissants, le coût est maintenu aussi bas que possible en réduisant le poids total, cela signifie que le système de turbine devient plus flexible et donc plus actif dynamiquement.

Pour s'assurer que l'activité dynamique n'influence pas négativement sur le système, la conception intégrée de l'ensemble du système d'éoliennes est cruciale, cela peut même donner lieu à une réduction des coûts : dans certains cas, le montant des analyses séparées est supérieur à celui des analyses intégrées.

Avec une puissance informatique accrue des modèles plus sophistiqués peuvent être construits pour étudier le système intégré, mais les systèmes plus complexes restent soumis aux principes de dynamique.

III.2 Caractéristique de la turbine

En général, les systèmes d'éoliennes sont constitués de cinq composants physiques : rotor, transmission, générateur, structure de support et système de contrôle, une approche de modé-

lisation simple de tels systèmes est représentée à la figure (III.1), le système dispos d'entrées externes provenant du vent, des vagues et du réseau.

Une approche différente qui peut réduire radicalement la quantité de calcul est montrée dans figure (III.2), les composants fonctionnels et non les composants physiques sont les sous-modules à interagir ensemble, l'approche illustrée à la figure (III.1) qui présente des caractéristiques mécaniques interactions entre tour, rotor, transmission et générateur alors que l'approche en figure (III.2) résout directement les équations du mouvement et n'interagit qu'avec d'autres fonctionnalités.

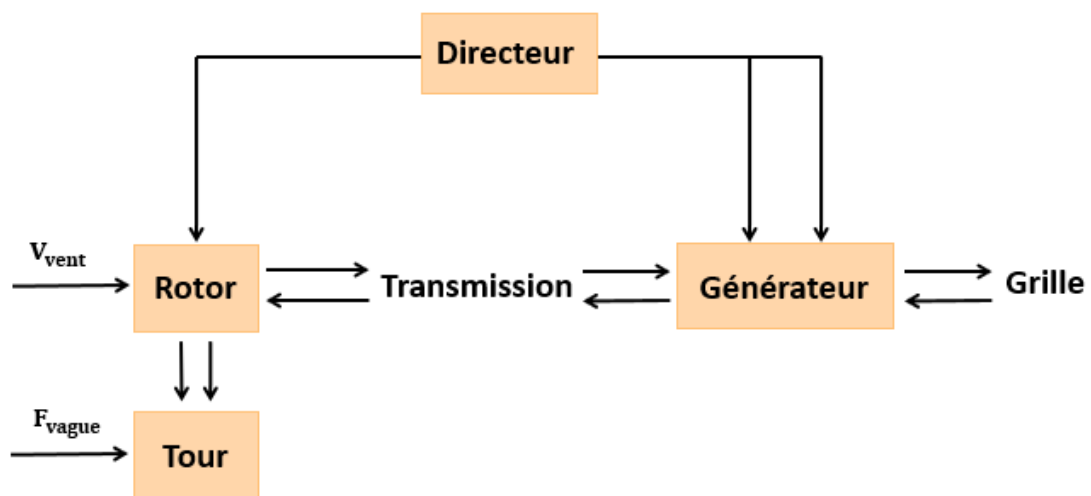


FIGURE III.1 – Approche de modélisation basée sur les parties physiques du système d'éoliennes.

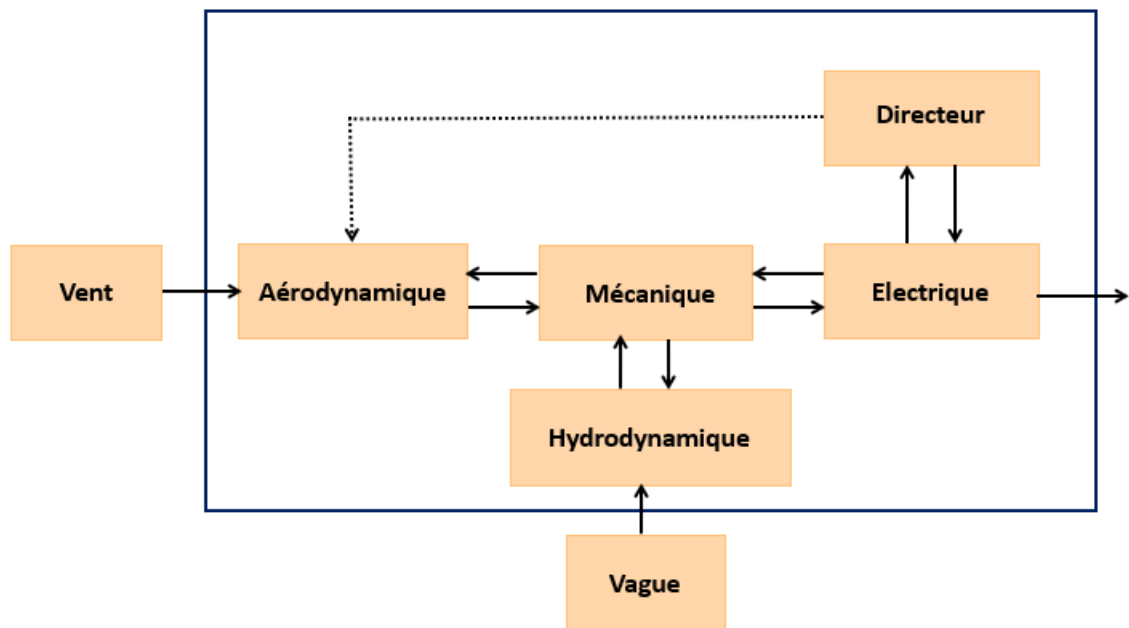


FIGURE III.2 – Approche de modélisation basée sur les caractéristiques fonctionnelles.

Dans ce chapitre, trois exemples de turbines sont utilisés pour montrer l'application de la théorie de base sur structures réelles.

Le premier exemple de turbine a été conçu dans le cadre de l'étude Opti-OW ECS. Dans cette étude, une turbine à deux pales de 3 MW à vitesse constante a été utilisée.

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau (III.1).

TABLEAU III.1 – Caractéristiques Opti-OWECS.

Longueur du fond marin au moyeu	81 m	L
Nombre de pales	2	Nb
Puissance nominale	3 MW	$P \text{ évalué}$
Vitesse rotationnelle	22 r.p.m = 0.37 Hz	ω
Top masse	130,000 kg	M
Diamètre de la tour au fond de la mer	3.5 m	D
Épaisseur de la paroi de la tour au fond de la mer	0.075 m	t

La prochaine turbine est une turbine offshore de 1,5 MW à Utgrunden en Suède, un parc éolien composé de 7 turbines installé en 1999.

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau (III.2).

TABLEAU III.2 – Caractéristiques Utgrunden.

Longueur du fond marin	75 m	L
Nombre de pales	3	Nb
Puissance nominale	1.5 MW	$P \text{ évalué}$
Plage de vitesse de rotation	11–20 r.p.m = 0.18–0.33 Hz	ω

La troisième turbine est une turbine offshore Vestas V66 de 2 MW installée à l'extérieur de Blyth Harbour, nord-est de l'Angleterre.

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau (III.3).

TABLEAU III.3 – Blyth caractéristiques.

Longueur du fond marin au moyeu	68 m	L
Nombre de pales	3	Nb
Puissance nominale	2 MW	$P \text{ évalué}$
Vitesse rotationnelle	10.5-24.4 r.p.m = 0.17-0.4 Hz	ω
Top masse	80,000 kg	M
Diamètre de la tour au fond de la mer	3.0 m	D
Épaisseur de la paroi de la tour au fond de la mer	0.040 m	t

III.3 Les bases de la dynamique

L'importance de la modélisation détaillée de la dynamique structurelle peut être illustrée plus de manière pratique en considérant un système à un degré de liberté masse-ressort-amortisseur, notez qu'un système complet d'éoliennes (offshore) peut être considéré comme étant constitué d'un certain nombre de systèmes couplés masse-ressort-amortisseur [9].

Lorsqu'une force d'excitation harmonique $F(t)$, c'est-à-dire une sinusoïde est appliquée à la masse, la magnitude et la phase du déplacement résultant u dépend fortement de la fréquence d'excitation v .

Trois régions de réponse peuvent être distinguées :

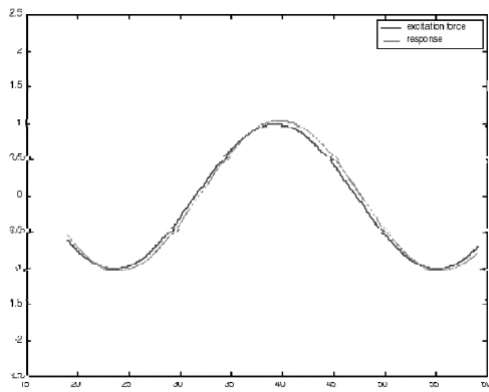
- Quasi-statique.
- Résonance.
- L'inertie dominée.

Pour des fréquences d'excitation bien inférieures à la fréquence naturelle du système, la réponse sera quasi-statique comme illustré à la figure (III.3.a) : le déplacement de la masse suivra le temps une force variable presque instantanément c'est-à-dire avec un léger décalage de phase, comme si elle était excitée par une charge statique oblique, la figure (III.3.b) montre une réponse typique pour les fréquences d'excitation dans une région étroite autour de la fréquence naturelle du système. Dans cette région, la force du ressort et la force d'inertie presque annulée, produisant une réponse plusieurs fois supérieure à ce qu'elle serait statiquement. L'amplitude qui en résulte est régie par l'amortissement présent dans le système, pour les fréquences d'excitation bien au-dessus de la fréquence naturelle, la masse ne peut pas « suivre » le mouvement plus long, par conséquent, le niveau de réponse est faible et presque en contre-phase comme illustré dans figure (III.3.c), dans ce cas l'inertie du système domine la réponse.

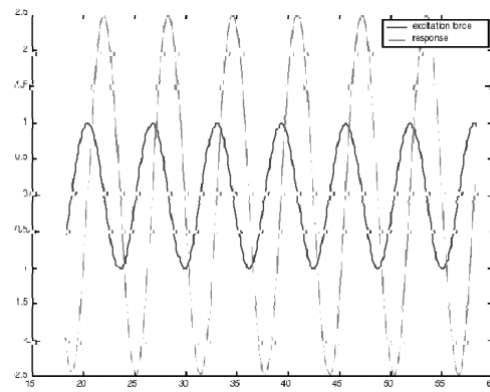
Il convient de souligner que dans les trois figures l'amplitude de la force d'excitation $F(t)$ est identique mais appliqué à différentes fréquences d'excitation.

Le rapport normalisé des amplitudes des figures (III.3.a à III.3.c) illustre le fait général que dans en régime permanent les entrées sinusoïdales appliquées à un système linéaire génèrent des sorties sinusoïdales de même fréquence mais différent en magnitude et en phase (c.-à-d. décalage entre l'entrée et la sortie sinusoïdale).

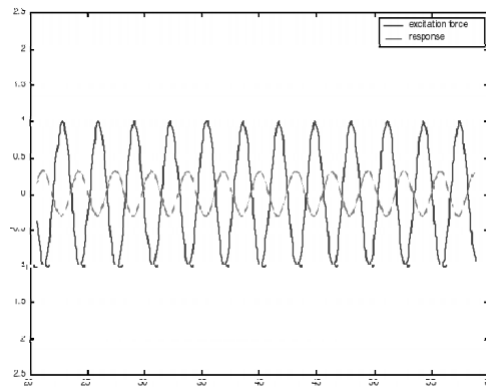
Le rapport d'amplitude normalisé est également appelé facteur d'amplification dynamique. le FAD est couramment utilisé dans les calculs de l'énergie éolienne et de la technologie offshore communautés dans la phase de conception préliminaire, pour tenir compte de l'effet des charges dynamiques de réponse statique (en négligeant ainsi les informations de phase). En général, les FAD requis sont les suivants : dérivés de simulations dans le domaine temporel similaires à celles illustrées aux figures III.3.a III.3.c.



a : Réponse quasi-statique.



b : Réponse de résonance.



c : Réponse à l'inertie.

FIGURE III.3 – Les types des réponses.

— Ligne continue : force d'excitation.

..... Ligne pointillée : réponse simulée.

La propriété de modification de la magnitude et de la phase des systèmes linéaires peut être facilement résumée en un graphique : la fonction de réponse en fréquence, la fonction de réponse en fréquence (FRF) décrit le rapport d'amplitude de la sortie sinusoïdale sur l'entrée, ainsi que le déphasage correspondant en fonction de la fréquence d'excitation, la figure (III.5) montre le FRF du système à un seul degré de liberté décrit à la figure (III.4).

Le pic de la figure (III.5) correspond à la fréquence propre du système, la hauteur du pic est déterminé par amortissement, par conséquent, tout problème de résonance peut être contrôlé avec contrôles d'amortissement adéquats, si le budget le permet. En dynamique, la fréquence de la force est au moins aussi importante que sa magnitude, le comportement de résonance peut causer de graves problèmes de charge, même échec mais on craint le plus pour les problèmes de fatigue, pour les structures où la dynamique est devrait poser problème, connaissance détaillée des fréquences attendues de l'excitation les forces et les fréquences propres de la structure, ou

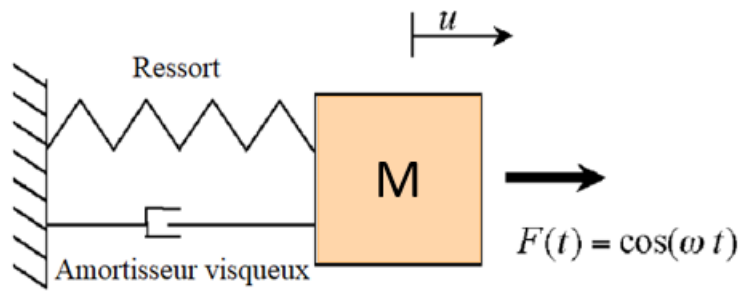


FIGURE III.4 – Système masse-ressort-amortisseur à un seul degré de liberté.

des parties de la sous-structure sont vitales.

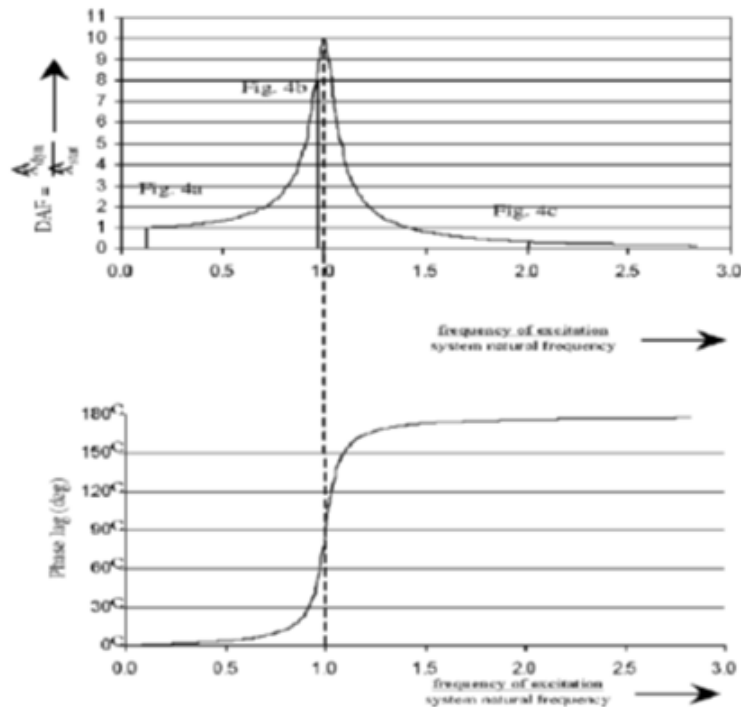


FIGURE III.5 – Fonction de réponse en fréquence.

Figure supérieure : Figure supérieure : magnitude par rapport à la fréquence.

Figure inférieure : décalage de phase par rapport à la fréquence.

III.4 Doux à Raide

Dans cette section, l'approche dynamique présentée est appliquée à un système d'éolienne. Tout d'abord les charges variables dans le temps sont présentées puis les propriétés du système sont modélisées.

III.4.1 Les charges

Pour traduire le modèle de base en éolienne, les fréquences d'excitation sont d'abord examinées, la source d'excitation la plus visible et la plus présente dans une éolienne est le rotor. Dans cet exemple, une turbine à vitesse constante sera étudiée, la rotation constante la vitesse est la première fréquence d'excitation plus communément appelée 1P. La deuxième excitation fréquence est la fréquence de passage des pales du rotor : $N_b P$ dans laquelle N_b est le nombre de pales du rotor. Cela signifie $2P$ pour une turbine équipée de deux pales de rotor et $3P$ pour un rotor à trois pales.

La figure (III.6) illustre le mieux la charge variable aux deux fréquences. le courant dans le champ de vent provoquera une charge supplémentaire sur les pales chaque fois qu'elles interagissent, la charge supplémentaire changera pendant une rotation complète : la première pale est à nouveau excitée à 1P avec deux lames, il y a une réponse $2P$.

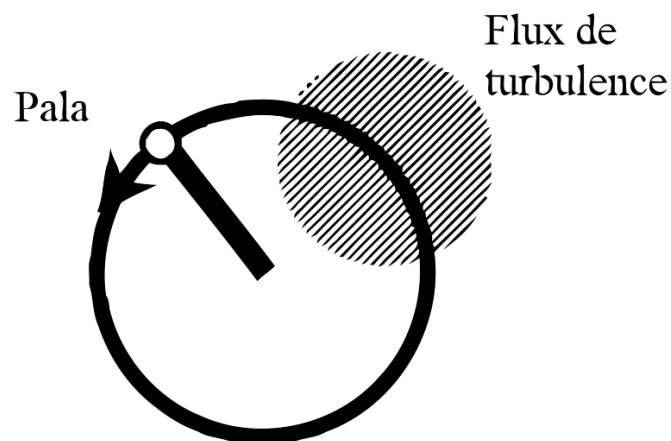


FIGURE III.6 – Lame tournant dans un courant de turbulence.

La différence entre un spectre de charge de vent statique et la figure (III.7) montre le spectre ressenti par une turbine à deux pales due au rotor en rotation.

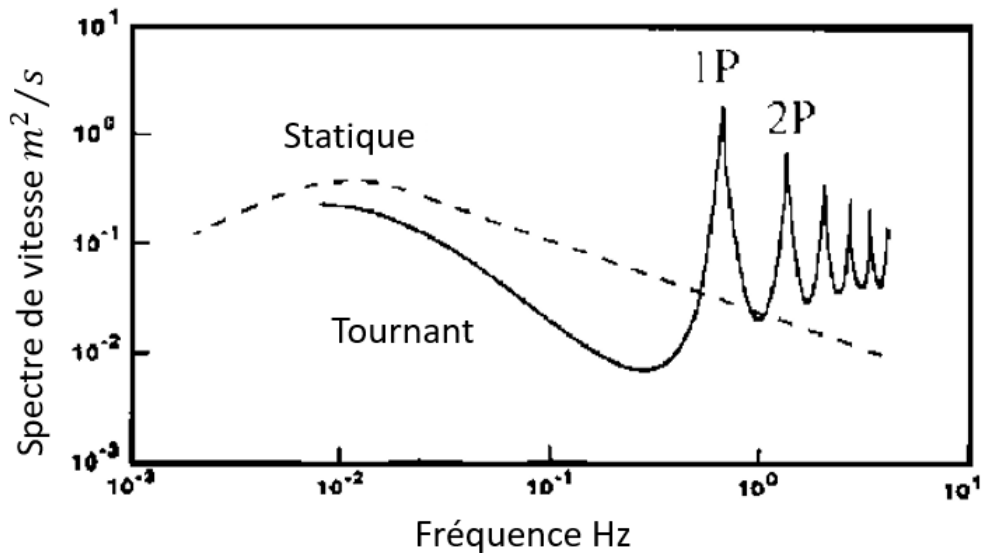


FIGURE III.7 – Spectre de vitesse d'un point de rotation statique et tournant, rotor à deux pales.

Ces deux fréquences sont indiquées dans un diagramme comme illustré à la figure (III.8), pour la constante Turbine Opti-OW ECS à 2 pales et à vitesse variable, l'axe horizontal représente la fréquence en hertz et l'axe vertical indicatif n'a pas de valeur, bien que des excitations d'ordre supérieur se produisent dans ce Sur le papier, seuls 1P et 2P sont pris en compte à des fins d'illustration.

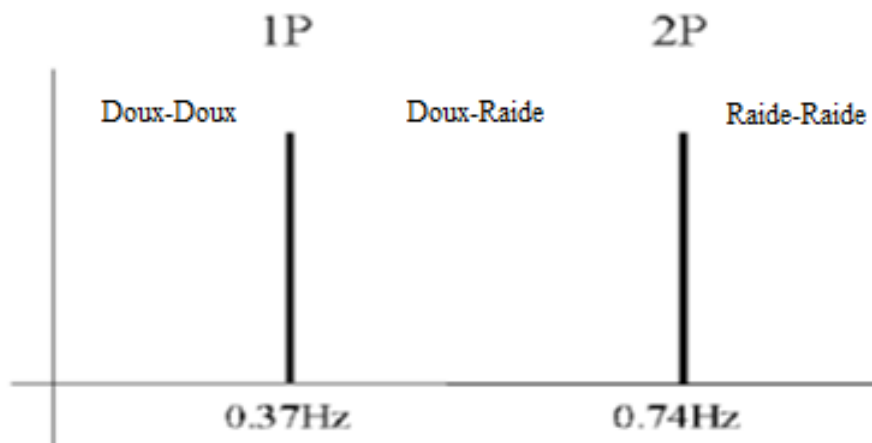


FIGURE III.8 – Intervalles de fréquence souples à raides pour la turbine Opti-OWECS à vitesse constante.

Pour éviter la résonance, la structure doit être conçue de telle sorte que sa première fréquence propre ne coïncide ni avec 1P ou 2P, cela laisse trois intervalles possibles. Une structure très rigide avec une haute fréquence naturelle supérieure à 2P (raide-raide), une fréquence natu-

relle comprise entre 1P et 3P : douce-raide et une structure très douce inférieure à 1P : Doux-Doux.

III.5 La structure

La dynamique des structures d'un système d'éolienne flexible peut être modélisée comme une poutre avec une masse supérieure M_{RNA} comme illustré dans la figure (III.9.c), sous cette forme elle ressemble au modèle de masse-amortisseur à ressort système de la section (III.3), la flexibilité de flexion de la tour représente le ressort, rigidité ; l'amortissement est donné sous la forme d'un coefficient d'amortissement.

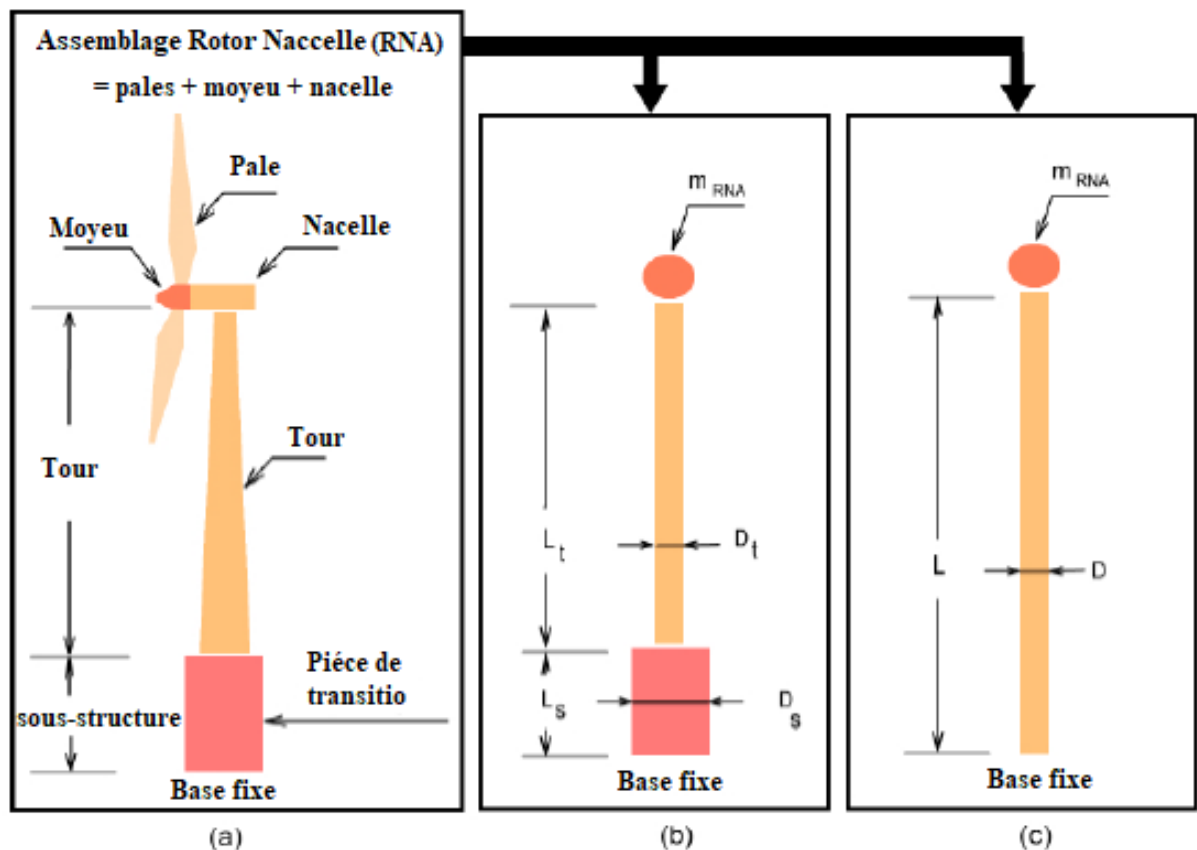


FIGURE III.9 – Les modèles analytiques (a) : Les composants principaux (b) : modèle arany (c) : modèle de poutre

Vught[30] est utilisé une idée simple d'estimer la fréquence naturelle de base fixe des éoliennes où l'éolienne est considérée comme une poutre a une rigidité à la flexion $E_T I_T$ et la masse de la tour m_T et d'une masse supérieure m_{RNA} égal à la masse total du rotor et la nacelle

Assemblée figure (III.9.c).

L'équation de la première fréquence naturelle est donnée par :

$$F_{FB,T1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.04E_T I_T}{L^3(m_{RNA} + 0.227m_T)}} \quad (III.1)$$

En utilisant la même idée, une seconde expression fournie par Belvins[5], où la première fréquence propre est transmise par :

$$F_{FB,T2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E_T I_T}{L^3(m_{RNA} + (\frac{33}{140})m_T)}} \quad (III.2)$$

Où :

$F_{FB,T1}$:La première fréquence naturelle.

$F_{FB,T2}$:La deuxième fréquence naturelle.

m_{RNA} :Top masse.

L :Hauteur de la tour.

$E_T I_T$:Rigidité à la flexion.

m_T :La masse de la tour.

D : Diamètre de la tour.

Si nous appelons à un œil à l'équation (III.1) et de l'équation (III.2), on découvre qu'elles sont appropriées que pour un modèle simple dans lequel la turbine est conçue comme une poutre avec une section transversale uniforme, mais avec cette approche nous a ignoré le fait que la turbine est généralement de forme tubulaire et conique avec une épaisseur de paroi irrégulière.

Pour nous trouvons le faisceau correspondant de la turbine de forme irrégulière, Arany et al. [14][15] fourni une solution pour évaluer la fréquence naturelle de base fixe d'une turbine éolienne présente une partie conique (tour) et une partie tubulaire (sous-structures) dans laquelle peut être résumé de la procédure d'évaluation :

- Avec l'équation (1), compter sur la fréquence naturelle de base fixe de la tour $F_{FB,T1}$ où la section conique de la tour est remplacée par une pièce tubulaire Figure (III.9.b) ayant un diamètre donné par :

$$D_T = \frac{D_{sup} + D_{inf}}{2} \quad (III.3)$$

Si nous demandons un coup d'oeil à la solution proposée par Arany et al. [13-12], nous observons qu'une importante erreur de gamme a été créée lorsque la fréquence naturelle de base fixe de la tour a été estimée, en effet, la substitution de la partie conique crée une erreur dans l'estimation de la fréquence naturelle de base fixe de la partie conique, et par conséquent, dans le résultat final.

A titre d'exemple, l'équation (III.2) est appliquée à la conception Opti-OWECS avec une paroi de 7,5 mm d'épaisseur constante sur toute la hauteur, comme résumé au tableau IV, la structure pourrait avoir une première fréquence naturelle proche de 0,25Hz, une fréquence douce-raide proche de 0,5Hz et une fréquence rigide près de 1Hz. L'équation (III.2) est donc appliquée pour déterminer le diamètre D correspondant à la spécifié "autorisé" fréquences naturelles, les résultats sont énumérés dans le tableau (III.4).

TABLEAU III.4 – Diamètres de tour requis pour la fréquence propre centrée sur les valeurs indiquées.

TYPE	La fréquence (Hz)	Diamètre (m)
Doux-Doux	0.25	2.4
Doux-Raide	0.5	4.2
Raide-Raide	1.0	7.2

Parce que le prix de l'achat et de la manutention de gros pieux tubulaires est principalement influencé par le diamètre, d'un point de vue économique, le choix de la structure la plus « douce » sera le moins cher et le meilleur.

Nous notons que l'utilisation de l'équation (III.2) avec les données du tableau I donne une fréquence propre de 0,396Hz, ce qui serait une structure Douce-Raide, la fréquence propre réelle de la turbine telle qu'établie dans l'étude Opti-Owecs est de 0,289 Hz : une structure douce à douce[10]. Ceci a été conçu en ayant premièrement le diamètre de la tour et l'épaisseur de la paroi diminuent rapidement au-dessus de la ligne d'eau, ce qui donne une structure plus flexible et deuxièmement en incluant la flexibilité de la fondation comme paramètre.

III.6 Limitation des options

Dans la section précédente, les propriétés de base du système d'une éolienne ont été décrites, le modèle simple doit être étendu pour inclure des turbines plus grandes et à vitesse variable, ces influences sont décrites dans les sections suivantes.

III.6.1 Vitesse variable

Les turbines à vitesse variable gagnent du terrain et se distinguent des turbines à vitesse constante, ils offrent capture d'énergie plus élevée et charges dynamiques plus faibles, par exemple, les turbines Vesta de 2 MW dans la mer du Nord près de Blyth, au nord-est de l'Angleterre, a une vitesse de rotation comprise entre 10,5 et 24,5 RPM. Cela signifie que l'intervalle pour une conception Douce-Raide est également plus étroit, comme le montre la figure (III.10).

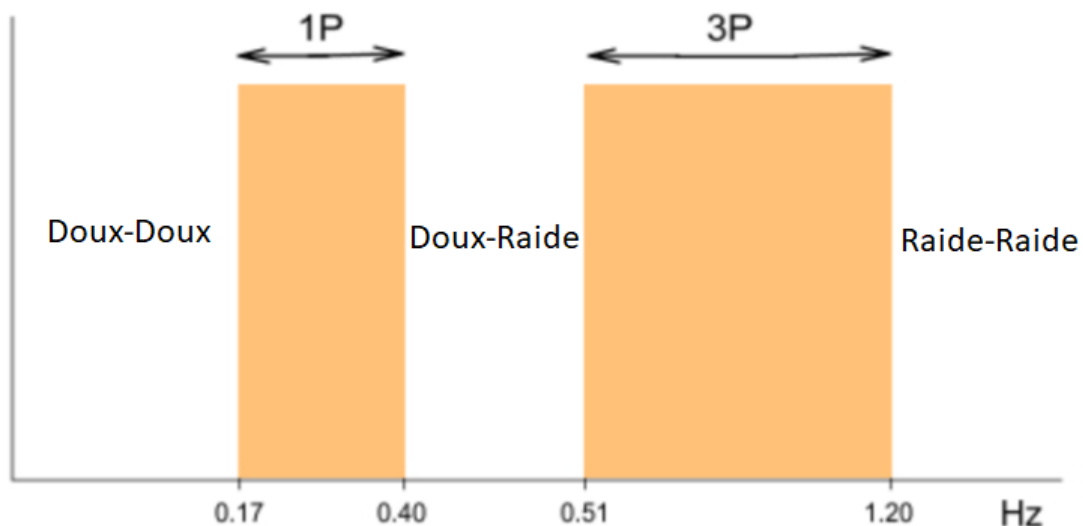
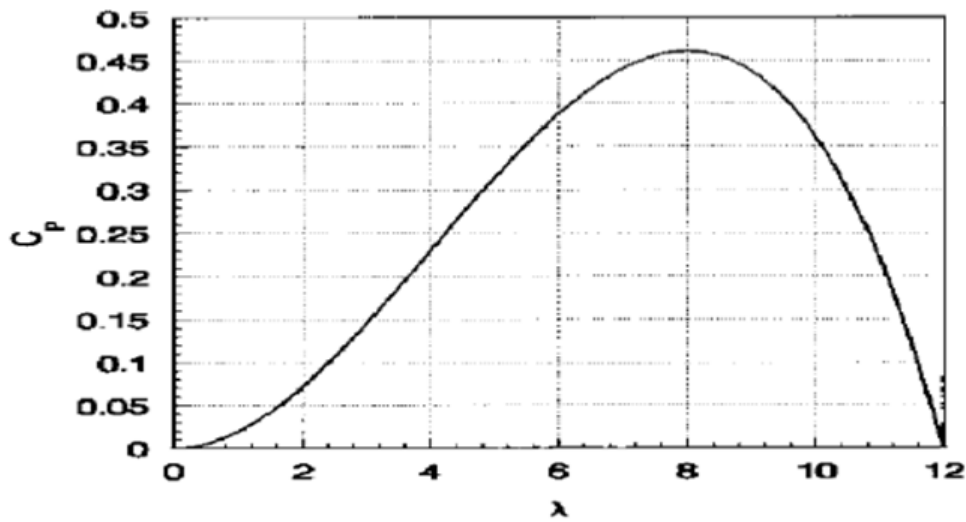


FIGURE III.10 – Intervalles de fréquence pour un système de turbine à vitesse variable.

Notez qu'une turbine à deux pales aurait une plage de fréquence de passage d'aube $2P$ qui commencerait à 0,34 Hz, ce qui est inférieur à la limite supérieure de la plage $1P$: la zone Douce-raide aurait disparu.

III.6.2 Turbines plus grandes :

La tendance à créer de plus grandes turbines est toujours forte, cela signifie que les pales du rotor deviennent plus longues et des masses génératrices supérieures, l'augmentation du diamètre du rotor a un effet direct sur la souplesse approche raide, la performance d'une turbine peut être mesurée en fonction du rapport de vitesse de pointe, comme le montre la figure (III.11).

FIGURE III.11 – Courbe typique $C_p - \lambda$.

C_p est le coefficient de puissance égal à la puissance extraite de l'air divisé par la quantité totale de puissance dans l'air en mouvement sur la zone balayée, cette courbe a un maximum théorique de 0,593, limite de Betz [6], λ est le rapport de vitesse de pointe, égal à la vitesse de la pointe de la lame divisée par la vitesse du vent en amont.

Le rapport de vitesse de pointe est défini par l'équation (III.4) :

$$\lambda = \frac{V_{pointe}}{V_W} = \frac{\Omega R}{V_W} = \frac{f_{1p} \cdot \pi \cdot D}{V_W} \quad (\text{III.4})$$

Alors :

$$f_{1p} = \frac{\lambda \cdot V_W}{\pi \cdot D} \quad (\text{III.5})$$

Cela signifie que la fréquence de rotation diminue lorsque le diamètre augmente, les résultats de l'équation (III.5) pour une vitesse du vent de 11,4 m / s et $\lambda = 8$ et des diamètres de rotor de 80, 100 et 120m respectivement (avec 3 pales) sont tracés à la figure (III.12).

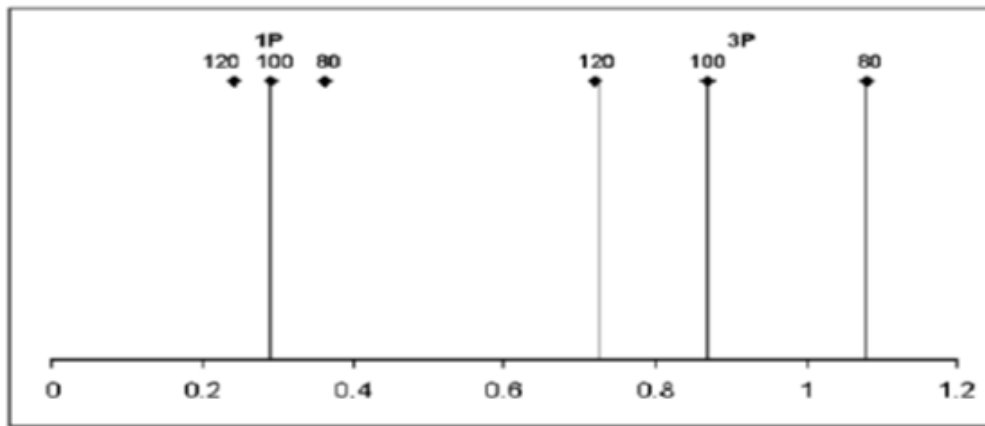


FIGURE III.12 – Les fréquences 1P et 3P pour 80, 100, et 120 m diamètre du rotor fonctionnant à la vitesse de rotation constante.

L'augmentation du diamètre du rotor nécessite également une hauteur de moyeu plus élevée et un plus lourd générateur, dans l'équation (III.2) la hauteur de la tour L apparaît sous la forme d'un carré, cela produit une diminution importante de la fréquence naturelle avec l'augmentation de la hauteur.

III.7 Indemnisation

Comme indiqué dans les sections précédentes, l'objectif devrait être de créer une structure de soutien souple à souple parce qu'elle utilise moins d'acier et est donc moins chère, mais les tendances en matière de structure des forces d'excitation semblent converger toutes les deux vers cette zone molle avec un risque majeur de comportement résonnant, cependant, deux autres aspects sont à prendre en compte : aérodynamique, amortissement et contrôlabilité des turbines à vitesse variable.

III.7.1 Amortissement aérodynamique

La section 5 a montré que, si une structure offshore-Douce est conçue pour empêcher excitation par la fréquence 1P du rotor, il rencontrerait des ondes de mer avec des fréquences près de sa fréquence naturelle pendant 25% de l'année (voir figure III.13), cependant, bien que résonnant comportement se produirait l'excitation dynamique est nettement inférieure à celle prédite par juste analyse structurelle de la structure de support, la rotation du rotor ajoute un amortissement à la système qui réduit considérablement la hauteur du sommet de la figure 5 et donc le sommet de la tour : le déplacement et la fatigue totale.

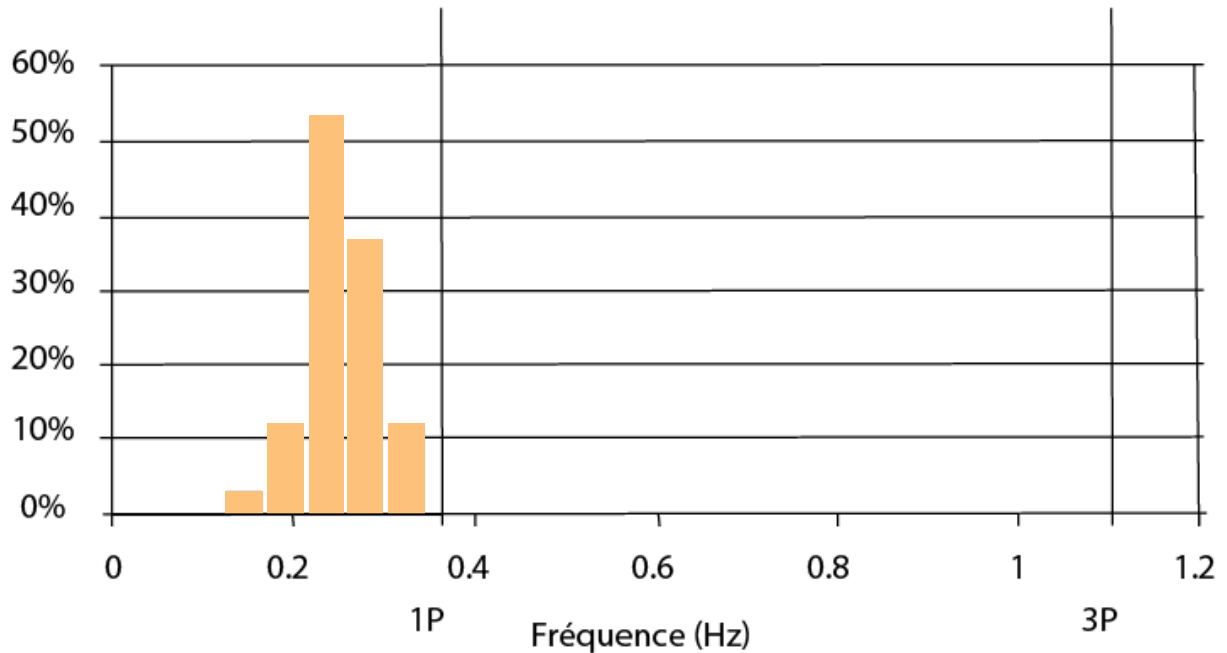


FIGURE III.13 – Occurrence de fréquences d'ondes avec les fréquences 1P et 3P tracées.

Nous notons que d'après Van der Tempel [29], la durée de vie en fatigue de l'Opti-OW ECS la structure de support est doublée lorsque la turbine est en fonctionnement par rapport à une turbine garée.

III.7.2 Saut de fréquence de vitesse variable :

Les turbines à vitesse variable sont équipées de commandes complètes pour maintenir le système courir à une vitesse optimale pour la vitesse du vent particulière, une telle variabilité de la vitesse de rotation réduit les intervalles de fréquences de sécurité pour la structure et de plus, le contrôleur peut être utilisé pour créer de nouveaux intervalles, même si la fréquence naturelle se situe dans la gamme des fréquences de rotation, le contrôleur peut être programmé pour ignorer la région autour de la fréquence propre. Cela empêchera le rotor d'exciter la fréquence de la tour, le réglage de contrôleur est mieux fait après l'installation et les mesures de la première réelle naturelle la fréquence. C'est parce que les incertitudes sur les conditions de sol de la fondation et sur les travaux d'installation peuvent faire en sorte que la fréquence réelle s'écarte sensiblement de la conception [31].

Ce saut de fréquence a été appliqué avec succès au parc éolien d'Utgrunden à Suède [21].

III.8 Conclusion

Les modèles et les calculs utilisés dans ce chapitre introduisent les principes de l'analyse, mais ils sont certainement insuffisants pour décrire toute la complexité de l'éolienne des systèmes offshore. De plus, lorsque la longueur de la lame augmente, les fréquences propres des lames eux-mêmes réduisent et peuvent être excités ; donc ceux-ci produisent une autre ligne dans le spectre à surveiller. Compréhension de base des différentes caractéristiques dynamiques d'un système offshore éolien permet un balayage rapide de l'ensemble du système, cela devrait identifier le problème domaines qui peuvent ensuite être étudiés et traités en détail.

Avec la popularité des turbines à vitesse variable, le terme «Doux-Doux» ne peut plus être utilisé maintenu : «doux-raide-doux-doux» serait probablement plus précis mais trop long pour être utilisation pratique.

Dans ce chapitre, on a traité trois exemples de turbines pour déterminés la fréquence naturelle.

Dans le chapitre qui suit, on parle sur le calcul de la fréquence naturelle par les éléments finis.

CHAPITRE

IV

Calcul par élément finis
la fréquence naturelle

Chapitre IV

Calcul par élément finis la fréquence naturelle

IV.1 Introduction

Dans certains cas, les solutions analytiques sont insuffisantes ou difficiles, comme par exemple la turbine avec un motif complexe, et donc la manière approfondie pour évaluer la fréquence naturelle de base fixe est les solutions numériques où nous utilisons la Méthode des éléments finis, avec des données d'entrée correctes (les données d'entrée doivent refléter la réalité physique) nous pouvons produire un modèle virtuel dans lequel les fréquences propres et des modes normaux de l'éolienne sont systématiquement fournis.

IV.2 Définition de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes et cette méthode revient à remplacer le système continu par un système discret. Le solide est alors divisé en un certain nombre de sous-domaines appelés éléments, dont l'assemblage permet la reconstitution de la géométrie initiale. Chacun des éléments est relié à ces voisins par des nœuds dont les degrés de liberté (DDL) constituent les inconnues du problème.

IV.3 Historique de la méthode

La méthode des éléments finis est le fruit de deux domaines de recherche : Les mathématiques et les sciences de l'ingénieur.

Mathématique : Outils qui remontent jusqu'aux résidus pondérés de Gauss (1775), Galerkin

(1915) et Biezenokoch (1923), ainsi qu'aux méthodes variationnelles de Rayleigh (1870) et Ritz (1909).

Sciences de l'ingénieur : Dont la contribution a débuté dans les années quarante avec Hrenikoff (1941), Henry (1943) et Newmark (1949) qui touchèrent pour la première fois aux structures continues, en faisant une approximation sur des portions de petites dimensions dans un problème continu d'une barre longue. D'où l'idée de base des éléments finis.

Argyris (1955), Turner (1956), Glough (1956) et Martin (1956) ont fait une analogie directe en adoptant un comportement simplifié pour des petites portions : ils représentent un milieu continu élastique à deux dimensions par un assemblage de panneaux triangulaires, sur lesquels les déplacements sont supposés variés linéairement comme pour chaque barre ou poutre du système discret : chaque panneau est décrit par une matrice de rigidité et l'assemblage donnait la rigidité globale du milieu continu. D'où la naissance d'éléments finis avec "panneaux" comme nom. Argyris et Kelsy (1960) utilisent la notion d'énergie dans l'analyse des structures et font appel à des méthodes mathématiques (résidus pondérés, principes variationnels ...).

Le terme " élément fini " est utilisé pour la première fois par Glough (1960), et dès lors, il y a un développement rapide de la méthode.

Dans les années soixante ; Zienkiwicz (1965), De Arante (1968), Oliviera (1968), Green (1969), Tones (1969), Lay (1969), Storne (1969), et Finlayson (1975) ont reformulé la méthode à partir de considérations énergétiques et variationnelles sous forme générale de résidus pondérés, d'où le modèle mathématique de la MEF. En 1969 la MEF est reconnue comme un outil général de résolution d'EDP, et utilisée pour résoudre des problèmes non linéaires et non stationnaires dans plusieurs domaines.

En mécanique des fluides, la résolution des équations de Navier Stokes incompressibles par éléments finis en utilisant la formulation vitesse – pression a commencé dans les années 1970.

IV.4 Hypothèses d'application de la méthode des éléments finis

Les hypothèses principales sont les suivantes :

- Le milieu est continu.
- La loi de comportement choisie est implicitement la bonne.
- Les essais en laboratoire donnent une image représentative du comportement réel des matériaux dans l'ouvrage et alentour.

- La détermination des paramètres est satisfaisante.
- Les états initiaux mécanique et hydraulique sont bien connus.

IV.5 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

Avantages :

- Elles permettent de modéliser l'hétérogénéité de comportement des matériaux.
- Elles prennent en compte la géométrie exacte des ouvrages et de leur environnement.
- Elle considèrent une interaction entre terrain et structure.
- Elle autorisent l'analyse d'une méthode de de construction dans toutes ses phases.

Inconvénients :

- la difficulté de la détermination exacte des paramètres à introduire dans le modèle.
- Le temps de calcul croissant avec la taille du maillage et la complexité de la loi considérée

IV.6 Les éléments proposés par le code DNV

Plusieurs éléments ont été suggérés par le code DNV [15] pour les éoliennes offshore où ils résumées dans le tableau (IV.1)

TABLEAU IV.1 – Les éléments proposés par DNV pour analyser les éoliennes.

Type d'élément	La description
BEAM2D	Élément poutre, 2 noeuds par élément, 3 DDL par noeud, u_x , u_y et θ_z
PLANE2D	Élément à membrane, 4 noeuds par élément, 2 DDL par noeud, u_x et u_y
TRIANG	Élément à membrane, 3 noeuds par élément, 2 DDL par noeud, u_x et u_y
SHELL3	Élément de coque, 3 noeuds par élément, 6 DDL par noeud
SOLID	élément solide, 8 noeuds par élément, 3 DDL par noeud, u_x , u_y et u_z
TETRA4	élément solide, 4 noeuds par élément, 3 DDL par noeud, u_x , u_y et u_z
TETRA4R	élément solide, 8 noeuds par élément, 6 DDL par noeud

Les avantage de code DNV :

- Un coût bon de calcul.
- Une bonne performance dans l'estimation de la fréquence naturelle de base fixe.
- Une capacité d'analyser l'éolienne avec une forme complexe.

- Une capacité d'analyser les éoliennes avec le système de base

IV.7 La procédure de calcul

les étapes d'application de la méthode des éléments finis et les outils nécessaires à sa mise en œuvre. La résolution d'un problème physique par éléments finis suit grosso modo les étapes suivantes (Figure IV.1) :

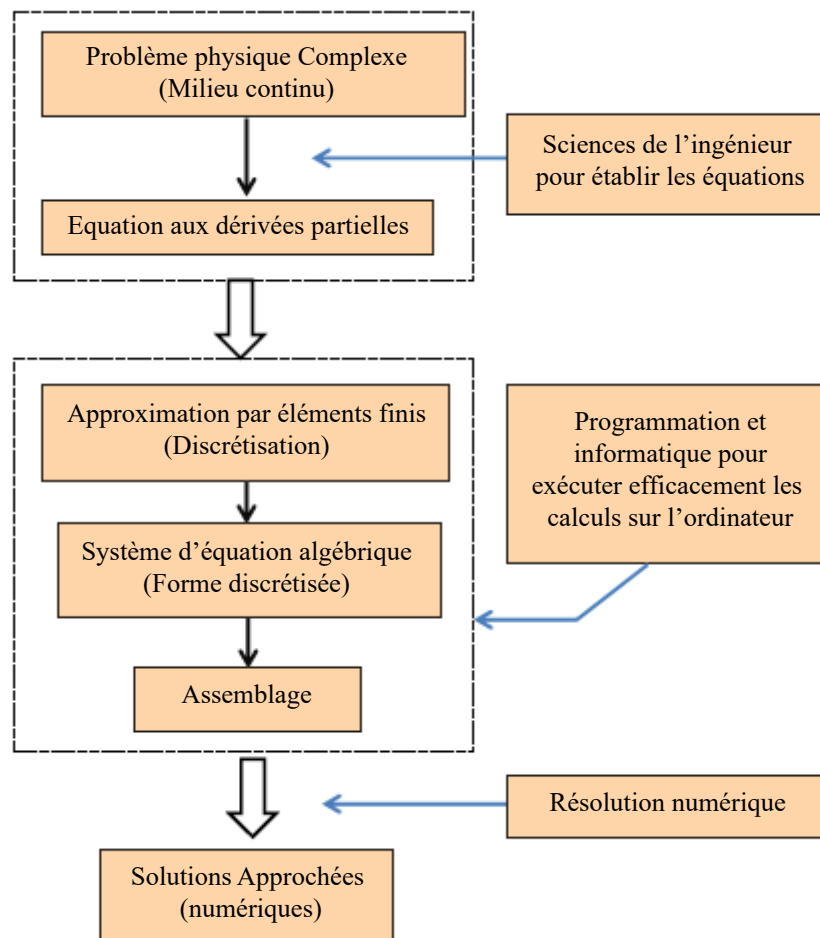


FIGURE IV.1 – Étapes générales de la méthode des éléments finis.

Le processus d'estimation de la fréquence naturelle de base fixe peut se résumer ainsi :

1. Discrétisation de l'éoliennes en sous domaines « éléments ».
2. Établir la matrice de rigidité $[K]$ et la matrice de masse $[M]$ pour chaque élément.
3. Assembler les matrices en un système global.
4. Prise en compte des conditions aux limites.

5. Obtenez la solution de ce système :

$$\det([K] - w^2[M]) = 0$$

Une deuxième procédure c'est la suivante :

1. Discrétisation de l'éoliennes en sous domaines « éléments ».
2. Calculer la matrice de rigidité $[K]$ et le vecteur de charge pour chaque élément.
3. Assembler les matrices et les vecteurs en un système global.
4. Prise en compte des conditions aux limites.
5. Résoudre le système :

$$[K]\{U\} = \{F\}$$

IV.7.1 Discrétisation

Cette opération consiste à décomposer le domaine continu en un nombre fini de sous domaines qui porte le nom **éléments finis**. Les points d'intersection entre les lignes qui sépare les éléments sont appelés **nœuds**. Une caractéristique de base de la méthode des éléments finis est que ces éléments sont analysés et traités séparément un par un. Chaque élément est assigné son propriétés physique ou constitutive, et sa propriété ou l'équation de rigidité sont formulées. Par la suite, les éléments sont assemblés pour obtenir l'équation pour l'ensemble de la structure.

Dans notre cas, On considère l'éolienne comme une poutre de masse supérieure et On discrétise la poutre en élément poutre à deux nœuds.

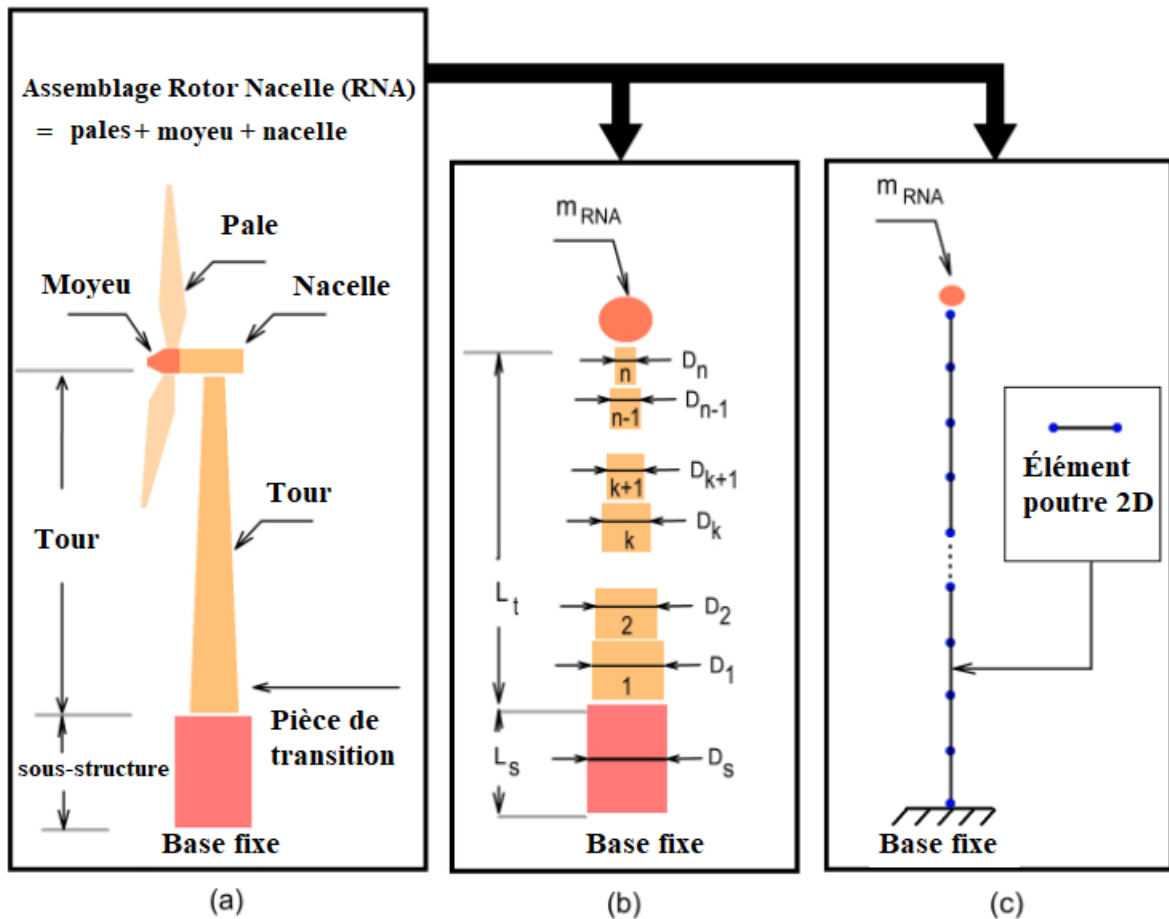


FIGURE IV.2 – Le modèle de poutre (a) : Composants principaux (b) : Modèle De Hanani M. N et Karam (c) : maille d'éolienne.

IV.7.1.1 Les éléments poutre à deux nœuds

Pour la discrétisation de cette équation on considère un élément à deux nœuds : un nœud à chaque extrémité de la poutre. La présence de dérivées d'ordre deux impose l'utilisation de polynômes quadratiques ou plus. En outre, on voit que l'expression des conditions aux limites fait intervenir la rotation aux extrémité, il est donc plus intéressant de prendre deux degrés de liberté par nœuds dans le but d'assurer en même temps la continuité des déplacements et de leurs dérivées qui sont les rotations. Le nombre de degrés de liberté atteint ainsi quatre et le polynôme d'interpolation doit être cubique (quatre constantes).

Le vecteur des déplacements et rotations élémentaires s'écrit donc comme suit :

$$U = \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

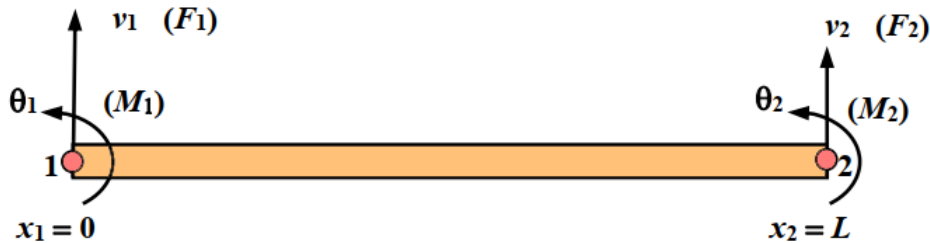


FIGURE IV.3 – Élément poutre à deux nœuds.

Les déplacements et les rotations le long de la poutres sont approximés par :

$$v(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (\text{IV.2a})$$

$$\theta(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \quad (\text{IV.2b})$$

L'évaluation de ces polynômes aux nœuds donne :

$$v(0) = a_0 = v_1 ; \quad \theta(0) = a_1 = \theta_1 \quad (\text{IV.3a})$$

$$v(L) = v_2 = v_1 + \theta_1L + a_2L^2 + a_3L^3 ; \quad \theta(L) = \theta_2 = \theta_1 + 2a_2L + 3a_3L^2 \quad (\text{IV.3b})$$

La résolution de (IV.3b) pour a_2 et a_3 donne :

$$a_2 = \frac{3}{L^2}(v_2 - v_1) - \frac{1}{L}(2\theta_1 - \theta_2) ; \quad a_3 = \frac{2}{L^3}(v_1 - v_2) - \frac{1}{L^2}(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{IV.4})$$

En remplace ces paramètres dans l'équation (IV.2) et après arrangement des termes on écrit l'interpolation nodale des déplacements sous la forme :

$$v(x) = N_1(x)v_1 + N_2(x)\theta_1 + N_3(x)v_2 + N_4(x)\theta_2 \quad (\text{IV.5})$$

Les fonctions de forme N_i sont appelées polynômes d'Hermite, leurs expressions sont :

$$\begin{aligned}
 N_1(x) &= 1 - \frac{3x^2}{L^2} + \frac{2x^3}{L^3} ; & N_2(x) &= x - \frac{2x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \\
 N_3(x) &= \frac{3x^2}{L^2} - \frac{2x^3}{L^3} ; & N_4(x) &= \frac{x^3}{L^2} - \frac{x^2}{L}
 \end{aligned}
 \tag{IV.6}$$

La figure ci-dessous montre les courbes des fonctions de forme et de leurs dérivées pour un élément poutre de longueur unitaire ($L = 1$) :

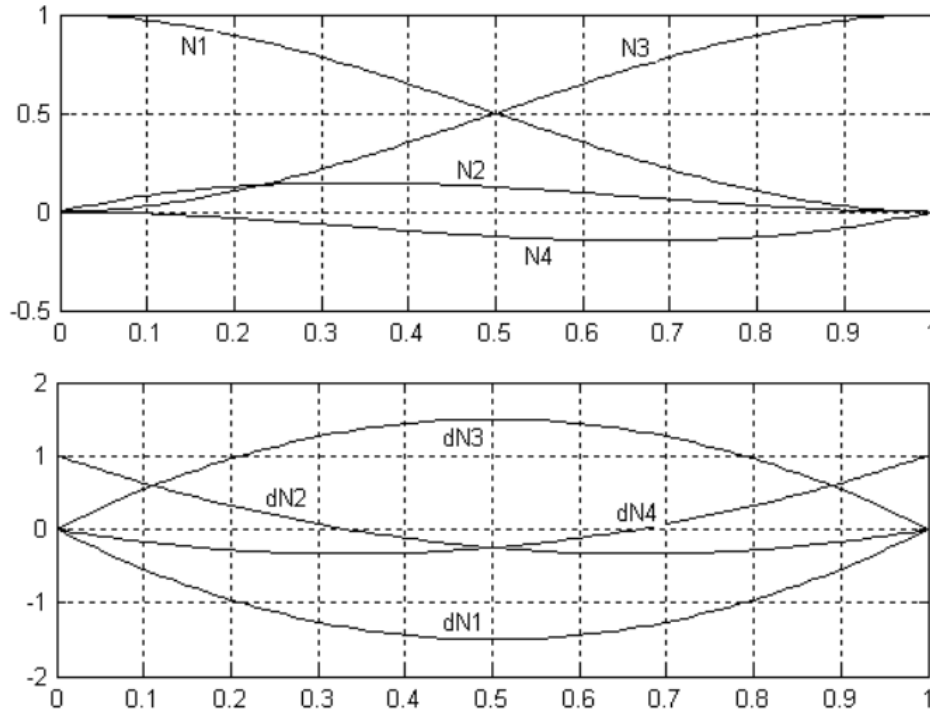


FIGURE IV.4 – Fonctions de forme d'un élément poutres et leurs dérivées.

IV.7.2 Matrice de rigidité et de masse élémentaire

- La matrice de rigidité élémentaire est exprimée comme suit[2] :

$$[K]_e = \int [B]^T [D] [B] dv
 \tag{IV.7}$$

Où B est la matrice de forme :

$$[B] = [\partial] [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4]
 \tag{IV.8}$$

Avec :

$$[\partial] = -y \left[\frac{d^2}{dx^2} \right] \text{ Tenseur de Green ou Matrice des dérivés.}
 \tag{IV.9}$$

$[N]$ Matrice des fonctions de formes.

$[D]$ Matrice d'élasticité de la poutre.

En remplace l'équation (IV.9) dans l'équation (IV.8) :

$$[B] = -y \begin{bmatrix} \frac{d^2 N_1}{dx^2} & \frac{d^2 N_2}{dx^2} & \frac{d^2 N_3}{dx^2} & \frac{d^2 N_4}{dx^2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

En remplace l'équation (IV.6) dans l'équation (IV.10) :

$$[B] = -y \begin{bmatrix} \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} & \frac{6x}{L^2} - \frac{4}{L} & -\frac{12x}{L^3} + \frac{6}{L^2} & \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

On a $[D] = [E]$ On le remplace dans l'équation (IV.7) On obtient :

$$[K]_e = \int [B]^T [E] [B] ds dx \quad (\text{IV.12})$$

On remplace l'équation (IV.10) :

$$[K]_e = \int y^2 \begin{bmatrix} \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} \\ \frac{6x}{L^2} - \frac{4}{L} \\ -\frac{12x}{L^3} + \frac{6}{L^2} \\ \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \end{bmatrix} \cdot E \begin{bmatrix} \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} & \frac{6x}{L^2} - \frac{4}{L} & -\frac{12x}{L^3} + \frac{6}{L^2} & \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \end{bmatrix} ds dx \quad (\text{IV.13})$$

On a $I = \int_s y^2 \cdot ds$ on obtient :

$$[K]_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.14})$$

• La matrice de masse élémentaire est exprimée comme suit :

$$[M]_e = \int \rho A [N]^T [N] dx \quad (\text{IV.15})$$

Où ρ est la masse volumique et $[N]$ est la matrice des fonctions de formes.

en remplace l'équation(IV.6) dans l'équation(IV.15), On obtient :

$$[M]_e = \rho A \int \begin{bmatrix} \frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} \\ \frac{6x}{L^2} - \frac{4}{L} \\ -\frac{12x}{L^3} + \frac{6}{L^2} \\ \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{12x}{L^3} - \frac{6}{L^2} \quad \frac{6x}{L^2} - \frac{4}{L} \quad -\frac{12x}{L^3} + \frac{6}{L^2} \quad \frac{6x}{L^2} - \frac{2}{L} \right] dx \quad (\text{IV.16})$$

$$\Rightarrow [M]_e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.17})$$

On peut associer la moitié de la masse totale de l'élément aux degrés de translation de chaque nœud. On prends uniquement les translations parce que les rotations ne produisent pas de forces d'inertie. La matrice masse concentrée s'écrit donc comme suit :

$$[M]_e = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

On a $\rho AL = m$ donc :

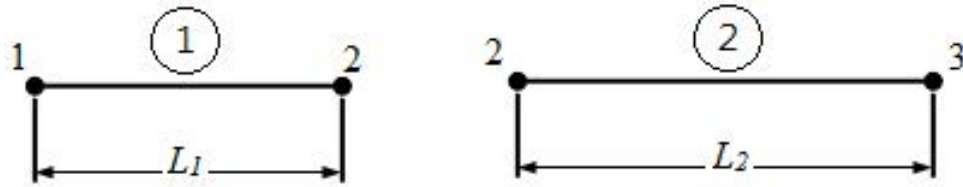
$$[M]_e = m \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.19})$$

IV.7.3 Assemblage et résolution de système global

Après le calcul de la matrice de rigidité élémentaire aux niveaux de chaque élément, il reste néanmoins à positionner chacun d'entre eux dans une matrice de rigidité globale $[K_G]$, l'assemblage s'effectuera en positionnant chacune des matrices de rigidité élémentaire $[K]_e$ en fonction des degrés de liberté des nœuds de l'élément considéré.

Pour illustré ce principe considérons l'exemple suivant où nous proposons d'assembler deux éléments poutres.

Remarquons que ces deux éléments ont le nœud 2 en commun. Soient $[K]_1$ et $[K]_2$ les matrices de rigidité des éléments 1 et 2.

FIGURE IV.5 – Deux éléments de poutre 1 et 2 avec L_1 et L_2 .

Élément 1 :

$$[K]_1 = \frac{EI}{L_1^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_1 & -12 & 6L_1 \\ 6L_1 & 4L_1^2 & -6L_1 & 2L_1^2 \\ -12 & -6L_1 & 12 & -6L_1 \\ 6L_1 & 2L_1^2 & -6L_1 & 4L_1^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.20})$$

Élément 2 :

$$[K]_2 = \frac{EI}{L_2^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_2 & -12 & 6L_2 \\ 6L_2 & 4L_2^2 & -6L_2 & 2L_2^2 \\ -12 & -6L_2 & 12 & -6L_2 \\ 6L_2 & 2L_2^2 & -6L_2 & 4L_2^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

Ainsi la matrice de rigidité globales sera :

$$[K_G] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L_1^3} & \frac{6EI}{L_1^2} & \frac{-12EI}{L_1^3} & \frac{6EI}{L_1^2} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{L_1^2} & \frac{4EI}{L_1} & \frac{-6EI}{L_1^2} & \frac{2EI}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{-12EI}{L_1^3} & \frac{-6EI}{L_1^2} & \frac{12EI}{L_1^3} + \frac{12EI}{L_2^3} & \frac{-6EI}{L_1^2} + \frac{6EI}{L_2^2} & \frac{2EI}{L_2} & \frac{6EI}{L_2^2} \\ \frac{6EI}{L_1^2} & \frac{2EI}{L_2} & \frac{-6EI}{L_1^2} + \frac{6EI}{L_2^2} & \frac{4EI}{L_1} + \frac{4EI}{L_2} & \frac{-6EI}{L_2^2} & \frac{2EI}{L_2} \\ 0 & 0 & \frac{-12EI}{L_2^3} & \frac{-6EI}{L_2^2} & \frac{12EI}{L_2^3} & \frac{-6EI}{L_2^2} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{L_2^2} & \frac{2EI}{L_2} & \frac{-6EI}{L_2^2} & \frac{4EI}{L_2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

On remarque que la matrice de rigidité de deux éléments est une matrice symétrique carrée d'ordre six par six (6x6). Cet ordre est dû au fait que l'élément assemblé possède trois nœuds donc six degrés de liberté car chaque nœud à deux degrés de liberté. Pour un assemblage de trois, quatre éléments ou plus d'élément, on procède de la même façon.

De la même manière qu'avec les matrices de rigidité, on construit la matrice de masse globale par assemblage des matrices de masse élémentaires.

IV.7.4 Les conditions aux limites

les conditions aux limites exigent que les conditions d'équilibre et de compatibilité en chacune des limites de la structure soient satisfaites.

Exemple : Les déplacement d'une extrémité encastrée doivent être nuls.

IV.7.5 Résoudre le système

IV.7.5.1 Matrice de rigidité dynamique

Les fréquences naturelles et les formes de mode non atténuées du système sont obtenues à partir du modèle en résolvant le problème propre montré dans l'équation (IV.23) (Tedesco et al., 1999).

$$[[BiGK] - \lambda[I]] \{A\} = 0 \quad (IV.23)$$

Où :

$[I]$ est la matrice d'identité.

$[[BiGK] - \lambda[I]]$ est une matrice carrée d'ordre n est appelée la matrice caractéristique de $[BiGK]$.

λ est la valeur propre (eigenvalue).

$\{A\}$ est le vecteur propre (eigenvector) associé.

$[BiGK]$ est la matrice de système formée dans l'équation (IV.24) :

$$[BiGK] = [M]^{-1}[K] \quad (IV.24)$$

Où $[M]$ et $[K]$ sont les matrices globales de masse et de rigidité pour le modèle structure respectivement.

les valeurs et les vecteurs propres de $[BiGK]$ peuvent être obtenus en tant que racines de l'équation caractéristique, obtenue par expansion de l'équation (IV.25) :

$$[[BiGK] - \lambda[I]] = 0 \quad (IV.25)$$

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre On a discrétisé de l'éolienne en sous domaines « éléments », ensuite on a établi la matrice de rigidité élémentaire $[K]_e$ et la matrice de masse élémentaire $[M]_e$ pour

chaque élément et à partir de ces matrices nous avons fait l'assemblage des matrices en un système global avec la prise en compte des conditions aux limites et enfin on a terminé pour obtenir la solution de ce système.

Dans le chapitre qui suit, On va présenter notre modèle de calcul avec quelques exemples de calcul.

CHAPITRE

V

Présentation du programme
avec des exemples de calcul

Chapitre V

Présentation du programme avec des exemples de calcul

V.1 Présentation du programme de calcul

Pour estimer la fréquence naturelle de base fixe des éoliennes et dans le but d'approfondir nos connaissances sur la méthode des éléments finis. On va élaborer un programme numérique sous Visual Studio 2019 nommé **TURbeam** qui calcule la fréquence naturelle d'une turbine à vent (analytique et numérique) basée sur les éléments poutres, le modèle étudié sera considéré comme une poutre de masse supérieure.

V.2 Architecture du programme

Le programme sera composé de deux sous-couches à savoir :

1. **Interface** : Elle gère les différentes boîtes de dialogue qui servent à introduire les données, ainsi que l'interface graphique qui permet l'affichage des résultats.
2. **Moteur de calcul** : Il gère le calcul de la fréquence naturelle analytique et numérique au niveau de chaque nœud.

La bibliothèque SFE01 est composée de plusieurs Subroutines à savoir :

- **conditionlimite** : Applique les conditions limites.
- **triangularisation** : Résout le système global.
- **solution** : Calcule les déplacements.

V.2.1 Interface

V.2.1.1 Fenêtre principale du programme

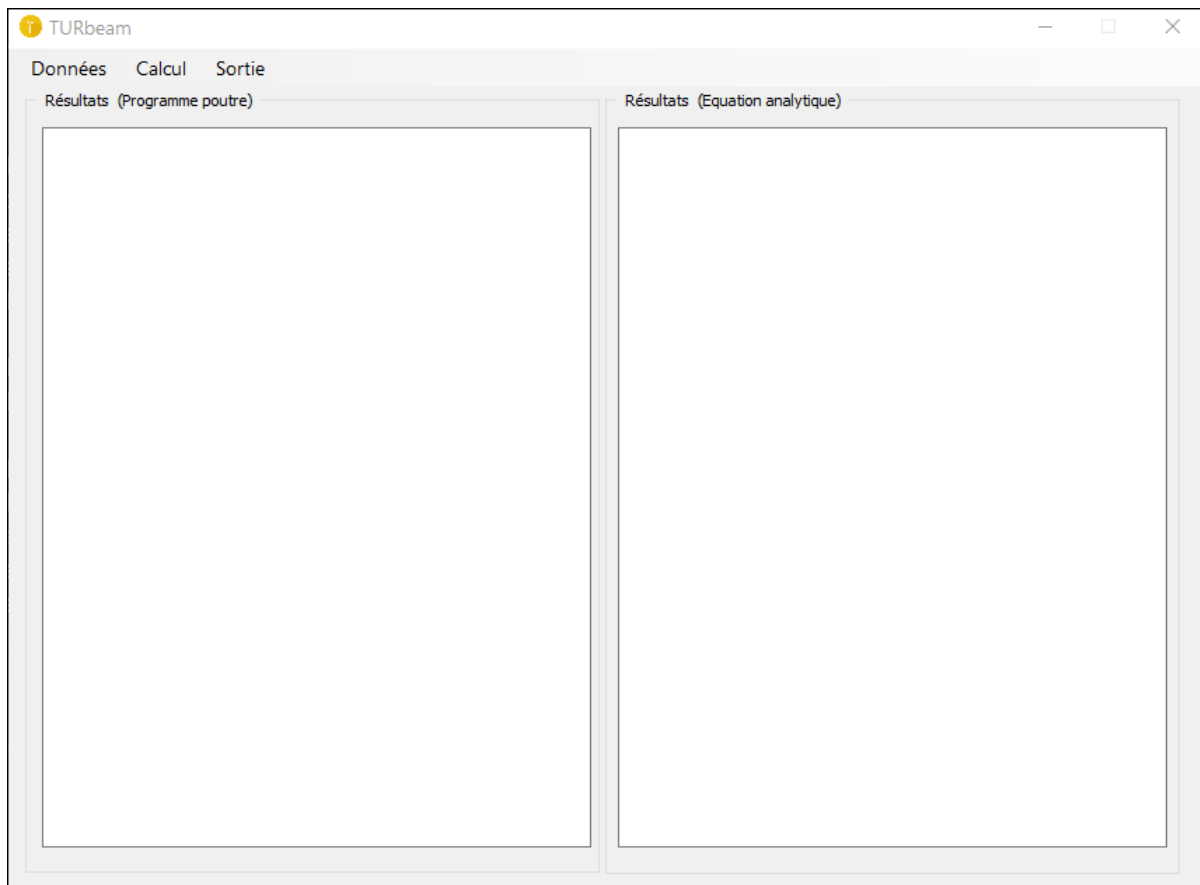


FIGURE V.1 – Fenêtre principale du programme.

Dans la fenêtre principale du programme on retrouve :

- La barre de menu du programme.
- Deux zones d’affichage pour afficher les résultats.

V.2.1.2 Barre de menu de programme

Dans la barre de menu on trouve trois sous menu :

1. Données.
2. Calcul.
3. Sortie.

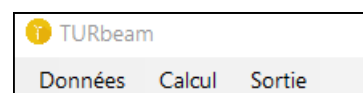


FIGURE V.2 – Barre de menu du programme.

1/ Dans le sous menu **Données** on trouve :

- Données Générales : Affiche la boîte de dialogue(Figure V.2.1.2) pour saisir les données.

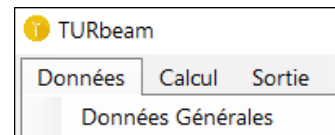


FIGURE V.3 – Sous menu Données.

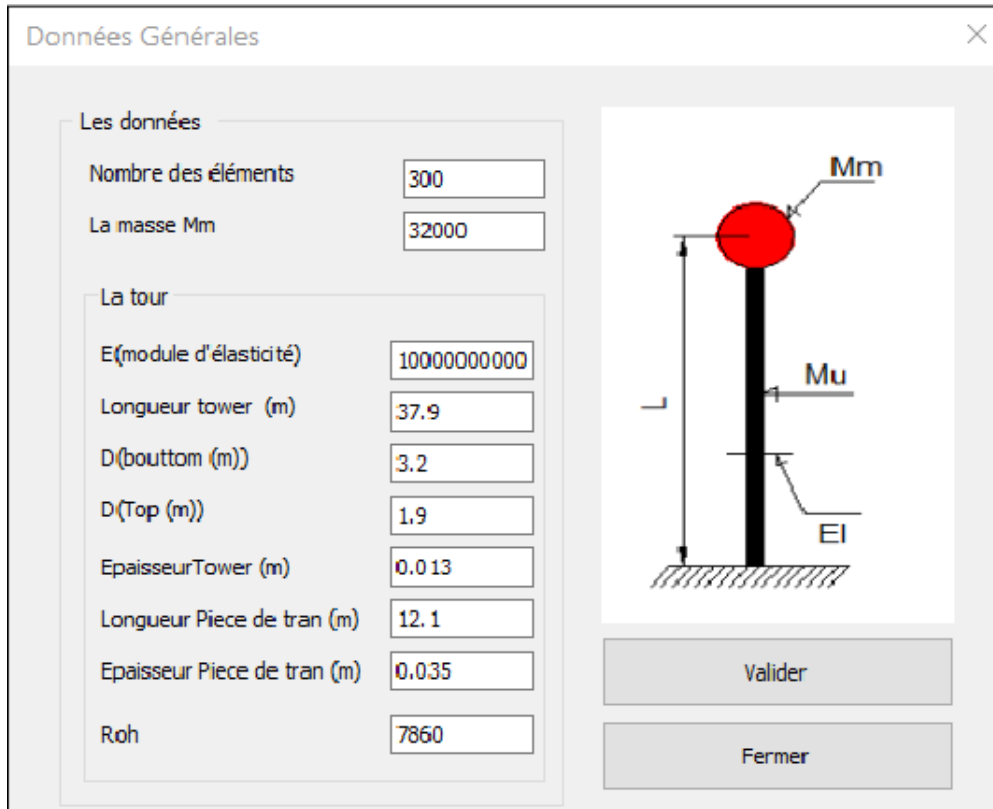


FIGURE V.4 – Boîte de dialogue des données générale.

2/ Dans le sous menu **Calcul** on trouve :

- Calcul : Elle sert a effectué le calcul de la fréquence naturelle(Par la méthode numérique ou par la méthode analytique).

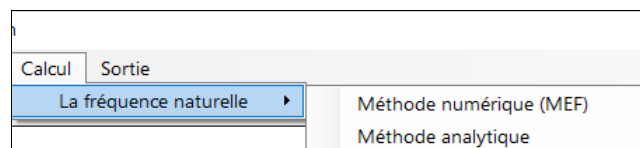


FIGURE V.5 – Sous menu Calcul.

3/ Dans le sous menu **Sortie** on trouve :

- Sortie : Elle sert a exporter les résultats sous forme d'un fichier texte.



FIGURE V.6 – Sous menu Sortie.

V.3 Exemples de calcul

Pour prouver la performance de notre code informatique TURbeam, six (6) éoliennes offshore ont été choisies parmi les six (6) des sites de parcs éoliens où la fréquence naturelle de base fixe de chaque turbine sera calculé par TURbeam. Ces éoliennes ont été choisies pour la pleine disponibilité de leurs données. Nom du parc éolien et de l'emplacement avec une source de données sont présentées dans le tableau (V.1). Les paramètres d'entrée de chaque éolienne sont résumées dans le tableau (V.2)

TABLEAU V.1 – Liste du nom et de l'emplacement de la ferme éolienne.

N	nom et l'emplacement de la ferme éolienne	La source de données
I	la ferme éolienne Lely Offshore (Pays-Bas)	Arany et al.[14],Zaaijer.[32][7]
II	la ferme éolienne en mer Irene Vorrink (Pays-Bas)	Arany et al.[14],Zaaijer.[32][7]
III	la ferme éolienne offshore Kentish Flats (Royaume-Uni)	Arany et al.[14], Damgaard et al.[7]
IV	la ferme éolienne Offshore Barrow (Royaume-Uni)	Arany et al.[14], Damgaard et al.[7]
V	la ferme éolienne offshore Belwind 1 (Belgique)	Arany et al.[14], Damgaard et al.[7]
VI	la ferme éolienne offshore Thanet (Royaume-Uni)	Arany et al.[14], Damgaard et al.[7]

TABLEAU V.2 – Les paramètres d'entrée pour les éoliennes choisies pour cette application.

dimensions des composants	Symbole (unité)	I	II	III	IV	V	VI
Hauteur de la tour	$L_T(m)$	37.9	44.5	60.06	58	53	54.1
Hauteur de la sous-structure	$L_s(m)$	12.1	5.2	16	33	37	41.1
Hauteur de la structure	$L(m)$	50	49.7	76.06	91	90	95.2
Diamètre supérieur de la tour	$D_t(m)$	1.9	1.7	2.3	2.3	2.3	2.3
Diamètre inférieur de la tour	$D_b(m)$	3.2	3.5	4.45	4.45	4.3	4.3
Épaisseur de la Tour	$t_T(mm)$	13	13	22	32	28	36
Diamètre de la sous-structure	$D_s(m)$	3.2	3.5	4.45	4.45	4.3	4.3
Épaisseur de la sous-structure	$t_s(mm)$	35	28	45	45	50	65
Module de Young de la tour	$E_T(gpa)$	210	210	210	210	210	210
Masse de la tour/sous-structure	$M_T(ton)$	63.5	49.5	187.7	314.7	314	436.3
Masse supérieure	$M_{RNA}(ton)$	32	35.5	130.8	130.8	130.8	130.8

TABLEAU V.3 – Les résultats de la fréquence naturelle d'un éolienne à basse fixe.

La méthode	Symbole (unité)	I	II	III	IV	V	VI
Analytique équation(III.1)	$f_{FB}(Hz)$	0.740	0.703	0.390	0.327	0.325	0.320
Analytique équation(III.2)	$f_{FB}(Hz)$	0.731	0.695	0.385	0.323	0.321	0.316
Élément finis (Poutre 2D)	$f_{FB}(Hz)$	0.802	0.711	0.414	0.375	0.382	0.388

L'élément de poutre et la méthode analytique qui sont utilisés dans cette démonstration où les résultats de chaque élément sont présentés dans le tableau (V.3). Les résultats de TURbeam montre que l'écart trouvé entre les résultats de la méthode des éléments finis (l'élément de poutre à deux nœuds) et les résultats de la méthode analytique est minime et les résultats sont proche les uns des autres, et par conséquent on peut dire que la méthode numérique (EF) donne des résultats plus précise et une bonne performance dans l'estimation de la fréquence naturelle d'une turbine à vent de base fixe.

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté notre programme informatique TURbeam qui calcul la fréquence naturelle d'une turbine a vent avec deux méthode de calcul qui sont la méthode analytique qui utilise deux équations différentes et la méthode des éléments finis qui utilise l'élément poutre.

D'après les résultats de programme TURbeam, on conclu que les résultats de la méthode numérique sont les plus précise que ceux de la méthode analytique.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La meilleure façon d'estimer la fréquence naturelle de base fixe de l'éolienne est basée sur les solutions numériques où nous avons utilisé MEF, en fait, ce jugement en se fondant sur le fait que les solutions analytiques ne peuvent être pas suffisantes pour un cas complexe de la turbine éolienne, qui est l'état de la plupart des éoliennes construites de nos jours et par conséquent l'analyse MEF devient de plus en plus nécessaire.

Les éléments suggérés par le code DNV sont très efficaces pour analyser l'éolienne de base fixe, en fait, l'élément de poutre 2D proposé par le code DNV est utilisé dans ce travail montré une grande performance pour estimer la fréquence naturelle d'éoliennes de base fixe, l'étude de validation montre que l'erreur d'intervalle de cet élément est inférieure à 3% et aussi nous pouvons dire que l'avantage majeur de cet élément est le faible coût de calcul, où le modèle sera notamment un petit nombre de nœuds et d'éléments et ainsi que le temps de solution très court.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A.Belaïde et B.Sahraoui, '*Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception*', Université Biskra, 2010.
- [2] Alaa.CHATEAUNEUF, '*Comprendre les éléments finis Principes, formulation et exercices corrigés*', ellipses, nouvelle édition.
- [3] A.Litim et Z.Abid, '*Application de la logique Floue pour la Poursuite du Point de puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque*', Mémoire de Master, Université de Saïda, 2017.
- [4] A. Mirecki, '*Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*', Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [5] Belvins.RD, '*Formulas for Frequencies and Mode shapes*', Malabar, Florida, USA, 2001.
- [6] Betz.A, '*Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust Gottinger Nachr*', Allemagne, 1919.
- [7] Damgaard.M, Ibsen.LB, Andersen.LV et Andersen.JKF, '*Cross-wind modal properties of offshore wind turbines identified by full scale testing.*', J Wind Eng Ind Aerodyn, 2013, 116 :94–108.
- [8] DNV. Offshore standard DNV-OS-J101, '*design of offshore wind turbine structures.*', Høvik, Norway, 2014.
- [9] D-P. Molenaar and Sj. Dijkstra, '*Modelling the structural dynamics of flexible wind turbines. In Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition*', Centre de convention Acropolis, Nice, France, 1 au 5 mars 1999.
- [10] Ferguson.M.C. (ed.) et al, '*Opti-OW ECS Final Report Vol.4 : A typical Design Solution for an Offshore Wind Energy Conversion System*', Université de technologie de Delft, Institut pour l'énergie de l'énergie, 1998.

-
- [11] F.Poitiers, *“Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau”*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [12] F.Zerrouki et A.Gana, *“Etude et analyse de la pertinence de l'implantation des éoliennes dans la région de tiziOuzou”*, université de TiziOuzou, 2010.
- [13] Kuik. G.A .M, *“van A re Wind Turbines Growing too Fast? In Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition”*, Copenhague, Danemark, du 2 au 6 juillet 2001.
- [14] L.Arany, S.Bhattacharya, J.H.G.Macdonald et S.J.Hogan, *“Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI.”*, Dynamique des sols et génie parasismique ,2016, 83 : 18-32.
- [15] L.Arany, S.Bhattacharya, S.Adhikari, S.J.Hogan J.H.G.Macdonald *“An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models.”*, Dynamique des sols et génie parasismique, 2015, 74 : 40-45.
- [16] L.Khelfat et L.Maataoui, *“Étude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée”*,Mémoire de Master, Université de Annaba, 2017.
- [17] M. BOUDIA Sidi Mohammed, *“Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie”*, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2013.
- [18] M.Bouaraki, *“Étude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF”*, Mémoire de Magister, Université Boumerdes, 2012.
- [19] M.Debbache, *“De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites”*, Mémoire de Master, université de Biskra, 2012.
- [20] Minh Huynh Quang, *“Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isol”*, Thèse Doctorat, Université de Reims.
- [21] M.Kühn, *“Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy Conversion Systems”*, Doctorat. Thèse de maîtrise, Université de technologie de Delft, Institut de l'énergie de l'énergie, mai 2001.
- [22] M.Massaoud, *“contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents”*, Mémoire de Magister, Université Batna, 2008.
-

-
- [23] M.Rebbah, '*Énergie renouvelable*', guide.2015.
- [24] M.Sadi, Z.Hamlat, '*L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV*', Mémoire de Master, Université de saïda, 2014.
- [25] O.Djaafri, A.E.Harizi, '*Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne*', Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2016/2017.
- [26] O.Tounsi et Z.Laskri, '*Étude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation*', Mémoire de Master, Université de Annaba, 2018.
- [27] PROGRAMME DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE. Mars 2011 réalisation SATINFO.
- [28] S.M.Boudia, '*Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie*', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2013.
- [29] Tempel.J, '*van der Lifetime Fatigue of an Offshore wind Turbine Support Structure*', Université de technologie de Delft, faculté de génie civil et des sciences de la nature, section Offshore Technology et section World Energy, mai 2000.
- [30] Vugts, J.H, '*Considerations on the dynamics of support structures for an OW EC Delft University of Technology*', Faculté de génie civil et des sciences de la Terre, section Technologie offshore, 2000.
- [31] Zaaier.M.B, '*Sensitivity A nalysis for Foundations of Offshore Wind Turbines*', Université de technologie de Delft, faculté de génie civil et des sciences de la nature, section W en énergie, tâche 4.1 du projet OW TES, 2002.
- [32] Zaaier.MB, '*Design methods for offshore wind turbines at exposed sites (OWTES)—sensitivity analysis for foundations of offshore wind turbines*',Delft, Pays-Bas, 2002.
- [33] Zaaier.MB, '*Foundation models for the dynamic response of offshore wind turbines*', 2002.

Annexes

Annexes

Module1.vb :

Module Module1

Déclaration des variable :

Structure Turbine

Dim Eturb As Double

Dim RhoTurb As Double

End Structure

Public Turb As Turbine

Public Ke1(4, 4) As Double

Public M_e1(4, 4) As Double

Public F1() As Double

Public u1() As Double

Public K1(,) As Double

Public M1(,) As Double

Public noeud1(,) As Double

Public EI1 As Double

Dim D1 As Double

Public Db1 As Double

Public Dt1 As Double

Public Th1 As Double

Public Thp1 As Double

Public L1 As Double

Public Lpice1 As Double

Public Le1 As Double

Public Ne1 As Integer

Public N1 As Integer

Public F11 As Double

Public W11 As Double

Public PI As Double = 3.14159265358979

Public PI1 As Double = Math.PI

Dim S1 As Double

Public mass1 As Double

Public mass As Double

Public VpieceTransi As Double

Public Vtower As Double

Public eigenvalue() As Double

Calcul de EI :

Public Function CalculEI(ByVal Lsrc As Double) As Double

If Lsrc <= Lpice1 Then

$D1 = Db1$

$CalculEI = (PI1 * D1^4)/64 - (PI1 * (D1 - 2 * Thp1)^4)/64$

$CalculEI = Turb.Eturb * CalculEI$

Exit Function

End If

$D1 = Db1 + (Dt1 - Db1) * ((Lsrc - Lpice1) - Le1/2)/L1$

$CalculEI = (PI1 * D1^4)/64 - (PI1 * (D1 - 2 * Th1)^4)/64$

$CalculEI = Turb.Eturb * CalculEI$

End Function

Calcul de la masse de la tour :

Public Function CalculMasse(ByVal Lsrc As Double) As Double

If Lsrc <= Lpice1 Then

$D1 = Db1$

$S1 = (PI1 * D1^2)/4 - (PI1 * (D1 - 2 * Thp1)^2)/4$

$CalculMasse = Turb.RhoTurb * S1 * Le1$

Exit Function

End If

$$D1 = Db1 + (Dt1 - Db1) * ((Lsrc - Lpice1) - Le1/2)/L1$$

$$S1 = (PI1 * D1^2)/4 - (PI1 * (D1 - 2 * Th1)^2)/4$$

$$\text{CalculMasse} = \text{Turb.RhoTurb} * S1 * Le1$$

End Function

Calcul de la masse totale :

Public Function CalculMasseTotale() As Double

Dim VolumeCone, VolumeCylindre, R1, R2 As Double

$$R2 = Db1/2$$

$$R1 = Dt1/2$$

$$\text{VolumeCylindre} = (PI1 * Lpice1/4) * (Db1^2 - (Db1 - 2 * Thp1)^2)$$

$$\text{VolumeCone} = (PI1 * L1/3) * (R1^2 + R2^2 + R1 * R2 - ((R1 - Th1)^2 + (R2 - Th1)^2 + (R1 - Th1) * (R2 - Th1)))$$

$$\text{VpieceTransi} = \text{VolumeCylindre}$$

$$\text{Vtower} = \text{VolumeCone}$$

$$\text{CalculMasseTotale} = \text{Turb.RhoTurb} * (\text{VolumeCylindre} + \text{VolumeCone})$$

End Function

Résoudre le système global :

Public Sub triangularisation()

Dim Triangular_A(N1, N1 + 1) As Double

Dim temporary_1 As Double

Dim multiplier_1 As Double

Dim line_1 As Long

For i = 1 To N1

For j = 1 To N1

$$\text{Triangular_A}(i, j) = \text{K1}(i, j)$$

Next

Next

For nn = 1 To N1

$$\text{Triangular_A}(nn, N1 + 1) = \text{F1}(nn)$$

Next nn

For Kg = 1 To N1 - 1

 If Triangular_A(Kg, Kg) = 0 Then

 For nn = Kg To N1

 If Triangular_A(nn, Kg) <> 0 Then line_1 = nn : Exit For

 Next nn

 For M11 = Kg To N1 + 1

 temporary_1 = Triangular_A(Kg, M11)

 Triangular_A(Kg, M11) = Triangular_A(line_1, M11)

 Triangular_A(line_1, M11) = temporary_1

 Next M11

End If

For nn = Kg + 1 To N1

 If Triangular_A(nn, Kg) <> 0 Then

 multiplier_1 = Triangular_A(nn, Kg) / Triangular_A(Kg, Kg)

 For M11 = Kg To N1 + 1

 Triangular_A(nn, M11) = Triangular_A(nn, M11) - Triangular_A(Kg, M11)

 * multiplier_1

 Next M11

End If

Next nn

Next Kg

For nn = 1 To N1

 For M11 = 1 To N1

 K1(M11, nn) = Triangular_A(M11, nn)

 Next

Next

For nn = 1 To N1

 F1(nn) = Triangular_A(nn, N1 + 1)

Next nn

End Sub

Calcul les déplacement :

```
Public Sub solution()
  Dim Sum As Single
  Dim i, j As Integer
  u1(N1) = F1(N1) / K1(N1, N1)
  For i = N1 - 1 To 1 Step -1
    Sum = 0
    For j = N1 To i + 1 Step -1 'or j=i+1 to n1      Sum = Sum + K1(i, j) * u1(j)
      Next j
    u1(i) = (F1(i) - Sum) / K1(i, j)
  Next i
End Sub
```

Application des conditions limite :

```
Public Sub conditionlimite(ByVal ligne As Integer)
  For i = ligne To N1 - 1
    For j = 1 To N1
      K1(i, j) = K1(i + 1, j)
      M1(i, j) = M1(i + 1, j)
    Next
  Next

  For i = ligne To N1 - 1
    For j = 1 To N1
      K1(j, i) = K1(j, i + 1)
      M1(j, i) = M1(j, i + 1)
    Next
  Next

  For i = ligne To N1 - 1
    u1(i) = u1(i + 1)
  Next
```

```

    For i = ligne To N1 - 1
        F1(i) = F1(i + 1)
    Next
    N1 = N1 - 1
End Sub

```

```

Public Function ln(a As Double) As Double
    ln = 2.30258509 * Math.Log10(a)
End Function
End Module

```

Form1.vb :

Importer la bibliothèque MathNet pour calculer les valeur propre :

```

Imports MathNet
Imports MathNet.Numerics.LinearAlgebra
Imports MathNet.Numerics.LinearAlgebra.Double
Imports MathNet.Numerics.LinearAlgebra.Complex

```

```

Public Class Form1

```

Pour afficher la boîte de dialogue de fermer :

```

    Private Sub Form1_FormClosing(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System
    .Windows.Forms.FormClosingEventArgs) Handles MyBase.FormClosing
        If (MessageBox.Show("Êtes-vous sûr de vouloir fermer le programme ?", "",
        MessageBoxButtons.YesNo) = Windows.Forms.DialogResult.No) Then
            e.Cancel = True
        End If
    End Sub

```

Pour ouvrir la boîte de dialogue données générales :

```

    Private Sub DonnéesGénéralesToolStripMenuItem_Click(sender As Object, e As
    EventArgs) Handles DonnéesGénéralesToolStripMenuItem.Click
        Form2.ShowDialog()
    End Sub

```

Calculer la fréquence naturelle par la méthode élément finis :

```
Private Sub NumériqueToolStripMenuItem_Click(sender As Object, e As EventArgs)
```

```
Handles NumériqueToolStripMenuItem.Click
```

```
Dim Ltot As Single
```

```
ReDim F1(2 * (Ne1 + 1))
```

```
ReDim u1(2 * (Ne1 + 1))
```

```
ReDim K1(2 * (Ne1 + 1), 2 * (Ne1 + 1))
```

```
ReDim M1(2 * (Ne1 + 1), 2 * (Ne1 + 1))
```

```
ReDim noeud1(2 * (Ne1 + 1), 2)
```

```
For i = 1 To Ne1
```

```
    noeud1(i, 1) = i
```

```
    noeud1(i, 2) = i + 1
```

```
Next
```

Longueur de chaque élément :

```
Le1 = (L1 + Lpice1) / Ne1
```

Nombre des inconnus :

```
N1 = (Ne1 + 1) * 2
```

Ke et l'assemblage :

```
For i = 1 To N1
```

```
    For j = 1 To N1
```

```
        K1(i, j) = 0
```

```
        M1(i, j) = 0
```

```
    Next
```

```
    F1(i) = 0
```

```
    u1(i) = 0
```

```
Next
```

```
Ltot = 0
```

```
For el = 1 To Ne1
```

```
    Ltot = Ltot + Le1
```

```
    EI1 = CalculEI(Ltot)
```

mass = CalculMasse(Ltot)

La matrice de rigidité élémentaire. :

$$Ke1(1, 1) = 12 * EI1 / Le1^3$$

$$Ke1(3, 3) = Ke1(1, 1)$$

$$Ke1(1, 2) = 6 * EI1 / Le1^2$$

$$Ke1(2, 1) = Ke1(1, 2)$$

$$Ke1(1, 4) = Ke1(1, 2)$$

$$Ke1(4, 1) = Ke1(1, 4)$$

$$Ke1(1, 3) = -Ke1(1, 1)$$

$$Ke1(3, 1) = Ke1(1, 3)$$

$$Ke1(3, 4) = -Ke1(1, 2)$$

$$Ke1(4, 3) = Ke1(3, 4)$$

$$Ke1(2, 3) = Ke1(3, 4)$$

$$Ke1(3, 2) = Ke1(2, 3)$$

$$Ke1(2, 2) = 4 * EI1 / Le1$$

$$Ke1(4, 4) = Ke1(2, 2)$$

$$Ke1(2, 4) = 2 * EI1 / Le1$$

$$Ke1(4, 2) = Ke1(2, 4)$$

La matrice de masse élémentaire. :

$$M_e1(1, 1) = mass / 2$$

$$M_e1(2, 2) = mass * Le1^2 / 78$$

$$M_e1(3, 3) = mass / 2$$

$$M_e1(4, 4) = mass * Le1^2 / 78$$

L'assemblage des matrices de rigidité et masse élémentaire. :

For ip = 1 To 4

For iq = 1 To 4

$$M1(ip + 2 * (el - 1), iq + 2 * (el - 1)) = M1(ip + 2 * (el - 1), iq + 2 * (el - 1)) + M_e1(ip, iq)$$

$$K1(ip + 2 * (el - 1), iq + 2 * (el - 1)) = K1(ip + 2 * (el - 1), iq + 2 * (el - 1)) + Ke1(ip, iq)$$

Next

```

Next
Next

M_e1(1, 1) = 0
M_e1(2, 2) = 0
M_e1(3, 3) = mass1
M_e1(4, 4) = 0
For ip = 1 To 4
  For iq = 1 To 4
    M1(ip + 2 * (Ne1 - 1), iq + 2 * (Ne1 - 1)) = M1(ip + 2 * (Ne1 - 1), iq + 2 *
      (Ne1 - 1)) + M_e1(ip, iq)
  Next
Next
Next

```

Vecteur de force :

```

Dim Mat_T(2 * (Ne1 + 1), 2 * (Ne1 + 1)) As Double
Dim bigK(,) As Double

```

Les conditions limites :

```

Call conditionlimite(2)
Call conditionlimite(1)

ReDim bigK(N1 - 1, N1 - 1)
For i = 0 To N1 - 1
  Mat_T(i, i) = 1 / (M1(i + 1, i + 1)^ 0.5)
Next

For i = 0 To N1 - 1
  For j = 0 To N1 - 1
    bigK(i, j) = K1(i + 1, j + 1) * Mat_T(i, i) * Mat_T(j, j)
    bigK(j, i) = bigK(i, j)
  Next
Next
Next

```

ReDim eigenvalue(N1 - 1)

La matrice de rigidité dynamique :

Dim BIGKK As New MathNet.Numerics.LinearAlgebra.Double.DenseMatrix(N1)

For i = 0 To N1 - 1

For j = 0 To N1 - 1

BIGKK(i, j) = bigK(i, j)

Next

Next

Dim eigen10 = BIGKK.Evd(Symmetry.Symmetric)

For i = 0 To N1 - 1

eigenvalue(i) = eigen10.EigenValues.Item(i).Real

Next

La triangularisation du système :

Call triangularisation()

Call solution()

Afficher les résultats de calcul de la fréquence naturelle numériquement :

ListBox1.Items.Add("Méthode numérique (MEF) ")

ListBox1.Items.Add("_____")

For i = 0 To N1 - 2 Step 2

ListBox1.Items.Add("W " & i + 1 & " = " & (eigenvalue(i))^0.5 & ", f & i + 1
& " = " & (eigenvalue(i))^0.5 / (2 * PI))

Next

End Sub

Calculer la fréquence naturelle par la méthode analytique :

Private Sub AnalytiqueToolStripMenuItem_Click(sender As Object, e As EventArgs)

Handles AnalytiqueToolStripMenuItem.Click

Dim CoefM, Fpm, Ftriangl, Favrage, alpha, EIs, Elt, masse02 As Double

CoefM = Db1 / Dt1

If CoefM <> 1 Then

$$Fpm = (2 * CoefM^2 * ((CoefM - 1)^3) / (2 * (CoefM^2) * (\ln(CoefM)) - 3 * (CoefM^2) + 4 * CoefM - 1)) / 3$$

$$Ftriangl = (12 * CoefM^2 * (CoefM - 1)^5 / (12 * CoefM^2 * (\ln(CoefM)) + CoefM^4 - 8 * CoefM^3 + 8 * CoefM - 1)) / 30$$

$$Favrage = (Fpm + Ftriangl) / 2$$

Else

$$Favrage = 1$$

End If

$$\alpha = L1 / (Lpice1 + L1)$$

$$EIs = (\pi * Db1^4) / 64 - (\pi * (Db1 - 2 * Thp1)^4) / 64$$

$$EIs = Turb.Eturb * EIs$$

$$EIt = (\pi * Dt1^4) / 64 - (\pi * (Dt1 - 2 * Th1)^4) / 64$$

$$EIt = Turb.Eturb * EIt$$

$$EI1 = (1 - \alpha) * EIs + \alpha * EIt * Favrage$$

$$masse02 = CalculMasseTotale()$$

$$L1 = L1 + Lpice1$$

Afficher les résultats de calcul de la fréquence naturelle analytiquement :

ListBox2.Items.Add("Méthode analytique ")

ListBox2.Items.Add("-----")

ListBox2.Items.Add("Résultats de l'équation : $(3 * EI1 / (L1^3 * (mass1 + 33 * masse02 / 140)))^{0.5}$ ")

$$W11 = (3 * EI1 / (L1^3 * (mass1 + 33 * masse02 / 140)))^{0.5}$$

$$F11 = W11 / (2 * \pi)$$

ListBox2.Items.Add("W 1 = " & W11.ToString)

ListBox2.Items.Add("f 1 = " & F11.ToString)

$$W11 = (3.04 * EI1 / (L1^3 * (mass1 + 0.227 * masse02)))^{0.5}$$

$$F11 = W11 / (2 * \pi)$$

ListBox2.Items.Add("-----")

ListBox2.Items.Add("Résultats de l'équation : $(3.04 * EI1 / (L1^3 * (mass+1$

```

0.227 * masse02)))^ 0.5")
ListBox2.Items.Add("W 1 = " & W11.ToString)
ListBox2.Items.Add("f 1 = " & F11.ToString)

ListBox2.Items.Add("-----")
ListBox2.Items.Add("Autres résultats :")
Dim masse01 As Double
masse01 = VpieceTransi * Turb.RhoTurb
ListBox2.Items.Add("La masse de la pièce de transition = " & masse01.ToString)
masse01 = Vtower * Turb.RhoTurb
ListBox2.Items.Add("La masse de la tour = " & masse01.ToString)
masse01 = (Vtower + VpieceTransi) * Turb.RhoTurb
ListBox2.Items.Add("La masse totale de la structure = " & masse01.ToString)
ListBox2.Items.Add("Fp (m) = " & Fpm.ToString)
ListBox2.Items.Add("Fq0 triang (m) = " & Ftriangl.ToString)
ListBox2.Items.Add("Faverage (m) = " & Favrage.ToString)
ListBox2.Items.Add("EIs = " & EIs.ToString)
ListBox2.Items.Add("EIt = " & EIt.ToString)
ListBox2.Items.Add("alpha = " & alpha.ToString)
ListBox2.Items.Add("EI = " & EI1.ToString)

End Sub

```

Exporter les résultats de calcul de la fréquence naturelle numérique :

```

Private Sub LaMéthodeNumeriqueToolStripMenuItem_Click(sender As Object, e
As EventArgs) Handles LaMéthodeNumeriqueToolStripMenuItem.Click

```

```

Dim xSave As New SaveFileDialog
Dim i As Integer
xSave.FileName = "La fréquence naturelle par la MEF"
xSave.Filter = "Fichier Text(*.txt)|*.txt"
If xSave.ShowDialog = DialogResult.OK Then
    Dim var1 As New IO.StreamWriter(xSave.FileName, True)
    For i = 0 To ListBox1.Items.Count - 1
        var1.WriteLine(ListBox1.Items.Item(i))
    
```

```

    Next
    var1.Close()
End If
End Sub

```

Exporter les résultats de calcul de la fréquence naturelle Analytique :

```

Private Sub LaMéthodeAnalytiqueToolStripMenuItem_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles LaMéthodeAnalytiqueToolStripMenuItem.Click

```

```

    Dim ySave As New SaveFileDialog
    Dim i As Integer
    ySave.FileName = "La fréquence naturelle par la méthode analytique"
    ySave.Filter = "Fichier Text(*.txt)|*.txt"
    If ySave.ShowDialog = DialogResult.OK Then
        Dim var2 As New IO.StreamWriter(ySave.FileName, True)
        For i = 0 To ListBox2.Items.Count - 1
            var2.WriteLine(ListBox2.Items.Item(i))
        Next
        var2.Close()
    End If
End Sub

End Sub
End Class

```

Form2.vb :

```

Public Class Form2

```

Valider les données dans la boîte de dialogue des données générales :

```

Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button1.Click
    Ne1 = Val(TextBox1.Text)
    Turb.Eturb = Val(TextBox2.Text)
    L1 = Val(TextBox3.Text)
    Db1 = Val(TextBox6.Text)
    Dt1 = Val(TextBox9.Text)

```

```
Th1 = Val(TextBox10.Text)
Thp1 = Val(TextBox12.Text)
Lpice1 = Val(TextBox11.Text)
Turb.RhoTurb = Val(TextBox7.Text)
mass1 = Val(TextBox8.Text)

MsgBox("Opération effectuée")
Me.Close()
End Sub
```

Fermer la boîte de dialogue des données générales :

```
Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button2.Click
    Me.Close()
End Sub

End Class
```