

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 : Energie renouvelable

Par

- **Belguerri Youcef**
- **Lazreg Ayoub**

Intitulé

*Amélioration de l'amortissement de vibration par un système
hybride*

Soutenu le : 02/07/2023

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>

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Premièrement, on tient à remercier le tout-puissant ALLAH qui nous a procuré la volonté, la force et la connaissance pour accomplir ce modeste travail.

Ont tiens à exprimer du fond du cœur nos sincères gratitude et remerciements à tous les professeurs de l'Université des Sciences et Techniques, Mohamed Bachir El Ebrahimi, Bordj Bou Arreridj, en particulier notre encadreur, le professeur chérif Aida, on tiens en particulier à exprimer nos sincères gratitude aux membres du comité de discussion pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Sans oublier la soeur yakoubi hadja pour son aide, ses efforts et conseils à notre égard.

Enfin, nos remerciements à tous ceux qui nous a soutenu de près ou de loin pour la réussite de ce travail.

Table des matières

Titre	Page
Remercient	
Liste de figure	
Liste de tableaux	
Liste d'abréviation	
Introduction général	1
Chapitre 1: Généralités sur les matériaux intelligent	
1.1 Introduction	4
1.2 Définition des matériaux intelligents	4
1.3 Types des matériaux intelligents	4
1.3.1 Matériaux magnétostrictifs	5
1.2.3 Matériaux électrostrictifs	5
1.3.3 Alliages à Mémoire de Forme	5
1.3.3.1 Définition	5
1.3.3.2 Famille d'alliage	5
1.3.3.3 Caractéristique des AMF	6
1.3.3.4 Effet mémoire de forme	7
1.3.3.5 Applications des AMF	9
1.3.4 Matériaux piézoélectriques	13
1.3.4.1 Définition de la piézoélectricité	13
1.3.4.2 L'effet piézoélectrique	13
1.3.4.3 Equations de la piézoélectricité	14
1.3.4.4 Coefficients de Couplage électromécanique	16
1.3.4.5 Classes cristallines	16
1.3.4.6 Applications des matériaux piézoélectriques	18
1.4 Conclusion	19
Chapitre 2 : Contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques	
2.1 Introduction	21
2.2 Méthodes de contrôle	21
2.2.1 Contrôle passif	21
2.2.1.1 Définition	21
2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif	22
2.2.2 Contrôle actif	22
2.2.2.1 Définition	22
2.2.3 Contrôle semi-actif	23
2.2.4 Contrôle semi-passif	24
2.2.4.1 Technique SSDS « Synchronised Switch on Short circuit »	24
2.2.4.2 Technique SSDI « Synchronised Switch Damping on Inductor »	25
2.2.4.3 Technique SSDV « Synchronised Switch Damping on voltage source » :	26
2.2.5 SSDI modal	27
2-2-6- SSDI-Max	28

2.3 Conclusion	28
Chapitre 3 : Energie éolienne	
3.1 Introduction	30
3.2 Définition	30
3.3 Avantages et inconvénients de l'éolien	31
3.3.1 Avantages	31
3.3.2 Inconvénients	31
3.4 Types des turbines éoliennes	32
3.4.1 Les éoliennes terrestres	32
3.4.2 Les éoliennes en mer posées	32
3.4.3 Les éoliennes en mer flottantes	33
3.5 Principaux composants d'une éolienne	33
3.6 Fonctionnement d'une éolienne	36
3.7 Pales d'éolienne	36
3.8 Géométrie d'une pale éolienne	38
3.9 Pales éoliennes et les vibrations	39
3.10 Efforts sur une pale	40
3.11 Conclusion	41
Chapitre 4 : Contrôle de vibration des pales éoliennes par les méthodes non-linéaires	
4.1 Introduction	43
4.2 Modélisation d'une pale intelligente	43
4.3 Patches piézoélectriques	45
4.4 Définition de la structure intelligente	46
4.5 Simulation	47
4.5.1 L'analyse de la force du vent (la force axiale)	47
4.5.2 Contrôle de vibration de la pale	50
4.6 Conclusion	54
Conclusion général	56
Bibliographie	58

Liste des figures

Figure	Page
Chapitre 1	
Figure 1.1: Diagramme de phase simplifiée	7
Figure 1.2: Structure atomique de l'austénite et de la martensite	7
Figure 1.3 : Effet mémoire de forme étape par étape	8
Figure 1.4 : Télescope Hubble	9
Figure 1.5: Satellite Clémentine	10
Figure 1.6 : Frangibolt de la compagnie TiNi Alloy Aerospace Inc de San Leandro	10
Figure 1.7 : Micro actuateur pour la robotique	11
Figure 1.8 : Lunette avec monture superélastique	11
Figure 1.9 : Stent cardiovasculaire comprimé --> cardiovasculaire relâché	12
Figure 1.10 : Stent	12
Figure 1.11 : Broche d'orthodontie	12
Figure 1.12: Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité direct et indirect	13
Figure 1.13: Notation tensorielle utilisée dans les équations. (l'axe de polarisation est 3)	15
Chapitre 2	
Figure 2.1: Principe de fonctionnement de contrôle passive	22
Figure 2.2: Technique SSDS : Dispositif électronique simplifié et formes d'ondes caractéristiques	24
Figure 2.3 : Technique SSDI : Dispositif électronique simplifié et formes d'ondes caractéristiques	25
Figure 2.4: Technique SSDV classique : Dispositif électronique et formes d'ondes caractéristiques	26
Figure 2.5 : (a) Le circuit SSDI, (b) Les formes d'onde de tension typiques, où V_a est la tension de l'actionneur piézoélectrique et q_1 est le premier déplacement modal correspondant et (c) l'inversion de tension	27
Figure 2.6 : Illustration de la stratégie SSDI-Max	28
Chapitre 3	
Figure 3.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	30
Figure 3.2: Eolienne terrestre	32
Figure 3.3: Eolienne en mer posées	33
Figure 3.4 : Eolienne en mer flottante	33
Figure 3.5 : Composante d'une éolienne de forte puissance	34
Figure 3.6 : Différents types de tours	35
Figure 3.7 : Un rotor d'une éolienne à axe horizontal	35
Figure 3.8 : Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	38
Figure 3.9 : Géométrie d'une pale éolienne	39
Figure 3.10: Efforts sur un élément d'une pale	40
Chapitre 4	
Figure 4.1 : Illustration montrant les efforts appliqués par une électrode	46
Figure 4.2 : Patches piézoélectrique	46

Figure 4.3 La configuration approximative de la pale après l'insertion des éléments piézoélectriques	47
Figure 4.4 : Vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent λ . Effet sur la force axiale de sur la pale de profil NACA4412.	49
Figure 4.5 : Le rapport de vitesse du vent λ et vitesse du vent. Effet sur la force axiale de sur la pale de profil NACA4412.	50
Figure 4.6 : Déplacement de mode 1 (vitesse du vent =10 m/s et $\lambda=10$)	51
Figure 4.7 : Tension aux bornes de l'actionneur (vitesse du vent =10 m/s et $\lambda=10$)	52
Figure 4.8 : Déplacement de mode 1 (vitesse du vent est somme de quatre sinus d'amplitude 2.282851e+00, 2.282851e+00, 3.347480e+00, et 3.347480e+00).	53
Figure 4.9 : Tension aux bornes de l'actionneur (Vitesse du vent est la somme de quatre sinus d'amplitude est 2.282851e+00, 2.282851e+00, 3.347480e+00, et 3.347480e+00).	53
Figure 4.10 : Déplacement de 4 modes (Vitesse du vent est somme de quatre sinus d'amplitude 2.282851e+00, 2.282851e+00, 3.347480e+00, et 3.347480e+00).	54

Liste des tableaux

Tableau	Page
Chapitre 1	
Tableau 1.1 : Classes cristallines	17
Tableau 1.2: Applications des matériaux ferroélectriques en fonction de l'effet	18
Chapitre 4	
Tableau 4.1 : Les dimensions de la pale éolienne	46
Tableau 4.2 : La géométrie de la pale éolienne.	47
Tableau 4.3 Les valeurs calculées des forces axiales en fonction de la vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent.	48

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)

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

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

Compte tenu de la demande énergétique croissante, les fabricants de grandes éoliennes se tournent vers des éoliennes de plus en plus grosses. Parallèlement, des tentatives ont été faites pour réduire la masse de divers éléments afin de réduire les coûts de fabrication. Ces deux facteurs rendent l'utilisation des lames de plus en plus flexible. Cette flexibilité accrue a rendu les pales du rotor plus sensibles aux vibrations aéroélectriques. Ces vibrations peuvent endommager et casser les lames, raccourcissant leur durée de vie, qui peut prendre 10 ans ou plus. Il est important de mettre en place un système capable de contrôler les vibrations sur les pales du rotor. Dans cette étude, des matériaux piézoélectriques (capteurs et actionneurs) sont intégrés dans la structure de la pale pour réduire les vibrations à l'aide de méthodes de contrôle des vibrations SSD.

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

Abstract

Given the growing demand for energy, manufacturers of large wind turbines are relying on larger wind turbines than ever before. At the same time, attempts were made to reduce the mass of various elements in order to reduce manufacturing costs. These two factors make the blade even more flexible to use. This increased flexibility made the rotor blades more susceptible to aeroelectric vibrations. This vibration can damage or break the blade, shortening its lifespan, in some cases 10 years or more. It is important to set up a system that can control the vibration of the rotor blades. In this study, piezoelectric materials (sensors and actuators) are integrated into the blade structure to reduce vibration using the SSD vibration control method.

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

ملخص:

نظرًا للطلب المتزايد على الطاقة، يتجه مصنعو توربينات الرياح الكبيرة إلى توربينات الرياح الكبيرة بشكل متزايد. في الوقت نفسه، بذلت محاولات لتقليل كتلة العناصر المختلفة من أجل تقليل تكاليف التصنيع. هذان العاملان يجعلان استخدام الشفرات أكثر وأكثر مرونة. جعلت هذه المرونة المتزايدة ريش الدوار أكثر عرضة للاهتزازات الهوائية. يمكن أن تؤدي هذه الاهتزازات إلى إتلاف الشفرات وكسرها، مما يؤدي إلى تقصير عمرها الافتراضي، والذي قد يستغرق 10 سنوات أو أكثر. من المهم أن يكون لديك نظام يمكنه التحكم في الاهتزازات على ريش الدوار. في هذه الدراسة، تم دمج المواد الكهروضغطية (أجهزة الاستشعار والمشغلات) في هيكل الشفرة لتقليل الاهتزاز باستخدام طرق التحكم في الاهتزاز SSD.

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

Introduction Générale

Introduction générale

Aujourd'hui, notre monde fait face à d'énormes besoins énergétiques et plusieurs pays se tournent vers les énergies renouvelables. Dans ce contexte, les éoliennes doivent également augmenter leur potentiel de production d'électricité. L'industrie éolienne tend donc à maximiser les dimensions des machines tout en réduisant la masse des éléments tournants. Cela affecte négativement la rigidité de la structure, rendant les pales de rotor d'éolienne beaucoup plus sensibles aux charges aérodynamiques. En conséquence, ils peuvent être exposés à des conditions de fonctionnement dangereuses qui conduisent à leur défaillance, et leur durée de vie, qui devrait être de 10 ans ou plus, peut être raccourcie. Il est important de mettre en place un système capable de contrôler les vibrations sur les pales du rotor. De tels systèmes ont le potentiel d'améliorer à la fois la durée de vie et le rendement de la turbine [1].

Le défi est de contrôler ou d'éliminer ces vibrations. Ceci est hautement indésirable car cela peut entraîner des problèmes tels que des contraintes structurelles, la transmission de vibrations à d'autres systèmes et des bruits internes ou externes dus au rayonnement acoustique. Cependant, grâce aux techniques d'amortissement passif qui intègrent ou ajoutent des matériaux ou des systèmes aux propriétés amortissantes au sein de la structure, leurs effets peuvent être atténués, de sorte que les vibrations de la structure sont passives, c'est-à-dire qu'elles absorbent des vibrations externes supplémentaires. Il existe également un deuxième type de méthode de contrôle des vibrations appelée amortissement actif. Il offre de bien meilleures performances que le premier type, mais nécessite également un traitement complexe, une conception coûteuse et une alimentation externe.

Le troisième type est semi-actif et semi-passif et s'appelle SSD. Développé au LGEF. Il repose sur l'augmentation cumulative de tension en un bon point de l'élément piézoélectrique provoquée par une commutation continue de tension. Il a été démontré que les performances d'atténuation dépendent fortement de l'oscillation de tension totale disponible. Parmi les technologies SSD se trouve le contrôle SSDI. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à une excitation large bande. En effet, les contraintes dans les structures industrielles sont généralement à large bande et la réduction des vibrations doit affecter plusieurs résonances. Le contrôle modal SSDI consiste à combiner les avantages des techniques de contrôle actif et semi-actif.

Grâce à la stratégie modale. Le but de ce travail est d'augmenter la tension piézoélectrique (qui est directement liée à l'énergie du mouvement d'amortissement) afin d'améliorer les performances d'amortissement.

Ce mémoire se composera de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu des matériaux intelligents, et on a parlé des Alliages à Mémoire de Forme, puis nous aborderons les définitions et les propriétés liées à la piézoélectricité. Il aborde également plus en détail ces matériaux piézoélectriques et présente les équations régissant la piézoélectricité sans oublier l'application.

Le deuxième chapitre, nous avons discuté de la technologie de contrôle des vibrations. Nous commençons par décrire les schémas de contrôle des vibrations pour cette classe (actif, passif, semi-passif, semi-actif) puis abordons les trois technologies SSD de base. Décrit les types (SSDS, SSDI, SSDV) et leurs principes de fonctionnement.

Le troisième chapitre a présenté une étude approfondie de l'énergie éolienne, montrant les avantages et les inconvénients de cette énergie et des différents types de turbines. Il montrait également les principaux composants d'une éolienne et expliquait le fonctionnement principal d'une éolienne.

Et dans le dernier chapitre, Nous avons vu une nouvelle technologie développée à partir de la technologie précédente appelée SSDI Max, qui comporte un observateur modal. Après avoir utilisé le logiciel Matlab/Simulink pour simuler numériquement le mouvement (déplacement) de la structure et les contraintes sur les actionneurs d'extrémité, cette technique montre de très bonnes performances en amortissement des vibrations, par rapport au SSDI Modal, et plus efficace. Cela signifie que la durée de vie de la pale sera plus longue.

Chapitre 1

Généralités sur les matériaux intelligents

Chapitre 1 :

Généralités sur les matériaux intelligents

1.1 Introduction

Les premières civilisations se sont construites grâce à des matériaux naturels : le bois, la pierre, le cuir, l'os, la corne, le lin ou le chanvre. Nous avons ensuite connu, mais plus récemment, l'émergence des matières plastiques, puis des composites. La société moderne est envahie d'objets en matières plastiques, dans le bâtiment, l'automobile, l'aéronautique, le sport ou le secteur militaire. Un objet naturel ou en matière plastique dépend des caractéristiques de la matière qui le constitue. Ainsi en est-il d'une chaise en bois ou d'un combiné téléphonique en plastique. Mais progressivement, les chercheurs et les ingénieurs ont eu le besoin d'utiliser des matériaux comportant eux-mêmes leurs propres fonctions. Des matériaux multifonctionnels capables de s'adapter à leur environnement. C'est l'avènement des matériaux intelligents, nés au début des années 80 de travaux menés principalement aux États-Unis dans le domaine de l'aérospatiale et qui concernent aujourd'hui tous les secteurs d'activités.

1.2 Définition des matériaux intelligents

Les matériaux intelligents ou "smart materials" sont de plus en plus sujets de recherche dans de nombreux domaines scientifiques. Elles sont innovantes et permettent le développement de technologies dans des domaines très divers tels que l'informatique, la robotique et le médical. Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Les matériaux intelligents sont des matériaux qui réagissent aux stimulations externes en changeant une ou plusieurs de leurs propriétés. Nous pourrions également les appeler matériaux réactifs. Ces objets ont la capacité de changer de forme ou de comportement dès qu'ils rentrent en contact avec de l'eau chaude, un changement de pression, des produits chimiques, de la lumière ou de la chaleur [2].

1.3 Types des matériaux intelligents

Les différents matériaux intelligents sont divisés en trois catégories qui connaissent de nombreuses applications dans des secteurs divers : les Alliages à Mémoire de Forme (AMF), les matériaux piézoélectriques, et magnétostrictifs.

1.3.1 Matériaux magnétostrictifs

Les alliages magnétostrictifs sont au champ magnétique ce que les piézoélectriques sont au champ électrique. Sous l'effet d'un champ magnétique, un barreau de fer s'allonge tandis qu'il subit une striction dans le sens transversal. Inversement, l'effet Villari correspond à l'aimantation du barreau sous l'effet d'un allongement. Selon la géométrie considérée, il est aussi possible d'exploiter des déformations en flexion ou en torsion. Ces alliages pourraient être intéressants dans la réalisation de moteurs à effort élevé et faible vitesse [3].

1.2.3 Matériaux électrostrictifs

Sont des matériaux dont les propriétés physiques évoluent sous l'application d'un champ électrique, ces matériaux sont des polymères, des mono-cristaux 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... 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 [4].

1.3.3 Alliages à Mémoire de Forme

1.3.3.1 Définition

Les alliages à mémoire de forme sont communément appelés AMF (en anglais SMA pour Shape Memory alloy). Ils sont, de nos jours, de plus en plus connus et utilisés. Plusieurs applications ont vu le jour au cours des dernières décennies dans plusieurs domaines tels que, le domaine biomédical, l'aérospatiale, la robotique et bien d'autres. Dans tous ces domaines d'application, les AMF sont utilisés soit pour leur propriété de mémoire de forme, soit pour leur propriété superélastique, soit pour leur effet amortissant. Malgré le fait qu'ils soient de plus en plus connus et utilisés, ils demeurent coûteux comparativement aux autres matériaux plus communs. Par contre, dans certaines situations, ils peuvent devenir économiquement rentables puisqu'il est possible de remplacer des dispositifs très complexes par un simple dispositif d'AMF.

1.3.3.2 Famille d'alliage

Il existe plusieurs familles d'AMF. Les plus connues sont les alliages titane-nickel (Ti-Ni) et les alliages cuivreux (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be), car ils possèdent de bonnes propriétés thermomécaniques tout en ayant des prix industriellement compétitifs. À l'opposé, les alliages d'or (Au-Cd, Cu-Au-Zn) et d'argent (Ag-Cd) sont coûteux et n'ont donc que des intérêts

scientifiques puisqu'ils ne sont pas commercialisables. Finalement, ils existent des alliages de Fer (Fe-Mn-Cr-Ni-Si, Fe-Cr-Ni-Co-Mn-Si) peu coûteux, mais possédant des propriétés thermomécaniques plutôt limitées. De plus, même avec l'ajout de chrome, ces alliages ne supportent pas bien les milieux corrosifs [5].

1.3.3.3 Caractéristique des AMF

Les AMF doivent leurs caractéristiques à la présence de deux phases à l'état solide.

Comme pour l'acier, la phase basse température est appelée martensite tandis que la phase haute température, dite phase mère, est appelée austénite. Le changement de phase dans les aciers et les alliages à mémoire de forme est similaire. La transformation martensitique :

- 1 Est sans diffusion, c'est-à-dire que les atomes ne se déplacent pas sur de longues distances.
- 2 Implique une déformation homogène du réseau qui conduit à un changement de forme macroscopique.
- 3 Est caractérisée par une déformation déviatorique, c'est-à-dire sans changement de volume.

Cependant, une analyse détaillée de la transformation des alliages à mémoire de forme prouve qu'il y a un léger changement de volume. Par contre, ce dernier est très faible comparé au changement de forme. La transformation est donc quand même considérée martensitique.

Toutefois, contrairement aux aciers, les températures de transformation sont beaucoup plus basses et se situent entre moins 100 et plus 200 degrés Celsius selon l'alliage utilisé. Ces températures de transition dépendent aussi de l'historique de l'alliage, c'est-à-dire des traitements thermomécaniques ou des procédés de fabrication, ou encore de la combinaison des deux. De plus, il y a quatre températures qui caractérisent les AMF : les températures de début et de fin de transformation inverse, pour austénite $START_As$ et Af pour austénite finish, ainsi que les températures de début et de fin de transformation directe, Ms pour martensite $START$ et Mf pour martensite finish. Finalement, ces quatre températures dépendent de la contrainte appliquée, mais heureusement, elles varient linéairement, à la figure I.1, un diagramme d'état simplifié représentant bien un AMF.

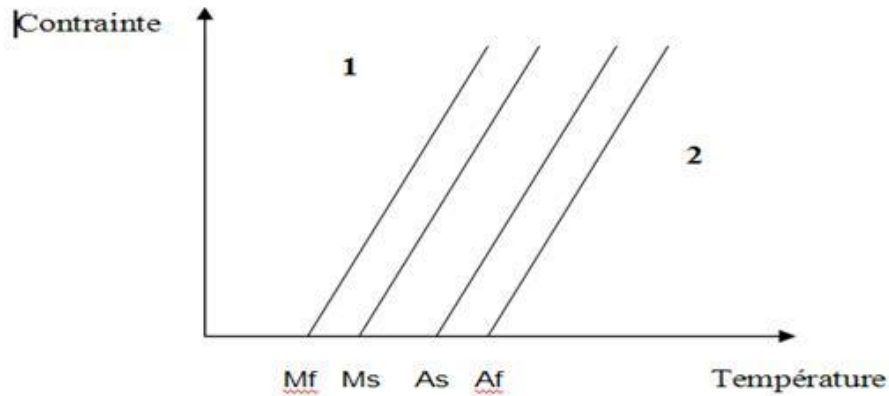


Figure 1.1: Diagramme de phase simplifiée [6].

Bien qu'il existe certains alliages possédant $As < Ms$, il sera plus facile de comprendre les concepts de base en considérant $Mf < Ms < As < Af$, comme l'illustre la figure I.1. On retrouve donc pour $T < Mf$, représenté par la zone 1, 100 % de martensite. À l'opposé, pour $T > Af$ représenté par la zone 2, on retrouve 100 % d'austénite. Entre les deux zones, on retrouve une coexistence des deux phases. La proportion dépend alors des conditions de chargement thermique et/ou mécanique antérieures. Finalement, le dernier concept important pour comprendre les propriétés des AMF réside dans le fait que l'austénite a un réseau cristallin cubique et que la martensite a un réseau monoclinique comme à la figure 1.2.

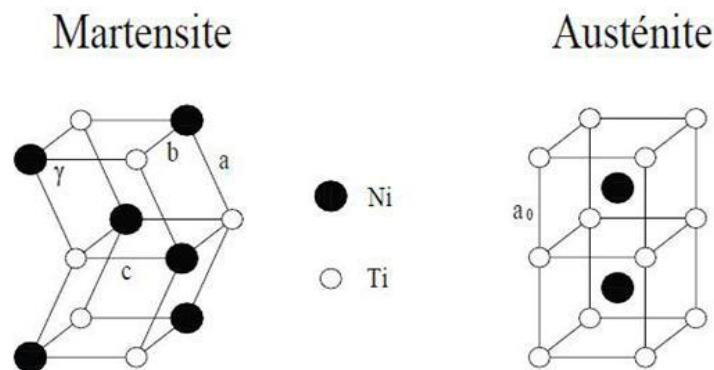


Figure 1.2: Structure atomique de l'austénite et de la martensite [2]

1.3.3.4 Effet mémoire de forme

L'effet mémoire de forme est le comportement le plus étonnant des AMF. D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle on appelle ces alliages à mémoire de forme. Cet effet peut être représenté par une déformation importante qui ressemble à une plastification du matériau, c'est-à-dire que l'échantillon, après un chargement et un déchargement, ne retrouve pas sa forme initiale. Par contre, si le spécimen est par la suite chauffé, il y aura alors un retour de forme. Ce

phénomène s'explique de la façon suivante. L'échantillon est d'abord composé entièrement d'austénite, comme le montre l'étape 1 de la figure 1.3. Lors du refroidissement sans contrainte, toute l'austénite se transforme en martensite, mais de façon aléatoire (étape 2). Il y a donc une répartition uniforme dans tous les sens des variantes de martensite. On dit alors que la martensite est autoaccommodante. Il est à noter qu'à cette étape, il n'y a aucune déformation, le matériau a seulement changé de phase. Par la suite, si une force est appliquée, il y aura d'abord une déformation élastique ϵ_1 (étape 3) suivie d'une réorientation de la martensite (étape 4). La force appliquée permet d'aligner toutes les variantes de martensite dans la même direction. On obtient de cette façon une grande déformation ϵ_2 . C'est cette étape qui imite la plasticité puisque la martensite a changé de configuration. Elle porte donc maintenant le nom de martensite orientée.

Lors du relâchement de la force, il y aura bien sûr un retour élastique ($\epsilon_2 - \epsilon_3$), mais la martensite restera orientée (étape 5). Finalement, lors d'un chauffage, la martensite se transformera en austénite et l'AMF retrouvera alors sa forme initiale. Puisque l'étape possède la même configuration que l'étape 1, il est possible d'effectuer ce cycle à plusieurs reprises. Si l'échantillon avait été fixé avant le chauffage, le retour aux conditions initiales n'aurait pu se produire. Il y aurait alors eu une génération de contraintes dans l'échantillon.

C'est d'ailleurs ces conditions qui permettent de créer des actionneurs en AMF performants.

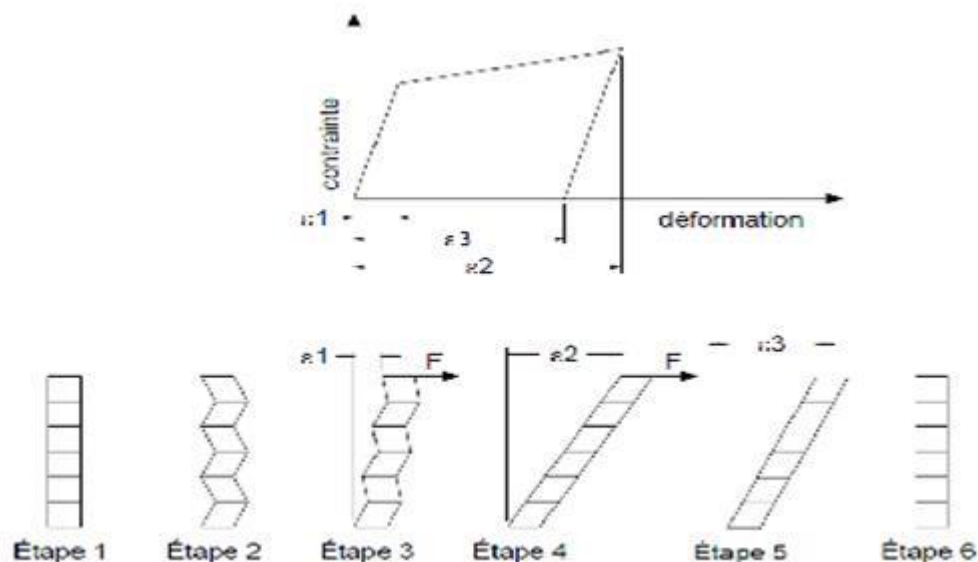


Figure 1.3 : Effet mémoire de forme étape par étape [2]

1.3.3.5 Applications des AMF

Cette section contient quelques domaines d'applications ainsi que quelques exemples bien connus dans le milieu des alliages à mémoire de forme. Il est à noter qu'elle ne constitue pas une revue exhaustive de toutes les applications [7]

a) Secteur aérospatial

L'industrie aérospatiale doit minimiser le volume et le poids de toutes leurs composantes afin de minimiser les coûts de lancement. Puisque les AMF offrent un rapport force / densité et énergie / poids excellent, ils sont des outils par excellence.

Le premier exemple est le télescope Hubble. Ce télescope, lancé en avril 1990 (Figure 1.5), possédait des actionneurs en AMF (reprise de forme) pour le déploiement des panneaux solaires nécessaires à l'alimentation électrique des composantes électroniques.



Figure 1.4 : Télescope Hubble [8]

Le deuxième exemple est le satellite Clémentine. Lancé le 25 janvier 1994, ce satellite a déployé ses panneaux solaires en utilisant des boulons frangibolt développés par la compagnie TiNi Alloy Aerospace Inc. de San Leandro, Californie (voir figure 1.6 et figure 1.7). Ces boulons permettent d'éliminer les charges explosives utilisées auparavant qui nécessitaient des précautions spéciales pour le transport et l'entreposage. De plus, ces charges libéraient un gaz lors de l'explosion, ce qui peut faire dévier le satellite de sa trajectoire initiale.

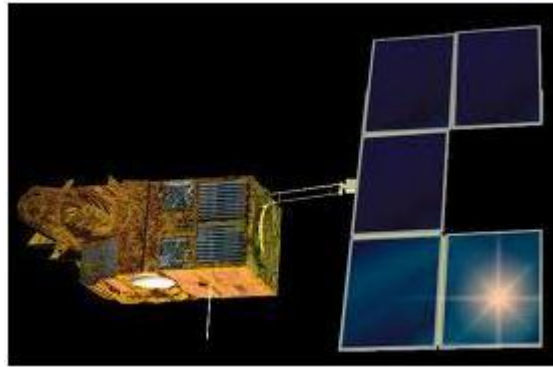


Figure 1.5 : Satellite Clémentine [6]

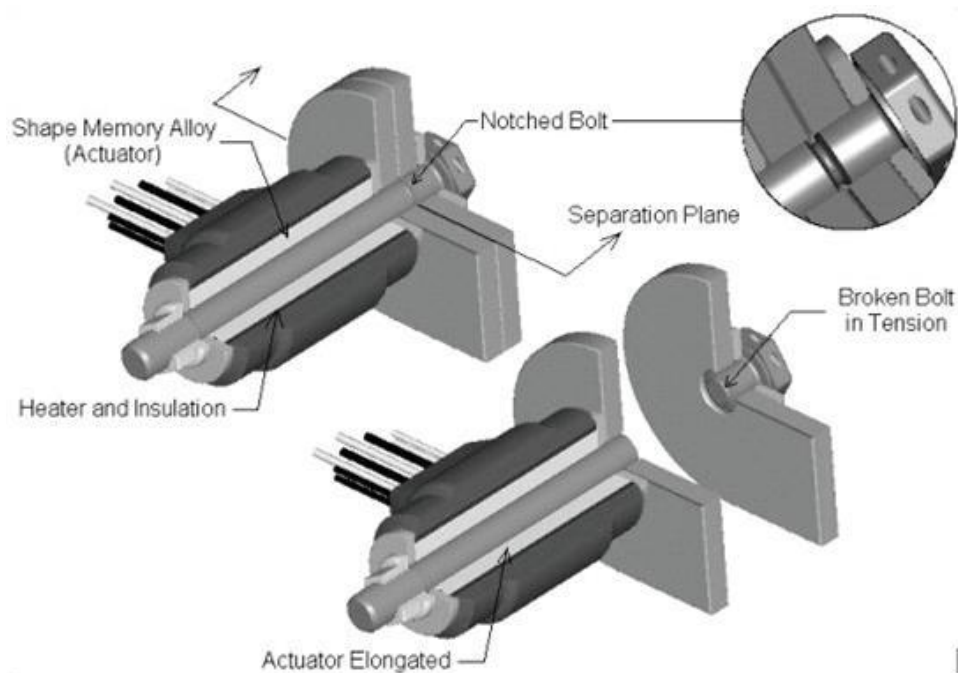


Figure 1.6 : Frangibolt de la compagnie TiNi Alloy Aerospace Inc de San Leandro [9]

b) Secteur industriel

Ce secteur, tout comme l'industrie aérospatiale, utilise également la reprise de forme des AMF afin de créer des actionneurs les plus compacts possible. Par contre, on utilise aussi les AMF pour leur effet amortissant et leur effet superélastique. En robotique, l'utilisation de micro actionneurs est courante. Par exemple, la figure 1.8 montre une main artificielle utilisant les AMF [10].

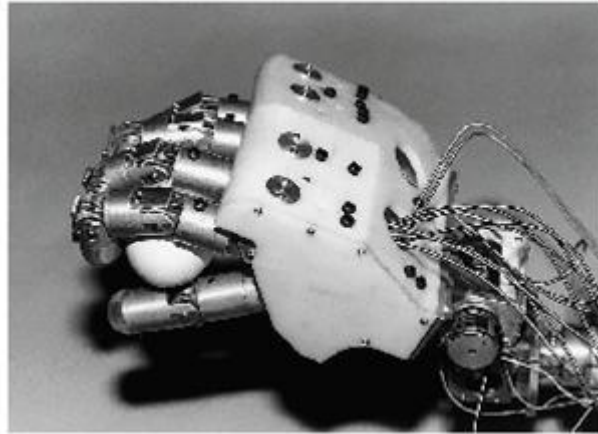


Figure 1.7 : Micro actuateur pour la robotique [11]

L'optométrie, avec ses lunettes (Figure 1.9) à monture superélastique, est probablement l'exemple le plus connu. En effet, la superélasticité permet de grandes déformations et les lunettes deviennent alors pratiquement incassables.



Figure 1.8 : Lunette avec monture superélastique [12].

c) Secteur biomédical

Ce secteur d'activité a des exigences très élevées par rapport aux matériaux utilisés. D'ailleurs, ce secteur est probablement le plus actif de nos jours et il utilise particulièrement l'effet superélastique avec les alliages de nitinol qui sont évidemment biocompatibles.

Par exemple, les stents sont des dispositifs qui permettent une chirurgie minimalement invasive afin de contrer les problèmes cardiaques liés à l'obstruction partielle des artères.

En effet, ce dispositif, une fois contracté, s'insère dans l'artère (figure 1.10). Par la suite, lors du relâchement, l'effet superélastique contraint l'artère à retrouver le diamètre original et permet ainsi le passage du sang (figure 1.11).

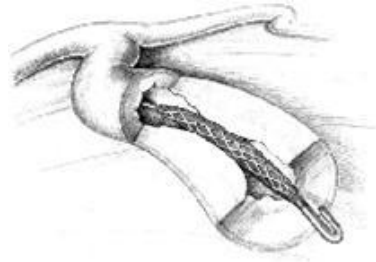


Figure 1.9 : Stent cardiovasculaire comprimé --> cardiovasculaire relâché [13]

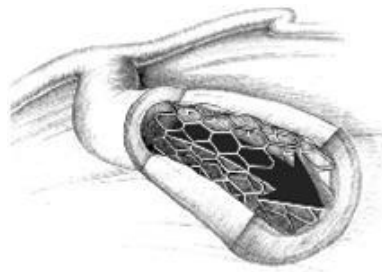


Figure 1.10 : Stent [13]

Finalement, le dernier exemple du secteur biomédical est les broches d'orthodontie (figure 1.12). En effet, puisque les AMF ont un plateau sur l'hystérésis, la charge appliquée sur les dents reste constante pour une certaine plage de déformation. Cela permet au patient d'aller moins régulièrement chez son dentiste pour l'ajustement de son appareil dentaire.



Figure 1.11 : Broche d'orthodontie [14]

1.3.4 Matériaux piézoélectriques

1.3.4.1 Définition de la piézoélectricité

La piézoélectricité (1880, Pierre Curie) est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse). Dans certains matériaux, comme le quartz, cet effet est naturellement observable. L'application d'une force provoque l'apparition d'un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique provoque la déformation du matériau (piézoélectrique inverse). Cependant, la réalisation d'actionneurs repose sur l'utilisation de céramiques synthétiques polycristallines, fréquemment constituées d'un alliage de plomb, de zirconium et de titanate [1,2,6], les céramiques PZT [15].

Les caractéristiques piézoélectriques de ces céramiques résultent de la polarisation initiale dans un champ électrique à température contrôlée. Les céramiques massives ainsi produites peuvent générer des contraintes de l'ordre de 40 MPa avec des déformées relatives de 1000 à 2000 ppm [16].

1.3.4.2 L'effet piézoélectrique

La piézoélectricité caractérise l'aptitude de certains matériaux cristallins de convertir une contrainte mécanique en une énergie électrique et réciproquement

Il s'agit d'une polarisation électrique induite par une déformation mécanique dans des cristaux appartenant à certaines classes cristallines. Cette polarisation est proportionnelle à la déformation et change de signe avec elle. Cet effet appelé « effet piézoélectrique direct », est réversible : l'application d'un champ électrique externe induit une déformation mécanique c'est l'effet piézoélectrique inverse.

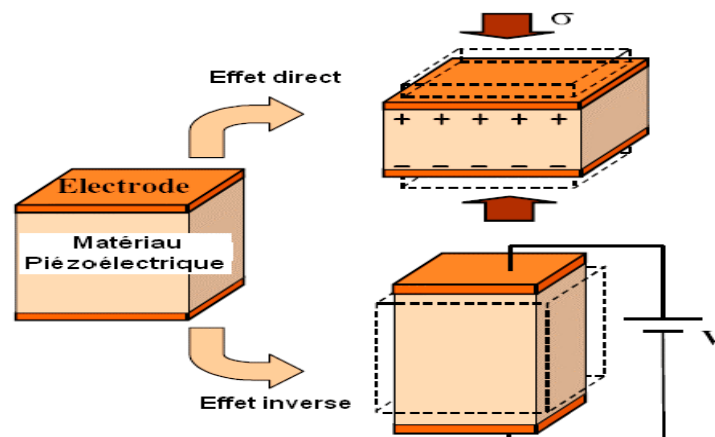


Figure 1.12: Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité direct et indirect [17]

1.3.4.3 Equations de la piézoélectricité

La piézoélectricité est un phénomène de couplage entre les grandeurs électriques (champ électrique E , déplacement électrique D) et les grandeurs mécaniques (contrainte T , déformation S). Elle peut être décrite mathématiquement à partir d'un modèle phénoménologique faisant intervenir des potentiels thermodynamiques. L'ensemble des équations décrivant l'effet piézoélectrique dépendent alors du choix de la grandeur thermodynamique et des variables indépendantes utilisées. Dans le cas d'un matériau piézoélectrique sous des conditions adiabatiques et isothermes, la fonction de Gibbs élastique G_1 est définie comme :

$$G_1 = \frac{1}{2} (S_{ijkl}^D T_{ij} T_{kl} + 2g_{nij} D_n T_{ij}) + \frac{1}{2} \beta_{mn}^T D_m D_n \quad (1.1)$$

où g est le coefficient piézoélectrique de tension, s est la compliance élastique et β est l'inverse de la permittivité. Les variables indépendantes sont la contrainte T et le déplacement électrique D . Les équations linéaires de la piézoélectricité sont obtenues en dérivant l'équation comme suit :

$$\begin{cases} S_{ij} = -\frac{\partial G_1}{\partial T_{ij}} = S_{ijkl}^D T_{kl} + g_{nij} D_n \\ E_m = \frac{\partial G_1}{\partial D_m} = \beta_{mn}^T D_n + g_{nij} T_{ij} \end{cases} \quad (1.2)$$

Où S est la déformation relative et E est le champ électrique. Il existe d'autres représentations des équations linéaires de piézoélectricité qui dérivent d'autres grandeurs thermodynamiques. L'ensemble de ces équations sont données avec des éléments des tenseurs notés de manière condensée en utilisant les conventions de Voigt schématisée figure 1.14:

$$\begin{cases} S_p = S_{pq}^D T_q + g_{pm} D_m \\ E_m = \beta_{mn}^T D_n - g_{pm} T_p \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} S_p = S_{pq}^E T_q + d_{pm} E_m \\ D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n - d_{pm} T_p \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} T_p = C_{pq}^E S_q - e_{pm} E_m \\ D_m = \varepsilon_{mn}^S E_n - e_{pm} S_p \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} T_p = C_{pq}^D S_q + h_{pm} D_m \\ D_m = \beta_{mn}^S D_n - h_{pm} S_p \end{cases} \quad (1.6)$$

O^x Indique que la grandeur considérée est à x constant ou nul

Les paramètres des équations sont des tenseurs en raison de la dépendance directionnelle des propriétés du matériau (anisotropie). Les couples des indices (m, n) et (p, q) varient entre (1 à 3) et (1 à 6) respectivement. Les coefficients élastiques c et s sont des

tenseurs d'ordre 4 constituant une matrice (6x6). Les grandeurs électriques ε et β sont des tenseurs d'ordre 2 représentés par une matrice (3x3). Quant aux coefficients piézoélectriques d , e , et h , ils sont des tenseurs d'ordre 3 et forment une matrice de (3x6). Le nombre des éléments de ces tenseurs peuvent être réduits par des considérations de symétrie [18].

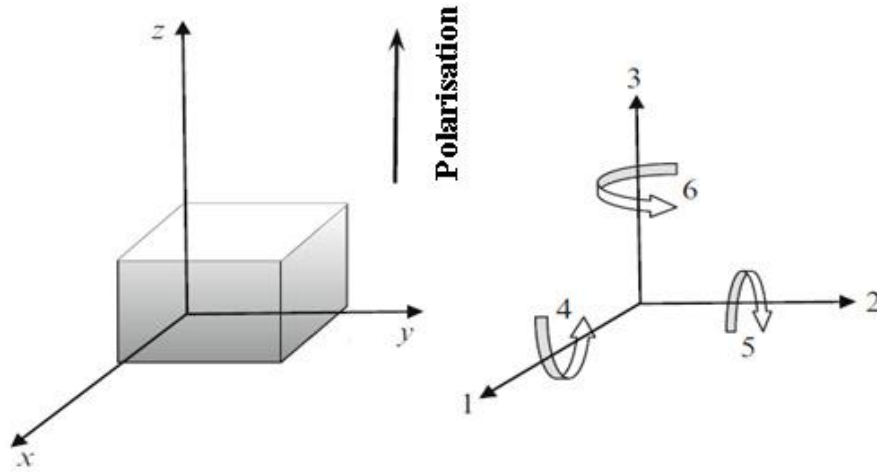


Figure 1.13: Notation tensorielle utilisée dans les équations. (l'axe de polarisation est 3) [19]

A titre d'exemple, pour une céramique ferroélectrique polarisée suivant l'axe 3 mais dont l'orientation des cristallites ne présente pas de direction privilégiée, la symétrie est de type (∞ mm) et les matrices des coefficients piézoélectriques, diélectriques et élastiques sont réduites à :

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{11} & d_{22} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Ces coefficients seront utilisés pour la modélisation des propriétés piézoélectriques des céramiques polarisées.

1.3.4.4 Coefficients de Couplage électromécanique

Le couplage électromécanique définit la capacité d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Il n'est pas relié aux pertes ni au rendement mais traduit plutôt une adaptation entre ces deux formes d'énergie du matériau. Le coefficient de couplage est obtenu à partir d'une étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques. Il peut s'écrire sous la forme suivante [20] :

$$k_{ij}^2 = \frac{\text{énergie mécanique transformée (S et T) dans la direction } i}{\text{énergie électrique fournie (E et D) dans la direction } j} \quad (1.10)$$

K_{ij}^2 varie suivant la forme de l'échantillon et le mode de vibration provoqué et dépend des coefficients élastiques, diélectriques et piézoélectriques. Les expressions du facteur de couplage pour les cinq modes de résonance piézoélectrique sont :

$$\square \text{ mode longitudinal} \quad K_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^E + \varepsilon_{33}^T}} \quad (1.11)$$

$$\square \text{ mode transverse} \quad K_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{11}^E + \varepsilon_{33}^T}} \quad (1.12)$$

$$\square \text{ mode radial} \quad K_p = K_{31} \sqrt{\frac{2S_{11}^E}{S_{11}^E + S_{12}^E}} \quad (1.13)$$

$$\square \text{ mode en épaisseur} \quad K_t = \frac{e_{33}}{\sqrt{C_{33}^p \varepsilon_{33}^S}} \quad (1.14)$$

$$\square \text{ mode de cisaillement} \quad K_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^T S_{55}^E}} \quad (1.15)$$

1.3.4.5 Classes cristallines

L'existence de la piézoélectricité dans un cristal est liée aux symétries de la structure cristalline. En particulier, un cristal ne peut pas être piézoélectrique si sa structure possède un centre de symétrie (structure dite centrosymétrique).

De manière générale, on classe les cristaux suivant leurs symétries en 230 groupes d'espace regroupés en 32 classes cristallines. Il existe 21 classes non centrosymétriques, dont 20 sont piézoélectriques. Parmi ces classes piézoélectriques, 10 possèdent une polarisation électrique spontanée et sont dites polaires. Leur polarisation spontanée varie avec la température, ces cristaux sont donc pyroélectriques. Parmi les cristaux pyroélectriques enfin, certains sont dits ferroélectriques et se caractérisent par le fait qu'il est possible de renverser leur polarisation électrique permanente en appliquant un fort champ électrique dans le sens opposé [21].

Classification			
32 <u>classes cristallines</u>			
20 classes piézoélectriques			Non piézoélectriques
10 classes polaires <u>pyroélectriques</u>		Non pyroélectriques	
Matériaux <u>ferroélectriques</u>	Matériaux non ferroélectriques		
ex : <u>BaTiO₃</u> , <u>PbTiO₃</u>	ex : <u>Tourmaline</u>	ex : <u>Quartz</u>	

Tableau 1.1 : Classes cristallines [21]

L'absence de centre de symétrie dans une structure s'explique parfois de manière naturelle par la géométrie. Dans le quartz par exemple, la disposition des ions positifs et négatifs conduit naturellement à la création d'un dipôle électrique lorsque la structure est déformée par une contrainte non hydrostatique. De même, dans les polymères PVDF, la symétrie est naturellement rompue par la substitution de deux atomes d'hydrogène par deux atomes de fluor, beaucoup plus électronégatifs, qui attirent à eux les charges électroniques négatives.

Dans d'autres cas, notamment les ferroélectriques, la brisure de symétrie met en jeu des phénomènes plus complexes. C'est notamment le cas des ferroélectriques modèles qui possèdent à hautes températures une structure cristalline centrosymétrique, non piézoélectrique. À basses températures, la structure de haute symétrie devient instable et le cristal bascule dans une phase de plus basse symétrie. L'énergie d'interaction entre dipôles devient prépondérante et favorise le décalage des ions en dehors de leur position de haute symétrie, et l'apparition d'un ordre ferroélectrique à longue portée.

Certains éléments purs cristallisent également dans des structures non centrosymétriques ; c'est le cas du tellure et du sélénium. La brisure de symétrie s'explique dans ce cas par une distorsion de Peierls : les électrons sont localisés en liaisons covalentes de manière dissymétrique autour des atomes [21].

La symétrie peut également être brisée en moyenne seulement à une échelle de longueur plus grande que celle de la maille cristalline. Ainsi, le silicium n'est pas piézoélectrique, mais un effet piézoélectrique a été mis en évidence dans le silicium poreux. De même, un effet piézoélectrique peut être provoqué par un couplage entre la polarisation et un gradient de déformation (flexoélectricité) [22].

1.3.4.6 Applications des matériaux piézoélectriques

Le domaine d'application des matériaux piézoélectriques est très vaste car il est possible d'exploiter soit l'effet direct, soit l'effet inverse soit les deux alternativement. Quelques applications des matériaux piézoélectriques sont données dans le tableau en fonction de l'effet utilisé.

Applications basées sur l'effet direct	Applications basées sur l'effet inverse	Applications basées sur les deux effets
Microphone	Haut-parleur	Transducteur d'ultrasons pour diagnostic médical (échographie).
hydrophone	Buzzer	CND par ultrasons
Capteur de choc	Transducteur sonar	Détecteur de proximité ou de présence
Accéléromètres	Nébuliseur	Mesures de distances ou de débits
Allumage	Moteurs ultrasonores	Gyroscope
Capteur de pression ou de contraintes	Relais	Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW)
	Micropositionnement	Lignes à retard.
	Ajustement laser	Transformateur piézoélectrique.
	Imprimante à jet d'encre	
	Dispositifs acousto-optiques	
	Pompe piézoélectrique	
	Bistouri piézoélectrique	

Tableau 1.2: Applications des matériaux ferroélectriques en fonction de l'effet [23]

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, Nous donnerons un aperçu des matériaux intelligents, et on a parlé des Alliages à Mémoire de Forme, puis nous aborderons les définitions et les propriétés liées à la piézoélectricité. Il aborde également plus en détail ces matériaux piézoélectriques et présente les équations régissant la piézoélectricité sans oublier l'application

Chapitre 2

Contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques

Chapitre 2 :

Contrôle de vibration par les matériaux piézoélectriques

2.1 Introduction

Dans de nombreuses applications industrielles ou de défense, les vibrations constituent un enjeu scientifique et technologique majeur. Les objectifs recherchés par l'amortissement des vibrations revêtent différents aspects, tels que l'amélioration du confort en acoustique comme en mécanique, la stabilité de structures de plus en plus légères ou l'augmentation de la durée de vie des matériaux. Un des enjeux actuels dans le domaine des systèmes embarqués est de réduire les vibrations le plus efficacement possibles tout en limitant la masse et le volume du système de contrôle. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire d'utiliser des méthodes performantes tout en diminuant voire supprimant l'énergie nécessaire au contrôle de ces vibrations.

2.2 Méthodes de contrôle

Les méthodes utilisées pour réduire les vibrations d'usinage peuvent être classifiées en quatre catégories : les méthodes passives, les méthodes actives, les méthodes semi-actives et les méthodes semi-passives.

2.2.1 Contrôle passif

2.2.1.1 Définition

Le contrôle passif a l'avantage de ne nécessiter ni énergie ni information pour fonctionner. Il consiste à connecter l'élément piézoélectrique à un circuit constitué de composants passifs, par exemple une résistance. Le but de ce circuit est de dissiper l'énergie électrique fournie par l'élément piézoélectrique par effet joule. Pour cela, l'impédance du circuit doit être réglée judicieusement et la plupart des études proposent de l'accorder sur un des modes de vibrations de la structure [24].

Le système de contrôle le plus simple consiste à connecter l'élément piézoélectrique à une résistance. Le circuit résistif ainsi réalisé au même effet que l'adjonction d'une couche viscoélastique : une faible atténuation sur une bande de fréquence relativement large. Afin de cibler une fréquence de résonance et d'augmenter les performances du contrôle, l'élément piézoélectrique peut être connecté à une résistance et à une inductance en série. Les valeurs de l'inductance et de la résonance sont choisies de manière à optimiser l'échange d'énergie par résonance entre le mode mécanique et celui du circuit électrique oscillant à la résonance. Ainsi,

l'énergie mécanique est transférée et dissipée dans le circuit électrique produisant une atténuation notable dans la bande de fréquence correspondante.

A partir de ces résultats, de nombreux travaux ont été menés pour comprendre, optimiser et améliorer ces techniques passives. Les configurations séries et parallèles du circuit électrique ont par exemple été étudiées et mènent à des résultats similaires.

Les avantages des techniques passives sont :

- Une grande facilité de réglage du système électrique,
- Un poids et une taille des éléments à ajouter à la structure peu significative,
- Un système inconditionnellement stable.

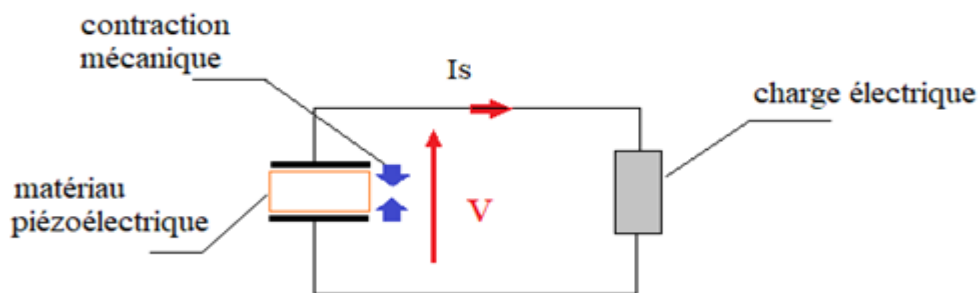


Figure 2.1: Principe de fonctionnement de contrôle passif [25]

2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif

- ✓ 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 [26].

2.2.2 Contrôle actif

2.2.2.1 Définition

Né dans les années 30, le contrôle actif des vibrations s'est réellement développé lors de l'avènement des processeurs de signaux digitaux dans les années 80. Mais ce n'est que depuis une dizaine d'années que l'utilisation de capteurs et d'actionneurs se base de céramiques piézoélectriques a permis des avancées dans des applications jusqu' alors irréalisables.

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. On distingue deux principes de contrôle : le contrôle par rétroaction (feedback control) et par anticipation (feedforward control). Le contrôle par anticipation est basé sur la disponibilité d'une information sur la perturbation appliquée au système. Cette information est disponible lorsque l'excitation est déterministe (signal synchronisé sur une machine tournante) ou lorsqu'on se trouve en présence d'un phénomène de propagation (un capteur de détection est alors placé en amont du système). Le contrôle par anticipation, breveté en 1936, est essentiellement développé en acoustique [27].

La deuxième approche appelée contrôle par rétroaction ou feedback consiste à utiliser la réponse de la structure plutôt que l'excitation qui la fait vibrer. Les mesures effectuées sur la structure sont interprétées par un contrôleur qui génère une commande. Cette commande est transmise sur les actionneurs qui agissent alors sur la structure pour maîtriser son comportement dynamique.

2.2.3 Contrôle semi-actif

Afin de dépasser les limites du contrôle passif, différents contrôles ont été proposés. Leur objectif commun est d'augmenter les performances en amortissement des techniques piézoélectriques passives tout en maintenant une faible compacité et en utilisant une source minimale d'énergie extérieure. La plupart de ces méthodes reposent sur un traitement non linéaire de la tension électrique générée par les éléments piézoélectriques.

Ces techniques sont le plus souvent qualifiées de semi-passives. Cette appellation est justifiée par le fait que contrairement aux techniques actives, très peu d'énergie extérieure est nécessaire. La plupart de ces contrôles peuvent d'ailleurs être autoalimentés. Cependant si on se réfère à la définition du contrôle semi-actif, ces techniques entrent dans cette catégorie. En effet, les dispositifs semi-actifs sont caractérisés par leur capacité à adapter en temps réel les propriétés du système ou de la structure grâce à une énergie de commande minimum [28]. La simplicité et l'efficacité de ces méthodes permettent de les appliquer à différents domaines tels que le contrôle acoustique, la récupération d'énergie ou encore le contrôle de santé [29]. Dans le but de contrôler les vibrations, ces dispositifs semi-actifs ont également suscité beaucoup d'intérêt.

Les premières méthodes semi-actives à avoir été mises en place consistent à commuter l'élément piézoélectrique d'un état de circuit ouvert à un état de court-circuit. Selon le moment et la durée de la commutation, il est possible d'obtenir un contrôle en raideur ou un contrôle en amortissement.

La technique "state switching", consiste à connecter le patch piézoélectrique à un court-circuit. L'élément piézoélectrique est court-circuité à chaque extremum de contrainte puis tenu en court-circuit jusqu'à ce que l'énergie mécanique dans l'élément piézoélectrique disparaisse. Les phases de fermeture et d'ouverture sont par conséquent de durées comparables. Ce type de contrôle peut être comparé à un système mécanique à raideur variable. La commutation permet en effet de retirer l'énergie potentielle électrique convertie depuis la déformation mécanique grâce à l'effet piézoélectrique. De ce fait, une partie de l'énergie mécanique initiale est extraite de la structure.

2.2.4 Contrôle semi-passif

Les techniques semi-passives 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 [25].

2.2.4.1 Technique SSDS « Synchronised Switch on Short circuit »

Où ils sont connectés à un simple court-circuit. Quand un extremum est détecté, l'interrupteur est ferme, Dans le cas de la technique SSDS, la tension est alors brièvement ramenée à zéro [30].

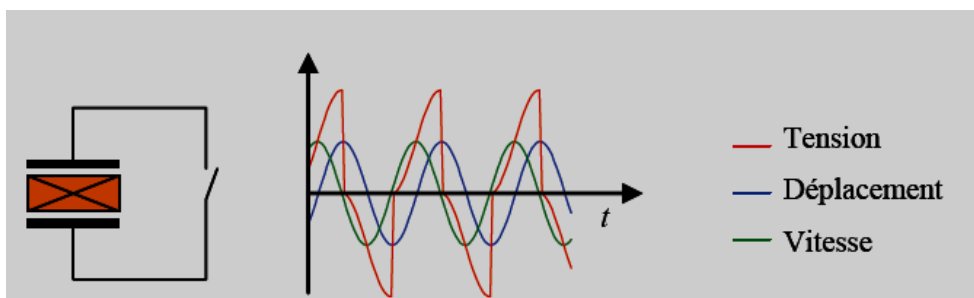


Figure 2.2: Technique SSDS : Dispositif électronique simplifié et formes d'ondes caractéristiques [31]

L'amortissement en SSDS peut être déduit du cas SSDI en prenant $\gamma = 0$, il est ainsi donné par:

$$A_{SSDS} = 20 \log \left\{ \frac{1}{1 + \frac{4}{\pi} k^2 Q_m} \right\} \quad (2.1)$$

2.2.4.2 Technique SSDI « Synchronised Switch Damping on Inductor »

Dans le cas de la technique SSDI, l'interrupteur est en série avec une bobine d'inductance L . Celui-ci est pratiquement toujours ouvert, sauf quand un extremum de déplacement est détecté. Dans le cas de sollicitations simples, les extrema de déplacement de la structure correspondent à des extrema de déformation de l'insert piézoélectrique et donc également à des extrema de tension. Quand un extremum est détecté, l'interrupteur est fermé [30].

La capacité propre C_0 des éléments piézoélectriques et l'inductance L_I forment un circuit oscillant. 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_i correspondant à un demi-pseudo période du circuit oscillant équation $t_i = \pi \sqrt{C_0 L_I}$. Plus l'inductance est petite et plus le temps d'inversion est faible. Ainsi cette technique ne nécessite pas de grosses valeurs d'inductance, contrairement aux techniques passives classiques. D'un point de vue pratique, l'inductance est choisie de façon à ce que t_i soit entre 20 et 50 fois plus petit que la période de vibration mécanique. Lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant sortant des éléments piézoélectriques est nul et la tension évolue comme le déplacement [30].

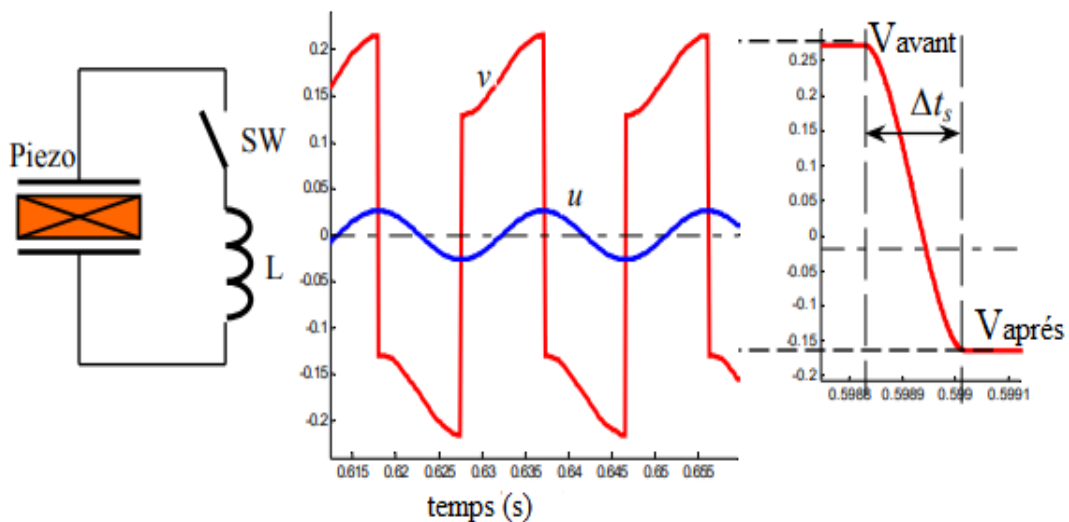


Figure 2.3 : Technique SSDI : Dispositif électronique simplifié et formes d'ondes caractéristiques [30]

L'inversion à travers l'inductance n'est pas parfaite parce qu'une part de l'énergie électrique sur les électrodes de l'insert piézoélectrique avant l'inversion est perdue dans le

dispositif de commutation. Cette qualité de l'inversion électrique est représentée par γ dans l'équation :

$$V_{après} = V_{avant} \quad (2.2)$$

L'amortissement en SSDI est donné par l'équation (2.3) en fonction du coefficient de couplage électromécanique, du facteur de qualité mécanique et de la qualité de l'inversion électrique [30].

$$A_{SSDI} = 20 \times \log \left\{ \frac{1}{1+k^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right\} \quad (2.3)$$

2.2.4.3 Technique SSDV « Synchronised Switch Damping on voltage source »:

Dans le cas de la technique SSDV classique, l'insert piézoélectrique est commuté sur une tension continue positive ou négative à travers l'inductance L . La tension n'est ainsi plus inversée par rapport à un potentiel nul, mais par rapport à un potentiel constant. La stratégie de contrôle des interrupteurs est de fermer le premier lorsqu'un maximum de déplacement est atteint, ce qui correspond également à un maximum de tension sur l'insert piézoélectrique. Cette action déclenche une oscillation électrique pseudo périodique autour de la tension $-V_{sw}$.

L'interrupteur est maintenu fermé pendant un demi-pseudo période, c'est-à-dire le même temps t_i que dans le cas de la technique SSDI. Lorsque le premier interrupteur est de nouveau ouvert, la tension est donc négative. Le deuxième interrupteur est contrôlé de la même façon que le premier. Il est fermé lorsqu'un minimum de déplacement est atteint, ce qui correspond à un minimum de tension sur l'insert piézoélectrique. Il est de nouveau ouvert après un temps t_i . A cet instant, la tension redevient positive, elle a été inversée autour du potentiel V_{sw} . Le circuit électrique correspondant à la technique SSDV classique ainsi que les formes d'ondes théoriques associées sont représentées sur la figure 2.4

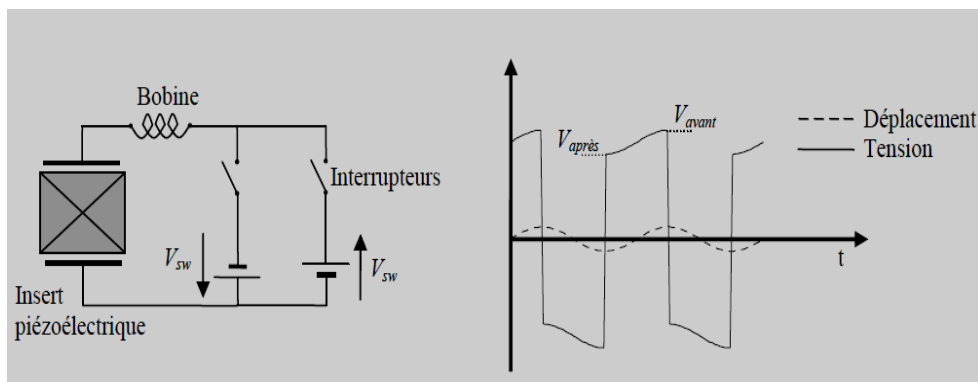


Figure 2.4: Technique SSDV classique : Dispositif électronique et formes d'ondes caractéristiques [30]

2.2.5 SSDI modal

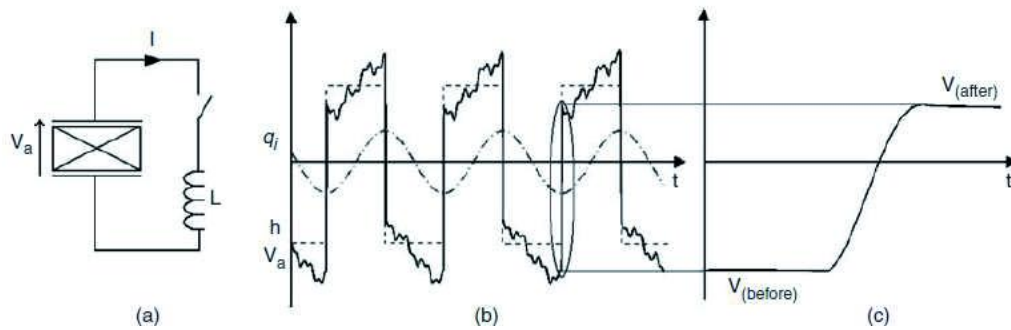


Figure 2.5 Le circuit SSDI, et les formes d'onde de tension typiques.

Dans le cas d'une excitation large bande, de nombreux extrema locaux apparaissent sur la tension d'actionnement V_a comme le montre la figure 2.5. Dans ce cas, la stratégie SSDI, qui consiste à commuter à chaque extremum de tension de l'actionneur, n'est pas optimale. Etant donné que la structure vibre principalement sur les fréquences propres, le contrôle proposé se concentre sur les modes et utilise un contrôleur SSDI pour chaque mode contrôlé piloté par le déplacement modal ciblé. Même dans le cas de mouvements complexes hautement structurés, la tension de l'actionneur est inversée lorsque le déplacement modal du mode ciblé est maximal. Cette inversion sur le maximum du déplacement modal est possible grâce à sa reconstruction numérique par l'observateur. La figure 2.5 (b) montre la forme d'onde du déplacement modal q_i , qui détermine le moment de l'inversion et la forme d'onde de la tension d'actionnement V_a de l'élément piézoélectrique.

L'inversion générée par la commande SSDI génère une fonction créneau en quadrature avec le déplacement modal visé (Figure 2.5 (c)) qui peut s'exprimer par :

$$V_a(t) = \frac{\theta^t}{c_{0a}} q(t) + h(t) \quad (2.4)$$

Le premier terme de l'équation, correspond à la tension qui doit apparaître sur l'actionneur en circuit ouvert. L'inversion implique que le deuxième terme est une fonction de créneau auto-générée qui est toujours en phase avec le signe de $q_i(t)$, c'est-à-dire la vitesse modale ciblée. La fréquence de la fonction créneau est la même que la fréquence du mode commandé. La fonction de créneau auto-générée pourrait réinjecter des harmoniques. De plus, son amplitude peut être modulée par les modes non contrôlés. Par conséquent, le contrôle peut interagir avec des modes non contrôlés, entraînant un débordement. La fréquence de modulation dépend du rapport de fréquence des différentes fréquences propres non contrôlées de la structure sur la fréquence du mode contrôlé.

2.2.6 SSDI-Max

La technique SSDI-Max est une amélioration de la technique SSDI au niveau du circuit de commutation. Elle consiste, différemment à la technique SSDI, à retarder l'instant de commutation et prendre en considération le signe de la tension, la variation de la coordonnée modale ciblée et la fenêtre du temps. Les cas de ce processus de commutation sont illustrés sur la figure 2.6. L'algorithme de cette stratégie de commande est résumé comme suit : quand un maximum de déplacement modal apparaît, le temps de la fenêtre de limitation commence à s'écouler. Au cours de cette fenêtre de temps, les signes de la tension du transducteur V_a et sa dérivée, sont examinées comme suit :

- Si la tension est positive et la dérivée est négative, la commutation est immédiate.
- Si la tension est positive et la dérivée est positive, le système attend la tension maximale prochaine. Ce délai est néanmoins limité par la fenêtre du temps.
- Si la tension est négative, le système attend l'une des conditions ci-dessus.
- Si aucun changement n'apparaît à la fin de la fenêtre de temps, la commutation est déclenchée.

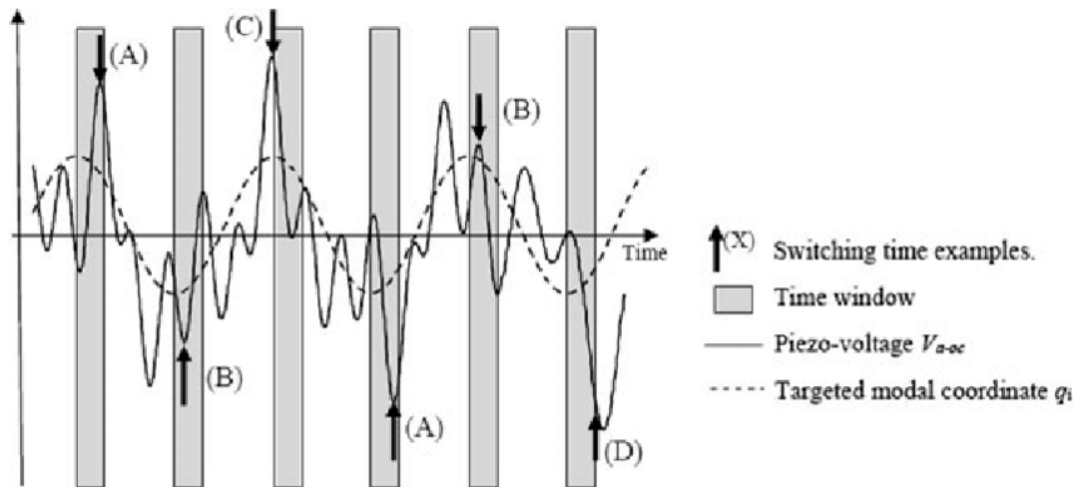


Figure 2.6 : Illustration de la stratégie SSDI-Max[32]

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une description des techniques du contrôle des vibrations tel que nous avons commencé par une explication sur les méthodes de contrôle des vibrations de leurs 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.

Chapitre 3

Energie éolienne

Chapitre 3 : Energie éolienne

3.1 Introduction

L'énergie éolienne fait partie des plus anciennes formes d'exploitation d'énergie de l'humanité. Si les bateaux à voiles ou encore les moulins à grains ont perdu de leur superbe au profit d'équivalents plus modernes, le développement récent des énergies renouvelables a remis le vent au premier plan, grâce notamment aux éoliennes. Les plus utilisées sont celles à axe horizontal. Dans ce chapitre on montre les principes de cette forme d'énergie renouvelable, ses avantages ainsi que ses inconvénients.

3.2 Définition

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [33].

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure 3.1. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.

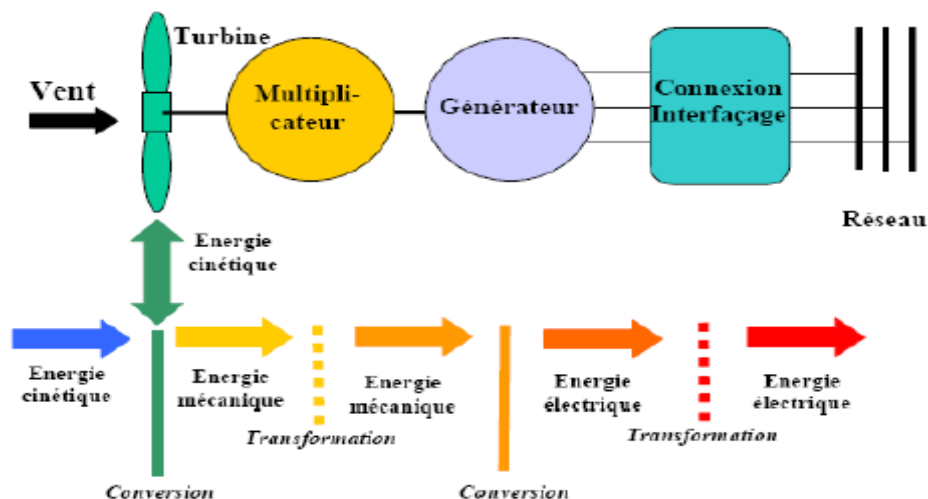


Figure 3.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [34]

3.3 Avantages et inconvénients de l'éolien

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 [35].

3.3.1 Avantages

L'énergie éolienne présente plusieurs atouts [35] :

- ✓ Elle est renouvelable, et donc inépuisable ;
- ✓ Elle est naturelle, et donc non polluante. La production d'électricité éolienne ne produit que très peu de gaz à effet de serre et aucun déchet toxique. Il s'agit donc d'une source particulièrement intéressante aux vues des objectifs de transition énergétique que se sont fixés la France et l'Europe ;
- ✓ Elle ne perturbe pas les activités agricoles, d'élevage... ;
- ✓ Elle permet aussi bien de répondre à des besoins électriques de masse qu'à des besoins particuliers plus limités et locaux ;
- ✓ Elles sont rapides à installer, mais aussi à démanteler si besoin et ne laisse pas de traces de leur passage sur les sites.

A savoir aussi : la production éolienne est en phase avec notre consommation d'électricité. En effet, le vent souffle plus en automne et en hiver, donc les éoliennes produisent plus d'électricité à ce moment-là. C'est justement la période où notre besoin en électricité est plus important, car nous chauffons plus nos logements.

3.3.2 Inconvénients

L'énergie éolienne pose toutefois quelques problèmes [35] :

- ✓ Elle dépend de facteurs météorologiques et est donc intermittente. S'il n'y a pas de vent ou si la puissance du vent n'est pas assez forte, il n'est pas possible de produire de l'électricité ;
- ✓ Les zones de développement demeurent limitées. Il n'est pas possible d'installer des éoliennes partout ;
- ✓ Elle suscite des conflits. Certains riverains d'éoliennes se plaignent de nuisances sonores, visuelles et sanitaires. Les éoliennes ne font pas l'unanimité. Les éoliennes offshore peuvent aussi être à l'origine de conflits et gêner les pêcheurs ou plaisanciers par exemple.

3.4 Types des turbines éoliennes

Il existe des éoliennes terrestres et des éoliennes en mer posées ou flottantes. Fixes et destinées aux fonds de moins de 50 mètres, les éoliennes en mer posées peuvent exploiter les forts vents marins côtiers. Avec une fondation flottante, reliée au fond par des lignes d'ancrage, ces éoliennes peuvent être implantées plus au large, dès 30 mètres de fond. Les éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal. Le modèle d'éolienne le plus répandu est l'éolienne à axe horizontal tri-pales mais il existe aussi des modèles d'éoliennes à axe vertical.

3.4.1 Les éoliennes terrestres

Les éoliennes terrestres tripales à axe horizontal sont les éoliennes les plus implantées sur le territoire [36].



Figure 3.2: Eolienne terrestre [36]

3.4.2 Les éoliennes en mer posées

Fixes et destinées aux fonds de moins de 50m, ces éoliennes, actuellement les plus puissantes, peuvent exploiter les forts vents marins côtiers [36].



Figure 3.3: Eolienne en mer posées [36]

3.4.3 Les éoliennes en mer flottantes

Avec une fondation flottante, reliée au fond par des lignes d’ancrage, ces éoliennes peuvent être implantées plus au large, dès 30m de fond.



Figure 3.4 : Eolienne en mer flottante [36]

3.5 Principaux composants d’une éolienne

Une installation est généralement constituée d’une éolienne, d’une tour avec de solides fondations et d’un ensemble d’équipements électriques pour le stockage de l’énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure 3.5 présente les composantes d’une éolienne.

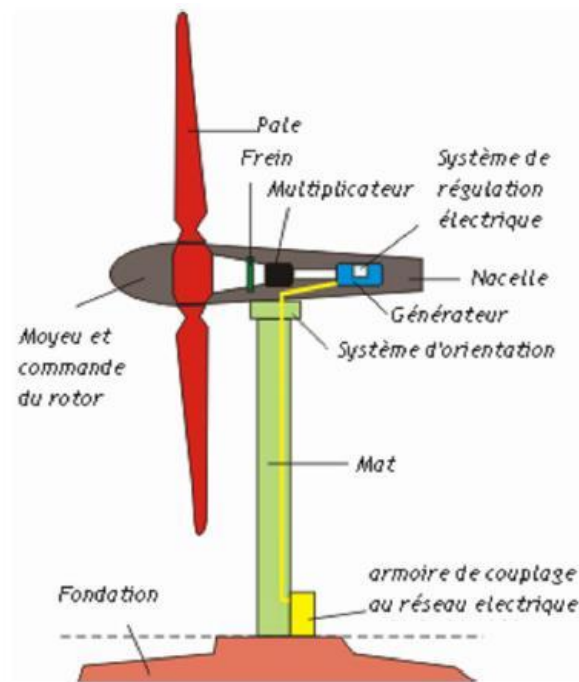


Figure 3.5 : Composante d'une éolienne de forte puissance [37]

La nacelle : Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter, le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [38].

La tour : Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation [38].

**Tour en treillis****Tour tubulaire****Mât haubané****Figure 3.6 :** Différents types de tours [38]

Le rotor : Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

**Figure 3.7 :** Un rotor d'une éolienne à axe horizontal [38]

Multiplicateur : Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs [38] :

- ✓ Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.

- ✓ L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- ✓ Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

La génératrice : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs : génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée.

Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe [38].

3.6 Fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne [39].

3.7 Pales d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement [39].

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien.

Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une pale revient à déterminer :

- ✓ La longueur de la pale : Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est

essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent.

Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

✓ La largeur de la pale : La largeur des pales intervient pour le couple de démarrages qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis. La valeur du couple augmente si la largeur de pale augmente.

✓ Le profil aérodynamique de la pale : il est choisi en fonction de ses propriétés aérodynamiques telles que la portance et la traînée mais aussi selon le couple désiré et la vitesse spécifique de la pale. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance, elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

✓ Le calage initial et le gauchissement de la pale : ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne a le meilleur rendement.

✓ Les matériaux de fabrication de la pale : le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en œuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de bois, certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

✓ Nombre de pales : Le nombre de pales B , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale.

Le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique λ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour $4 < \lambda < 10$ le nombre de pale recommandé se situe entre 1 et 3 inclusivement (Figure 3.8)

✓ Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

✓ Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.



Figure 3.8 : Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales

[38]

3.8 Géométrie d'une pale éolienne

La forme d'une coupe verticale d'une pale est déterminée 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 3.9), 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 3.9. 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 [40].

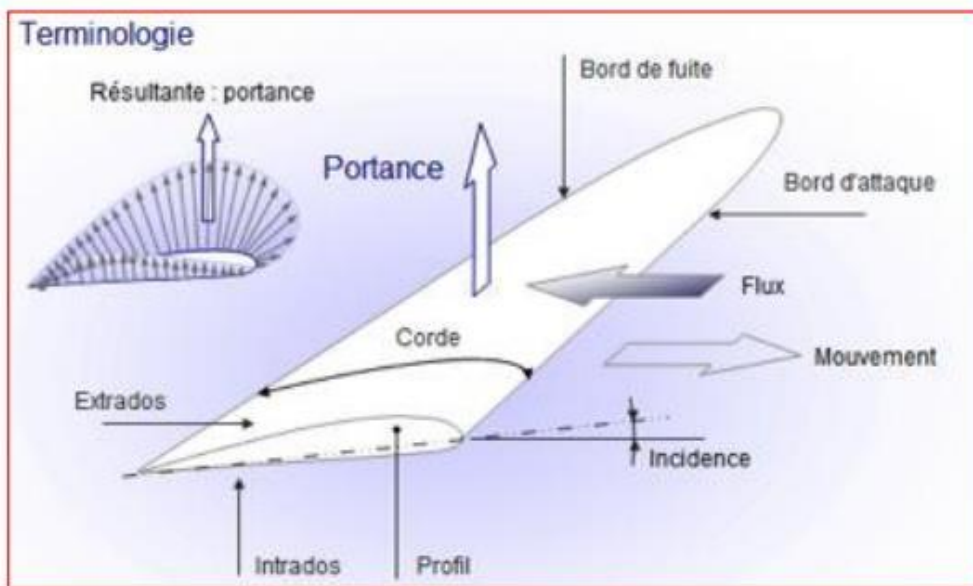


Figure 3.9 : Géométrie d'une pale éolienne [41].

3.9 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 [42].

Ces phénomènes peuvent être une source significative de dommages par usure et nuire au fonctionnement des structures. Le projet ACTAGREEN (Aeroelasticity control for transportation and green energy) a ainsi été lancé pour rechercher des techniques communes pour analyser et éliminer les oscillations induites par le vent dans les grandes structures flexibles de génie civil.

L'initiative a combiné expertise en mécanique, en aérodynamique et en contrôle et a commencé par l'étude des limites et du potentiel des volets de bord d'attaque et de fuite pour la suppression des instabilités aéroélastiques. Les résultats ont montré que même si la stabilisation du système peut être obtenue relativement simplement, il est sensible aux vitesses de vent au-delà de la vitesse de divergence torsionnelle.

Ce résultat important fixe une limite qualitative et une référence pour la performance de tous les contrôleurs utilisant des ailerons de bord d'attaque et de fuite. Dans le cas de ponts à longue portée, il a également été observé qu'il était possible d'augmenter de manière significative les performances de la structure en fixant des volets contrôlables sur le tablier sur un tiers de la

longueur totale de la travée principale.

3.10 Efforts sur une pale

La figure 3.10 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 vitesse de ce vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_r \quad (3.1)$$

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 .

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.

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V} + \vec{U} \quad (3.2)$$

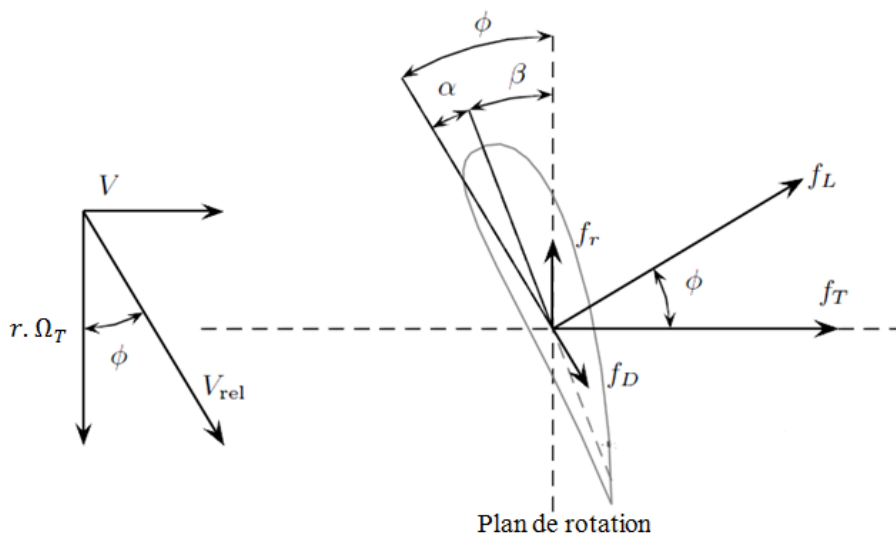


Figure 3.10: Efforts sur un élément d'une pale [43]

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. Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de trainée C_D :

$$f_L = \frac{\rho \cdot dA}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot C_L(\alpha) \quad (3.3)$$

$$f_D = \frac{\rho \cdot dA}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot C_D(\alpha) \quad (3.4)$$

Ou : ρ Densité de l'air.

A : Surface balié par le rotor de la turbine.

$C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$: 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 :

$$f_T = \frac{\rho \cdot dA}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot [C_L(\alpha) \cos(\varnothing) + C_D(\alpha) \cdot \sin(\varnothing)] \quad (3.5)$$

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 :

$$\Gamma_T = \frac{\rho \cdot dA}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot r \cdot [C_L(\alpha) \sin(\varnothing) + C_D(\alpha) \cdot \cos(\varnothing)] \quad (3.6)$$

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 [44].

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude détaillée sur l'énergie éolienne et on a donné les avantages et inconvénients de cette énergie et les différents types de turbines et aussi on a montré les principales composantes d'une éolienne, nous avons aussi parlé du principal du fonctionnement de l'éolienne.

Chapitre 4

**Contrôle de vibration des pales éoliennes par les méthodes
non-linéaires**

Chapitre 4 :

Contrôle de vibration des pales éoliennes par les méthodes non-linéaires

4.1 Introduction

Le contrôle des vibrations des pales d'éoliennes constitue un aspect crucial dans la conception et l'exploitation de ces structures. Dans ce chapitre, nous penchons sur l'analyse de la force du vent, responsable des vibrations pouvant engendrer divers problèmes tels que des dommages structurels, une usure prématurée des composants, une augmentation du bruit et des vibrations transmises au mât de l'éolienne. En effet, la compréhension des vibrations des pales éoliennes et des problèmes qui y sont associés repose sur une analyse approfondie de la force du vent. Les éoliennes subissent des charges aérodynamiques variables dues aux variations du vent, ce qui peut engendrer des vibrations indésirables.

L'objectif principal de ce chapitre est de réduire ces vibrations indésirables sur les pales éoliennes. Pour ce faire, nous utilisons la technique semi-active SSDI-max, basée sur l'utilisation de matériaux piézoélectriques. Nous examinons les performances de cette technique dans le processus en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus par la technique SSDI.

4.2 Modélisation d'une pale intelligente

Le comportement électromécanique général des structures mécaniques à éléments piézoélectriques (aubes à éléments piézoélectriques intégrés) est déterminé par les équations (4.1) et (4.2). La première est appelée équation d'état mécanique et la seconde est appelée équation d'état électrique :

$$m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k^E\delta = -\alpha V + \beta F \quad (4.1)$$

$$I = \alpha^t \dot{\delta} - c_0 \dot{V} \quad (4.2)$$

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 :

$$\delta = \phi q \quad (4.3)$$

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

Les équations (4.1) et (4.2) deviennent :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + k^E q = -\theta V + \beta F \quad (4.4)$$

$$I = \alpha^t \delta - c_0 \dot{V} \quad (4.5)$$

Avec :

$$\theta = \phi^t \alpha \quad (4.6)$$

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 :

$$m = I_d \quad (4.7)$$

$$C = 2diag(\xi)diag(\omega^D) \quad (4.8)$$

$$dk^E = diag((\omega^E)^2) \quad (4.9)$$

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.

Les structures sont généralement instrumentées à la fois par des capteurs et des actionneurs.

Lorsque la tension de l'actionneur V_a est séparée de la tension du capteur V_s et que la tension du capteur est mesurée par un amplificateur de tension (ainsi l'intensité du capteur est nulle), les équations (4.4) et (4.5) deviennent :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + k^E q = -\theta_a V_a - \theta_s V_s + \beta F \quad (4.10)$$

$$\theta_s^t - C_{0s} V_s = 0 \quad (4.11)$$

Par substitution de (4.7) en (4.6) on trouve :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + (k^E + \theta_s(C_{0s})^{-1}\theta_s^t)q = -\theta_a V_a + \beta F \quad (4.12)$$

Le système d'équations linéaires (4. 10) et (4. 11) peut être écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

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 $y = [q \quad \dot{q} \quad V_s]$ 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 :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_d \\ -M^{-1}(K^E + \theta_s C_{0s}^{-1}) & -M^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \\ +M^{-1}\beta & -M^{-1}\theta_a \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$C = \begin{bmatrix} I_d & 0 \\ 0 & I_d \\ C_{0s}^{-1}\theta_s^t & 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

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

$$V_a = C_{0a}^{-1}\theta_a^t q \quad (4.17)$$

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

4.3 Patches piézoélectriques

Il s'agit d'une plaque (la structure à utiliser) qui est complètement collée de part et d'autre de l'élément piézoélectrique. Il a une capacité qui représente la quantité de charge stockée pour un potentiel donné. Il mesure donc l'énergie (mécanique et/ou électrique) emmagasinée par unité de tension. Lors du blocage (ou de l'encastrement) d'un élément piézoélectrique, lorsqu'un potentiel est appliqué, la charge s'accumule sous forme électrique uniquement. D'autre part, si l'élément est libéré, la charge est stockée sous forme électrique et mécanique. Notez qu'ils sont également utilisés dans le double rôle de capteurs ou d'actionneurs.

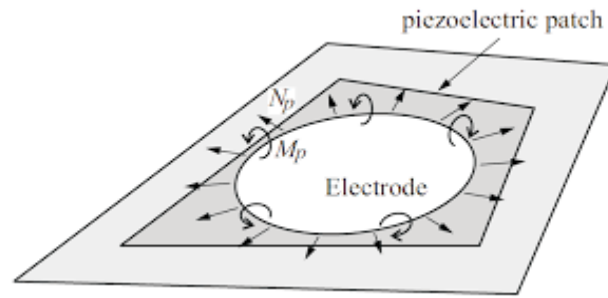


Figure 4.1 : Illustration montrant les efforts appliqués par une électrode [45]

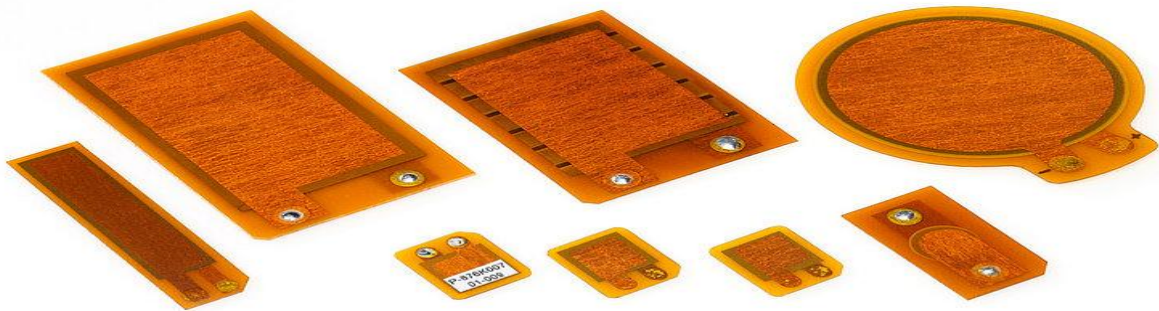


Figure 4.2 : Patches piézoélectrique [46]

4.4 Définition de la structure intelligente

La structure utilisée dans la simulation et l'analyse ci-dessous est une pale d'éolienne fixe avec quatre inserts piézoélectriques (deux capteurs et deux actionneurs). Les dimensions et les propriétés physiques sont présentées dans le tableau 4.1. La figure 4.2 montre cette pale comme un élément oscillant. Cette structure a été identifiée selon le modèle décrit.

Tableau 4.1 : Les dimensions de la pale éolienne [47].

Type de profil	NACA 4412
Nombre des pales	3
Longueur de la pale	1,5 m
Largeur de base de la pale	0,15 m
Largeur de la pointe de la pale	0.0312 m

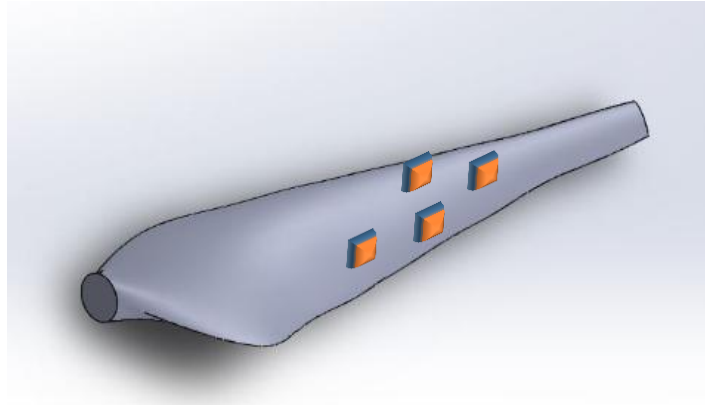


Figure 4.3 : La configuration approximative de la pale après l'insertion des éléments piézoélectriques.

4.5 Simulation

4.5.1 L'analyse de la force du vent (la force axiale)

Le tableau suivant présente les éléments de la pale

Tableau 4.2 : La géométrie de la pale éolienne.

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (°)
0.1300	0.1687	24.7274
0.1900	0.1370	16.7652
0.2500	0.1124	11.2761
0.3100	0.0936	7.6140
0.3700	0.0794	5.2344
0.4300	0.0688	3.6945
0.4900	0.0608	2.6531
0.5500	0.0546	1.8706
0.6100	0.0497	1.2090
0.6700	0.0457	0.6318
0.7300	0.0421	0.1652
0.7900	0.0388	-0.2584
0.8500	0.0358	-0.6820
0.9100	0.0332	-1.1056
0.9700	0.0312	-1.5292

Et par l'application de l'équation (3.5) on trouve les valeurs des forces dans le tableau suivant :

Tableau 4.3 Les valeurs calculées des forces axiales en fonction de la vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent.

Vitesse du vent (m/s)	Rapport de vitesse du vent λ		
	8	10	12
1	2.282851e+00N	2.939620e+00	3.347480e+00
2	9.131405e+00	1.175848e+01	1.338992e+01
3	2.054566e+01	2.645658e+01	3.012732e+01
4	3.652562e+01	4.703392e+01	5.355969e+01
5	5.707128e+01	7.349050e+01	8.368701e+01
6	8.218264e+01	1.058263e+02	1.205093e+02
7	1.118597e+02	1.440414e+02	1.640265e+02
8	1.461025e+02	1.881357e+02	2.142387e+02
9	1.849109e+02	2.381092e+02	2.733008e+02
10	2.282851e+02	2.942545e+02	3.403443e+02
11	2.762250e+02	3.578559e+02	4.147887e+02
12	3.287306e+02	4.279020e+02	4.968876e+02
13	3.856722e+02	5.044064e+02	5.869828e+02
14	4.471534e+02	5.874010e+02	6.838238e+02
15	5.131700e+02	6.769098e+02	7.851011e+02

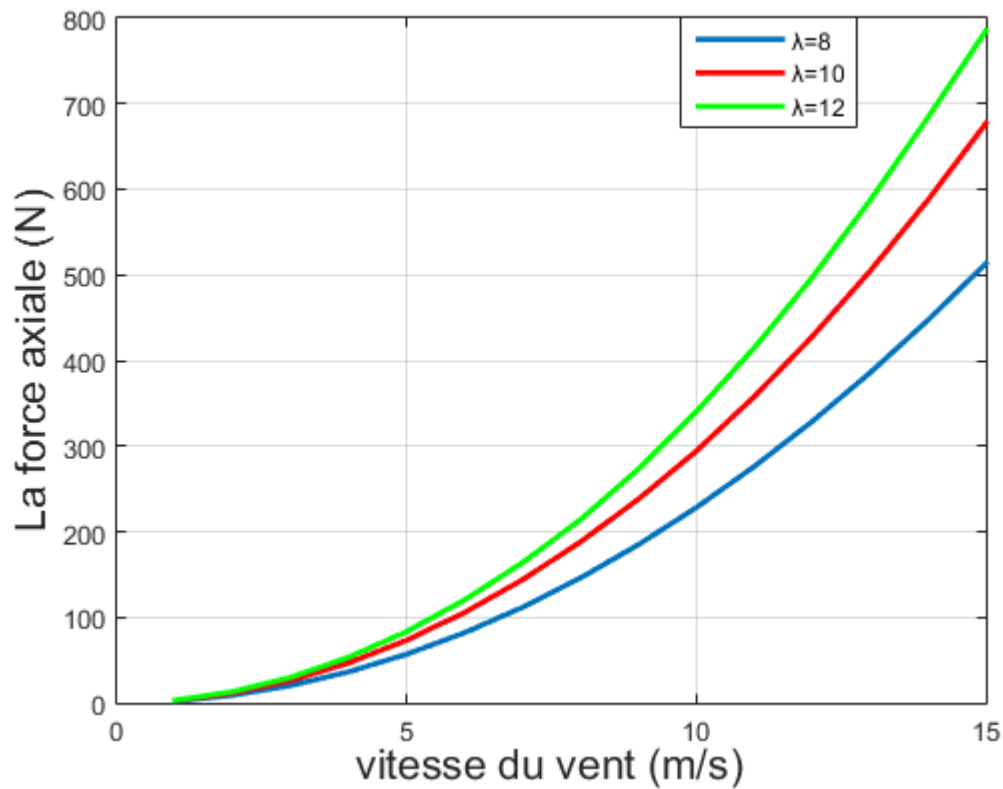


Figure 4.4 : Vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent λ . Effet sur la force axiale de sur la pale de profil NACA4412.

L'objectif de ces courbes est de comprendre l'influence de λ sur la force exercée sur la pale 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 λ est élevée, plus la force est grande.

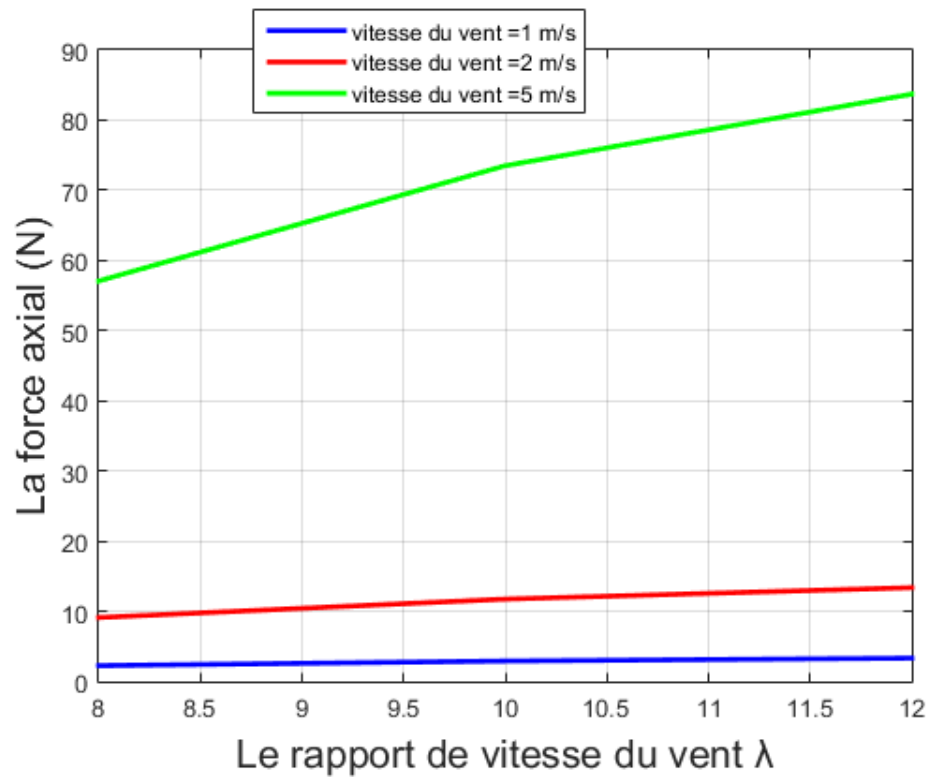


Figure 4.5 : Le rapport de vitesse du vent λ et vitesse du vent. Effet sur la force axiale de sur la pale de profil NACA4412.

La vitesse du vent affecte à la fois sur la force axiale et aussi λ (rapport de vitesse du vent), mais la vitesse du vent a un effet plus grand plus que λ (rapport de vitesse du vent).

4.5.2 Contrôle de vibration de la pale

L'excitation des forces des vents

Premier excitation : Pour une vitesse du vent constant=10 m/s, $\lambda=10$, $f=2.942545e+02$ N

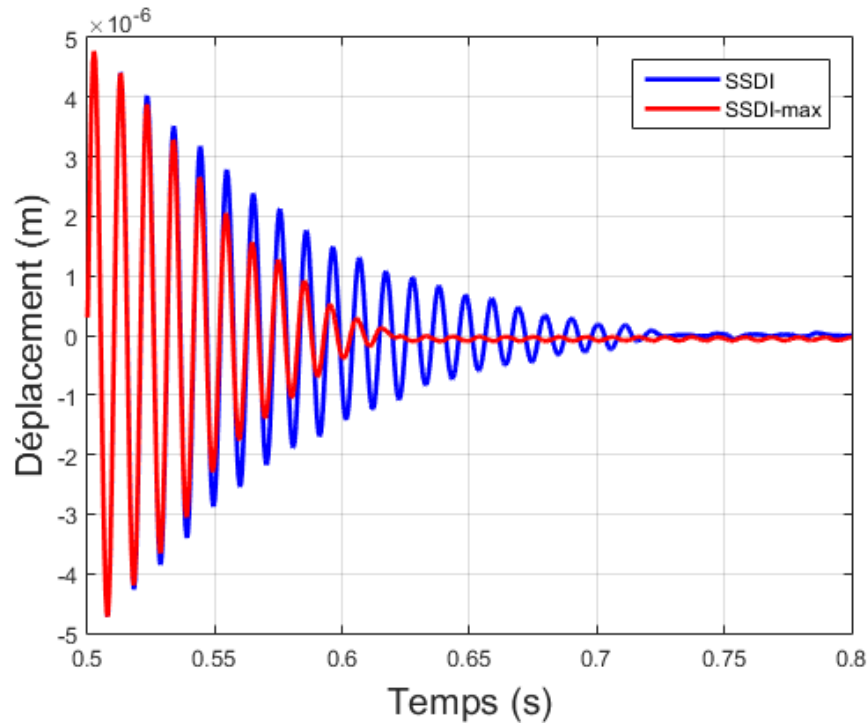


Figure 4.6 : Déplacement de mode 1 (vitesse du vent =10 m/s et $\lambda=10$)

A partir de la figure 4.6 et après l'utilisation du contrôle SSDI-max et SSDI on remarque que le contrôle SSDI-max c'est mieux que le contrôle SSDI d'une part, la diminution du déplacement cette diminution montre l'effet de l'amortissement SSDI-max sur la structure vibrante (la pale éolienne) et prouvé son efficacité sur l'amélioration de performances.

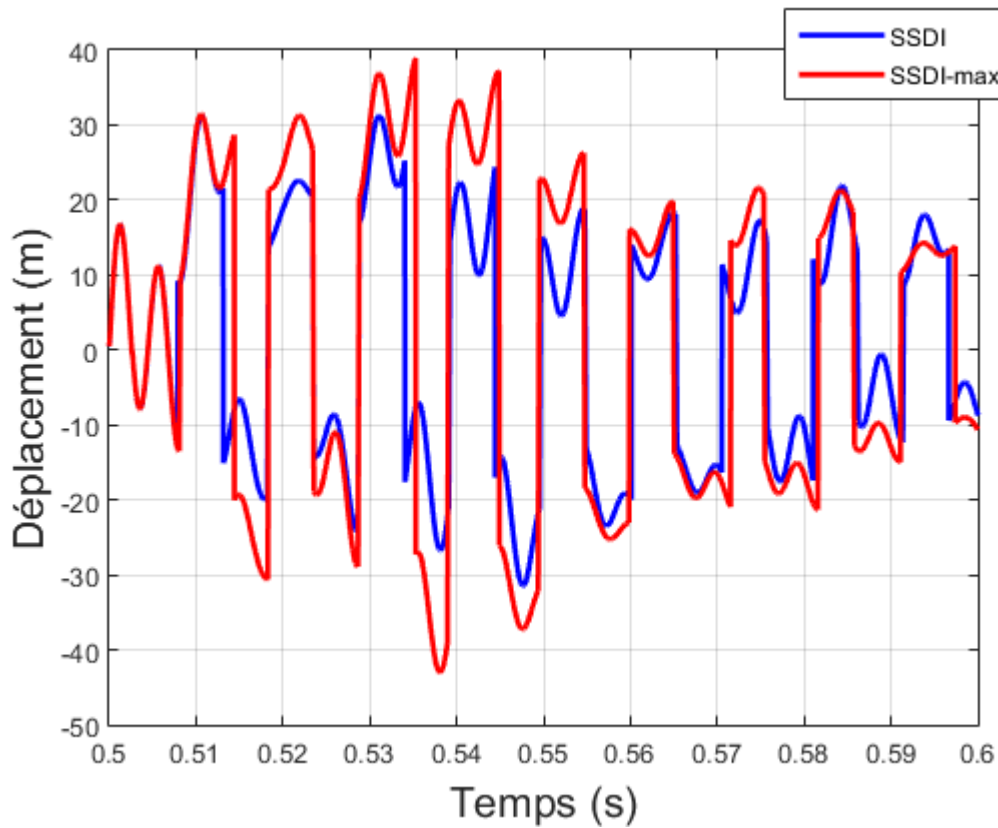


Figure 4.7 : Tension aux bornes de l'actionneur (vitesse du vent =10 m/s et $\lambda=10$)

La figure 4.7 montre la tension aux bornes de l'actionneur on observe une augmentation dans son amplitude après le contrôle SSDI-max et SSDI modale, mais la plus grande augmentation est lors de l'utilisation du contrôle SSDI-max parce que cette croissance de tension est la raison de l'augmentation des performances de l'actionneur et donc l'amélioration de l'amortissement.

Deuxième excitation : pour la somme de 4 sinus d'amplitude $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$.

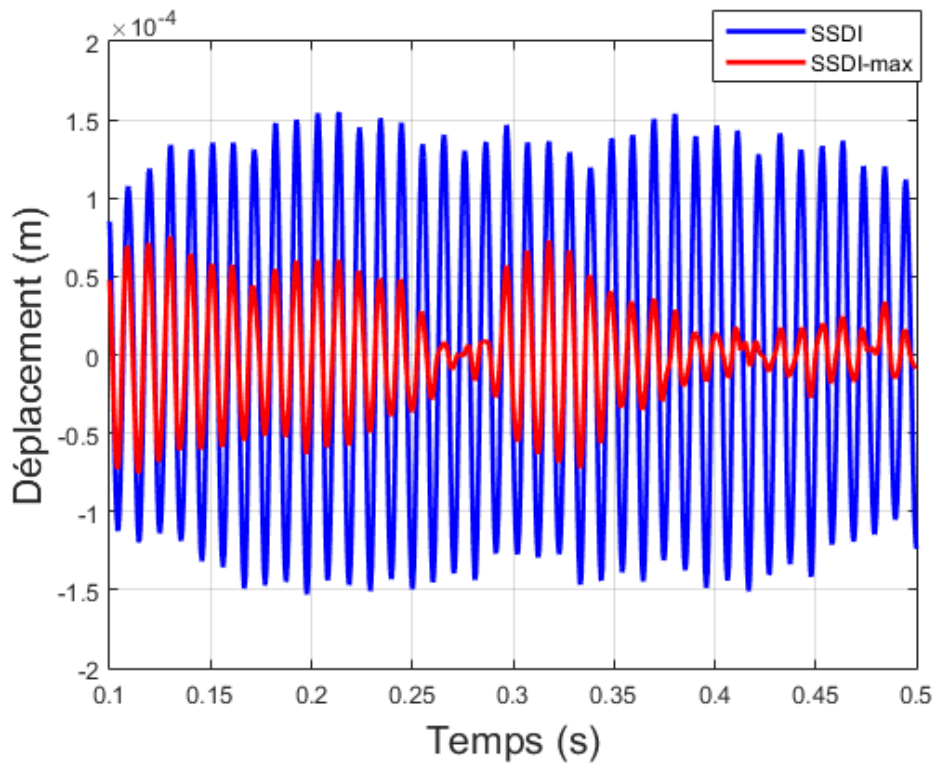


Figure 4.8 : Déplacement de mode 1 (vitesse du vent est somme de quatre sinus d'amplitude $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$).

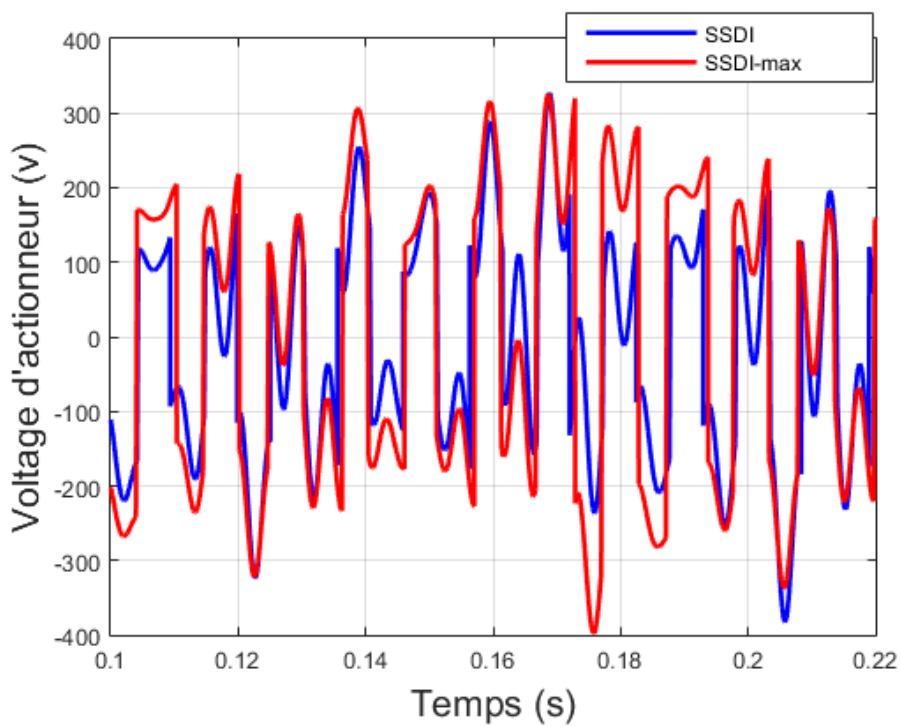


Figure 4.9 : Tension aux bornes de l'actionneur (Vitesse du vent est la somme de quatre sinus d'amplitude est $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$).

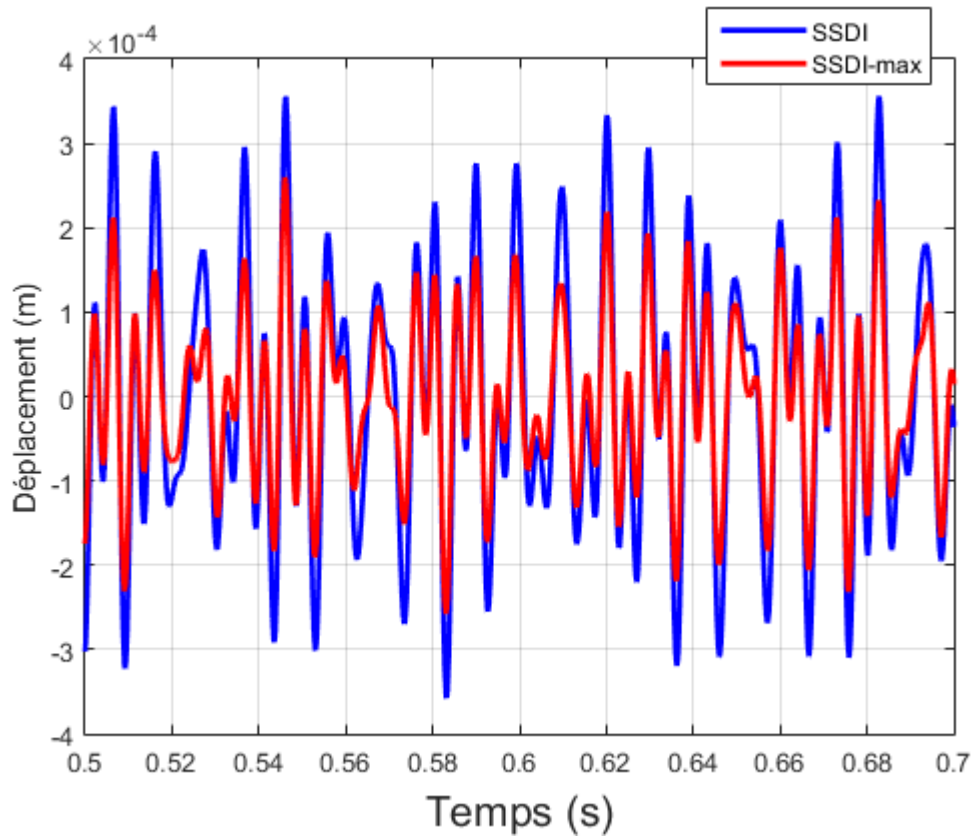


Figure 4.10 : Déplacement de 4 modes (Vitesse du vent est somme de quatre sinus d'amplitude $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$).

4.6 Conclusion

La commande SSDI-max offre très bonnes performances par rapport le cas de contrôle SSDI modal, la technologie de contrôle SSDI modal a été développée à la technique SSDI-max qui aussi amortir les vibrations mieux, et ainsi augmenter la durée de vie de la pale.

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, 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 à la structure afin d'amortir ou de réduire les vibrations.

Et pour cela, et dans le premier chapitre, ont à parler sur les matériaux intelligents, et nous avons donné les définitions et les propriétés associées à la piézoélectricité. On a abordé également plus en détail ces matériaux piézoélectriques sans oublier les applications.

En suit, le chapitre 2 a traité de la technologie de contrôle des vibrations. Ensuite, nous avons abrégé les trois technologies SSD de base, décrire les types (SSDS, SSDI, SSDV) et leurs principes de fonctionnement, puis discuter de cette classe de systèmes de contrôle des vibrations.

Dans le chapitre 3, nous avons examiné en détail l'énergie éolienne, montrant les avantages et les inconvénients de cette énergie et des différents types de turbines. Nous avons couvert les principaux composants d'une éolienne et les principales opérations d'une éolienne.

Dans le dernier chapitre, après avoir simulé numériquement le mouvement structurel (déplacement) à l'aide du logiciel Matlab/Simulink avec une nouvelle technologie appelée SSDI Max qui a été développé à partir de la technologie précédente. Nous concluons que cette technique est très bonne pour l'amortissement des vibrations et est plus efficace par rapport aux SSDI modal. Et ça nous ramènes a une durée de vie plus longue de la pale.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [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] CHETOUH Samir, « Caractérisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et leur application », *Université Mentouri Constantine, Mai 2010*.
- [3] Questions & réponses sur les phénomènes scientifiques quotidiens, *Scritronscience.com*.
- [4] Matériaux Electroactifs et Applications. <https://matelec2020.sciencesconf.org>.
- [5]. Abdelkader BENABOU, *thèse Doctorat : « contribution à la caractérisation et à la modélisation des matériaux magnétiques en vue d'une implantation un code de calcul de champ », Université de LILLE I, Décembre 2002*.
- [6] http://www.pxi.com/praxis_publicpages/CLEM.html.
- [7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-actifs-et-intelligents-42126210/alliages-a-memoire-de-forme-m530/#biblio>
- [8] <http://www.science-explorer.de/astonomie/astro.html>.
- [9] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845697075500110>
- [10] <https://www.cours-et-exercices.com/2012/10/les-materiaux-intelligents.html>
- [11] O. Boissonneault, F. Wong, *Rapport technique DRDC Valcartier, TR 2006-036, 2006*.
- [12] <http://www.sports-gear-l.com/Nike-Flexon-Reveal-2-Sunglasses.htm>.
- [13] <http://www.mhvi.org/ownersmanual/procedangiob.asp>.
- [14] <http://perso.wanadoo.net.ma/orthobest/ortho.htm>.
- [14] B. Nogarède, *Machines tournantes, principe et constitution, Techniques de l'ingénieur, vol. D3411, 2001*.
- [16] J. Salenson, « Motorisations piézoélectriques à fonctionnement quasi-résonant ou quasi-statique : analyse des contraintes d'alimentation et expérimentation de structures innovantes », *Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2000*.
- [17] E. Boucher. *thèse doctorat, Université de Lyon, n° 02 ISAL 0088, 2002*.
- [18] J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*, Clarendon Press, Oxford (1979).
- [19] <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/>
- [20] Chevallier, Gaël, and Ayech Benjeddou. "Couplage électromécanique effectif dans les structures piézoélectriques composites. Caractérisations expérimentale et numérique." *Revue des composites et des matériaux avancés* 19, no. 3 (December 31, 2009)
- [21] D. Royer and E. Dieulesaint, « Elastic and piezoelectric constants of trigonal selenium and tellurium crystals », *Journal of Applied Physics*, vol. 50, 1979.

- [22] J. Fousek, L.E. Cross, D.B. Litvin, « Possible piezoelectric composites based on flexoelectric effect », *Materials Letters*, vol. 39, 1999
- [23] D. VASIC, « Micro-transformateur piézoélectrique intégré sur substrat en silicium », *JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003, Ecole Normale Supérieure de Cachan Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie SATIE, France*.
- [24] N.W.Hagood and A.Von Flotow. « Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks ». *Journal of Sound and Vibration*, 146(2) :243–268, April 1991.
- [25] L. YAN, « thèse de doctorat : Contrôle de vibrations large bande à l'aide d'éléments piézoélectriques utilisant une technique non-linéaire » *et de l'art*, 04 10 2013.
- [26] S. HARARI, « Contrôle modal semi-actif et actif à faible consommation énergétique par composants piézoélectriques » *INSA de Lyon*, 2009.
- [27] P.A. Nelson and S.J. Elliott. « Active control of sound ». *Elsevier*, 2005.
- [28] C. Maurini, F. Dell'Isola, and D. Del Vescovo. « Comparison of piezoelectronic networks acting as distributed vibration absorbers ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18:1243–1271, 2004.
- [29] T. Monnier, P. Guy, M. Lallart, L. Petit, D. Guyomar, and C. Richard. « Optimization of signal pre-processing for the integration of cost-effective local intelligence in wireless self-powered structural health monitoring ». *Advances in Science and Technology*, 56 :459–468, 2008.
- [30] T. Richard, « Diminution du coefficient de transmission acoustique d'une paroi à l'aide d'amortisseurs piézoélectriques semi-passifs », *thèse de doctorat de laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité de l'INSA*, 2007.
- [31] A. Badel, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », *thèse de doctorat, Ecole Doctorale de l'Université de Savoie*, 2006.
- [32] Chérif, A. et al.: Simulation de l'amortissement vibratoire multimodal d'une structure de plaque en utilisant une technique SSDI-Max modale. *J. Intel. Mater. Syst. Structure*. 1–15 (2012)
- [33] G. YAICHI, « Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur » 06/06/2018.
- [34] A. Mirecki. Thèse Doctorat (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance) *de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005)*.
- [35] S. Fortuné, « étude et conception d'une centrale éolienne couplée au réseau électrique avec groupes électrogènes 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.
- [36] Benamara Nabil, L'Energie Eolienne, *cours destiné aux étudiants, S2, UFE 1.2.2, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie, 2021-2022*.
- [37] Kerikeb Mohamed, Thème: Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative. *Mémoire de MAGISTER U. Skikda, Année universitaire 2011/2012*

- [38] Sadi Oufela Aissa, intitulé : Evaluation de la puissance aérodynamique d'une éolienne a axe Horizontal, *Mémoire de master université de T i z i O u z o u*
- [39] L. M. Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchroné à AimantPermanant (MSAP) utilisée dans un système éolienne» chez *Etat de l'Art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne*, 24 /06 /2012.
- [40] A. I. E. A. ZAHRA, «Definition du choix type d'une eolienne application dans un site favorable» chez *technique des eolienne*, 09/09/2020.
- [41] 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.
- [42] «Réduire les vibrations dues au vent pour les ponts et les pales d'éolienne» 1 Mars 2014.
- [43] M. SAMIR, «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA »2009.
- [44] N. LAVERURE, «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» 2005.
- [45] A. Preumont, «Vibration control of active structures» *Kluwer academic pubischer*, 2002.
- [46] «<https://www.pifrance.fr/fr/produits/transducteurs-et-actionneurs-piezoelectriques/p-876-duraact-patch-transducer-101790/>».
- [47] Wood, D. (2011). *Small wind turbines. In Advances in wind energy conversion technology*, (pp. 195-211). Springer, Berlin, Heidelberg