

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département électromécanique.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electrotechnique

Spécialité : commande électrique

Par

- **Deboucha Akram.**
- **Bouafia Walid.**

Intitulé

***Contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques des pales
éoliennes***

Soutenu le : 18/09/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Zaher Djamila</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Chérif Aida</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Tahi Wassila</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Aouabed Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remercient

Durant toutes ces longues années d'études, je tiens à exprimer du fond du cœur ma sincère gratitude à tous ceux qui m'ont aidé à mener à bien ce modeste travail, et à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs de l'Université des Sciences et Techniques, Mohamed Bachir Brahim, Bordj Bou Arreridj, en particulier mon encadreur, le professeur chérif Aida,

et qui a supervisé le travail présenté dans ces notes.

Je tiens en particulier à exprimer ma sincère gratitude aux membres du comité de discussion pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Sans soutien, je ne pourrais certainement pas terminer la page sans remercier la soeur yakoubi hadja pour son aide, ses efforts et conseils à notre égard. Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin pour la réussite des travaux. Cette note est mes salutations les plus chaleureuses.

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, de tendresse et
d'affection

A mes chers frères, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis, et mes collègues

A Walid, chère amie avant d'être binôme

A vous cher lecteur

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mon très cher père

À ma très chère mère

Qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années scolaires

pour que je puisse atteindre mes

objectifs. Quoi que je fasse ou dise, je ne pourrais jamais

réussir à leur exprimer avec

exactitude ma gratitude. Leur présence à mes côtés a

toujours été une source de ma force

pour faire face à des obstacles divers. J'espère qu'ils

trouveront ici un témoignage de ma

profonde gratitude.

A ma famille et mes amis

Pour leurs conseils précieux et leurs encouragements tout

au long de mes études.

Et bien sûr A ma binôme « Deboucha Akram »

Pour sa compréhension et sa sympathie.

Table des matières

Titre	page
Remercient	I
Dédicace 1	II
Dédicace 2	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VIII
Liste des Tableaux	X
Nomenclatures et abréviations	XI
Résumé	XIII
Introduction générale	1
<i>Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux intelligents et les méthodes de contrôle de vibration</i>	
1.1 Introduction	2
1.2 Matériaux intelligent	2
1.3 Type des matériaux intelligents	3
1.3.1 Alliages à mémoire de forme (AMF)	3
1.3.2 Matériaux magnétostrictif	4
1.3.3 Matériaux Electroactifs	4
1.3.4 Matériaux piézoélectrique	5
1.3.4.1 Définition des matériaux piézoélectrique	5
1.3.4.2 L'origine source de la piézoélectricité	5
1.3.4.3 Types des matériaux piézoélectrique	6
1.3.4.4 Principaux équation de la piézoélectricité	7
1.3.4.5 Coefficient de couplage électromécanique	9
1.3.4.6 Les mode des déformation	10
1.3.4.7 Les application des matériaux piézoélectrique	10
1.3.4.8 Avantage et les inconvénients des matériaux piézoélectriques	12
1.4 Méthodes de controle de vibration par effet piézoélectrique	12
1.4.1 Techniques passives	13
1.4.2 Techniques actives	14
1.4.3 Techniques semi-passives et semi-actives	15
1.4.4 Techniques SSD (synchronised switch damping)	16
1.4.4.1 Technique SSDS	16
1.4.4.2 technique SSDI	17
1.4.4.3 Technique SSDV	18
1.5 Conclusion	19
<i>Chapitre 2 : L'énergie éolienne</i>	
2.1 Introduction	20
2.2 Définition	20
2.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	21
2.3.1 Avantages	21
2.3.2 Inconvénients	21
2.4 Types des turbines éoliennes	22
2.4.1 Aspect de structure (la forme extérieure)	22
2.5 Aspecte lieu d'installation	22
2.6 Principaux composants d'une éolienne	24

2.7 Fonctionnement d'une éolienne	25
2.8 Pales éoliennes	25
2.9 Différents types de matériaux	26
2.10 Géométrie d'une pale éolienne	27
2.11 Pales éoliennes et les vibrations	27
2.12 Efforts sur une pale	28
2.13 Conclusion	30
<i>Chapitre 3 : Le contrôle de vibration par les méthodes non linéaires des pales éoliennes.</i>	
3.1 Introduction	31
3.2 Modélisation d'une pale intelligente par les éléments piézoélectriques	31
3.3 patches piézoélectriques	35
3.4 Définition de la structure intelligente	36
3.5 SSDI modal	37
3.6 Observateur modal	38
3.7 Simulation et analyse	39
3.8 Conclusion	44
Conclusion générale	45
Bibliographie	/

Liste des figures

Figure	Page
Chapitre 1	
Figure 1.1 :le changement de l'état AMF par le variation de température	3
Figure 1.2 : Les Propriétés thermomécaniques des AMF	4
Figure 1.3 : Effet piézoélectrique direct et inverse	5
Figure 1.4 : Organisation des 32 classes cristallines	6
Figure 1.5 : Les différents modes de déformation	10
Figure 1.6 : Axes de référence	10
Figure 1.7 : principe de fonctionnement de controle passive	13
Figure 1.8: Diagramme de Contrôle actif	14
Figure 1.9 : Techniques SSDS, circuits et leurs formes d'ondes	17
Figure 1.10 : Techniques SSDI, circuits et leurs formes d'ondes	17
Figure 1.11 : circuit électrique de Technique SSDV originale	19
Chapitre 2	
Figure 2.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	20
Figure 2.2 : Principaux organes du système de conversion éolienne	21
Figure 2.3 : Eolienne à axe horizontal (a) et à axe vertical (b)	22
Figure 2.4 : Eoliennes onshores	23
Figure 2.5 : Eoliennes offshores	23
Figure 2.6 : Les principaux composants d'une éolienne	24
Figure 2.7 : une pale éolienne	26
Figure 2.8 : Géométrie d'une pale éolienne	27
Figure 2.9 : Efforts sur un élément d'une pale	28
Figure 2.10 : Evolution des coefficients de portance CL et de traînée CD	30
Chapitre 3	
Figure 3.1 : Le concept du contrôle acoustique shunt piézoélectrique pour le contrôle des vibrations des systèmes mécaniques	34
Figure 3.2 : Illustration montrant les efforts appliques par une électrode	36
Figure 3.3: Patchs piézoélectriques	36
Figure 3.4 : Modèle (masse, ressort, amortisseur) d'une structure munie de n inserts piézoélectriques pour un mode m .	36
Figure 3.5 : la structure appoximatif de la pale après l'insert des éléments piézoélectriques	37
Figure 3.6 : Principe du contrôle SSDI modal	38
Figure 3.7 : Variation de la force axiale du éolienne NACA4412 en fonction du vitesse du vent à différents valeur du lambda λ (TSR)	39
Figure 3.8 : Signal aléatoire de la force axiale en fonction temps avec $\lambda = 1$	40
Figure 3.9 : Déplacement de mode 1 pour le cas $\lambda = 1$	41
Figure 3.10 : Tension aux bornes de l'actionneur pour cas $\lambda = 1$	41
Figure 3.11: Signal aléatoire de la force axiale en fonction de temps avec $\lambda = 7$	42
Figure 3.12: Déplacement de mode1 pour le cas $\lambda = 7$	43
Figure 3.13 : Tension aux bornes de l'actionneur pour cas $\lambda = 7$	43

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau 1.1: Définition des grandeurs	8
Tableau 1.2 : Les équations électromécaniques de la piézoélectricité	9
Tableau 1.3: Les différentes application des matériaux piézoélectrique	11
Tableau 1.4 : Les méthodes de contrôle de vibration	13
Tableau 3.1: Caractéristique de la structure instrumentée d'éléments piézoélectriques	34
Tableau 3.2: Les caractéristiques des pales	37

Nomenclature et Abréviation

Nomenclature

d : traduit la liaison entre la contrainte et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/N).

g : indique la relation entre la contrainte mécanique et le champ électrique à induction nul ou constant (en C/ m²).

e : indique la relation entre la déformation et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/ m²).

h : C'est le coefficient Piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à induction nulle ou constante (en V/m ou N/C)

T : Contrainte mécanique (N/m²) .

S : Déformation relative. (m/m)

E : Champ électrique .(V /m) .

D : Induction ou déplacement électrique (C/m²)

S : Compliance ou susceptibilité élastique ou souplesse (m²/N) .

c : Raideur ou constante élastique (N /m²) .

β : Constante d'imperméabilité diélectrique (m/F) .

ε : Permittivité électrique (F/m) .

r : est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en (m) .

Ω_T : est la vitesse de rotation de la turbine en (rd /s).

λ : est le rapport pointe-vitesse à la i^{ème} section transversale de la pale.

ρ : Densité de l'air.

S : Surface balayée par les pales.

C_D(α) et **C_L(α)** : Coefficient de trainée et coefficient de portance respectivement.

δ : le vecteur de déplacement.

m : matrice de la masse.

c : matrice de l'amortissement.

k^E : matrice de la rigidité lorsque les patchs piézo-électriques sont en court-circuit.

V : est le vecteur de tension des patch *i* piézoélectrique.

I : est le vecteur du courant électrique.

C₀ :est la capacité piézoélectrique du patch.

F :est la force externe appliquée sur la structure.

α :matrice de couplage électromécanique.

Abréviations

LGEF : laboratoire de génie électrique et ferroélectrique.

AMF : alliages à mémoire de forme.

SW : switch.

SSDS : synchronized switch Damping on short circuit.

SSDI : synchronized switch Damping on inductance.

SSDV : synchronized switch Damping on voltage source.

Résumé

Face à une demande croissante en énergie, les constructeurs de grandes éoliennes se sont tournés vers des turbines de plus en plus grandes. En même temps, ils ont tenté de réduire les masses des différents éléments, afin de diminuer les coûts de fabrication. Ces deux éléments ont conduit à l'utilisation de pales de plus en plus flexibles. Cette flexibilité grandissante a rendu les pales plus sensibles aux vibrations aéroélectriques. Ces vibrations peuvent détériorer les pales et amener à leur rupture, et réduire ainsi leur durée de vie - qui doit être supérieur à de 10 ans. Il devient important d'implanter des systèmes permettant le contrôle des vibrations induites sur les pales. Dans ce travail, on intègre les matériaux piézoélectriques (capteur et actionneur) sur la structure de la pale pour diminuer les vibrations par l'utilisation des méthodes de contrôle de vibration SSD.

Mots clés : vibration, amortissement, pales, éolienne, capteur, actionneur, les matériaux piézoélectriques.

Abstract

Faced with an increasing demand for energy, manufacturers of large wind turbines have turned to increasingly larger turbines. At the same time, they tried to reduce the masses of the various elements, in order to reduce manufacturing costs. These two elements have led to the use of increasingly flexible blades. This increasing flexibility has made the blades more sensitive to aereoelectric vibrations. These vibrations can deteriorate the blades and lead to their breakage, and thus reduce their lifespan - which must be more than 10 years. It becomes important to implement systems allowing the control of the vibrations induced on the blades. In this work, we integrate piezoelectric materials (sensor and actuator) on the blade structure to reduce vibrations by using SSD vibration control methods.

Keywords : vibration, damping, blades, wind turbine, sensor, actuator, materials piezoelectric.

المخلص

في مواجهة الطلب المتزايد على الطاقة، تحول مصنعو توربينات الرياح الكبيرة إلى توربينات أكبر بشكل متزايد. في الوقت نفسه، حاولوا تقليل كتل العناصر المختلفة من أجل تقليل تكاليف التصنيع. أدى هذان العنصران إلى استخدام شفرات مرنة بشكل متزايد. هذه المرونة المتزايدة جعلت الشفرات أكثر حساسية للاهتزازات الهوائية. يمكن أن تؤدي هذه الاهتزازات إلى تدهور الشفرات وتكسرها، وبالتالي تقليل عمرها الافتراضي - الذي يجب أن يكون أكثر من 10 سنوات. يصبح من المهم تنفيذ أنظمة تسمح بالتحكم في الاهتزازات التي تحدث على الشفرات. في هذا العمل، قمنا بدمج المواد SSD الكهروضغطية (المستشعر والمشغل) على هيكل الشفرة لتقليل الاهتزازات باستخدام طرق التحكم في الاهتزاز.

الكلمات المفتاحية : الاهتزاز ، التخميد ، الشفرات ، التوربينات الريحية ، المستشعر ، المحرك ، المواد الكهروضغطية.

Introduction
générale

Introduction générale

Aujourd'hui notre monde est soumis à une demande immense en énergie et plusieurs nations s'orientent vers les énergies renouvelables. Dans ce contexte, les éoliennes doivent augmenter aussi leur potentiel de production en électricité. Par conséquent, l'industrie éolienne a une tendance à maximiser les dimensions de ses machines tout en réduisant la masse des éléments tournants. Cela a influé négativement sur la rigidité des structures et rend les pales d'éoliennes bien plus susceptibles aux sollicitations aéroélastiques. Celles-ci peuvent les placer dans des conditions de fonctionnement critiques pouvant mener à la rupture et réduire ainsi leur durée de vie qui devrait être supérieure à 10 ans. Il devient important d'implanter des systèmes permettant le contrôle des vibrations induites sur les pales. Un tel système pourrait augmenter à la fois la durée de vie et la production des turbines. [1]

Le défi est alors de contrôler ou d'éliminer ces vibrations. Il est hautement indésirable car il peut causer des problèmes tels que des contraintes structurelles, la transmission de vibrations à d'autres systèmes, des bruits internes ou externes dus au rayonnement acoustique, etc. Cependant, il est possible de réduire leurs effets grâce à la technique d'amortissement passif qui est basé sur l'intégration ou l'ajout de matériaux ou de systèmes, possédant des propriétés d'amortissement, combinés avec la structure de telle sorte que les vibrations de la structure s'amortissent passivement, c'est-à-dire sans aucune intervention extérieure supplémentaire. Il existe également un deuxième type de méthode de contrôle vibration appelé amortissement active qui a une bien meilleure performance que le premier type mais il nécessite traitements complexes, une conception couteuse et alimentation externe aussi. Le troisième type est semi actif et semi passif, appelé SSD a été développée au LGEF. Il s'appuie sur une élévation cumulative de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique résultant de la commutation continue de ladite tension. Il a été montré que les performances d'amortissement sont fortement liées à cette amplitude de tension totale disponible. Et parmi les techniques SSD on cite le contrôle SSDI. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à des excitation large bande alors que les sollicitations des structures industrielles sont le plus souvent à large bande. la réduction des vibrations doit alors concerner plusieurs résonances. Le contrôle SSDI modale consiste à combiner les avantages des techniques de contrôle active et semi active grâce à une stratégie modale. L'objectif de ce travail est d'augmenter la tension piézoélectrique (directement lié à l'énergie opératoire d'amortissement) pour l'amélioration les performances d'amortissement. [2] [3]

Chapitre 1 :

Généralités sur les matériaux intelligents et les méthodes de contrôle de vibration

Chapitre I : Généralités sur les matériaux intelligents et les méthodes de contrôle de vibration

1.1.Introduction

A partir des efforts des chercheurs et des ingénieurs dans notre époque, la technologie connaît un développement croissant, ce développement nous a apporté de nombreuses innovations qui ont profité à notre monde, parmi eux les matériaux intelligents, qui ont fait un saut qualitatif dans le domaine de récupération d'énergie et de contrôle de vibration. Ces derniers endommagent les équipements mécaniques en fonctionnement. Cela pourrait entraîner une fatigue des matériaux, une détérioration des performances du système, ainsi qu'une augmentation du niveau de bruit. En particulier, la structure pourrait être endommagée en raison de la vibration de haute amplitude lorsque l'excitation se situe juste autour des fréquences de valeurs propres de la structure. Plusieurs catastrophes telles que l'effondrement d'un pont ou un accident d'avion ont été attribuées à des problèmes causés par les vibrations. Ainsi, le contrôle des vibrations devient un problème urgent pour les ingénieurs en mécanique [4]. De ce point de vue, les techniques de vibrations sont apparues afin de réduire l'impact de ces dernières sur les systèmes.

Dans la première partie de ce chapitre, nous aborderons brièvement ces matériaux intelligents, leurs types et leur principe de fonctionnement, puis nous détaillerons plus particulièrement le matériau piézoélectrique et mentionnerons ses applications en tant qu'élément essentiel de notre travail. Et puis présenterons différentes méthodes de contrôle de vibration dans la deuxième partie.

1.2 matériaux intelligents

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Ils possèdent des fonctions qui leur permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations). Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques, par exemple sa forme, sa connectivité, sa viscoélasticité ou sa couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau - variations de température, contraintes mécaniques, champs électriques ou magnétiques. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structures dans le revêtement d'un avion, des fissures

apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton, réduire les vibrations de pales d'hélicoptère ou les pale eoliene par le transformation d'énergie mécanique a énergie électrique [5].

1.3 Type des matériaux intelligents

1.3.1 Alliages à mémoire de forme (AMF)

Les alliages à mémoire de forme sont des matériaux métalliques qui présentent des propriétés thermomécaniques particulières telles que la super-élasticité, l'effet mémoire de forme et un fort pouvoir d'amortissement. Les phases «basse» et «haute» températures sont qualifiées respectivement de martensite et austénite, par référence à la transformation de phase dans les aciers lors d'une trempe. Les transformations martensitiques dans les aciers présentent en effet certaines similarités avec les transformations de phase dans les AMF, notamment le caractère «displacif» de la modification cristalline. Les plages de température et de contrainte dans lesquelles s'opère le changement de phase dans les AMF sont compatibles avec des applications en ingénierie. [6]

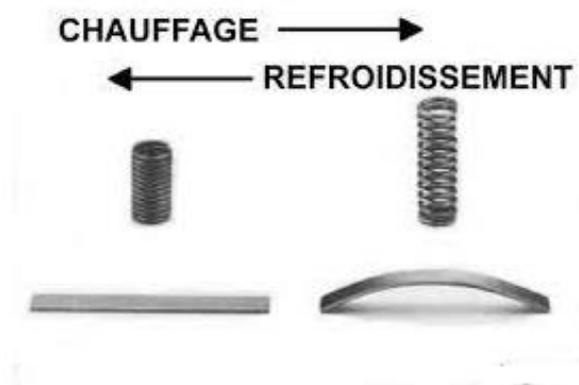


Figure 1.1: Le changement de l'état AMF par le variation de temperature [7].

Propriétés des alliage à mémoire de forme

Un alliage à mémoire de forme (AMF) est un alliage possédant plusieurs propriétés inédites parmi les matériaux métalliques : la capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique, et un comportement superélastique permettant des allongements sans déformation permanente supérieurs à ceux des autres métaux [8]. Nous pouvons le résumer dans le schéma suivant figure 1.2:

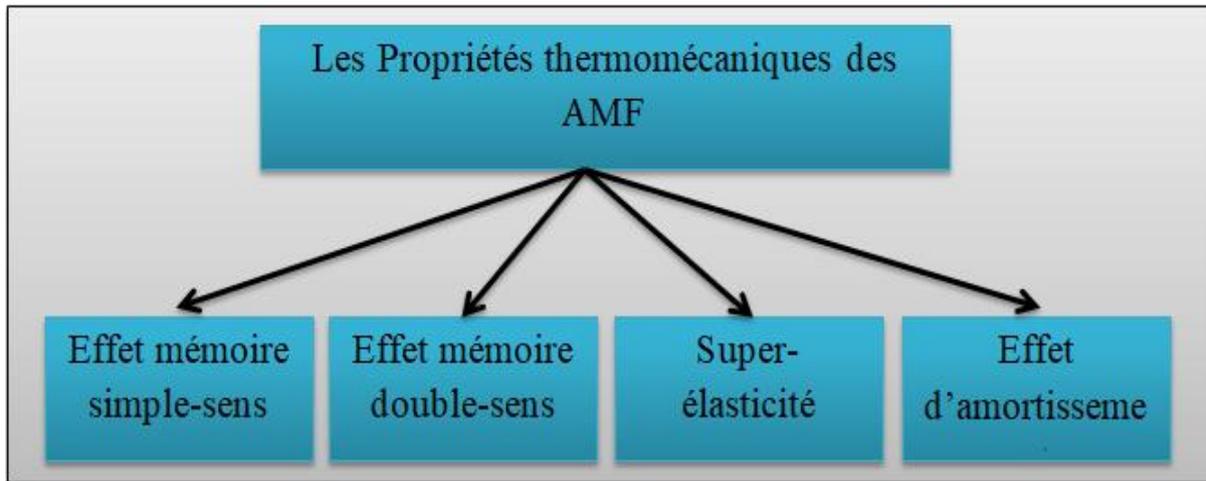


Figure 1.2: Propriétés thermomécaniques des AMF .

1.3.2 Matériaux magnétostrictif

Les matériaux magnétostrictif est basé sur la propriété de magnétostriction qui les amène à changer de forme ou de dimensions au cours du processus d'aimantation. La variation de l'aimantation des matériaux due au champ magnétique appliqué modifie la déformation magnétostrictive jusqu'à atteindre sa valeur de saturation λ [9] . Cet effet provoque une perte d'énergie due à l'échauffement par friction dans les noyaux ferromagnétiques sensibles. L'effet est également responsable du bourdonnement grave qui peut être entendu provenant des transformateurs, où les courants alternatifs oscillants produisent un champ magnétique changeant [10].

1.3.3 Matériaux Electroactifs

Sont des matériaux dont les propriétés physiques évoluent sous l'application d'un champ électrique : ce champ induit une déformation (matériaux électrostrictifs, piézoélectriques), ou une polarisation (matériaux ferroélectriques) ... Ces matériaux sont des polymères, des monocristaux ou des céramiques (couches minces ou massives) qui trouvent des applications en tant que capteurs ou actionneurs notamment dans les domaines du médical, de l'électronique, des transports, de la domotique... [11] d'ailleurs les matériaux électrostrictifs a les mêmes propriétés qu'un matériau piézoélectrique mais la transformation mécanique est proportionnelle au carré du champ électrique. Cette caractéristique entraîne toujours des déplacements dans le même sens.

1.3.4 Matériaux piézoélectriques

L'effet piézoélectrique a été découvert par Pierre et Jacques Curie en 1880, est représenté un lien entre deux vastes domaines de la physique qui sont l'électromagnétisme et l'acoustique. L'intérêt majeur de ce phénomène réside dans le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Il permet une action sur l'état mécanique d'une structure par l'application d'un champ électrique ou vice versa. Depuis plus d'un siècle, l'exploitation de la piézoélectricité a débouché sur des applications dans des domaines extrêmement variés, allant des techniques de mesure, comme les capteurs ultrasonores, à l'énergie renouvelable comme les récupérateurs d'énergie. Il y a une soixantaine d'années, la piézoélectricité s'est placée dans un champ d'application riche en perspectives qui est celui de l'électronique de faible puissance. [12]

1.3.4.1 Définition des matériaux piézoélectriques

Le terme piézoélectricité nous vient du grec « piézein » signifiant presser ou appuyer. Ainsi le terme piézoélectricité désigne la propriété que présentent certains corps de se polariser électriquement soit de générer un champ ou un potentiel électrique sous l'action d'une contrainte mécanique. On parle d'effet piézoélectrique **direct**.

Cet effet est réversible tel que un matériau piézoélectrique soumis à un champ électrique se déforme sous l'action des forces internes. Cette déformation change de sens avec le sens du champ électrique appliqué. C'est l'effet appelé **inverse**, parfois qualifié de réciproque ou de converse. [13]

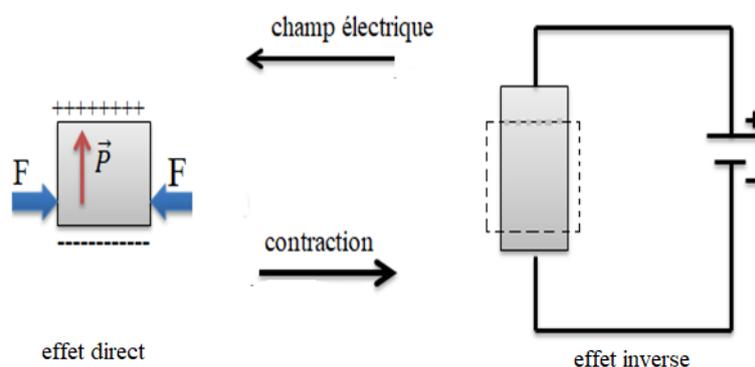


Figure 1.3 : Effet piézoélectrique direct et inverse.

1.3.4.2 L'origine de la piézoélectricité

L'origine de l'électricité piézoélectrique provient de la famille des cristalline, il contient 32 classes cristallines 21 sont dépourvues de centre de symétrie, parmi celles-ci, 20 sont

piézoélectriques. Dans ces 20 classes, 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ extérieur et possèdent une polarisation naturelle selon au moins une direction; elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température. Enfin, les cristaux ferroélectriques correspondent à un sous-groupe des pyroélectriques pour lesquels l'axe polaire, support d'un dipôle permanent et mobile dans le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Ils ont eue la particularité de pouvoir se polariser selon deux axes ou plus, chaque direction étant équiprobable. [14]

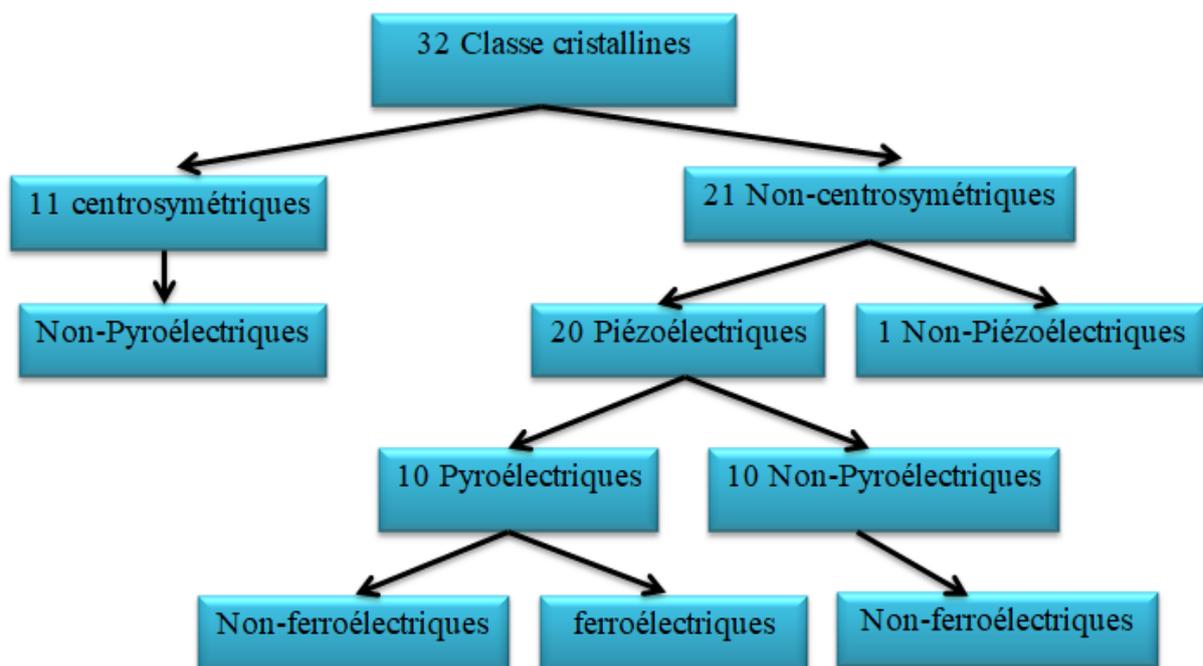


Figure 1.4 : Organisation des 32 classes cristallines. [15]

1.3.4.3 Types des matériaux piézoélectriques

Depuis sa découverte, les matériaux piézoélectriques est largement utilisé pour la possibilité d'exploiter l'effet direct ou inverse ou les deux alternativement (ou simultanément). Lorsqu'il existe plusieurs types, chacun d'eux a ses propres caractéristiques, et nous présentons quatre types bien connus comme suit:

- **Les céramiques:** les céramiques piézo-électriques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique. Ils sont souvent utilisés tels quels mais entrent également dans la fabrication des

composites que nous décrivons plus loin. [15] En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière. Citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée; les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT et enfin les métaniobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution.

- **Les polymers:** les polymères ou les co-polymères comme respectivement le Poly-Vinyl-DiFluoridène ou PVDF et le (PVDF-TrFE) partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sousmarine réception .Le PVDF en est le représentant le plus connu, les chaines de polymères peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique [15].
- **Les Composites:** dans un composite, le matériau piézoélectrique est divisé et plongé dans une matrice non piézoélectrique (une résine). Les composites ont montré leur intérêt par rapport aux céramiques conventionnelles dans le domaine des transducteurs acoustiques hautes fréquences pour l'imagerie : leur meilleur coefficient de couplage électromécanique et leur impédance acoustique plus adaptée permettent d'améliorer la résolution des images [16].
- **Les cristaux:** le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz mais ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs médicaux : son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage très faible [15].

1.3.4.4 Principaux équation de la piézoélectricité

Piezo est basé sur deux parties de base, électrique et mécanique. L'équation piézoélectrique a pour but d'établir la relation entre les variables électriques (induction et champ électrique) et les variables mécaniques (déformation relative et contrainte). Lorsque les tableau ci-dessous le montre.

Le tableau 1.1 définir les notions des variables et connassant ses unités:

Tableau 1.1: Définition des grandeurs.

Nature	Notation	La signification	Unité	Dimension
Électrique	D	induction électrique	C/m^2	$3*1$
	E	champ électrique	V/m	$3*1$
	ϵ	permittivité	F/m	$3*3$
	β	inverse de la permittivité	m/F	$3*3$
Mécanique	S	tenseur de déformation	M/M	$6*1$
	T	tenseur des contraintes	N/M^2	$6*1$
	c	rigidité	N/M^2	$6*6$
	s	souplesse	M^2/N	$6*6$
piézoélectrique	H	constantes piézoélectriques du matériau	N/C	$3*6$
	e		N/Vm	$3*6$
	g		m^2/c	$3*6$
	d		m/v	$3*6$

Constante de charge d : traduit la liaison entre la contrainte et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/N).

Constante de tension g : indique la relation entre la contrainte mécanique et le champ électrique à induction nul ou constant (en C/ m²).

Constante piézoélectrique e : indique la relation entre la déformation et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/ m²).

Constante piézoélectrique h : C'est le coefficient Piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à induction nulle ou constante (en V/m ou N/C) .

Le tableau 1.2 donne les équations électromécaniques de la piézoélectricité:

Tableau 1.2 : Les équations électromécaniques de la piézoélectricité. [15]

Variables indépendantes	Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
E, T	$D = dT + \varepsilon^T E$	$S = S^E T + d^t E$
D, T	$E = \beta^T D - g^T$	$S = S^D T + g^t D$
E, S	$D = \varepsilon^S E + Es$	$T = c^E S - e^t E$
D, S	$E = \beta^S D - Hs$	$T = c^D S - h^t D$

[]^t : Transportée de la matrice.

T (N/m²): Contrainte mécanique.

S (m/m): déformation relative.

E (V /m): Champ électrique.

D (C/m²): Induction ou déplacement électrique.

s (m²/N): Compliance ou susceptibilité élastique ou souplesse.

c (N /m²): Raideur ou constante élastique.

β (m/F): Constante d'imperméabilité diélectrique.

ε (F/m): Permittivité électrique.

1.3.4.5 Coefficient de couplage électromécanique

Le coefficient de couplage électromécanique représente la capacité d'un matériau piézoélectrique à convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, et inversement. Il ne faut pas le confondre avec le rendement, qui lui peut être nettement supérieur à ce coefficient, il s'apparente plus à un facteur de puissance. La conversion électromécanique de l'énergie s'effectue de manière directe au sein de la céramique. Ce coefficient, calculé au court d'un cycles de travail, est défini, pour une conversion électromécanique [17], par le rapport des énergies suivant:

$$K^2 = \frac{\text{Energie mécanique stockée}}{\text{Energie mécanique fournie}} \quad (1.1)$$

1.3.4.6 Modes des déformation

On distingue trois modes principaux de déformation d'un échantillon piézoélectrique: le mode longitudinal, le mode transversal et le mode de cisaillement qui sont illustrés sur la figure (1.5). Les déformations selon les axes perpendiculaires à la grande longueur n'ont pas été représentées sur les figures (a) et (b)

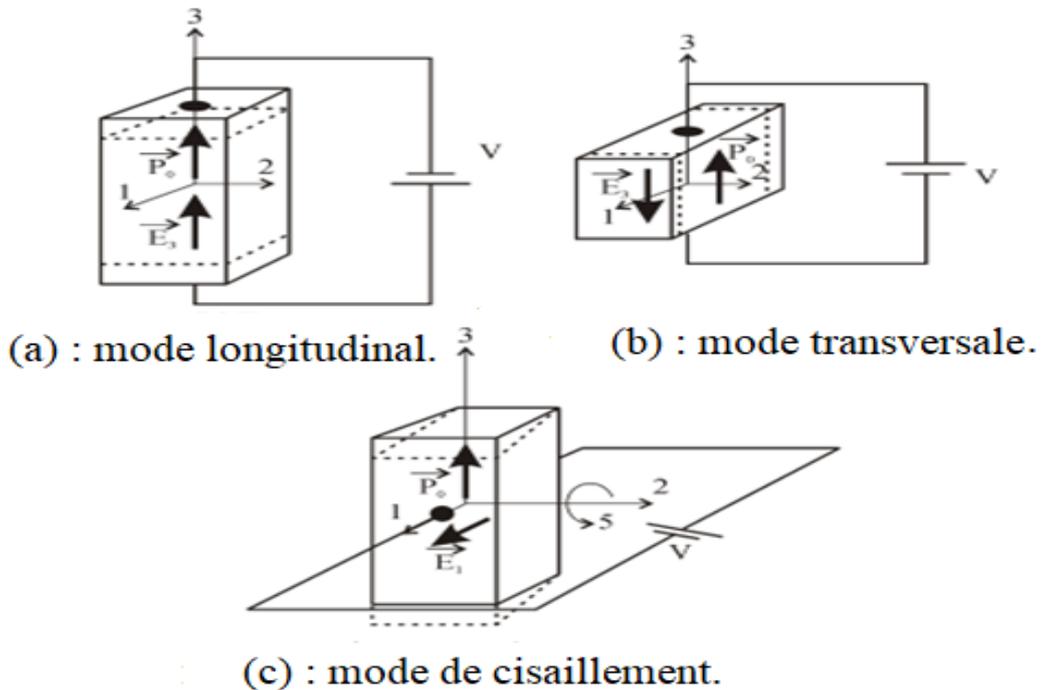


Figure 1.5 : Les différents modes de déformation [18]

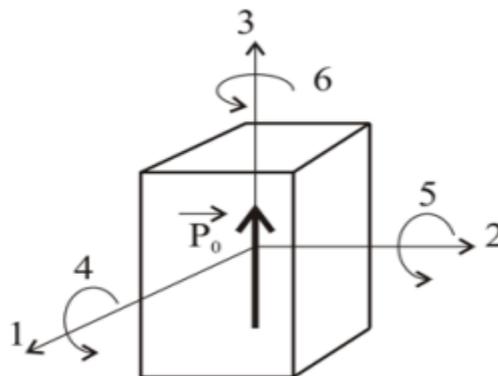


Figure 1.6: Axes de référence [18]

1.3.4.7 Application des matériaux piézoélectriques

Le tableau 1.3 ci-dessous présente des composants piézoélectrique et leur domaines d'application:

Tableau 1.3: Les différentes application des matériaux piézoélectrique.

Les composants piézoélectriques	Domaines d'application
Transducteurs acoustiques	<ul style="list-style-type: none"> • Microphones (et en particulier des microphones de contact) • Haut-parleurs, notamment dans les téléphones portables. • La détection d'obstacles: les sonars chez la marine, et aussi dans l'automobile. • En médecine, on en utilise pour la réalisation d'échographies.
Résonateurs piézoélectriques	<ul style="list-style-type: none"> • Horloge de quartz. • Oscillateur. • Les microbalances piézoélectriques.
Actionneurs piézoélectriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les microscopes à sonde locale. • Le microscope à force atomique. • Le microscope à effet tunnel. • Dans le monde industriel pour de l'assistance à l'usinage par génération de vibrations. • Le contrôle de vibrations. • La command de certains injecteurs en automobile. • Dans les applications opto-acoustique. • En optique adaptative en astronomie.
Moteurs piézoélectriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les systèmes autofocus d'appareils photographiques. • Les mécanismes de vitre électrique de voiture. • En général dans les applications où la taille réduite de ces moteurs répond à des contraintes volumiques.
Capteurs	<ul style="list-style-type: none"> • L'automobile (pression des pneus). • L'aéronautique (pression dans les tuyères). • Dans le domaine de musique (batterie électronique). • Capteurs inertiels qui peuvent être utilisés dans: <ul style="list-style-type: none"> - les centrales à inertie. - ou plus couramment dans des applications de plus basse précision : coussin gonflable de sécurité, guidage, manette de jeu vidéo (wii).
Générateurs et transformateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Transformateurs piézoélectrique. • Microgénérateurs. • Filtres.
Microscopie à force piézoélectrique (PFM)	<ul style="list-style-type: none"> • utilisation dans le microscope à force atomique: application d'une tension entre la pointe et l'échantillon permet de sonder la structure en domaines ferroélectriques à l'échelle nanométrique.

1.3.4.8 Avantages et inconvénients des matériaux piézoélectriques

Avantages

- Densité énergétique importante.
- Grand bande passante.
- Haute fréquences.
- Faible puissance de mise en action.

Inconvénients

- Tensions limitées.
- Equipement auxiliaire nécessaire.
- Matériaux fragiles.
- Variations de température limitées [19].

1.4 Méthodes de contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques

Les techniques [20] utilisées pour réduire les vibrations d'usinage peuvent être classifiées en trois catégories : les méthodes passives, les méthodes semi-actives et les méthodes actives. Les méthodes passives impliquent souvent l'adaptation de la structure en changeant les caractéristiques dynamiques pendant la phase de conception (inertie, élasticité ou l'amortissement). Elles ont la particularité d'être difficiles à adapter à une large gamme de changements de perturbations qui peuvent se produire dans les conditions réelles de fonctionnement. D'autre part, des méthodes semi-actives impliquent l'utilisation d'actionneurs et de capteurs afin de régler (moduler) les caractéristiques dynamiques de la structure (raideur, amortissement ou caractéristiques inertiels). Enfin, les méthodes actives sont utilisées afin d'agir directement en introduisant des efforts dynamiques dans la structure, à travers un système mécatronique intégré (actionneur, capteur, et le contrôleur) après analyse de la réponse du système.

Tableau 1.4 Les méthodes de contrôle de vibration [].

Contrôle passif (1970)	Contrôle actif (1970-1990)	Contrôle semi-actif (1990-2000)	Contrôle hybride (2000-.....)
Les système passifs peu couteux à entretenir et ne nécessitent aucune puissance pour etre efficace ,mais ces systèmes ne peuvent pas etre modifiés une fois installé.	les système actifs s'appuient sur des algorithmes complexes aux vibrations de combat, mais ces systèmes nécessitent une immense source d'alimentation externe.	Les système hybrides et les systèmes semi-actifs combinent les systèmes passifs et actifs pour maximiser l'effet d'amortissement , mais ils sont plus chers et sont encore l'objet de recherches .	

1.4.1 Techniques passives

Les techniques passives d'amortissement des vibrations structurales utilisent l'intégration ou l'ajout de matériaux ou systèmes, possédant des propriétés amortissantes, couplés à la structure de telle façon que les vibrations de la structure sont amorties passivement, c'est-à-dire, sans aucune intervention extérieure supplémentaire [3]. Les éléments piézoélectriques convertissant l'énergie mécanique sous forme électrique, la façon la plus simple de les utiliser dans le cadre du contrôle vibratoire consiste à dissiper cette énergie. Ainsi, la connexion d'une résistance aux bornes du matériau actif est la manière la plus directe pour réduire l'énergie mécanique dans la structure en dissipant celle-ci une fois convertie sous forme électrique [21].

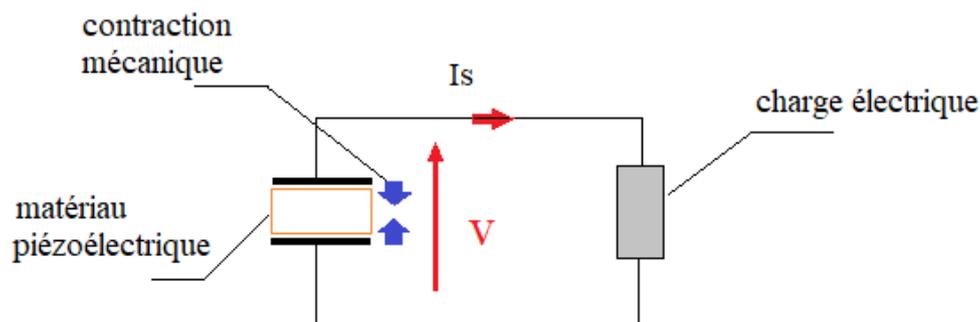


Figure I.7: Principe de fonctionnement de contrôle passivé.

Avantages des techniques passives

- Elles sont simples à implémenter.
- Elles ne nécessitent pas d'énergie extérieur.
- Un poids et une taille des éléments à ajouter sur la structure peu significatif.
- Un système inconditionnellement stable.

Inconvénients des techniques passives

- Offrent des performances limitées pour des valeurs de composants réalistes.
- Elles sont très sensibles aux variations environnementales.
- Elles ne peuvent réaliser de contrôle large bande qu'au prix de structures relativement complexes. [21] [22]

1.4.2 Techniques actives

Contrairement au contrôle passif, les amortisseurs actifs sont des actionneurs qui peuvent au choix dissiper de l'énergie, ou donner de l'énergie au système. Cela les rend efficaces dans notre cas au lieu d'utiliser deux systèmes, un pour capter la vibration et le deuxième pour contrôler les vibrations, les matériaux piézoélectriques est un exemple des matériaux à utiliser pour le contrôle actif. Un amortisseur passif est fondamentalement conçu pour réduire seulement un mode de vibration particulier de la structure. En revanche, un amortisseur actif peut amortir une bande large de fréquences. D'où, l'étude du contrôle actif des structures est une extension logique de technologie du contrôle passif. Un système de contrôle est actif si un ou plusieurs actionneurs appliquent des forces sur une structure selon une loi de contrôle en utilisant pour leur fonctionnement une source d'énergie externe. [23]

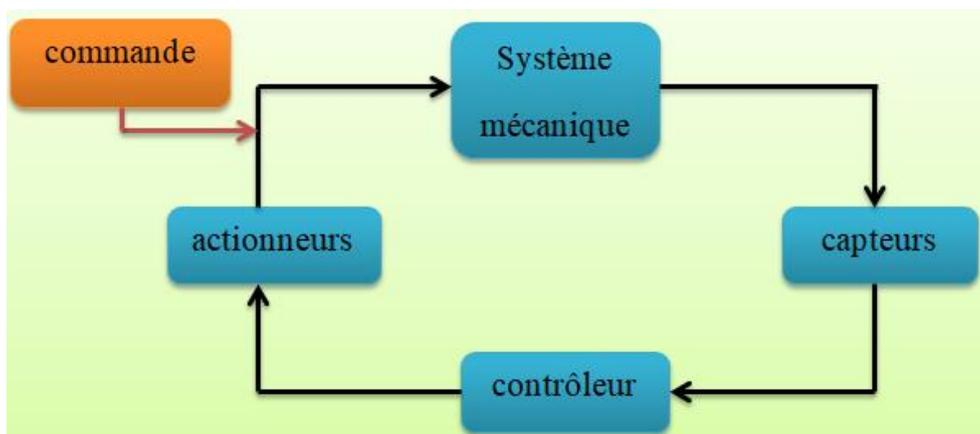


Figure 1.8: Diagramme de Contrôle actif .

Avantages des techniques actives

- Contrôle efficace et robuste.
- Permettent une réduction importante et robuste des vibrations.
- Contrôle large bande.

Inconvénients des techniques actives

- La nécessité de traitements complexes et une conception coûteuse
- Nécessité une alimentation externe
- L'utilisation d'amplificateurs nécessitant une alimentation extérieure conséquente limitent leur application dans le cas de structures de faibles dimensions et/ou de systèmes embarqués. [21] [3]

1.4.3 Techniques semi-passives et semi-actives

Afin de combiner les avantages des systèmes passifs (simplicité et efficacité énergétique) et des systèmes actifs (robustesse et performances) sans souffrir de leurs inconvénients respectifs, l'utilisation de techniques semi-passives et semi-actives a été proposée. On différenciera ces deux dénominations selon qu'aucune énergie extérieure n'est nécessaire dans la partie de puissance mais possiblement est très faiblement dans la partie de commande (techniques semi-passives) ou qu'une petite quantité d'énergie extérieure y soit fournie (techniques semi-actives). [21]

Les techniques semi-passives et semi-actives sont généralement basées sur un élément non-linéaire, qui change les conditions aux limites électriques de l'insert piézoélectrique afin de changer son comportement mécanique équivalent. En particulier, on mentionnera les techniques dites « SSD » qui consistent à commuter pendant un temps très bref l'élément piézoélectrique sur un court-circuit ou une inductance, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie convertie sous forme électrique créant ainsi un effet mécanique de frottement sec amortissant par là-même les vibrations. Ces techniques peuvent même être auto-alimentées, c'est-à-dire que l'énergie nécessaire pour la commande du commutateur est directement prélevée sur l'élément piézoélectrique, permettant de disposer d'une technique fermée sur le plan énergétique [21].

Avantages des méthodes semi passive/semi active

- Elles minimisent la sensibilité aux vibrations environnementales et aux petites variations de la fréquence propre.

- Elles sont moins encombrantes du point de vue pratique puisque la valeur de l'inductance requise dans la gamme des basses fréquences est plus faible. [24]

1.4.4 Techniques SSD (synchronised switch damping)

Comme nous l'avons expliqué précédemment la SSD c'est un technique est mise en œuvre à l'aide d'un interrupteur électronique qui commute brièvement l'élément piézoélectrique à un instant précis vers un circuit de shunt électrique, qui peut être soit un simple court-circuit (SSDS), soit une petite inductance (SSDI). dans le cycle vibratoire de la structure. Dans ces cas, le traitement non linéaire de la tension produit une force mécanique qui est une fonction par morceaux déphasée avec la vitesse de vibration. Cela signifie que structurellement, le traitement non linéaire introduit des mécanismes de dissipation tels que le frottement sec. De plus, dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'avoir des informations sur le modèle structurel, il est donc très adaptable. [25] La force piézoélectrique provoquée par cette tension est toujours de signe opposé à la vitesse de la structure, supprimant ainsi les vibrations sur la structure.

1.4.4.1 Technique SSDS

Le circuit de SSDS est très simple qui ne consiste qu'en un fil, un interrupteur et une petite résistance. Une fois que la structure atteint ses extrema (maximum ou minimum) de déplacement, l'interrupteur sera fermé pendant un temps très court puis rouvert. C'est que le circuit est en court-circuit. Ainsi, la charge électrique de polarités différentes stockée à la surface des patches piézoélectriques sera annulée pendant le temps de fermeture et la tension piézoélectrique reviendra à zéro pendant la durée de fermeture. La figure (1.9) montre les formes d'onde du déplacement structurel et de la tension. D'après cette figure, nous savons que la tension piézoélectrique augmente la plupart du temps, ce qui indique que l'énergie mécanique est extraite de la structure et stockée dans les éléments piézoélectriques sous forme d'énergie électrique. Une telle tension ne chute que lorsque l'interrupteur est fermé. Cela signifie que l'énergie électrique est dissipée dans le circuit sous forme de chaleur joule. Ainsi, l'énergie mécanique de la vibration s'est finalement dissipée dans le circuit. On peut aussi remarquer que la tension a toujours le même signe avec la vitesse. Par conséquent, la force piézoélectrique induite qui vaut $-\alpha V$ est toujours de signe opposé avec la vitesse. [26]

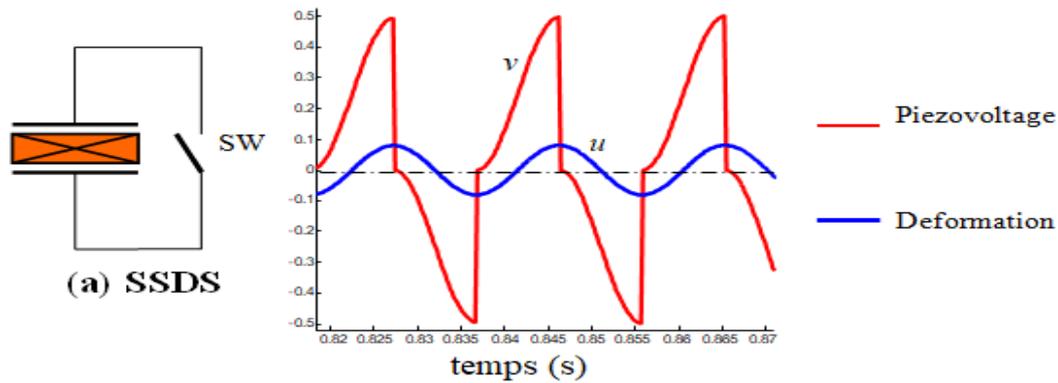


Figure 1.9 : Techniques SSDS, circuits et leurs formes d'ondes [25].

1.4.4.2 Technique SSDI

Dans le cas de la technique SSDI, l'interrupteur est en série avec une inductance L . L'interrupteur est toujours ouvert, sauf lorsqu'un extremum de déplacement ou de tension est détecté. Dans le cas de SSDI, la capacité C_p de l'élément piézo et l'inductance L constituent un circuit oscillant. L'interrupteur est maintenu fermé jusqu'à ce que la tension piézoélectrique soit complètement inversée. Le temps d'inversion Δt_s est égal à la demi-période du circuit oscillant et s'exprime [27] par :

$$\Delta t_s = (2f_s)^{-1} = \pi(c_p l)^{1/2} \quad (1.2)$$

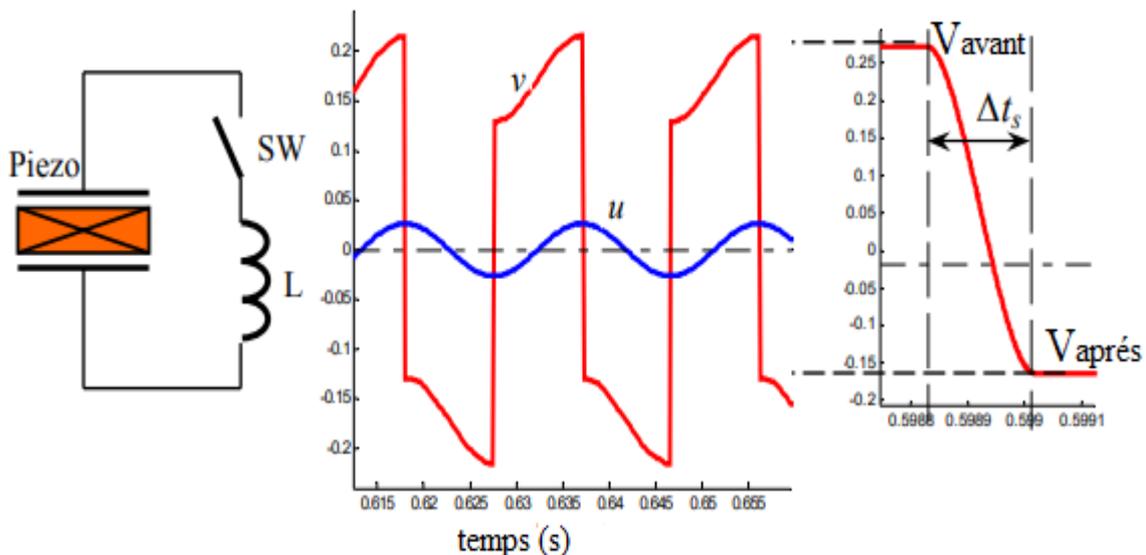


Figure 1.10: Techniques SSDI, circuits et leurs formes d'ondes [25].

L'interrupteur est pratiquement toujours ouvert, sauf quand un extremum de tension est détecté.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant sortant des éléments piézoélectriques est nul et la tension évolue alors proportionnellement à la déformation.

Lorsqu'un extremum de la tension est détecté, l'interrupteur est fermé jusqu'à ce que la tension soit inversée. Cette inversion est rendu possible par la capacité C_0 des éléments piézoélectriques et l'inductance L qui forment un circuit électrique oscillant dont l'équation peut s'écrire sous la forme:

$$\frac{dv^2}{dt^2} + \frac{1}{l c_0} v = 0 \quad (1.3)$$

L'interrupteur est maintenu fermé jusqu'à ce que la tension sur les éléments piézoélectriques soit inversée, c'est à dire au bout d'un temps t correspondant à une demi pseudo période du circuit oscillant électrique.

Un choix judicieux de l'inductance L permet d'avoir une période d'inversion électrique beaucoup plus faible que la période de vibration mécanique.

1.4.4.3 Technique SSDV

Dans le cas de technique SSDV, l'amplitude de la tension inversée et par conséquent l'énergie dissipée sont augmentées en utilisant un potentiel constant à l'instant de la commutation. Le circuit électrique de la technique SSDV originale a été représenté sur la figure (1.11). La différence par rapport à la technique SSDI est que l'élément piézoélectrique est allumé sur une source de tension positive ou négative à travers le circuit de shunt inductif L . La tension n'est pas inversée plutôt qu'un potentiel nul, mais inversée plutôt qu'un potentiel constant, c'est-à-dire pour augmentant l'effet du cycle de conversion électromécanique. La stratégie de commande des interrupteurs électroniques consiste à fermer SW_1 lorsqu'il se produit un maximum de déplacement correspondant à un maximum de tension. Lorsque SW_1 est fermé, une oscillation de tension pseudo-périodique commence autour de la tension $-V_c$, jusqu'à l'ouverture de SW_1 . L'interrupteur est maintenu fermé pendant une demi-pseudo-période (le même Δt_s pour la technique SSDI) de l'oscillateur électrique (l'inductance et la capacité des éléments piézoélectriques). A l'ouverture de l'interrupteur SW_1 la tension s'est inversée autour du potentiel $-V_c$ et est négative. L'interrupteur SW_2 est commandé de manière symétrique avec SW_1 . Il se ferme lorsqu'un minimum de déplacement correspondant à un minimum de tension se produit et s'ouvre après un temps de fermeture Δt_s . Par conséquent, le signe de la tension devient positif. D'autre part, SW_1 est utilisé pendant la phase décroissante d'inversion, tandis que SW_2 est utilisé pendant l'augmentation de un (c'est-à-dire que les interrupteurs

SW_1 et SW_2 se déclenchent respectivement à chaque maximum et minimum de la tension piézoélectrique). Les potentiels des sources sont symétriques V_c et $-V_c$. $V_c=0$ correspond à la technique SSDI [25].

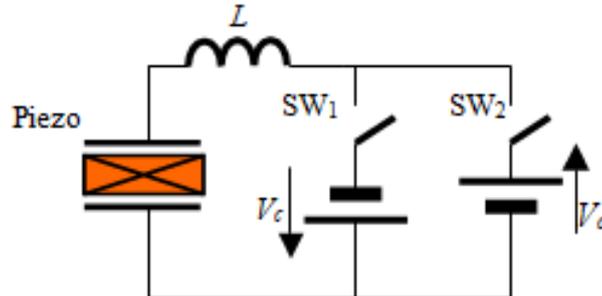


Figure 1.11: Circuit électrique de Technique SSDV originale [25].

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des matériaux intelligents, puis nous voyons les définitions et les propriétés associées à la piézoélectricité. Nous donnons également une description plus détaillée de ces matériaux piézoélectriques et après cela nous avons appelé les équations qui régissent la piézoélectricité sans oublier les applications, les avantages et les inconvénients de ces matériaux. Quant à la deuxième partie, on a présenté une description des techniques du contrôle des vibrations tel que nous avons commencé par une explication détaillée sur les méthodes de contrôle des vibrations de leurs trois classes (active, passive, semi passive / semi active) et puis on a abordé les techniques SSD, qui ont également trois types de base (SSDS, SSDI, SSDV) avec leur principe de fonctionnement.

Chapitre 2 :

L'énergie éolienne

Chapitre 2 :

L'énergie éolienne

2.1 Introduction

L'énergie éolienne est connue depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme. Pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde. Ce chapitre présente en première partie une brève définition de l'énergie éolienne, ainsi que les types et les composants d'une éolienne et les installations des éoliennes sur onshore et offshore. Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes à axe horizontal de grande puissance qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces[27]. Deuxième partie est basée principalement sur la pale car c'est l'élément qui reçoit le vent. Cet élément est principalement responsable de la performance globale de l'énergie éolienne. Leur fonctionnement est basé sur la théorie de la quantité de mouvement et la théorie d'élément de pale. Plusieurs codes informatiques ont été développés pour évaluer les performances des éoliennes et pour définir les effets de tous les paramètres aérodynamiques tels que la vitesse du vent, le type de profil, l'angle d'attaque et le tangage, la portance et la traînée, et le facteur d'induction axial et en termes de design a été développés dans la taille des lames de petite à grande taille, qui assurent la haute performance d'éolienne et réduire les vibrations résultantes. [28]

2.2 Définition

Une éolienne est une énergie renouvelable dispositif qui utilise la force du vent pour pomper l'eau ou pour produire de l'électricité, est un dispositif qui assure la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par une génératrice. [29]

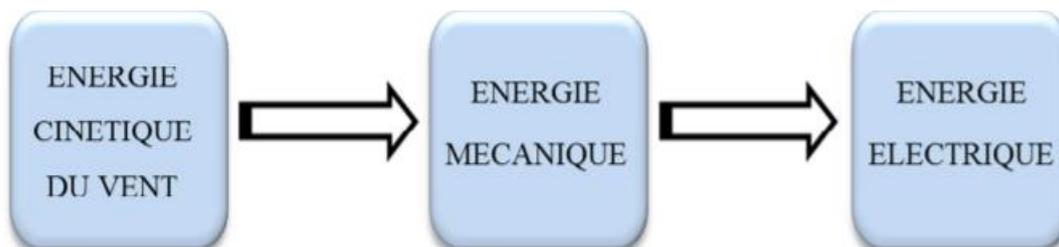
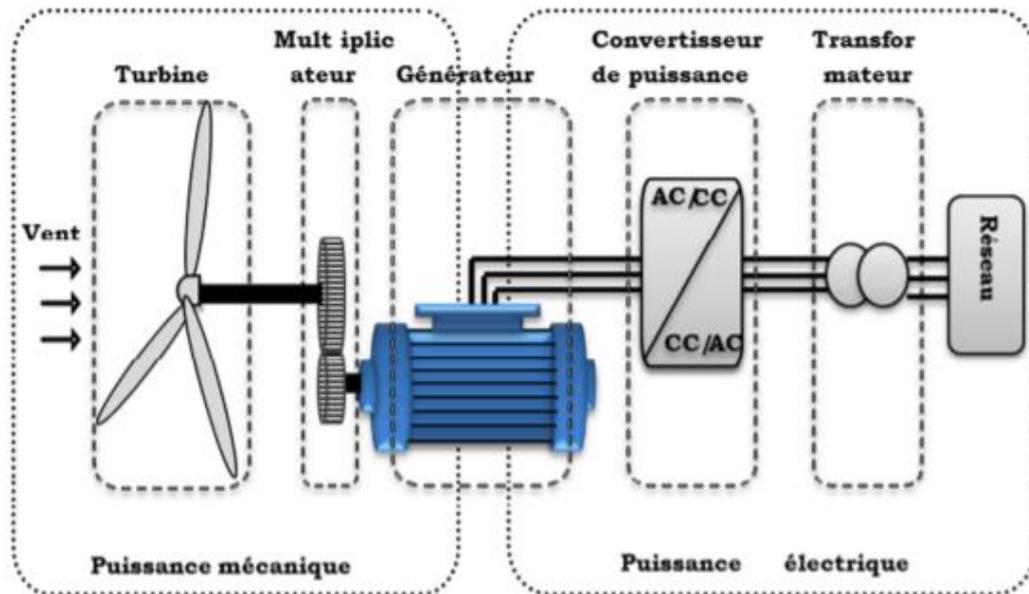


Figure 2.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure 2.2. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.



.I.1

Figure 2.2: Principaux organes du système de conversion éolien [30].

2.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [31].

2.3.1 Avantages

- Prend peu de place au sol
- Fonctionne de jour comme de nuit
- Fonctionne par temps nuageux comme par temps de pluie
- Maturité technologique et recyclage des déchets facile

2.3.2 Inconvénients

- Détermination de l'endroit idéal d'une éolienne (difficile).
- Cout d'installation et maintenance élevée.
- Parfois bruyant et risques mécaniques.

2.4 Types des turbines éoliennes

On peut classer les types des turbines éoliennes selon deux aspects :

2.4.1 Aspect de structure (la forme extérieure)

Il existe deux principaux types d'éoliennes une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [32].

- **L'éolienne à axe vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)**

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées donc seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de savon et le rotor de Darrieux [10]. A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue . [32]

- **L'éolienne à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles face ou sous le vent [32] [33].

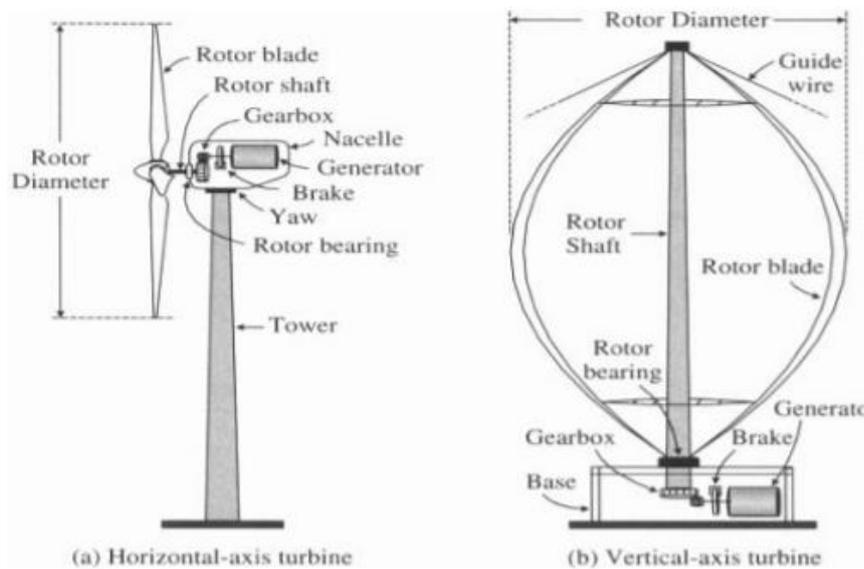


Figure 2.3: Eolienne à axe horizontal (a) et à axe vertical (b) [34].

2.5 Aspecte lieu d'installation

Les installations des éoliennes peuvent être réalisées sur terre (les fermes éoliennes onshore) et en mer (les fermes éoliennes offshore) en tenant compte de la présence d'un vent favorable. Il existe deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne.

- **Les éoliennes terrestres « onshore »**

Sont installées sur la terre, cette énergie renouvelable tirée par la force du vent au moyen d'un aérogénérateur. La production de l'énergie éolienne dépend des données géographiques, topographiques et météorologiques du site [35].



Figure 2.4 : Eoliennes onshores [36].

- **Les éoliennes marines « offshore »**

Sont installées en mer, les éoliennes offshores fonctionnent selon le même principe que les éoliennes terrestres traditionnelles, elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. La différence entre un modèle marin et un modèle terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer [37].



Figure 2.5: Eoliennes offshores [37].

2.6 Principaux composants d'une éolienne

Les composants essentiels d'une éolienne à axe horizontal sont illustrées dans la figure 2.6 ci-dessous :

- **Rotor** : il se compose des pales et du moyeu. Le moyeu relie les pales au groupe motopropulseur.
- **Nacelle** : elle contient le train d'entraînement (arbres, boîte de vitesses, accouplement, un frein mécanique), le générateur et le système de commande.
- **Système de l'orientation** : il se trouve sous la nacelle et sert à maintenir l'arbre du rotor correctement aligné avec le vent.
- **Tour** : elle est utilisée pour élever la nacelle et le rotor afin que les vents avec des vitesses de vent plus élevées soient capturés.
- **Fondation** : elle maintient la tour en place, sa taille et sa masse sont donc déterminées par la taille de l'éolienne et les conditions locales du sol.
- **Armoire de couplage au réseau électrique** : il se compose de câbles, appareillage, transformateur, et l'alimentation convertisseurs électroniques [38].

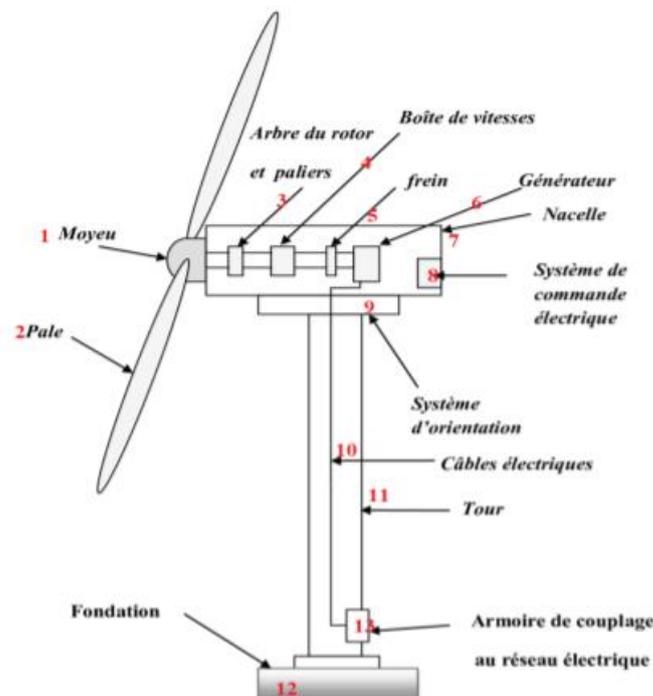


Figure 2.6: Principaux composants d'une éolienne [27].

2.7 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [39].

2.8 Pales éoliennes

Considéré comme les pales d'une éolienne ont pour rôle important de capter la vitesse du vent et de la transformer en force mécanique [27], elles sont caractérisées par :

- **Leur longueur** : le diamètre de l'hélice est en fonction de la puissance désirée et fixe la fréquence de rotation maximum que l'hélice ne devra pas dépasser (force centrifuge en bout de pale). Il faudra prendre en considération la fatigue et les risques de vibration, en particulier pour les longues pales.
- **Leur largeur** : La largeur des pales a une influence sur la puissance maximale théorique de l'aérogénérateur « Limite de Batz ». Elle fait partie des paramètres sur lesquels il faut jouer pour se rapprocher de cette limite (avec la forme du profil, le poids, le nombre de pales...) et elle influe sur le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale soit large. Pour obtenir des vitesses de rotation élevées, il est préférable d'opter pour des pales fines et légères.
- **Leur profil** : il est nécessaire de choisir le profil en fonction du couple désiré. Pour les aérogénérateurs de grande puissance (> 100 kW), pour la majorité des aérogénérateurs de faible et moyenne puissance les pales ne sont pas vrillées.
- **Leur nombre** : les rotors multiples procurent un couple élevé au démarrage mais sont peu efficaces par vent fort.
- **Leur matériau de construction** : le matériau utilisé pour la fabrication des pales n'implique pas de difficultés d'ordre aérodynamique mais plutôt des difficultés dans la construction et dans la résistance des matériaux. Les pales doivent répondre à plusieurs exigences :
 - ✓ Légèreté.
 - ✓ Non déformables.
 - ✓ Homogènes.

- ✓ Résistantes.
- ✓ Fatigue mécanique, vibrations.
- ✓ Corrosion et érosion (plus particulièrement dans le cas des éoliennes offshore).
- ✓ Mise en œuvre et usinage simple.
- ✓ Faible coût (rentabilité de l'aérogénérateur).

2.9 Différents types de matériaux

- **Le bois** : il est simple, facile à travailler, léger et résiste à la fatigue mais il a un manque d'homogénéité.
- **Le métal** : l'aluminium Al Si7Mg0.6 peut être utilisé. La technique utilisée est le moulage sable par gravité avec un noyau interne pour éviter la pale.
- **Les matières synthétiques composites, résines, fibres** : La fibre de verre est un excellent matériau pour la construction de pales. Les matériaux composites à base de fibres de verre ou de carbone imprégnées de résines polyester ou époxyde se sont généralisés et produisent un très bon rapport rigidité / masse.
- **Nanotubes** : les pales à nanotube de carbone en polyuréthane renforcé offrent une meilleure légèreté et une plus grande solidité que les pales classiques en fibre de verre [27].

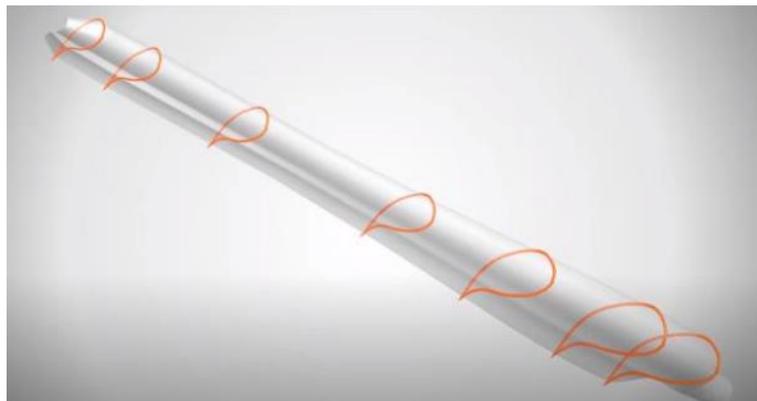


Figure 2.7: Pale éolienne [27].

2.10 Géométrie d'une pale éolienne

La forme d'une coupe verticale d'une pale est déterminée par les qualités aérodynamiques d'une pale. Un profil d'une pale présente une partie arrondie à l'avant appelée bord d'attaque, et une pointe à l'arrière appelée bord de fuite (Figure 2.8), une ligne joignant le bord d'attaque et le bord de la fuite appelée corde du profil, la distance maximale entre extrados et l'intrados représente l'épaisseur du profil comme le montre la figure 2.8. Les profils sont répartis le long de la pale de l'éolienne. L'extrados (le dessus de la pale) et l'intrados (le dessous) qui ont tous les deux une forme convexe (bombée), plus importante sur l'extrados que sur l'intrados. L'écoulement de l'air est plus rapide sur l'extrados que sous l'intrados [ZER, 2015] [40].

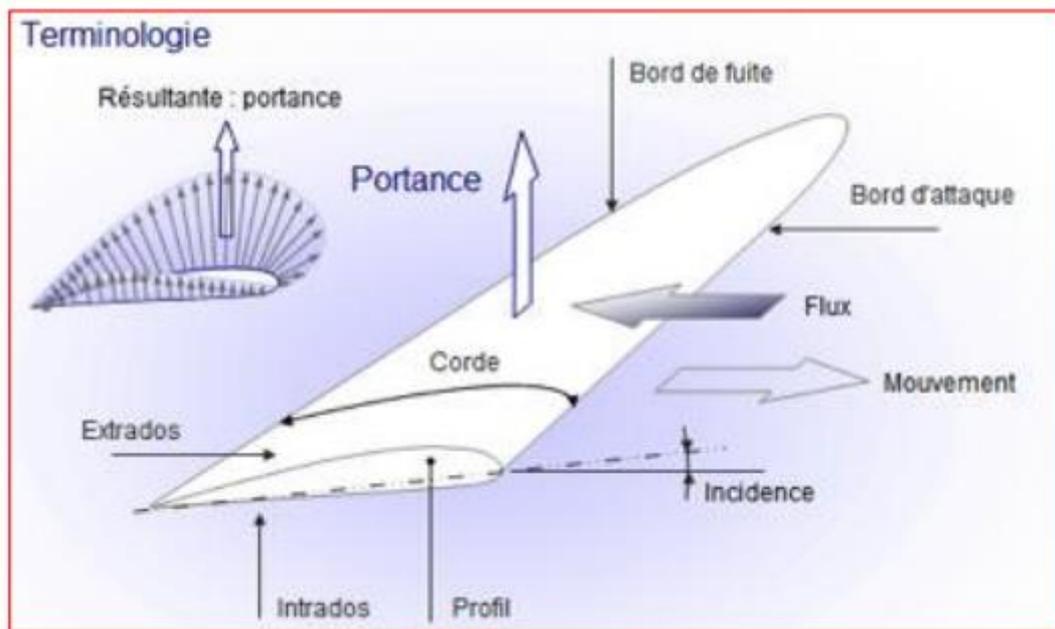


Figure 2.8: Géométrie d'une pale éolienne [40].

2.11 Pales éoliennes et les vibrations

Les pales d'éolienne sont de plus en plus longues, et elles sont fabriquées à partir de matériaux plus légers et plus flexibles, ce qui les rend sujettes aux flottements et aux tremblements. Le flottement aérodynamique est causé par des effets d'amortissement négatifs, qui peuvent survenir avec des vents suffisamment élevés, tandis que le tremblement est provoqué par les turbulences ou autres dérèglements tels que les sillages dans le champ de vent entrant [41].

2.12 Efforts sur une pale

La figure I.9 illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V . Du fait de la rotation, la pale est soumise en plus du vent incident de vitesse V , à un vent relatif U dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine .La composition de vitesses de ces deux vents, incident V et relatif U donne la vitesse du vent réel V_{rel} au quel est soumise la pale et pour la section transversale de l'élément de pale local, la vitesse réelles calculée comme :

$$\vec{V}_{rel} = \vec{U} + \vec{V} \quad (2.1)$$

Tel que la vitesse de vent relatif est donnée par :

$$U = r. \Omega_T \quad (2.2)$$

$$U = \lambda. V \quad (2.3)$$

Où :

r : est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m .

Ω_T : est la vitesse de rotation de la turbine en rd /s.

λ : est le rapport pointe-vitesse à la $i^{ème}$ section transversale de la pale [42].

λ ou TSR pour les éoliennes est le rapport entre la vitesse tangentielle de la pointe d'une pale et la vitesse réelle du vent V , le rapport vitesse de pointe est lié à l'efficacité, l'optimum variant avec la conception de pale. [43]

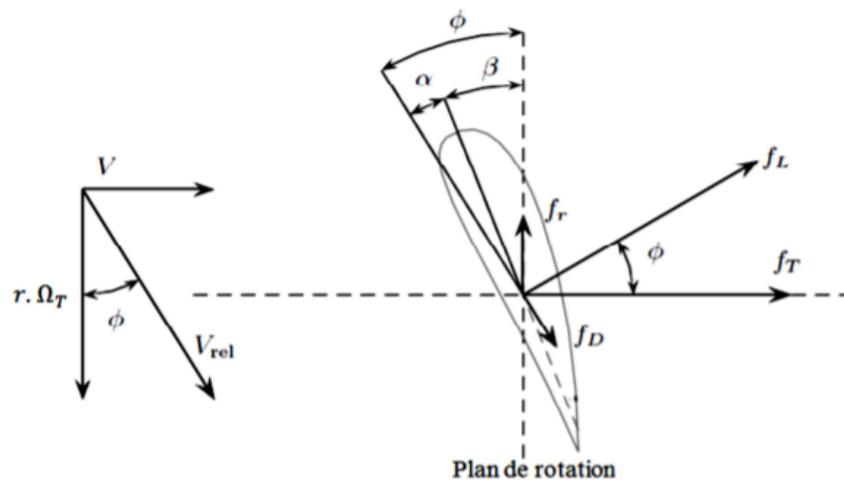


Figure 2.9: Efforts sur un élément d'une pale [32].

L'écoulement d'air crée une différence de pression en dessus et en dessous de la pale qui aura comme conséquence deux forces, l'une perpendiculaire à la direction du vent réel appelée la portance f_L et l'autre dans le même sens que V_{rel} appelée la trainée f_D . Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de trainée C_D . [33] [44]

$$f_L = \frac{\rho \cdot dS}{2} \cdot V_{rel}^2 C_L(\alpha) \quad (2.4)$$

$$f_D = \frac{\rho \cdot dS}{2} \cdot V_{rel}^2 C_D(\alpha) \quad (2.5)$$

Ou : ρ : Densité de l'air.

S : Surface balayée par les pales.

$C_D(\alpha)$. $C_L(\alpha)$: Coefficient de trainée et coefficient de portance respectivement.

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale par unité de longueur est donnée par :

$$F_T = \frac{\rho \cdot dS}{2} V_{rel}^2 \cdot [C_L(\alpha) \cdot \cos(\varnothing) + C_D(\alpha) \cdot \sin(\varnothing)] \quad (2.6)$$

Cette force doit être supportée par le rotor, la tour et les fondations. D'une autre part, la force tangentielle développe un couple de rotation qui produit le travail utile. Ce couple par unité de longueur est donné par :

$$C_T = \frac{\rho \cdot dS}{2} V_{rel}^2 \cdot r \cdot [C_L(\alpha) \cdot \sin(\varnothing) + C_D(\alpha) \cdot \cos(\varnothing)] \quad (2.7)$$

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la trainée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la trainée C_L/C_D est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine . [33]

Ces coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α (figure 2.10). Pour des angles α faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique [30].

Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la trainée. La trainée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles α importants [30].

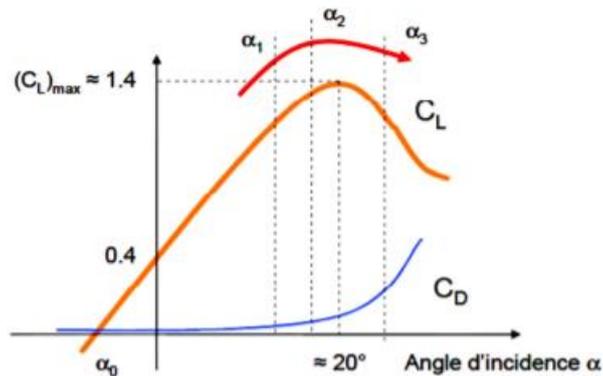


Figure 2.10: Evolution des coefficients de portance C_L et de trainée C_D . [39]

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné présenté une étude détaillée sur les l'énergies éoliennes et on a donné les Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne et les différents types de turbines (l'éolienne à axe verticale et l'éolienne à axe horizontale). Nous avons aussi montré les principales composantes d'une éolienne à axe horizontale et donné l'élément principal du fonctionnement de l'éolienne (les pales éoliennes) et donnait la définition des pales la conception et la modélisation géométrique détaillée des deux structures mécaniques des pales. Nous avons aussi montré efforts sur une pale.

Chapitre 3 :
Le contrôle de vibration par
les méthodes non linéaires
des pales éoliennes

Chapitre 3:

Le contrôle de vibration par les méthodes non linéaires des pales éoliennes

3.1 Introduction

L'amortissement des vibrations est l'une des manifestations de la dissipation de l'énergie mécanique liée au mouvement dans un système mécanique. Parfois, le simple fait de modifier la rigidité ou la masse du système pour modifier les fréquences de résonance peut réduire les vibrations tant que la fréquence d'excitation ne change pas. Mais dans la plupart des cas, les besoins énergétiques des vibrations. Le contrôle des vibrations à l'aide d'éléments piézoélectriques est un sujet de recherche prioritaire pour de nombreux secteurs industriels notamment dans le domaine des transports où les structures sont souvent embarquées. Dans ce cas, la structure est soumise à excitation large bande. Ensuite, le contrôle doit cibler certains modes structures, en particulier celles qui limitent leur durée de vie lorsqu'elles sont excitées structure. effectuer ce contrôle dans le cas d'une structure encastree, L'énergie nécessaire pour entraîner l'actionneur doit être minimale pour éviter d'avoir recours à des amplificateurs encombrants [22]. Dans ce chapitre nous allons essayerons d'amortir les vibrations de la pale éolienne a tavers les matériaux piezoélectriques en utilisant la technique semi-passive SSDI modal et on voit sa performance dans ce système.

3.2 Modélisation d'une pale intelligente par les éléments piézoélectriques

Le comportement électromécanique général de la structure mécanique (pale avec éléments piézoélectriques) pourvue d'éléments piézoélectriques [45], est régi par les équations (3.1) et (3.2). La première est dite équation d'état mécanique et la deuxième est dite équation d'état électrique:

$$m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k^E\delta = -\alpha V + \beta F \quad (3.1)$$

$$I = \alpha^t \dot{\delta} - C_0 \dot{V} \quad (3.2)$$

δ : le vecteur de déplacement.

m : matrice de la masse.

c : matrice de l'amortissement.

k^E : matrice de la rigidité lorsque les patchs piézo-électriques sont en court-circuit.

V : est le vecteur de tension des patch i piézoélectrique.

I : est le vecteur du courant électrique.

C_0 :est la capacité piézoélectrique du patch.

F :est la force externe appliquée sur la structure.

α :matrice de couplage électromécanique.

Définissons ϕ la matrice des modes propres de la structure mécanique limitée à n premiers modes et effectuons le changement de variable suivant :

$$\delta = \phi q \quad (3.3)$$

Où q est le vecteur de déplacement modal de la structure.

Les équations (3.1) et (3.2) deviennent :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K^E q = -\Theta V + \beta F \quad (3.4)$$

$$I = \Theta^t \dot{q} - C_0 \dot{V} \quad (3.5)$$

Avec

$$\Theta = \phi^t \alpha \quad (3.6)$$

Θ : est la matrice modale de couplage électromécanique. M , C et K^E sont respectivement les matrices modales de masse, d'amortissement et de rigidité de la structure.

Normalisation des équations constitutives

L'équation (3.4) est normalisée afin de définir les paramètres suivants:

$$M = I_d \quad (3.7)$$

$$C = 2diag(\xi)diag(\omega^D) \quad (3.8)$$

$$dK^E = diag((\omega^E)^2) \quad (3.9)$$

Avec ξ est l'amortissement modal, ω^E est la fréquence du transducteur en court-circuit et ω^D est la fréquence en circuit-ouvert.

Dans le cas général, la structure est instrumentée à la fois par des capteurs et des actionneurs. En séparant la tension des actionneurs V_a de celle des capteurs V_s et lorsque la tension du capteur est mesurée par un amplificateur de tension (donc l'intensité du capteur est nulle), les équations (3.4) et (3.5) deviennent:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K^E q = -\Theta_a V_a - \Theta_s V_s + \beta F \quad (3.10)$$

$$\Theta_s^t - C_{0s} V_s = 0 \quad (3.11)$$

Par substitution de (3.7) en (3.6) on trouve:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + (K^E + \Theta_s (C_{0s})^{-1} \Theta_s^t) q = -\Theta_a V_a + \beta F \quad (3.12)$$

Le système d'équations linéaires (3.10) et (3.11) peut être écrit sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + BU \\ y = Cx \end{cases} \quad X = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Avec:

- Le vecteur de commande $U = [F \ V_a]$ est composé de la force mécanique extérieure que le système subi et les tensions des actionneurs appliquées pour l'amortissement.
- Le vecteur de sortie $y = [q \ \dot{q} \ V_s]$ est composé des déplacements modaux de la structure avec ses variations temporelles et des tensions des capteurs utilisées par la suite par l'observateur modal.
- Les matrices A, B, C sont des matrices d'état du système données par:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_d \\ -M^{-1}(K^E + \Theta_s C_{0s}^{-1} \Theta_s^t) & -M^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ +M^{-1}\beta \quad -M^{-1}\Theta_a \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$C = \begin{bmatrix} I_d & 0 \\ 0 & I_d \\ C_{0s}^{-1}\Theta_s^t & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

La valeur de la tension des actionneurs V_a est calculée par l'expression suivante:

$$V_a = C_{0a}^{-1} \Theta_a^t q \quad (3.17)$$

C_{0a} et C_{0s} sont les matrices des capacités des actionneurs et des capteurs utilisés, respectivement.

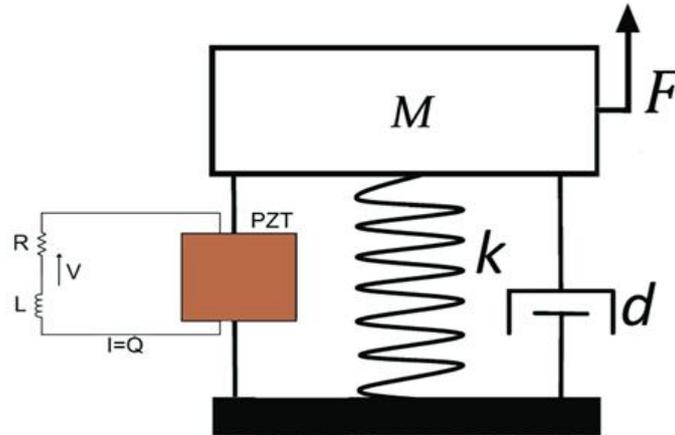


Figure 3.1: Le concept du contrôle acoustique shunt piézoélectrique pour le contrôle des vibrations des systèmes mécaniques [46]

Tableau 3.1: Caractéristique de la structure instrumentée d'éléments piézoélectriques.

Propriétés des éléments piézoélectriques	
Densité	$\rho_c = 7700 \text{ kg.m}^{-3}$
Permittivité à déformation constante	$E_{11}^s = 12.75 \times 10^{-9} \text{ F/m}$ $E_{33}^s = 7.411 \times 10^{-9} \text{ F/m}$
Souplesse en circuit fermé	$S_{11}^E = 15.44 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{N}$ $S_{11}^E = 20.09 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{N}$
Constantes piézoélectriques	$d_{31} = -186 \text{ pC.N}^{-1}$ $d_{33} = 425 \text{ pC.N}^{-1}$
Largueur	$b = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
Epaisseur	$h = 0.00043 \text{ m}$
Longeur des 1 ^{er} et 2 ^{eme} élément piézoélectrique (actionneurs)	$l_A = 0.050 \text{ m}$
Longeur des 3 ^{eme} et 4 ^{eme} élément piézoélectrique (capteurs)	$l = 0.025 \text{ m}$

Position des 1 ^{er} et 2 ^{eme} éléments piézoélectrique (actionneurs)	$x_A = 1.0 \times 10^{-3}$
Position des 3 ^{eme} éléments piézoélectrique (actionneurs)	$x_{c1} = 9.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
Position des 4 ^{eme} éléments piézoélectrique (capteurs)	$x_{c2} = 13 \times 10^{-3} \text{ m}$

3.3 patchs piézoélectriques

Ce sont des éléments piézoélectriques parfaitement collés de part et d'autre de la plaque (la structure à utiliser). il a une capacité représente la quantité de charge stockée pour un potentiel donné. Il mesure donc l'énergie (mécanique et/ou électrique) stocké par unité de tension. Dans le cas du blocage (ou de l'encastrement) d'éléments piézoélectriques, L'application d'un potentiel signifie que la charge n'est stockée que dans une forme électrique. A l'inverse, lorsque l'élément est libre, la charge est stockée dans forme électrique et mécanique. [47] et il est à noter que utilisé pour deux role soit comme capteur ou actionneur aussi.

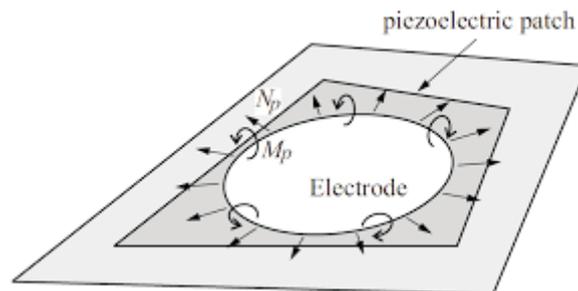


Figure 3.2: Illustration montrant les efforts appliques par une électrode (théorie des plaques). [48]

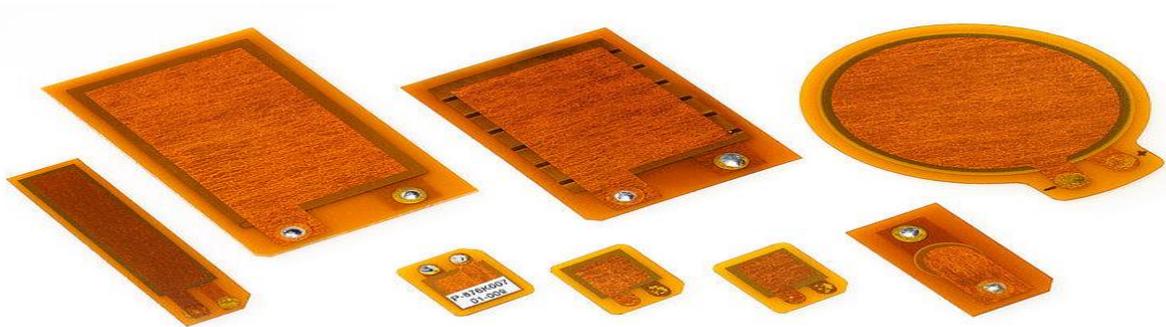


Figure 3.3: Patches piézoélectriques [49]

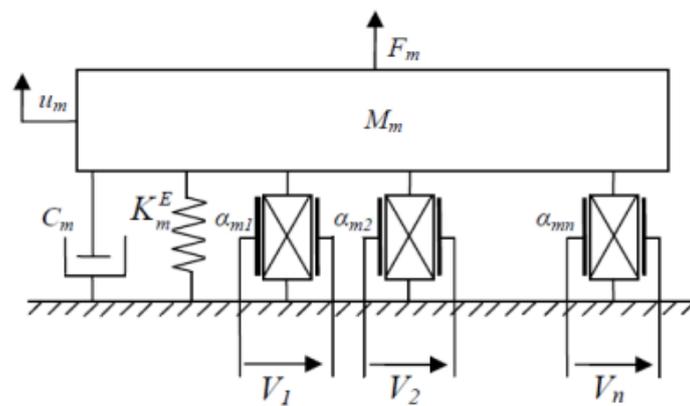


Figure 3.4 : Modèle (masse, ressort, amortisseur) d'une structure munie de n inserts piézoélectriques pour un mode m . [50]

3.4 Définition de la structure intelligente

La structure qui sera utilisée dans les simulations et les analyses suivantes est une pale éolienne serrée équipée de quatre inserts piézoélectriques (2 capteurs et 2 actionneurs). Ses dimensions et les propriétés physiques sont données dans le tableau 3.2. La figure 3.5 illustre cette pale représentant un élément vibrant. Cette structure a été identifiée selon le modèle décrit. Le processus de mesure et d'identification des paramètres est décrit dans

Les caractéristiques des pales	
Type de profile	NACA 4412
Nombre des pales	3
Longeur de pale	600 mm
Largeur des base des pales	100 mm
Largeur de la point des pales	50 mm

Tableau 3.2: Les caractéristiques des pales.

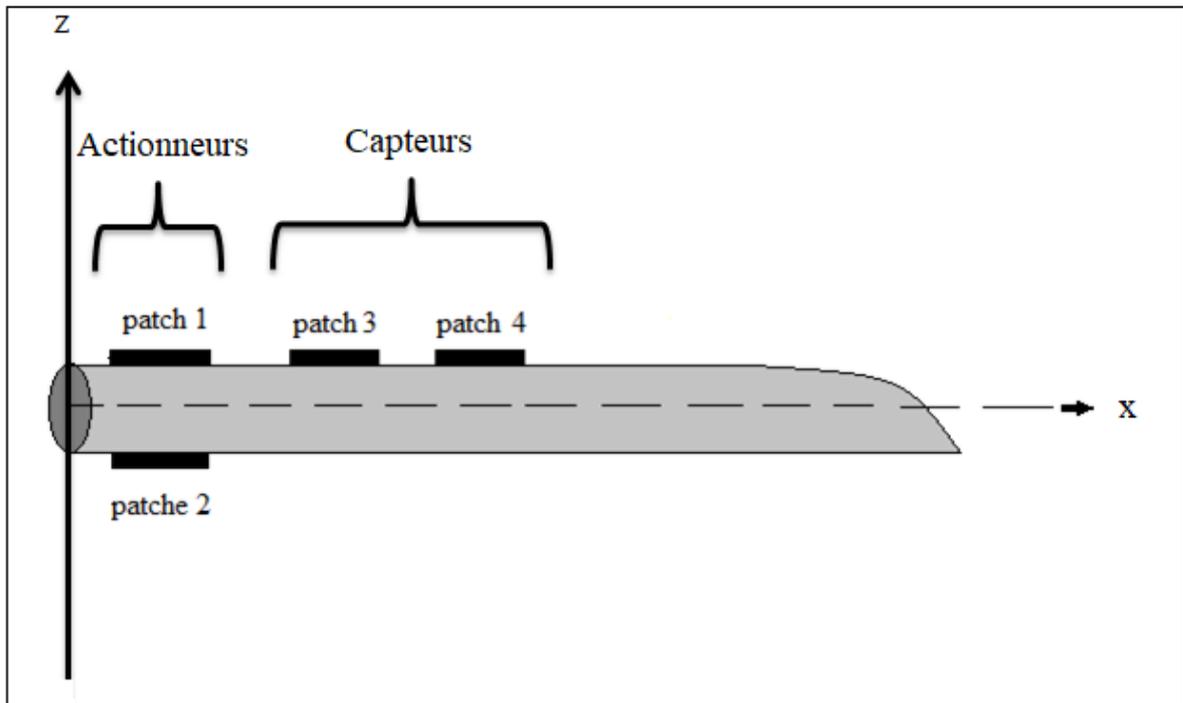


Figure 3.5: la structure approximatif de la pale après l'insert des éléments piézoélectriques.

3.5 SSDI modal

La stratégie du contrôle SSDI modal est résumé dans la figure 3.6. La tension aux bornes de l'actionneur (a) est inversée lorsque le déplacement modal du mode choisi est extrémal. Cibler plusieurs modes implique l'utilisation de plusieurs actionneurs. Chaque actionneur permettant de contrôler un mode de la structure, cette méthode nécessite autant d'actionneurs que de modes à contrôler.

Afin d'inverser la tension aux bornes de l'actionneur, un circuit nommé " SSDI " est connecté à l'actionneur (c). Ce circuit est composé d'une inductance adaptée au mode ciblé et d'un interrupteur. Chaque actionneur est relié à son propre circuit SSDI. La fermeture de l'interrupteur implique l'inversion de la tension. Ainsi, afin d'inverser la tension à l'instant adéquat, l'interrupteur doit être fermé lorsque le déplacement modal du modal ciblé est extrémal. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer les déplacements modaux q . Ne pouvant être directement mesurés, ils sont déterminés grâce à une observateur modal (b) qui les estime à partir des tensions piézoélectriques données par les capteurs (a). Cette méthode présente l'avantage de ne requérir aucune énergie pour alimenter les actionneurs. Seule une énergie de commande très faible est nécessaire pour alimenter l'interrupteur de chaque contrôleur SSDI ainsi que pour alimenter le processus sur lequel est implémenté l'observateur modal. [22]

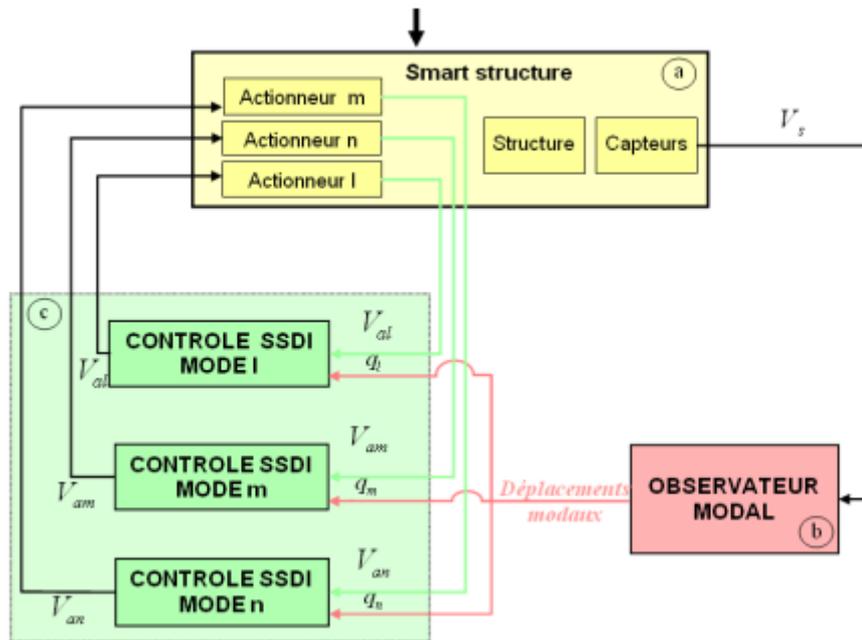


Figure 3.6: Principe du contrôle SSDI modal [22].

3.6 Observateur modal

Afin de cibler certains modes du système par le contrôle, il est possible de modéliser le système dans l'espace modal c'est-à-dire en considérant chacun des modes indépendamment les uns des autres. Cette méthode est fréquemment utilisée en contrôle actif dans le but de contrôler certains modes du système à partir de leurs déplacements et vitesses modaux. Ces deux variables - déplacements et vitesses modaux - n'étant pas accessibles directement via les mesures, il est nécessaire de les estimer. Le but de l'observateur est donc de reconstruire les déplacements et vitesses modaux, sans connaître les perturbations du système.

Pour ce faire, l'observateur utilise un modèle de la structure pour fournir des mesures indirectes d'une ou plusieurs variables (dans notre cas, déplacements et vitesses modales) à partir de variables connues et mesurées (tension aux bornes des capteurs). L'observateur consiste à faire tendre en boucle fermée, le calcul des mesures qu'il a estimé à l'aide du modèle de la structure vers les mesures réelles [22].

3.7 Simulation et analyse

Le travail proposé consiste principalement en une simulation numérique du mouvement (déplacement) de la structure et du réseau d'amortissement à l'aide du logiciel Matlab / Simulink. et nous utiliserons la technique SSDI modal pour trois modes mais allons analyser un seul mode (q_1) pour simplifier l'étude.

- a) Dans premier étape on commence par l'effet de rapport vitesse de point (λ) illustrée dans la figure 3.7:

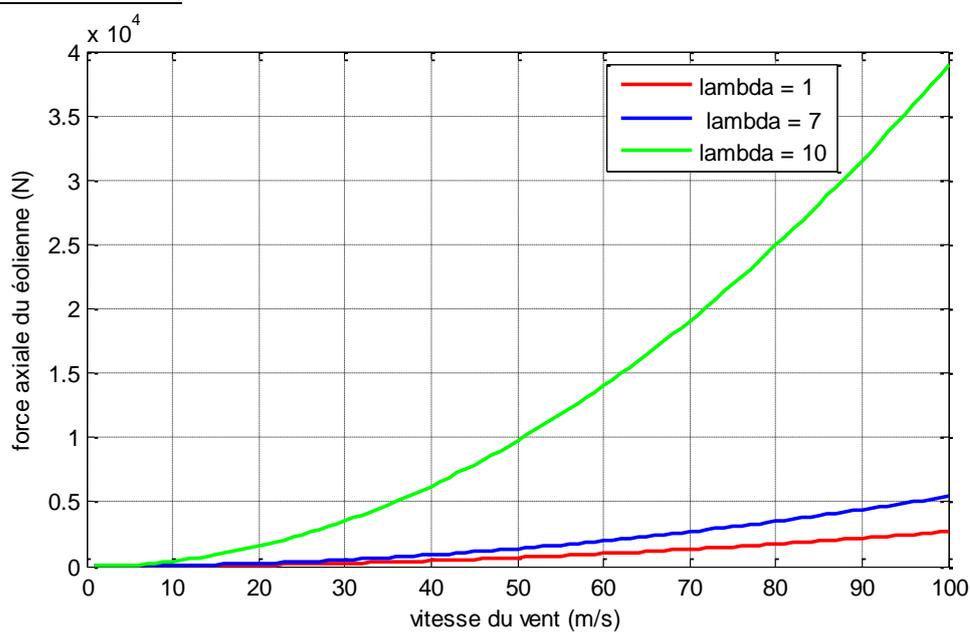


Figure 3.7: Variation de la force axiale du éolienne NACA4412 en fonction de la vitesse du vent à différents valeur du lambda λ (TSR).

L'objectif de ces courbes est de comprendre l'influence de lambda sur la force exercée sur la lame en donnant des valeurs différentes de λ et en voyant l'effet à chaque fois. Nous remarquons qu'il existe une corrélation positive, c'est-à-dire que plus la valeur lambda est élevée, plus la force est grande.

- b) Dans la deuxième partie nous allons cibler la simulation de déplacement avant et après l'applique la méthode SSDI modal et sans oublier la tension d'actionneur et on nous rappelle également étudierons un seul mode q_1 .

➤ 1^{ère} cas : pour $\lambda=1$

Excitation :

Signal aléatoire du **Variance**= 2.7047e+06 et **Moyen**= 1.8459e+03 et pour $\lambda=1$

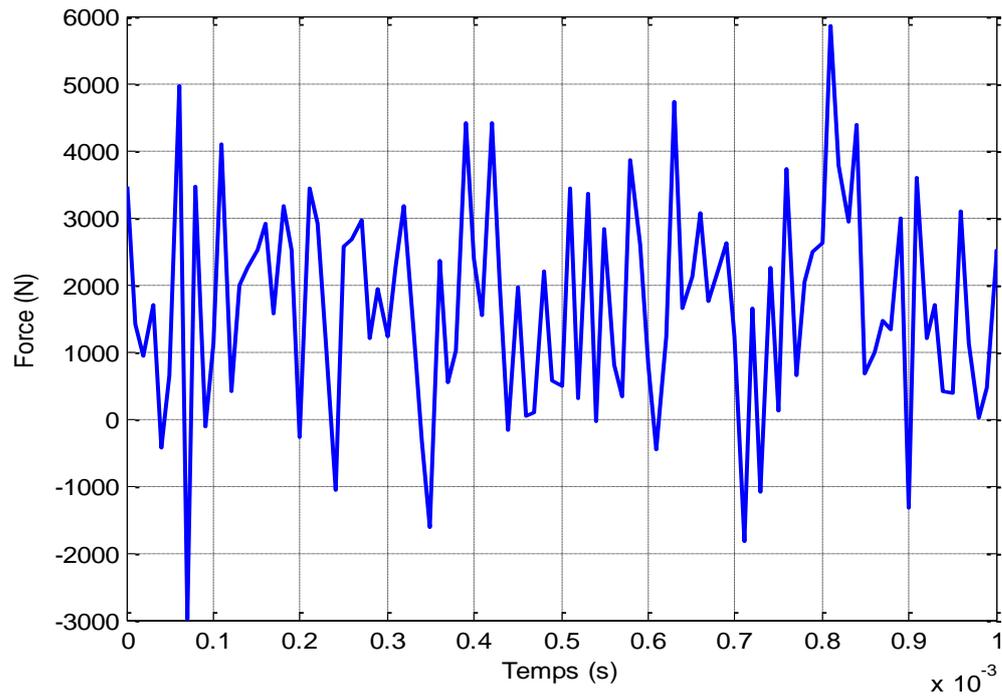


Figure 3.8: Signal aléatoire de la force axiale en fonction temps avec $\lambda = 1$.

Le signal dans la figure 3.8 représente la force axiale qui appliquée sur la pale en fonction du temps dans le cas $\lambda = 1$, Il exprime les vibrations que nous allons afin de les amortir.

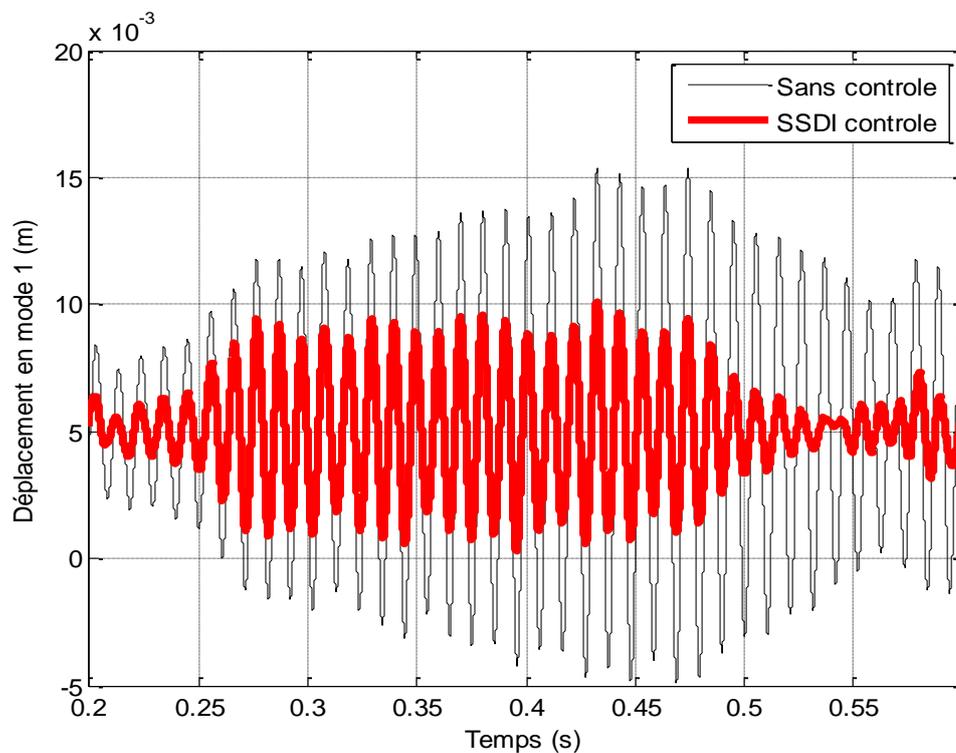


Figure 3.9: Déplacement de mode 1 pour le cas $\lambda = 1$.

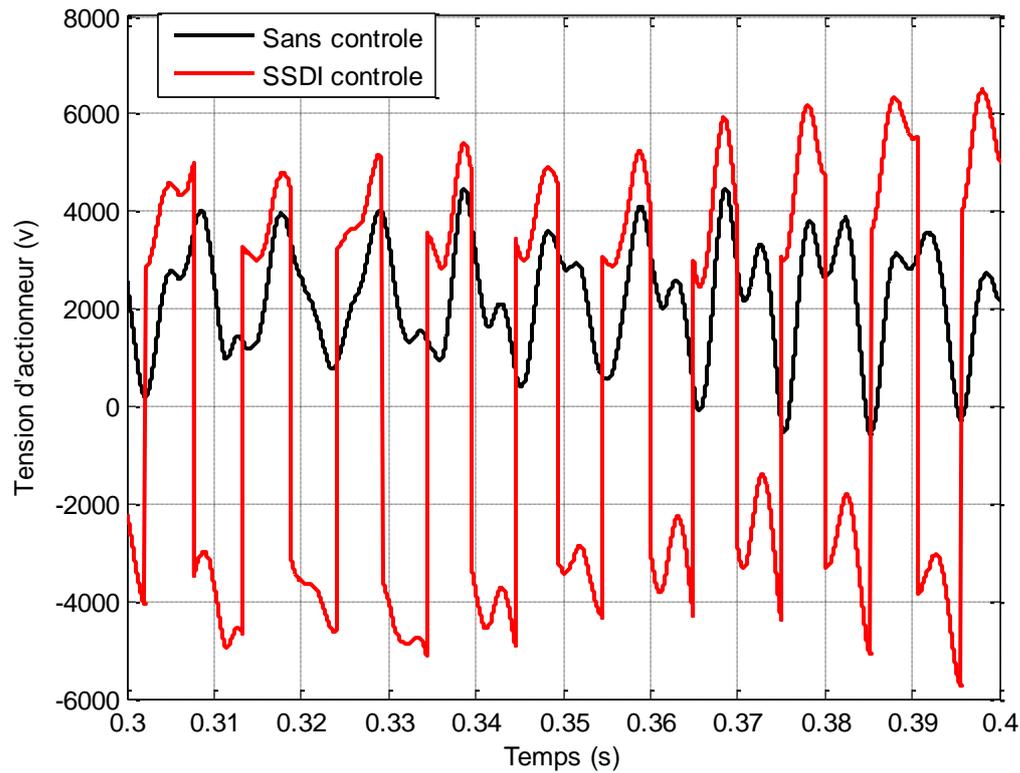


Figure 3.10: Tension aux bornes de l'actionneur pour cas $\lambda = 1$.

A partir de la figure 3.9 et après l'utilisation de la contrôle SSDI modal on remarque que il y un diminution notable dans le déplacement cette diminution montre l'effet de l'amortissement SSDI sur la structure vibrant (la pale éolienne) et prouvé son efficacité sur l'amélioration de performances et concernant la figure 3.10 qui illustre la tension aux bornes de l'actionneur on observe une grande augmentation dans son amplitude après le controle cela explique le premier résultat, parce que cette croissance de tension est la raison de l'augmentation des performances d'actionneur et donc amélioration de d'amortissement.

➤ **Deuxieme cas pour $\lambda = 7$**

Excitation:

Signal aléatoire du **variance= 6.6684e+07** et **moyen= 9.1358e+03** et pour $\lambda=7$

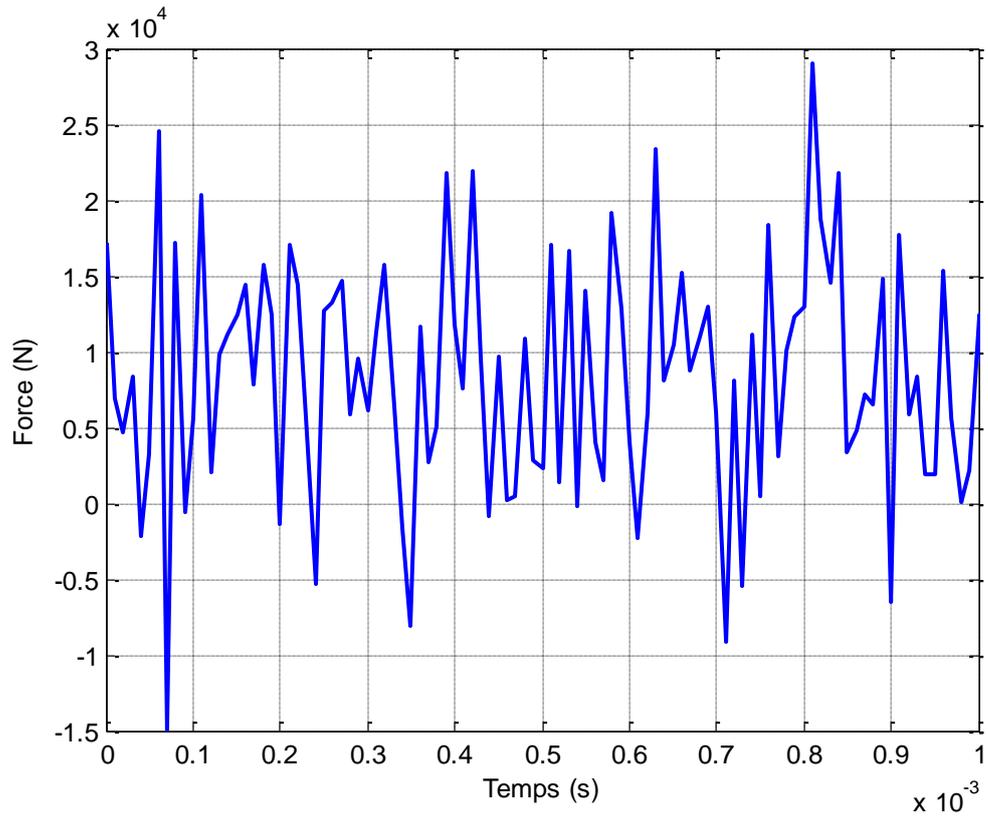


Figure 3.11: Signal aléatoire de la force axiale en fonction de temps avec $\lambda = 7$.

Comme le cas précédant la figure 3.11 représente la force axiale qui appliquée sur la pale en fonction du temps mais cette fois nous prendrons $\lambda = 7$ pour détecter la différence pour les deux cas.

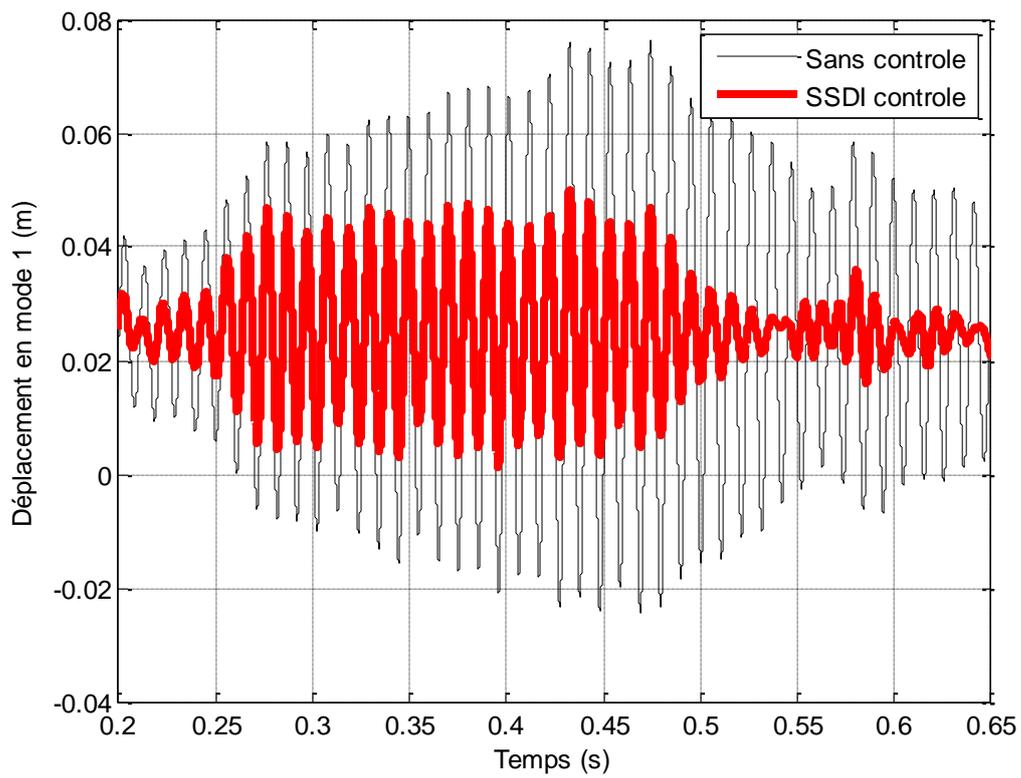


Figure 3.12: Déplacement de mode q_1 pour le cas $\lambda = 7$.

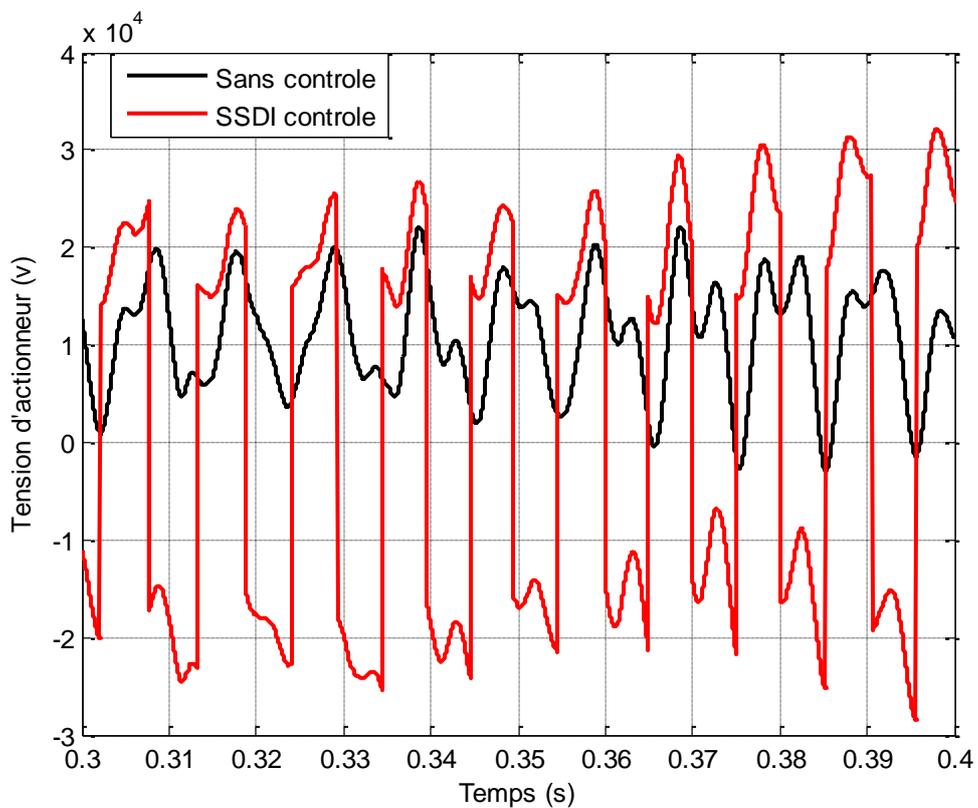


Figure 3.13: Tension aux bornes de l'actionneur pour cas $\lambda = 7$.

Dans le deuxième cas la valeur de λ est plus élevée donc la force est élevée aussi comme nous l'avons vu plus haut sur la figure 3.7 mais à travers la figure 3.12 on remarque que le déplacement est également diminué, l'amortissement n'est pas affecté par le changement de la valeur " rapport vitesse de point λ " et la technique SSDI il rest efficace ,et concernant la tension aux bornes de l'actionneur elle est bien sûr augmenté parce que le déplacement diminue tel que il existe une relation inverse entre eux.

3.8 Conclusion

La commande SSDI modal offre très bon performances par rapport le cas de sans contrôle, il a montré son efficacité pour amortir les vibrations et ainsi augmenter la durée de vie de la lame. Cependant cette technique peut également être améliorée. Elle est basée sur un observateur modal, permettant le calcul des diverses coordonnées modales utilisé pour le mieux ciblage de mode, son avantage est qu'aucune alimentation n'est nécessaire pour faire fonctionner les actionneurs. Seule une énergie de commande très faible est nécessaire pour alimenter l'interrupteur de chaque contrôleur SSDI ainsi que pour alimenter le processus sur lequel est implémenté l'observateur modal.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les vibrations mécaniques sont présentes dans pratiquement toutes nos vies. Nous pouvons en tirer parti en convertissant leur énergie mécanique en énergie électrique, d'une part ils fournissent une source d'énergie renouvelable très importante. En revanche, ses effets néfastes sur certains domaines stratégiques de la vie quotidienne l'exigent souvent (prenons l'exemple des éoliennes), ils doivent donc être réduits voire supprimés. Ces deux applications sont : la récupération d'énergie ambiante et l'amortissement des vibrations, et l'objectif principal de cette thèse était de mettre en œuvre des systèmes permettant de contrôler le bruit et les vibrations provoqués par les pales éoliennes. Ce travail repose sur l'ajout de matériaux intelligents (piézoélectriques dans notre cas) à la structure (pale éolienne) afin d'amortir ou de réduire les vibrations. Notre manuscrit est composé de trois chapitres :

Chapitre I : dans ce chapitre, nous donnons un aperçu générale sur les matériaux intelligents, puis on a approfondie sur les matériaux piézoélectriques par un description plus détaillée sur plusieurs aspects (définitions, propriétés , équations qui régissent la piézoélectricité, leur application, et avantage inconvénient de ces matériaux) et concernant la 2^{ème} on a présenter un description technique du contrôle des vibrations tel que nous avons commencer par une explication détaillée sur les méthodes de contrôle des vibrations de leurs trois classe (active - passive - semi passive / semi active) et puis on a abordé les techniques SSD, qui ont également trois types de base (SSDS - SSDI - SSDV) avec leur principe de fonctionnement et ses différents composants.

Chapitre II : le deuxième chapitre expose une étude détaillée sur l'énergie éolienne où nous avons vu les différents composantes d'une éolienne (à axe horizontale en particulier) et leur fonctionnement mais on a basé sur les pale en tant que composante essentielle de notre travail à partir la présentation de son conception, modélisation géométrique et explique les efforts appliquée sur une pale.

Chapitre III : Nous avons vu une nouvelle technique développée à partir des précédentes, connu sous le nom la SSDI modal qui se caractérise par la possession d'un observateur modale. Où après la simulation numérique du mouvement (déplacement) de la structure et la tension au born d'actionneur à l'aide du logiciel Matlab / Simulink cette technique a donné une très bonne performance (plus efficace par rapport la cas de sans contrôle) dans l'amortissement des vibrations, ce qui signifie une durée de vie plus longue de la pale éolienne.

Bibliographie

- [1] M. H. H. K. T. T. J. L. F. B. J. J. F. Rasmussen, «Present status of aeroelasticity of wind turbines,» chez *Wind Energy*, vol. 6, 2003, pp. 213-228.
- [2] D. WU, «Amortissement semi-actif de structures par éléments piézoélectriques connectés en réseaux,» chez *thèse doctorat*, Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) de l'INSA de Lyon, 29 Août 2013.
- [3] M. A. Trindade, «thèse de doctorat Contrôle hybride actif-passif des vibrations de structures par des matériaux piézoélectriques et viscoélastiques :poutres sandwich/multicouches intelligentes» 03 04 2006.
- [4] K. LI, «Structural vibration damping with synchronized energy transfer between piezoelectric patches,» lyon, Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) de l'INSA de Lyon, september 2011.
- [5] J. D. ROSNAY, «LES MATERIAUX INTELLIGENTS,» *Définition et exemples d'applications*, p. 1, 4 10 2000.
- [6] W. Adoum, «THESE DE DOCTORAT:Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme,» *ETAT DE L'ART*, p. 5, 12 09 2016.
- [7] «LES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORM» notice explicatif www.mineis.com.
- [8] «https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_à_mémoire_de_forme».
- [9] J. Joule, « Sur une nouvelle classe de forces magnétiques,» *Annales de l'électricité, du magnétisme et de la chimie*, 12 07 2009.
- [10] «Questions & réponses sur les phénomènes scientifiques quotidiens,» *Scritronscience.com.* , Récupéré le 11/08/2012..
- [11] «Matériaux Electroactifs et Applications». <https://matelec2020.sciencesconf.org>.
- [12] F. Boukazouha, «Conception, Réalisation, Modélisation et Caractérisation Expérimentale d'un Transformateur de Tension de Type Rosen,» 17 01 2016.
- [13] «Piézoélectricité : qu'est-ce que c'est ?». <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-piezoelectricite-4807/>.
- [14] A.HAJJAJI, «Caractérisation multi échelle et lois de comportement dans les matériaux ferroélectriques» chez *Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de lyon*, lyon, 2007, p. 172 .

-
- [15] R. BEDINA, «La piezoelectricité pdf» univ mesila, 2016.
- [16] «<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Piezoelectricite-.html>».
- [17] D. VASIC, «Apports des matériaux piézoélectriques pour l'intégration hybride et monolithique des transformateurs» chez , Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE, UMR 8029)Ecole Normale Supérieure de Cachan 61, avenue du président Wilson 94230 CACHAN , 26 juin 2003.
- [18] E. Labouré, G. Feld, E. Hoang et B. Revol, «Mesure de la déformation d'un matériau piézoélectrique par interférométrie,» École normale supérieure de Cachan, 61 avenue du Président Wilson.
- [19] B. kouider, «contrôle active de vibration par les matériaux piézoélectrique» 2012.
- [20] F. Kochtbène, «Contrôle actif des vibrations en fraisage» chez *thèse doctorat*, paris , 21/12/2017, 2017, p. 24.
- [21] L. YAN, «thèse de doctorat :Contrôle de vibrations large bande à l'aide d'éléments piézoélectriques utilisant une technique non-lineaire» *etet de l'art* , 04 10 2013.
- [22] S. HARARI, «Contrôle modal semi-actif et actif à faible consommation énergétique par composants piézoélectriques» INSA de Lyon, 2009.
- [23] «Étude expérimentale d'un système actif de contrôle des vibrations par matériau piézoélectrique». *in Mémoire présenté Dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie En vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M. Sc. A., *UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI)*.
- [24] E. Babasse, «thèse doctorat :contrôle vibratoire semi actif par élément piézoélectrique et récupération d'énergie ambiant» université farhat abbas -setif, 2018.
- [25] S. Mohammadi, «Semi-passive vibration control using shunted piezoelectric materials» INSA.Lyon, France , 2 July, 2008.
- [26] K. L, «thèse doctort :Amortissement vibratoire avec échange d' énergie synchronisé entre des éléments piézoélectriques» september 2011.
- [27] A. I. E. A. ZAHRA, «DEFINITION DU CHOIX TYPE D'UNE EOLIENNE APPLICATION DANS UN SITE FAVORABLE» chez *TECHNIQUE DES EOLIENNE*, 09/09/2020.
- [28] D. Mohamed, «Amélioration de la performance de pale éolienne par considération des paramètres locaux et prend en compte les phénomènes des pertes» 04/07/2018.

-
- [29] G. YAICHI, « Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur » 06/06/2018.
- [30] T. ZOHEIR, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » 2010.
- [31] S. Fortuné, « ÉTUDE ET CONCEPTION D'UNE CENTRALE EOLIENNE COUPLÉE AU RESEAU ELECTRIQUE AVEC GROUPES ELECTROGENES DE SECOURS : CAS DE L'HÔTEL BENIN MARINA DE COTONOU » chez *Conception du nouveau système d'alimentation en énergie électrique de l'hôtel*, 24/11/2015.
- [32] M. SAMIR, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » 2009.
- [33] N. LAVERURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » 2005.
- [34] [eolien-domestique-eolienparticuliers.html](#).
- [35] HADJIDJ.S, « Conception, modélisation, simulation et optimisation d'un projet d'une ferme éolienne Implantation sur site favorable », juin 2019.
- [36] p. MONJEAN, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu », 26/09/2012.
- [37] L. kerner, « Interaction sol-structure sous sollicitations cycliques dynamiques : Application aux éoliennes offshore fondées sur monopieu . Géotechnique., » 2017.
- [38] ALbadi, « techno-economic evaluation of wind-based DG » 2010.
- [39] L. M. Tahar, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolienne » chez *Etat de l'Art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne*, 24 /06 /2012.
- [40] M. C. e. B. OMARI, « CONCEPTION, MODÉLISATION STATIQUE & FABRICATION DES PALES D'ÉOLIENNE DE TYPE DARRIEUS » chez *Conception Assisté par Ordinateur DAO/CAO de deux Pales*, 2015.
- [41] « Réduire les vibrations dues au vent pour les ponts et les pales d'éolienne » 1 Mars 2014.
- [42] Y. L. M. & X. J. Wang, « Damage detection method for wind turbine blades based on dynamics analysis and mode shape difference curvature information. Mechanical Systems and Signal Processing » 2014.
- [43] W. DAVID, « Small Wind Turbines Analysis, Design, and Application ». *Introduction to*

Wind Turbine Technology.

- [44] M. O. L. HANSEN, «Aérodynamiques of Wind Turbines », 2008.
- [45] S. b. hadjer et R. dahmar, «Amélioration des performances de controle de vibration par les structures intelligent,» 2019.
- [46] k. marakakis, g. tairidis, p. koutsianitis et g. stavroulakis, «Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review» mai 2019.
- [47] C. A. B. Zehar, «L'amortissement multimodal des vibrations d'une structure intelligente à l'aide de la technique SSDI-Max» March 2017.
- [48] A. Preumont, «Vibration control of active structures» Kluwer academic pubischer, 2002.
- [49] «<https://www.pifrance.fr/fr/produits/transducteurs-et-actionneurs-piezoelectriques/p-876-duraact-patch-transducer-101790/>».
- [50] T.richard, «diminution du coefficient de transmission acoustique d'une paroi à l'aide d'amortisseurs piézoélectrique semi-passifs» chez *thèse de doctorat de laboratoire de genie électrique et ferroéletricité de L'INSA*, 2007.