

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Energie renouvelable

Par : Benzerara Noura

Sujet

Contrôle semi-passif de vibration des pales éoliennes avec l'intelligence artificielle

M. Zehar Djamila

M. Aouabed Fatiha

M. Chérif aida

MCB

MCB

PR

Univ-BBA

Univ-BBA

Univ-BBA

Président

Examineur

Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Dédicace

Je voudrais dédier ce mémoire :

À mon père et à ma mère.

À mon mari.

À mes sœurs et frères.

Remerciements

Premiers mots de louanges et de remerciements à Dieu qui nous a bénis et nous a permis d'écrire ce mémoire.

Je remercie le professeur Cherif Aida, Yakoubi Hadja, le jury et le président du comité.

Table des matières

titre	Page
remercient	
Liste de figure	
Liste de tableau	
Liste d'abréviation	
Introduction générale	1
Chapitre1 : généralité sur les matériaux piézoélectriques	
1.1 Introduction	2
1.2 Historique	2
1.3 Définition des matériaux piézoélectriques	3
1.4 Types des matériaux piézoélectrique	3
1.4.1 Céramique	3
1.4.2 Les polymères	4
1.4.3 Les composites	4
1.4.4 Le cristal	4
1.5 Les avantages	5
1.6 Les inconvénients	5
1.7 Les applications des matériaux piézoélectrique	5
1.7.1 Effet direct	5
1.7.1.1 Les capteurs	5
1.7.1.2 Production d'énergie	5
1.7.2 Effet inverse	8
1.8 Les caractéristiques des matériaux piézoélectriques	9
1.9 Classification des matériaux piézoélectriques	10
1.9.1 matériaux naturellement piézoélectriques	10
1.9.2 matériaux ferroélectriques	10
1.10 Equations piézoélectrique	11
1.11 Coefficients de couplage électromécanique	12
Conclusion	12
Chapitre2 : méthodes de contrôle des vibrations non linéaires	
2.1 Introduction	13
2.2 Méthode de contrôle	13
2.2.1 Contrôle passif	13
2.2.2.1 Définition	13
2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif	14
2.2.1.3 Avantages du contrôle passif	14
2.2.2 Contrôle actif	15
2.2.2.1 Avantages du contrôle actif	16
2.2.2.2 Inconvénients du contrôle actif	16
2.2.3 Contrôle semi passif	16
2.2.3.1 Technique SSDS(synchronized switch on short circuit)	17
2.2.3.2 Technique SSDI(synchronized switch on short circuit inductor)	17
2.2.4 Contrôle semi actif	18

2.2.4.1 Technique SSDV(synchronized switch on short circuit on voltage source)	18
2.2.3.4 SSDI modal	20
2.5 Conclusion	21
Chapitre3 : énergie éolienne	
3.1 Introduction	22
3.2 Différent types d'énergie renouvelables	22
3.2.1 Energie solaire photovoltaïques	22
3.2.2 L'énergie hybride	22
3.2.3 Energie biomasse	22
3.2.04 Energie géothermie	23
3.3 Définition énergie éolienne	23
3.4 avantages de l'énergie éolienne	24
3.5 inconvénients de l'énergie éolienne	24
3.6 principe composants d'une éolienne	24
3.7 Fonctionnement d'une éolienne	25
3.8 Pale éolienne et vibration	26
3.9 Types des turbines éoliennes	26
3.9.1 aspect de structure	26
3.9.2 aspect lieu d'installation	27
3.10 Géométrie d'une pale éolienne	28
3.11 Efforts sur une pale	29
Conclusion	31
Chapitre4 : contrôle de vibration des pales éolienne par les réseaux de neurones	
4.1 Introduction	32
4.2 Réseau neuronal	32
4.2.1 Définition	32
4.2.2 Fonctionnement	33
4.2.3 Fonction d'activation	33
4.3 Les avantages	34
4.2.4 Les inconvénients	35
4.3 Définition de la structure intelligente	35
4.4 Modélisation d'une pale intelligente	36
4.5 Simulation	38
4.5.1 L'analyse de la force du vent	39
4.5.2 Contrôle des vibrations des pales d'éolienne par la méthode SSDI	39
4.5.3 Contrôle des vibrations de la pale éolienne par les réseaux neurones	43
4.6 Conclusion	48
Conclusion générale	49

Liste des figures

figure	Page
---------------	-------------

Chapitre 1	
Figure 1.1 effet piézoélectrique direct et inverse	3
Figure 1.2 brique piézoélectrique	6
Figure 1.3 t-shirt pour recharge le téléphone	7
Figure 1.4 générateur de l'énergie pendant la marche	8
Figure 1.5 métro piézoélectrique	9
Chapitre 2	
Figure 2.1 principe des circuits de dissipation à commande passive(a) structure séries (b) structure parallèle	14
Figure 2.2 système de contrôle actif typique	15
Figure 2.3 type de contrôle active(a) rebouclé(b) par anticipation	16
Figure 2.4 circuit SSDS	17
Figure 2.5 formes d'onde SSDS	17
Figure 2.6 circuit SSDI	18
Figure 2.7 formes de SSDI	18
Figure 2.8 circuit de SSDV	19
Figure 2.9 forme d'onde SSDV	19
Figure 2.10 forme d'onde typique de déplacement et de voltage	20
Figure 2.11 formes d'onde de tension typique, ou v , est la tension d'actionneur piézoélectrique et q premier déplacement modal correspondant	21
Chapitre3	
Figure 3.1 Energie éolienne	23
Figure 3.2 principe composant d'une éolienne	25
Figure 3.3 Eolienne à axe horizontale (a) et à axe verticale(b)	26
Figure 3.4 Eolienne onshores	27
Figure 3.5 Eolienne offshore	28
Figure 3.6 géométrique d'une pale éolienne	28
Figure 3.7 effort sur un élément d'une pale	29
Figure 3.8 Evolution des coefficients de portance C et de trainée	31
Chapitre 4	
Figure4.1 les réseaux neurones	33
Figure4.2 la configuration approximative de la pale	36
Figure4.3 vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent λ effet sur la force axiale de sur la pale de profile NACA 4412	39
Figure4.4 déplacement pour une vitesse du vent	40
Figure4.5 tension d'actionneur (v) en fonction du temps $2.282551 \times 10^0 (\lambda=8 \ v=1)$ $2.939620 \times 10^0 (\lambda=10 \ v=1)$	41
4.6 déplacement pour une force somme de 4 sinus d'amplitudes $2.28251 \times 10^0, 3.347480 \times 10^0$ et 3.347480×10^0	42
Figure 4.7 tension d'actionneur en fonction de temps	43
Figure 4.8 fenêtre d'entraînement de réseau de neurones	44
Figure 4.9 affichage de la valeur de la fonction objectif	45
Figure 4.10 affichage des valeurs	46
Figure 4.11 vibration prédites avec les forces ajustées	47

Liste de tableau

Tableau	Page
Chapitre 1	
Tableau 1.1 caractéristique piézoélectriques des matériaux piézoélectrique	9
Tableau 1.2 grandeur mécanique et électrique	11
Chapitre 4	
Tableau 4.1 fonction d'activation	34
Tableau 4.2 les dimensions et les propriétés physiques de la pale	35
Tableau 4.3 caractéristique des inserts piézoélectrique p188	36

Abréviations et Symboles

SSDS : synchronized switch damping on short circuit:

SSDV :synchronized switch damping on voltage source

SSDI:synchronized switch damping on inductance

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 traînée et coefficient de portance respectivement.

□: 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.

AMF : alliages à mémoire de forme.

SW : switch

Résumé

Lorsqu'il s'agit d'éoliennes, elles sont confrontées à un problème majeur de vibrations qui peuvent affecter les performances du moteur et réduire sa durée de vie, ces vibrations sont généralement contrôlées grâce à l'utilisation de système de contrôle intelligents tel que les réseaux de neurones modaux et artificiels ssdi ssds ssdv ssdi modal. Ces réseaux surveillent et analysent en performance les vibrations et prennent des mesures correctives pour réduire les vibrations et garantir un fonctionnement stable et sûr de la turbine.

ملخص:

عندما يتعلق الأمر بتوربينات الرياح، فإنها تواجه مشكلة كبيرة مع الاهتزازات التي يمكن أن تؤثر على أداء المحرك وتقلل من عمر الخدمة. عادة ما يتم التحكم في هذه الاهتزازات من خلال استخدام أنظمة التحكم الذكية مثل ssdi ssds ssdv ssdi modal والشبكات العصبية الاصطناعية.

Abstract :

When it comes to wind turbines, they face a major problem with vibrations that can affect the performance of the motor and reduce its service life. These vibrations are usually controlled through the use of intelligent control systems such as ssdi ssds ssdv ssdi modal and artificial neural networks. These networks continuously monitor and analyze vibrations and take corrective measures to reduce vibrations and ensure stable and safe performance of the turbine.

Introduction générale

Actuellement, de nombreux pays sont confrontés à des difficultés pour transporter l'électricité produite par les sources d'énergie alternatives, telles que l'énergie éolienne. Ces difficultés peuvent réduire l'efficacité de la production et augmenter l'usure des équipements. Afin de relever ces défis, il est envisagé de tirer parti des technologies de contrôle utilisant des matériaux intelligents tels que les matériaux piézoélectriques.

Les techniques basées sur les matériaux piézoélectriques, les systèmes de contrôle et les réseaux de neurones sont des solutions prometteuses pour réduire les vibrations dans les systèmes de production d'énergie éolienne. Les matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés pour convertir des vibrations mécaniques en énergie électrique, réduisant ainsi l'effet néfaste de ces vibrations sur le système de production d'électricité. À l'aide de techniques de contrôle et de réseaux neuronaux, les performances des systèmes de production d'énergie éolienne peuvent être améliorées en s'adaptant aux changements des conditions environnementales.

Ce mémoire vous présentera les matériaux piézoélectriques, les méthodes de contrôle, l'énergie éolienne et les réseaux de neurones. Il est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre aborde les matériaux intelligents en discutant notamment des alliages à mémoire de forme. Ensuite, nous explorerons les concepts et les caractéristiques associées à la piézoélectricité. Ce chapitre décrira les équations qui régissent ce phénomène et mettra en lumière leurs diverses applications.

Le deuxième chapitre couvre la technologie de contrôle des vibrations, en détaillant les schémas de contrôle des vibrations et les technologies SSD de base, y compris les types (SSDS, SSDI, SSDV) et leurs principes de fonctionnement.

Le troisième chapitre aborde les principes de base de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique en utilisant des turbines éoliennes et en expliquant les concepts physiques qui contrôlent leur fonctionnement.

Dans le quatrième et dernier chapitre, l'accent est mis sur la simulation d'un système d'éolienne et sur le contrôle par un réseau de neurones.

Chapitre 1 :

Généralités sur les matériaux piézoélectriques

1.1 Introduction

C'est fascinant de voir comment les matériaux intelligents ont évolué au fil du temps. En effet, ces matériaux ont la capacité de modifier leurs propriétés en réponse à certaines influences telles que la chaleur ou les aimants. Les frères Curie ont joué un rôle important dans la découverte de ces matériaux au 19^{ème} siècle. Ils ont notamment découvert que le quartz pouvait produire de l'énergie électrique lorsqu'il était soumis à une pression mécanique. Depuis lors, les études et les recherches se sont développées, permettant de faire progresser ces matériaux et d'explorer de nouveaux domaines d'utilisation.

1.2 Historique

Le lien entre l'électromagnétisme et l'acoustique permet de coupler les grandeurs électriques et mécaniques. Le phénomène piézoélectrique, découvert par Pierre et Jacques Curie en 1880, en est un exemple. Ce phénomène permet d'agir sur l'état mécanique d'une structure par un champ électrique, et vice versa. Depuis plus d'un siècle, la piézoélectricité est utilisée dans une variété d'applications, allant des capteurs ultrasonores aux récupérateurs d'énergie en passant par l'électronique de faible puissance. Ce champ d'application ouvre des perspectives prometteuses pour l'avenir[1].

En effet, l'effet piézoélectrique inverse a été découvert en 1881. Cela signifie que les cristaux peuvent se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Ces découvertes ont ensuite été appliquées pendant la Première Guerre mondiale, notamment en 1917, pour la création des sonars permettant de détecter la position des sous-marins. C'est fascinant de voir comment les avancées dans ce domaine ont ouvert la voie à de nombreuses applications et innovations. [2]

1.3 Définition des matériaux piézoélectriques

Le mot « piézoélectricité » provient du mot grec « piézein », qui signifie appuyer ou presser. Ainsi, le terme « piézoélectrique » fait référence à une propriété que possèdent certains matériaux leur permettant de se polariser électriquement, produisant soit un potentiel, soit un champ sous contrainte mécanique. Le terme « effet piézoélectrique direct » est utilisé pour décrire ce phénomène. Cet effet est réversible, de sorte que les forces internes provoquent la déformation d'un matériau piézoélectrique soumis à un champ électrique. Cette déformation change en fonction de l'amplitude du champ électrique appliqué. [3]

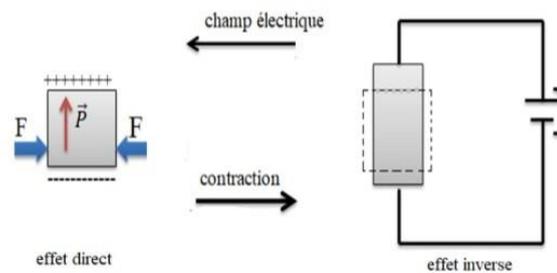


Figure 1.1: Effet piézoélectrique direct et inverse [3]

1.4 Types des matériaux piézoélectriques

Depuis leur découverte, les matériaux piézoélectriques ont été largement utilisés. Il existe plusieurs types, chacun ayant ses propres caractéristiques uniques. Nous allons maintenant présenter quatre types bien connus comme suit :

1.4.1 Céramique

Sans aucun doute, les matériaux les plus adaptés à une utilisation ergographique à l'époque moderne sont les céramiques avec électronique piézoélectrique. Ceux-ci sont fréquemment utilisés, mais ils sont également impliqués dans la production des composites que nous décrivons plus loin. En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière. Citons entre autres les titanates de baryum, qui sont les ancêtres

des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée, les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT, et enfin les métaniobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. [4]

Des composites que nous finirons par décomposer, il existe en fait une pléthore de compositions diverses avec des propriétés électriques et mécaniques variées, ce qui permet de toujours trouver une céramique adaptée à une application donnée. Parmi eux se trouvent les titanates de baryum, qui sont les ancêtres de la céramique moderne ; la famille PZT (plomb, zirconate titanate), qui comprend cinq à six compositions différentes et est la plus utilisée ; les titanates de plomb, qui rattrapent progressivement le PZT ; et enfin, les métaniobates de plomb, utilisés dans l'imagerie haute résolution.

1.4.2 Les polymères

Également connus sous le nom de copolymères, tels que le PVDF partiellement cristallisé et le PVDF-TrFE, ces matériaux peuvent être partiellement cristallisés pour fournir des matériaux plus conformes, qui sont mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à la réception sonore sous-marine. Bien que le PVDF soit le plus connu, les chaînes de polymère peuvent s'auto-orienter lorsqu'un champ électrique est appliqué. [4]

1.4.3 Les composites

Les composites sont des matériaux dans lesquels les matériaux piézoélectriques sont incorporés dans une matrice non-piézoélectrique, telle qu'une résine. Ces composites sont plus efficaces que les céramiques conventionnelles dans les transducteurs acoustiques haute fréquence utilisés en imagerie médicale, en raison de leur meilleur coefficient de couplage électromécanique et de leur impédance acoustique plus adaptée, ce qui améliore la résolution des images. [5]

1.4.4 Le cristal

Le cristal piézoélectrique le plus connu est le quartz, mais ses caractéristiques sont peu attractives pour les applications de transducteurs médicaux : il présente une impédance acoustique très élevée et un faible coefficient de couplage. [4]

1.5 Les avantages

Les transducteurs piézoélectriques offrent plusieurs avantages significatifs, notamment une grande bande passante, la capacité à fonctionner à des hautes fréquences et une faible puissance de mise en action. [6]

1.6 Les inconvénients

Malgré leurs avantages, les transducteurs piézoélectriques présentent également certains inconvénients, tels que des tensions limitées, la nécessité d'un équipement auxiliaire et une sensibilité aux variations de température. De plus, ces dispositifs peuvent être construits avec des matériaux fragiles. [6]

1.7 Les applications des matériaux piézoélectriques

1.7.1 : Effet direct

1.7.1.1 les capteurs

Parmi les types de capteurs utilisant la technologie piézoélectrique, on retrouve notamment les accéléromètres, qui sont conçus pour détecter le mouvement et la vitesse, les capteurs de vibration, qui permettent de détecter les vibrations mécaniques, les capteurs de vibration sonores, utilisés pour capter les ultrasons, ainsi que les capteurs d'impact, qui mesurent la force appliquée et le moment de son application.

Ces capteurs sont utilisés dans une variété de domaines, tels que les jeux vidéo, les systèmes de sécurité routière, les systèmes anti-cambriolage des voitures, ainsi que dans les sonars et les instruments de musique électroniques.

1.7.1.2 Production d'énergie

- **Le briquet piézoélectrique**

Un exemple courant d'application de la technologie piézoélectrique est le briquet piézoélectrique, où en appuyant sur le bouton, l'élément piézoélectrique reçoit une pression et génère un arc électrique.

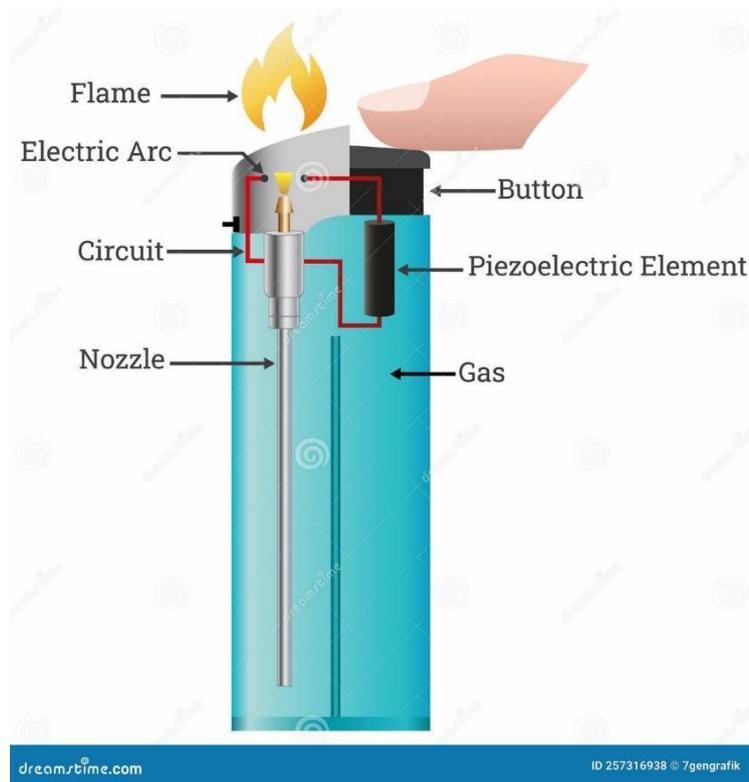


Figure 1.2: Briquet piézoélectrique [7]

- **Un t-shirt pour recharger son téléphone**

Un exemple innovant d'utilisation de la technologie piézoélectrique est le t-shirt « Sound Charge » lancé par la société de télécommunications Orange lors du festival de musique Glastonbury. Ce t-shirt est équipé d'un dispositif piézoélectrique qui permet de recharger votre téléphone grâce au son émis pendant le festival. [7]



Figure 1.3: T-shirt pour recharger le téléphone [7]

- **Génération d'énergie pendant la marche**

Une autre application novatrice de la technologie piézoélectrique est la génération d'énergie pendant la marche, réalisée à l'aide de chaussures. Un élément piézoélectrique est incorporé dans la semelle extérieure d'une paire de chaussures. L'armée américaine utilise déjà ce système pour recharger tous ses appareils électroniques, tels que les talkies-walkies, les radios et les GPS, garantissant ainsi l'indépendance électrique de ses soldats.

Une application innovante de la technologie piézoélectrique est l'utilisation de générateurs piézoélectriques pour alimenter des polymères émetteurs de lumière artificielle intégrés dans des chaussures de course. Cette technologie permet de rendre le chemin clair et visible la nuit, offrant ainsi une sécurité accrue aux coureurs. [7]



Figure 1.4: Générateur de l'énergie pendant la marche [7]

Bien que son utilisation ne soit pas encore généralisée à grande échelle, certaines régions ont commencé à exploiter cette source d'énergie. Un exemple concret est celui d'un parking de grande surface à Gloucester, en Angleterre, équipé de matériaux piézoélectriques. Cette installation permet de récupérer l'énergie générée à chaque passage de véhicule, alimentant ainsi les caisses de paiement du supermarché.

- **Métro de Tokyo**

Les plaques piézoélectriques sont utilisées pour générer de l'énergie à partir du mouvement des passagers lorsque certains passagers descendent des wagons et marchent sur le sol équipé de ces plaques. La pression exercée par leurs pas entraîne une déformation des matériaux piézoélectriques, générant ainsi une charge qui peut être recueillie et convertie en énergie électrique utilisable pour alimenter divers systèmes du métro, tels que l'éclairage, les écrans d'information et les escaliers mécaniques. [7]



Figure 1.5: Métro piézoélectrique [7]

1.7.2 Effet inverse

Les générateurs de vibrations utilisent l'effet piézoélectrique inverse pour créer des vibrations dans les matériaux piézoélectriques lorsqu'un courant leur est appliqué.

Voici quelques applications importantes de ces générateurs dans l'industrie :

- Générateurs d'ultrasons
- Générateurs de son audible
- Horloges [5]

1.8 Caractéristique des matériaux piézoélectriques

2 Tableau 1.1 : Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques [8]

Les matériaux piézoélectrique	$LiNbO_3$	$LiTaO_3$
Température de curie T_C (c°)	1210	<350
Constante diélectrique ϵ_t	29	200-400
Constant de charge $d_{33}10^{-12}(C/N)$	6	40-750
Coefficient de couplage $K_{33}(\%)$	23	40-70
Constant de tension $g_{33}10^{-3}(Vm/N)$	20	15-40
Densité g/cm^3	4.64	7.5

- La densité joue également un rôle essentiel ; elle est associée à la taille du matériau et à l'environnement de fonctionnement.
- L'impédance du résonateur est influencée par la taille des électrodes, l'épaisseur de la couche piézoélectrique et la constante diélectrique. À mesure que cette dernière augmente, la taille des résonateurs augmente également.
- Une charge constante d_{33} élevée garantit une excellente stabilité de puissance du matériau piézoélectrique.

Le degré d'échange d'énergie entre le domaine mécanique et le domaine électrique est déterminé par le carré du coefficient de couplage électromécanique. Il sera impossible de fabriquer des filtres avec la bande passante nécessaire pour les applications de téléphonie mobile si la couche piézoélectrique a un coefficient de couplage trop faible.
[8]

2.1 Classification des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont classés en deux catégories :

2.1.1 Matériaux naturellement piézoélectrique

- Le sel de Seignette ($\text{NaKC}_2\text{O}_6, 4\text{H}_2\text{O}$) et un certain nombre de composés de formule analogue
- La classe des matériaux piézoélectriques naturellement présents (quartz, tourmaline) englobe les matériaux piézoélectriques dans leur état paraélectrique.

2.1.2 Matériaux ferroélectriques

Les matériaux dits ferroélectriques, qui présentent un phénomène piézoélectrique après polarisation.

En fonction de leur phénomène piézoélectrique après polarisation, cette classe comprend des matériaux ayant une structure cubique ou presque cubique dans leur état paraélectrique. Ces matériaux présentent plusieurs directions de polarisation équivalentes, ce qui entraîne une structure en domaines plutôt complexe. [9]

2.2 Equations piézoélectrique [10]

Un phénomène piézoélectrique est en effet un phénomène qui permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Cela signifie que les grandeurs mécaniques et électriques sont liées les unes aux autres :

$$\begin{cases} S = s^E + d^t E \\ D = dt + \varepsilon^t E \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = eS + \varepsilon^e E \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{cases} S = s^D T + g^t E \\ D = -gT + \beta^t D \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} T = C^D S - h^t D \\ E = -hS + \beta^s D \end{cases} \quad (1.4)$$

S et T sont grandeurs mécaniques, D et E sont des grandeurs électriques.

Tableau 1.2 : Grandeurs mécaniques et électriques [10]

nom	Symbole	taille	unité
déformation	S	6*1	N\m ²
contrainte	T	6*1	V\m
Champ électrique	E	3*1	C\m ²
Induction électrique	D	3*1	C\m ²
Compliance ou souplesse élastique	S	6*6	m ² \N
Raideur au constant électrique	C	6*6	N\m ²
Permittivité électrique	E	3*3	F\m
Imperméabilité diélectrique	B	3*3	m\F
Constant piézoélectrique associés aux différents formes des équations constitutives	D	3*6	C\N
	E	3*6	C\m ²
	G	3*6	m ² \C
	H	3*6	N\C

2.3 Coefficients de couplage électromécanique

Les coefficients de couplage électromécaniques sont utilisés pour mesurer l'efficacité d'un matériau piézoélectrique dans la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Le coefficient k^2 représente la quantité d'énergie mécanique transformée en énergie électrique par rapport à l'énergie mécanique totale appliquée.

$$k^2 = \frac{\text{Energie électrique stockée}}{\text{Energie mécanique fournie}} = \frac{\text{Energie mécanique stockée}}{\text{Energie électrique fournie}} \quad (1.5)$$

La seconde définition consiste à simplement définir k à partir d'une des relations piézoélectriques :

$$k^2 = \frac{\text{Constante piézoélectrique}}{\text{Constante élastique} \cdot \text{constante diélectrique}} \quad (1.6)$$

La valeur de ce coefficient varie en fonction de la forme du matériau et de la direction de sa déformation. [11]

2.4 Conclusion

Les matériaux intelligents sont très utilisés dans différents domaines tels que la médecine, les appareils électriques et les voitures. Ils ont évolué au fil du temps et existent sous différentes formes, comme les matériaux piézoélectriques et les alliages à mémoire de forme. Les matériaux piézoélectriques se déforment sous l'influence d'un champ électrique, tandis que les alliages à mémoire de forme sont caractérisés par un couplage thermomécanique. Ces derniers sont utilisés pour leur capacité à passer d'une phase solide et rigide à une phase souple à haute température. Ils sont souvent utilisés comme solutions d'amortissement.

Chapitre 2

Méthodes de contrôle des vibrations non linéaires

Chapitre 2

Méthodes de contrôle des vibrations non linéaires

2.1 Introduction

En effet, les vibrations mécaniques peuvent causer des dommages aux équipements électriques et aux systèmes mécaniques, ainsi que générer du bruit indésirable. C'est pourquoi les chercheurs se sont penchés sur des solutions pour contrôler ces vibrations, et l'ajout de matériaux piézoélectriques est l'une de ces solutions. Les techniques de contrôle des vibrations peuvent être divisées en deux catégories : les systèmes actifs et les systèmes passifs. Les systèmes actifs utilisent des capteurs et des moteurs pour réduire les vibrations ; cependant, cette méthode peut être coûteuse et complexe à mettre en œuvre. C'est pourquoi une alternative appelée technologie de contrôle semi-actif a été développée. Elle utilise de petites batteries à la place des moteurs pour réduire les vibrations. Quant aux systèmes passifs, ils dépendent de circuits électriques reliés aux éléments piézoélectriques, tels que des résistances, pour contrôler les vibrations. Pour améliorer les performances, des techniques de contrôle semi-passif ont été développées, notamment le contrôle semi-passif basé sur les techniques SSD (Synchronized Switch Damping). Ces avancées dans le domaine du contrôle des vibrations offrent des solutions plus économiques et réduisent les dommages causés par les vibrations mécaniques.

2.2 Méthodes de contrôle

2.2.1 Contrôle passif

2.2.1.1 Définition

Les techniques de contrôle passif sont vraiment intéressantes. Elles utilisent l'amortissement structurel des vibrations sans nécessiter d'énergie ou d'interférence externe. Cela signifie qu'elles utilisent des composants passifs connectés à des éléments piézoélectriques, comme des résistances, pour dissiper l'énergie électrique et ajuster la résistance du circuit. [12] Certains circuits couramment utilisés sont ceux composés d'une inductance et d'une résistance en série ou en parallèle avec un élément

piézoélectrique comme une capacité. C'est une méthode astucieuse pour contrôler les vibrations. [13]

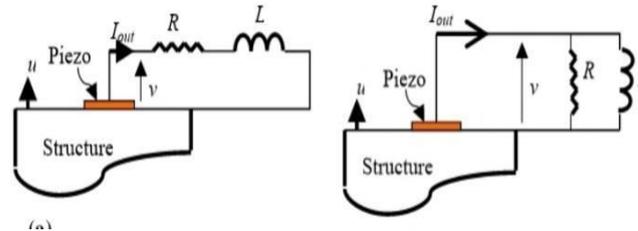


Figure 2.1: Principe des circuits de dissipation à commande passive (a) structure séries et (b) structure parallèle [13]

C'est vraiment fascinant de voir comment les circuits RLC peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique grâce aux éléments piézoélectriques.

Lorsque la fréquence de résonance du circuit est réglée, il peut absorber une grande quantité d'énergie à cette fréquence, ce qui permet de dissiper l'énergie thermique et d'amortir les vibrations. Les circuits avec une inductance en parallèle avec un condensateur piézoélectrique sont particulièrement efficaces comme absorbeurs de vibrations mécaniques. Des études sont en cours pour améliorer encore plus l'amortissement des vibrations en utilisant des matériaux piézoélectriques. C'est vraiment passionnant de voir comment les technologies peuvent être utilisées pour contrôler les vibrations.

2.2.1.2 Inconvénients du contrôle passif

- L'inductance élevée peut rendre difficile l'utilisation du contrôle passif dans des applications légères.
- La technique de shunt résonant est limitée à un seul mode structurel, c'est pourquoi le contrôle des vibrations sonores a évolué vers un contrôle semi-passif. [13]

2.2.1.3 Avantages du contrôle passif

- Elles sont simples à mettre en œuvre.

- Elles ne nécessitent pas d'énergie externe pour fonctionner.
- Les éléments à ajouter sur la structure sont généralement légers et de petite taille
- Un système passif peut offrir une solution efficace pour certaines applications. [14]

2.2.2 Contrôle actif

Le contrôle actif est une approche plus performante qui implique une chaîne de traitement complète pour améliorer les performances et le contrôle précis à large bande. Cela comprend l'utilisation de capteurs, de calculs, d'amplificateurs de puissance, de moteurs et d'actionneurs. En utilisant cette approche, on peut surmonter les limitations de performances et obtenir un meilleur contrôle.

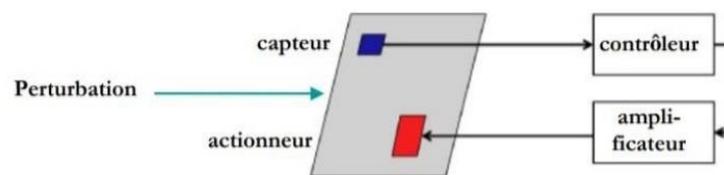


Figure 2.2: Système de contrôle actif typique [16]

Le contrôle actif utilise une source externe pour générer des forces qui interfèrent avec la vibration du système afin de la réduire. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser une chaîne de traitement complète comprenant des capteurs, une unité de contrôle et un bon modèle de la structure pour obtenir l'état vibratoire ou sonore d'un système de gestion avancé, tel qu'un microcontrôleur DSP peut être utilisé pour calculer le contrôle optimal et réduire les ondes. La performance du contrôle actif dépend des méthodes utilisées, allant des plus simples comme le contrôle proportionnel (P) aux plus complexes comme les algorithmes H ou l'utilisation de capteurs de surveillance. Différentes approches peuvent être envisagées en fonction des besoins spécifiques du système. [16]

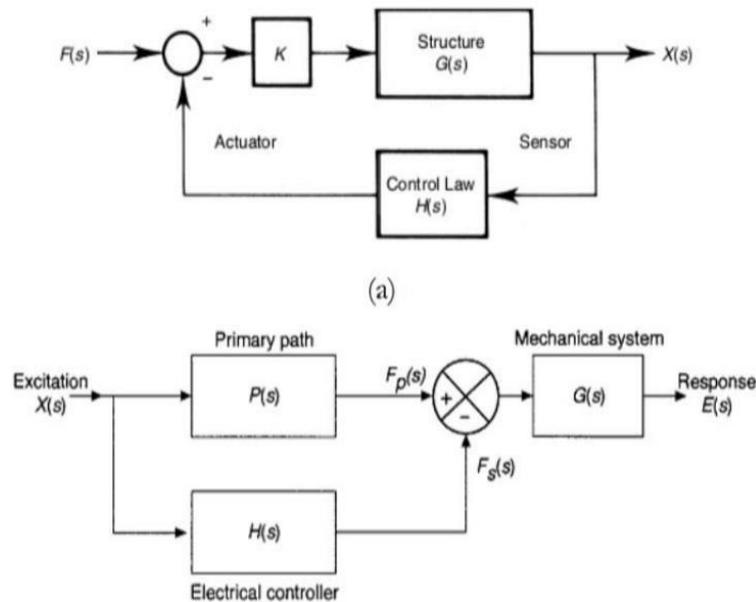


Figure 2.3: Type de contrôle active (a) rebouclé ;(b) par anticipation [16]

2.2.2.1 Avantage de contrôle actif

- Elle permet un contrôle efficace et robuste des vibrations.
- Elles offrent une réduction importante et durable des vibrations.
- Elles permettent un contrôle large bande, couvrant une large gamme de fréquences [14].

2.2.2.2 Inconvénient de contrôle actif

- Elles nécessitent des traitements complexes et une conception coûteuse.
- Elles requièrent une alimentation externe, ce qui peut être contraignant.
- L'utilisation d'amplificateurs qui nécessitent une alimentation extérieure conséquente limite leur application dans le cas de structures de petites dimensions ou de systèmes embarqués. [15]

2.2.3 Contrôle semi passif

Le contrôle semi-passif est une technique intéressante. Il s'agit d'une alternative au contrôle passif et actif, développée par le laboratoire LGEF. Ils utilisent un interrupteur électronique pour convertir temporairement un élément capacitif en un circuit shunt. Cela permet de réduire les vibrations de la structure à certains moments précis du cycle de vibration [13].

2.2.3.1 Technique SSDS (synchronized switch on short circuit)

Le circuit SSDS est un circuit simple. La technique de commutation, connectée en parallèle avec des éléments piézoélectriques, permet d'extraire l'énergie mécanique de la structure et de la stocker sous forme d'énergie électrique. Cela contribue à la dissipation de l'énergie mécanique de vibration. [17]

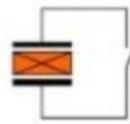


Figure 2.4: Circuit SSDS [1]

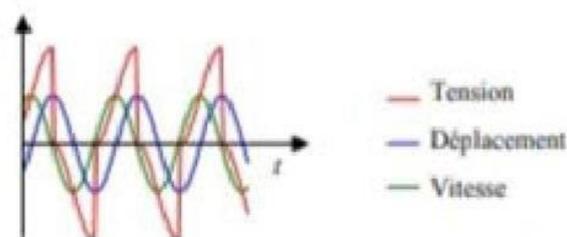


Figure 2.5: Formes d'onde SSDS [17]

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

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

2.2.3.2 Technique SSDI (synchronized switch on short circuit on inductor)

Un circuit SSDS auquel seul une inductance est ajoutée. Cela crée un oscillateur RLC avec une inductance L et une résistance R . l'interrupteur est ouvert puis fermé pendant une courte période à des moments spécifiques. Cela permet de contrôler l'amortissement et les vibrations du système, c'est une approche intéressante pour améliorer les performances de l'amortissement en utilisant des circuits simples.

D'après ce que vous avez décrit, dans le cas d'une excitation positive, la période de fermeture t du circuit SSDI est la moitié de la période d'oscillation électrique T . Pendant cette période de fermeture, la tension peut être inversée, ce qui permet de contrôler le déplacement du système. Il est important de fermer l'interrupteur au pic de la vibration

et de le rouvrir au premier. Cependant, il est vrai que lors de l'inversion de la tension, on perd un peu d'énergie car l'amplitude de la tension après l'inversion est inférieure à celle avant l'inversion. C'est un compromis à prendre en compte lors de la conception de ce type de circuit. [17]

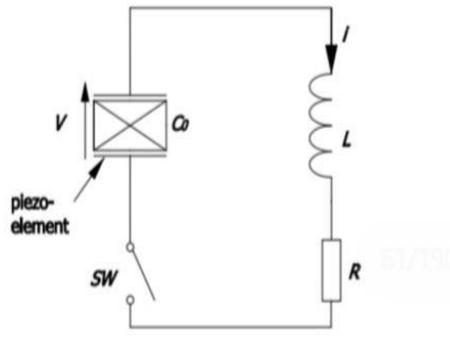


Figure 2.6: Circuit SSDI [17]

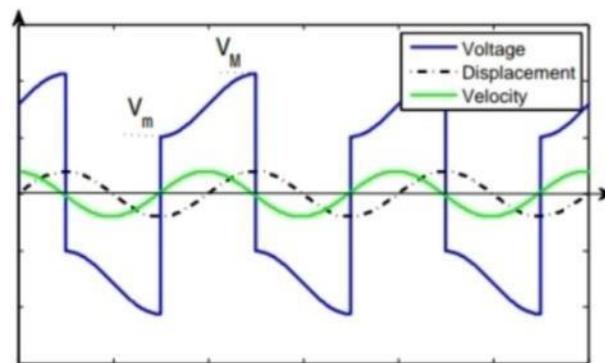


Figure 2.7: Formes de SSDI [17]

- L'équation représente la relation de tension avant et après l'utilisation du facteur de qualité.

$$V_{(après)} = -\gamma v_{avant} = -v_{avant} e^{2\gamma t - \pi} \quad (2.2)$$

- L'équation représenté le rapport d'inversion de tension, où le facteur d'inversion est égal à zéro dans SSDS.

$$t_i = \pi \sqrt{c_0 l_i} \quad (2.3)$$

2.2.4 Control semi actif

2.2.4.1 Technique SSDV (Synchronized switch on short circuit on voltage source)

Dans le technique SSDV, l'amplitude de la tension inversée et l'énergie dissipée sont augmentées en utilisant un potentiel constant lors de la commutation. Le circuit

électrique de la technique SSDV est légèrement différent de la technique SSDI, dans la technique SSDV l'élément piézoélectrique est activé par une source de tension positive ou négative à travers un circuit de shunt inductif L . Au lieu d'inverser la tension, un potentiel constant est utilisé pour augmenter l'effet du cycle de conversion électronique, les interrupteurs électriques sont commandés pour fermer lorsque le déplacement est à son maximum et ouvrir après une demi-pseudo-période de l'oscillateur électrique cela permet d'obtenir une tension pseudo-périodique autour du potentiel $-V_s$. L'interrupteur SW_2 est commandé de manière symétrique à SW_1 , c'est une approche intéressante pour améliorer les performances de la technique SSDS. [18]

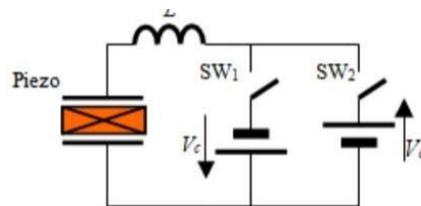


Figure 2.8: circuit de SSDV [18]

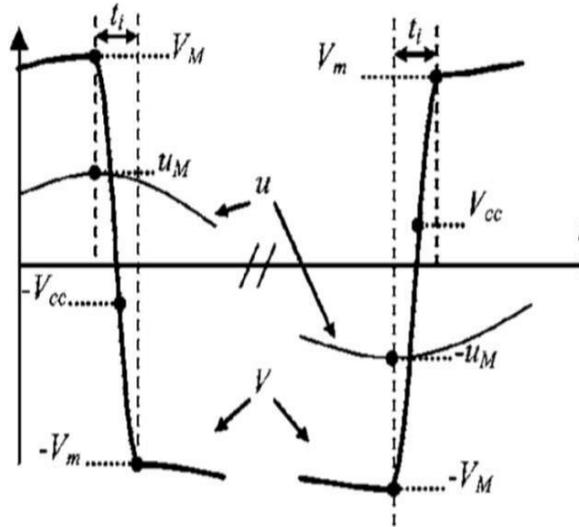


Figure 2.10 : Forme d'onde typique de déplacement et de voltage [18]

L'amortissement peut être exprimé par l'équation « A_{SSDI} » en fonction du coefficient de couplage électromécanique, du facteur de qualité mécanique et de qualité de l'inversion électrique.

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

L'équation V_{swmax} donne l'expression de la valeur de tension continue qui annule complètement la vibration pour une force excitatrice donnée.

$$V_{swmax} = \frac{\pi 1 + \gamma}{4\alpha 1 - \gamma} F_M \quad (2.7)$$

2.2.4.2 SSDI modal

La stratégie de contrôle SSDI est principalement utilisée pour signaux à fréquence unique.

Cependant, e il y a de nombreuses inversions de tension avec de petites amplitudes, cela est dû à la superposition d'ondes modales, ce qui entraîne de nombreux extrema sur le signal de

tension de l'actionneur. Dans certains cas, si la reconstruction des participations modales est possible, il est possible de contrôler l'inversion de tension en utilisant les extrema du déplacement modal. C'est un aspect intéressant à prendre en compte lors de l'utilisation de la technique SSDI.

D'après la figure 2.11 lorsque l'inversion est appliquée à tension de l'actionneur, le contrôle de l'inversion n'est possible que si le déplacement modal est disponible. [19]

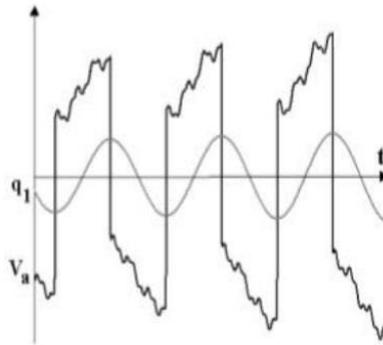


Figure 2.11 : Formes d'onde de tension typique, où V_a est la tension d'actionneur piézoélectrique et q_1 est le premier déplacement modal correspondant

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié quatre techniques de contrôle des vibrations avec les matériaux piézoélectriques. La commande active donne de meilleurs résultats, mais nécessite l'ajout d'une importante alimentation externe et de matériels encombrants et coûteux, tels que des amplificateurs. Une autre alternative est la commande semi passive, qui nécessite l'ajout d'une petite alimentation externe comme une batterie, et elle fonctionne également avec la technique SSDV. En revanche, le control passif ne nécessite pas l'ajout d'une alimentation externe, qui a été développé en un control semi passif qui fonctionne avec les techniques SSDI et SSDS.

Chapitre 3 :

Energie éolienne

3.1 Introduction

L'énergie éolienne est en effet une source d'énergie renouvelable très importante. Elle est utilisée depuis longtemps pour produire de l'électricité. Les éoliennes à axe horizontal de grande puissance sont les plus courantes et efficaces [20]. Effectivement, la pale d'une éolienne joue un rôle essentiel dans la captation de l'énergie éolienne. Son fonctionnement repose sur des théories aérodynamiques telles que la quantité de mouvement et la théorie d'élément de pale. Des codes informatiques ont été développés pour évaluer les performances des éoliennes en prenant en compte différents paramètres aérodynamiques. Ces avancées dans la conception des pales permettent d'obtenir des éoliennes plus performantes et de réduire les vibrations [21].

3.2 Différent types d'énergies renouvelables

3.2.1 Energie solaire photovoltaïques

Le technologique photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique, qui produit un courant continu à partir du rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (comme le soleil) ou artificielle.

3.2.2 l'énergie hydraulique

Est exploitée à travers les moulins à eau pour convertir l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique, notamment avec l'avènement de l'électricité. Cette conversion permet d'alimenter diverses machines et outil, comme les moulins à blé.

3.2.3 l'Energie biomasse

On fait la distinction entre la biomasse sèche, comme le bois et ses dérivés, et la biomasse humide, qui comprend les déchets organiques. Les ordures ménagères sont utilisées pour produire du gaz ou de l'engrais.

3.2.4 l'énergie géothermie

La géothermie profonde, contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, n'est pas influencée par les conditions atmosphérique (soleil, pluie, vent) son principe consiste à extraire l'énergie géothermique du sol pour la convertir en chauffage ou en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur terrestre provient de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire générée par la décomposition de de l'uranium, du thorium et du potassium.

3.3 Définition d'énergie éolienne

Une éolienne est en effet un dispositif qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité ou pomper de l'eau. Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique par une génératrice. C'est une source d'énergie renouvelable importante [22]. Effectivement, la conversion de l'énergie éolienne implique différents domaines tels que l'aérodynamique, la mécanique, l'électrique et l'automatique. Cela nécessite une approche multidisciplinaire pour résoudre les problèmes associés à chaque étape de la chaîne de conversion.

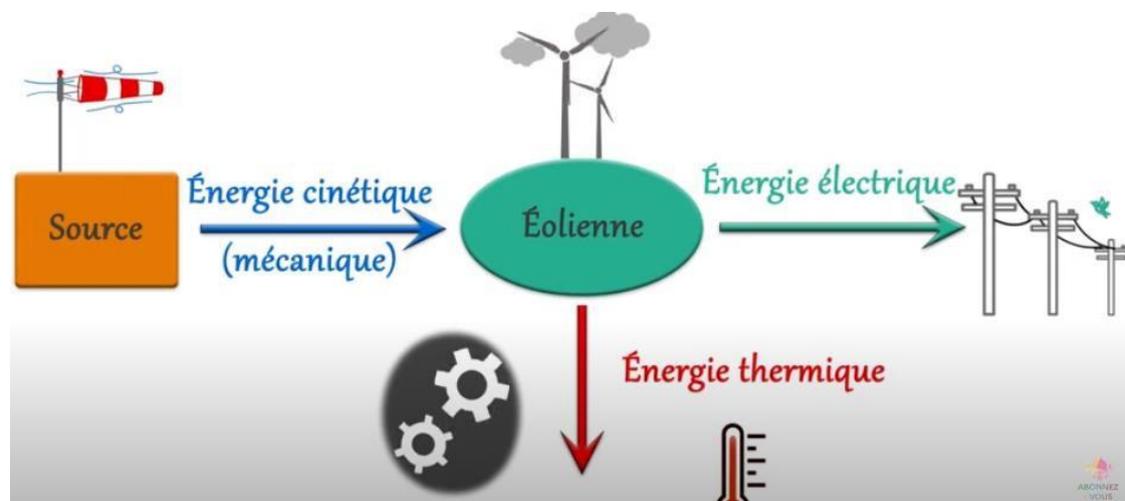


Figure 3.1: Energie éolienne [22]

3.4 Avantages de l'énergie éolienne

Les éoliennes présentent de nombreux avantages :

- Elles occupent peu d'espace au sol, ce qui permet une utilisation efficace des terres.
- Elles fonctionnent de jour comme de nuit, ce qui signifie qu'elles peuvent produire de l'énergie en continu.
- Elles continuent à fonctionner même par temps nuageux ou pluvieux, ce qui les rend fiables.
- De plus, la technologie des éoliennes est mature et le recyclage des déchets est relativement facile, ce qui contribue à réduire leur impact environnemental." [23]

3.5 Inconvénients de l'énergie éolienne

- La détermination de l'endroit idéal pour installer une éolienne peut être difficile, car il faut prendre en compte des facteurs tels que la vitesse et la direction du vent.
- Les coûts d'installation et de maintenance des éoliennes sont généralement élevés, ce qui peut représenter un investissement important.
- Parfois, les éoliennes peuvent être bruyantes, ce qui peut être gênant pour les personnes qui vivent à proximité. De plus, il existe des risques mécaniques associés au fonctionnement des éoliennes.

Cependant, malgré ces inconvénients, les avantages des éoliennes en tant que source d'énergie renouvelable restent considérables. [23]

3.6 Principaux composants d'une éolienne

Le composant principal d'une éolienne à axe horizontal se le figure 3.2.

- **Rotor** : le moyeu relie les pales au groupe motopropulseur
- **Nacelle** : le générateur et le système de commande sont inclus dans le train d'entraînement (arabes, boîte de vitesses, accouplement, un frein mécanique).

- **Système de l'orientation** : il se situe sous la nacelle et assure le bon alignement de l'arbre du rotor avec le vent.
- **Tour** : elle est employée pour soulever la nacelle et le rotor afin de capturer les vents à haute vitesse.
- **Fondation** : elle grande la tour en position, sa taille et son poids sont ainsi déterminés par la taille de l'éolienne et les conditions locales du sol.
- **Armoire de couplage au réseau électrique** : il est constitué de câbles, d'appareillage, de transformateur et d'alimentation à convertisseurs électrique.

[30]

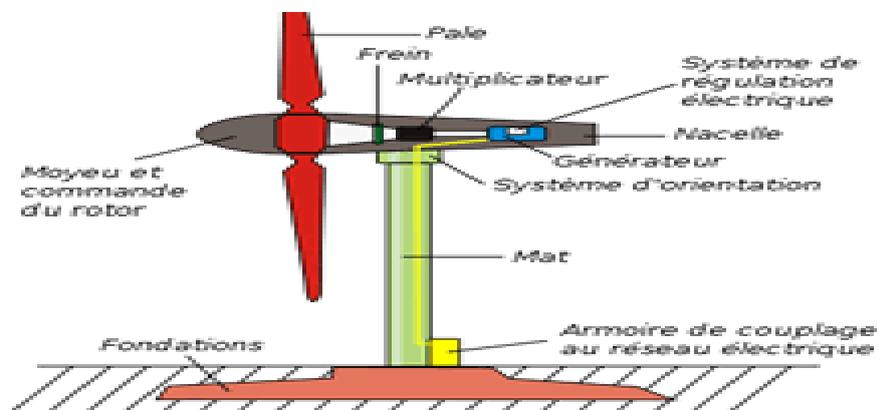


Figure 3.2 : Principaux composants d'une éolienne [31]

3.7 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour maximiser la production d'électricité tout en maintenant des coûts aussi bas que possible. Leur performance est principalement influencée par les conditions de vent, sur lesquelles nous n'avons aucun contrôle direct. Par conséquent, notre action se limite à optimiser la conversion de l'énergie par la turbine et le générateur électrique, en ajustant rigoureusement le processus dans certaines conditions et de manière plus flexible dans d'autres, avant de transférer l'électricité produite vers le réseau. [24]

3.8 Pale éolienne et vibration

Les pales des éoliennes sont de plus en plus longues et légères, ce qui les rend sujettes aux flottements et aux tremblements. Le flottement aérodynamique peut se produire avec des vents forts, tandis que le tremblement est causé par les turbulences. [25]

3.9 Types des turbines éolienne

On peut classer les turbines éoliennes selon deux aspects :

3.9.1 Aspect de structure

Il existe deux principaux types d'éoliennes : à axe vertical et à axe horizontal. [26]

- **L'éolienne axe verticale VAWT**

- Parmi les premières structures développées pour produire de l'électricité, seuls deux ont atteint le stade de l'industrialisation : le rotor de savon et le rotor de Darrieus [6]. Bien que différentes variantes technologiques aient été testées, ces éoliennes sont devenues peu courantes de nos jours et leur utilisation est moins répandue. [26]

- **L'éolienne axe horizontale HAWT**

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) sont les plus couramment utilisées en raison de leurs nombreux avantages remarquables. Ces éoliennes sont généralement équipées de deux ou trois pales placées soit face au vent soit sous le vent. [26] [27]

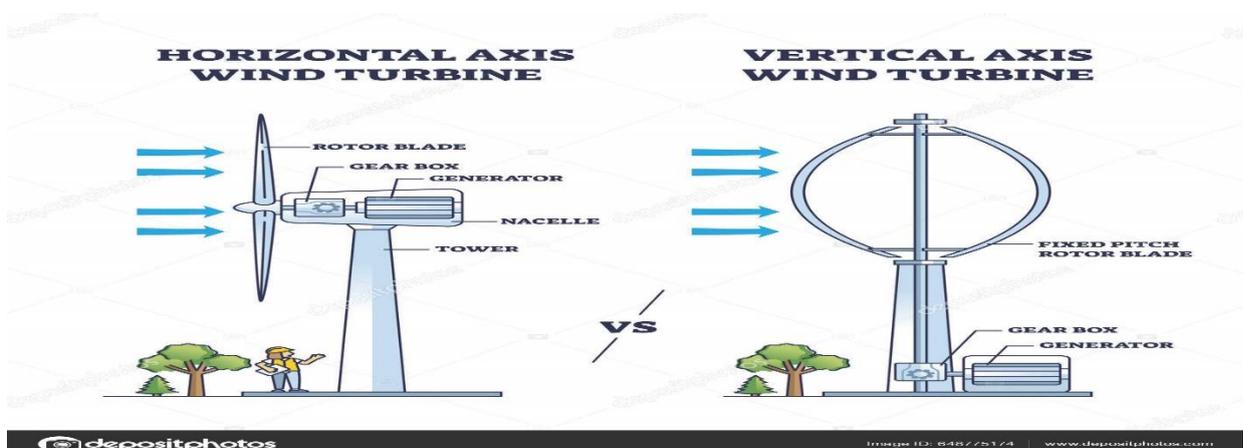


Figure 3.2 : Eolienne à axe horizontale (a) et à axe verticale (b) [2]

3.9.2 Aspect lieu d'installation

Il existe deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- **Les éoliennes terrestres « onshore »**

L'énergie éolienne est exploitée sur terre en utilisant des aérogénérateurs pour capter la force du vent. La production d'énergie éolienne est influencée par les caractéristiques géographiques, topographiques et météorologiques du site. [28]



Figure 3.3: Eoliennes onshores [33]

- **Les éoliennes marines « offshore »**

Les éoliennes offshore sont placées en mer et fonctionnent selon le même principe que les éoliennes terrestres classiques. Elles exploitent l'énergie cinétique du vent pour la convertir en électricité. La différence entre un modèle offshore et un modèle terrestre d'éolienne réside dans les fondations utilisées, qui permettent soit une fixation dans le sol, soit une ancre au fond de la mer. [29]



Figure 3.4: Eolienne offshore [29]

3.10 Géométrie d'une pale éolienne

La forme d'une pale d'éolienne est déterminée par ses qualités aérodynamiques. Elle présente un bord d'attaque arrondi à l'avant et un bord de fuite pointu à l'arrière. La corde du profil est la ligne qui relie le bord d'attaque et le bord de fuite, et l'épaisseur du profil est la distance maximale entre l'extrados et l'intrados. Les profils sont répartis le long de la pale de l'éolienne, avec un extrados (le dessus de la pale) et un intrados (le dessous) qui ont tous deux une forme convexe, plus prononcée sur l'extrados. Cela crée un écoulement d'air plus rapide sur l'extrados que sous l'intrados. [30]

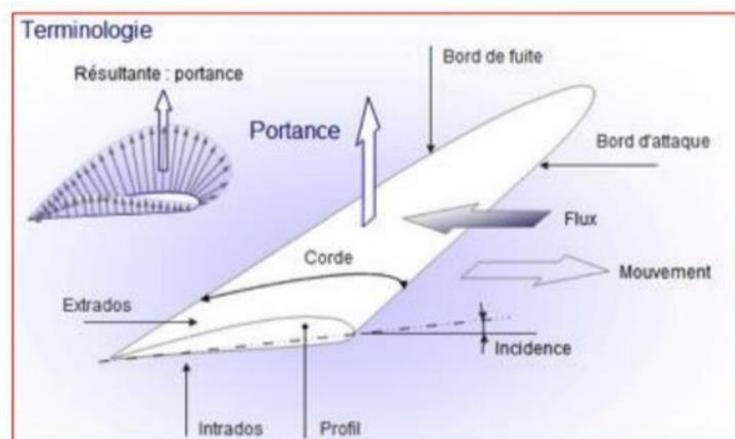


Figure 3.5 : Géométrie d'une pale éolienne [30]

3.11 Efforts sur une pale

La figure 3.6 semble être une coupe transversale d'une pale d'éolienne, vue de l'extrémité de la pale. Elle montre comment la pale se déplace dans un vent incident de vitesse V . En raison de la rotation, la pale est également soumise à un vent relatif dans le sens contraire de la rotation de la turbine. La combinaison de ces deux vitesses, incidente V et relative U , donne la vitesse réelle du vent V_{rel} à laquelle la pale est soumise. Il est intéressant de voir comment ces vitesses influencent le comportement de la pale dans la conversion de l'énergie éolienne.

$$\vec{V}_{rel} = \vec{U} + \vec{V} \quad (3.1)$$

Tel que la vitesse de vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_T \quad (3.2)$$

$$U = \lambda \cdot V \quad (3.3)$$

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 $i^{\text{ème}}$ section transversale de la pale [33]

λ ou TSR pour les éoliennes est le rapport entre la vitesse tangentielle de la point d'une pale et la vitesse réelle du vent V , le rapport vitesse de pointe est lié à l'efficacité, l'optimum variant avec la conception de pale. [31]

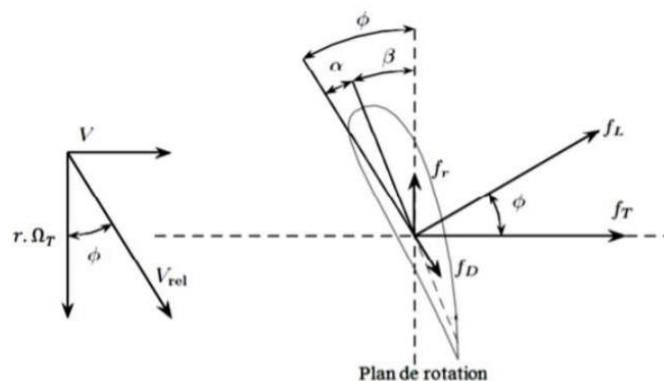


Figure 3.6: Effort sur un élément d'une pale [26]

Lorsque l'air s'écoule sur la pale de l'éolienne, il crée une différence de pression au-dessus et en dessous de la pale. Cela se traduit par deux forces : la portance f_l , perpendiculaire à la direction du vent réel, et la traînée f_D , dans le même sens que V_{rel} , ces forces sont généralement exprimées en fonction des coefficients de portance C_l et traînée C_D . C'est grâce à ces forces que l'éolienne peut convertir l'énergie peut convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. [32] [33]

$$f_l = \frac{\rho \cdot dS}{2} \cdot V_{rel}^2 C_l(\alpha) \quad (3.4)$$

$$f_D = \frac{\rho \cdot dS}{2} \cdot V_{rel}^2 C_D(\alpha) \quad (3.5)$$

Où : ρ : densité de l'air.

S : Surface balayée par les pales

$C_D(\alpha)$, $C_l(\alpha)$: Coefficient de traînée et coefficient de portance respectivement.

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

$$F_T = \frac{\rho \cdot dS}{2} V_{rel}^2 [C_l(\alpha) \cdot \cos(\Phi) + C_D(\alpha) \cdot \sin(\Phi)] \quad (3.6)$$

En effet, la force tangentielle développée par le vent crée un couple de rotation qui génère le travail utile. Le couple par unité de longueur est donné par une formule spécifique.

$$C_T = \frac{\rho \cdot dS}{2} V_{rel}^2 [C_l(\alpha) \cdot \sin(\Phi)] + C_D(\alpha) \cdot \cos(\Phi) \quad (3.7)$$

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, tandis que la traînée crée un couple dans le sens inverse. C'est pourquoi un rapport élevé entre la portance et la traînée (C_l/C_D) est fortement recommandé pour obtenir un bon rendement [34].

Les coefficients C_l et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α . Lorsque l'angle α est faible, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. Cela crée une dépression sur l'extrados, ce qui génère la portance. C'est cette force qui permet à un avion de voler. Cependant, lorsque α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point, puis l'écoulement devient

turbulent, ce qui entraîne la disparition de la portance due à la dépression sur l'extrados, ce phénomène est connu sous le nom de décrochage aérodynamique.

Les concepteurs des pales ne se préoccupent pas seulement de la portance et du décrochage, mais aussi de la résistance de l'air. Appelée la traînée, la traînée augmente généralement lorsque la surface exposée à l'écoulement de l'air augmente. Cela se produit notamment pour des α importants. C'est pourquoi ils accordent une grande attention à ces aspects lors de la conception des pales. [35]

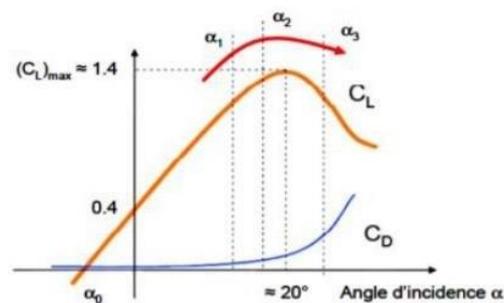


Figure 3.7 : Evolution des coefficients de portance C_L et de traînée C_D [10]

3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée sur l'énergie éolienne, en abordant à la fois ses avantages et ses inconvénients. De plus, nous avons expliqué différents types de turbines, tels que les turbines à axe vertical et à axe horizontal.

Chapitre 4 :
Contrôle de vibration des pales éoliennes par les
réseaux de neurones

Chapitre 4 :

Contrôle de vibration des pales éoliennes par les réseaux de neurones

4.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles qui s'inspirent du fonctionnement du cerveau humain. L'objectif est de concevoir des machines capables de se rapprocher autant que possible du comportement intelligent des êtres humains. Sans pour autant les limiter complètement, c'est pourquoi on parle « d'intelligence artificielle ». Les réseaux de neurones sont conçus pour apprendre à partir des données et ajuster leurs connexions pour résoudre des problèmes complexes. Cette approche permet d'obtenir des résultats prometteurs dans de nombreux domaines, parmi ces domaines le contrôle de vibration.

4.2 Réseaux neurones

4.2.1 Définition

Un réseau de neurones typique est structuré en plusieurs couches, comprenant

- **Un couche d'entrée** : cette couche est constituée de neurones qui reçoivent les données initiales du problème. Sa taille est généralement déterminée par le nombre de variables d'entrée.
- **Une couche de sortie** : cette couche comprend les neurones qui produisent les résultats du problème.
- **Une ou plusieurs couches cachées** : placées entre la couche entrée et la couche de sortie, ces couches définissent l'activité interne du réseau. Les fonction d'activation généralement utilisées dans ces couches sont non linéaires, permettant ainsi au réseau de capturer des relations complexes dans les données.

[36] [37]

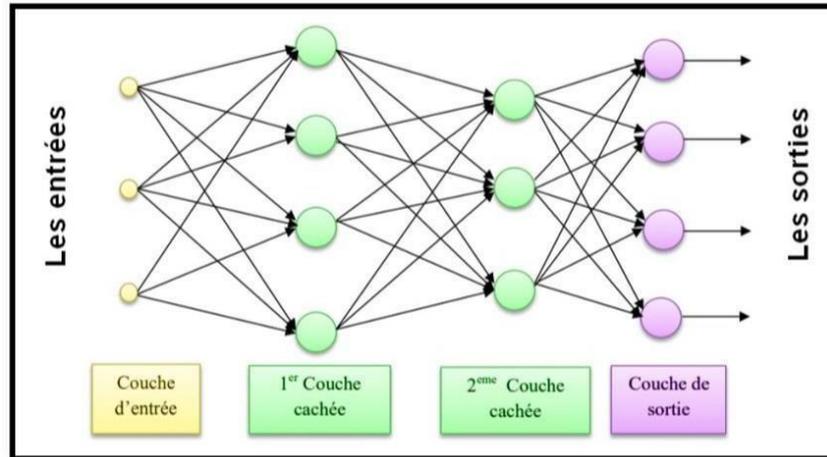


Figure 4.1 : Les réseaux neurones [37]

4.2.2 Fonctionnement

Le fonctionnement d'un modèle de neurone formel consiste à associer des poids synaptiques aux entrées et à effectuer une somme pondérée des grandeurs reçues en entrée. Cela permet d'obtenir une sortie basée sur cette fonction de calcul.

$$w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_r x_r = \sum_{j=1}^r w_{i,j} x_j \quad (4.1)$$

La grandeur obtenue après comparaison avec le seuil 0 est ensuite transformée par une fonction d'activation non linéaire F. Cela permet d'obtenir la sortie associée aux entrées x_1 à x_m [38].

4.2.3 Fonctions d'activations

Les fonctions d'activation, également appelées fonctions de transfert, sont des fonctions qui renvoient une valeur réelle proche de 1 lorsque les bonnes informations d'entrée sont fournies, et une valeur réelle proche de 0 lorsque les informations sont considérées comme mauvaises. En général, on utilise des fonctions qui renvoient des valeurs dans l'intervalle réel $[0,1]$. Lorsque la valeur réelle est proche de 1, on dit que l'unité (ou le neurone) est active, tandis que lorsqu'elle est proche de 0, on dit que l'unité est inactive. Il existe de nombreuses formes de fonctions d'activation, telles que binaire, linéaire,

sigmoïde, et bien d'autres encore. Voici un tableau présentant les fonctions d'activation les plus couramment utilisées : [39]

- Fonction binaire
- Fonction linéaire
- Fonction sigmoïde
- Et bien d'autre encore.

Tableau 4.1: Fonctions d'activations [39]

Catégories	Types	Equation	Allure
Seuil	Heaviside	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
	Signe	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Saturé symétrique	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq -1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \\ x & \text{sinon} \end{cases}$	
Non linéaire	Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
	Tangente hyperbolique	$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1$	

4.2.3 Les avantages

Les réseaux de neurones présentent de nombreux avantages :

- Leur structure parallèle permet un traitement simultané de l'information, ce qui les rend très efficaces.

- Ils sont adaptables et peuvent s'ajuster à différents types de problèmes.
- Les réseaux de neurones sont des « approximateurs universels », ce qui signifie qu'ils peuvent approximer n'importe quelle fonction. Cela permet d'utiliser directement les données pour faire des prédictions, sans avoir besoin d'intervenir, de recoder, de discrétiser ou d'interpréter de manière douteuse.
- Ils sont résistants au bruit ou aux données de faible qualité.
- Le concept d'apprentissage des réseaux de neurones est relativement simple à comprendre.
- Ils sont capables d'analyser des relations spatiales et topologiques.
- Un réseau de neurones bien conçu peut représenter n'importe quelle dépendance fonctionnelle et extraire des informations sans modèle préconçu.

4.2.4 Les Inconvénients

- Un réseau de neurones ne dispense pas de bien comprendre le problème à résoudre. Il est important de définir les classes de manière pertinente et de ne pas oublier des variables importantes.
- Un réseau de neurones est une « boîte noire » qui ne fournit pas d'explications sur ses décisions. Il peut être difficile de comprendre pourquoi il prend certaines décisions.
- Les réseaux de neurones ont une grande capacité de prédiction statistique, mais ils sont totalement impossibles à inspecter. Cela signifie qu'il peut être difficile de comprendre comment ils arrivent à leurs prédictions. [40]

4.3 Définition de la structure intelligente

Dans la simulation et l'analyse ci-dessous, une pale éolienne fixe est utilisée, équipée de quatre inserts piézoélectriques. Les dimensions et les propriétés physiques de cette configuration sont répertoriées dans le tableau 4.2, tandis que la figure 4.2 illustre la pale en tant qu'élément oscillant. [41]

Tableau 4.2 : Les dimensions et les propriétés physiques de la pale

Type de profil	NACA 4412
Nombre de pale	3
Longueur de la pale	1.5 m
Longueur de base de la pale	0.15 m
Largeur de la pointe de la pale	0.0312 m

Tableau 4.3 : caractéristique des inserts piézoélectrique P188[42]

propriétés	Symbole	Valeur
densité	ρ	7650Kg/m^3
Compliances court-circuit	s_{11}^E	$10.66.10^{-12} \text{Pa}^{-1}$
	s_{12}^E	$-3.34.10^{-12} \text{Pa}^{-1}$
	s_{13}^E	$-4.52.10^{-12} \text{Pa}^{-1}$
	s_{33}^E	$13.25.10^{-12} \text{Pa}^{-1}$
permittivité	ϵ_{33}^T	$10.17 \text{ n. F.m}^{-1}$
Coefficients piézoélectrique	d_{13}	-108 p C. N^{-1}

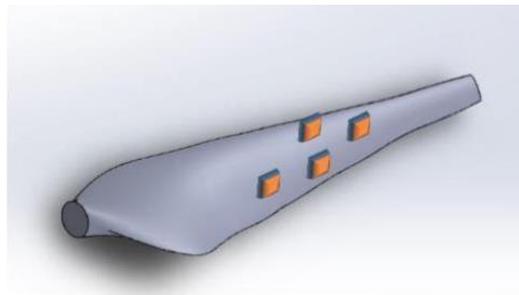


Figure 4.2 : La configuration approximative de la pale [6]

4.4 Modélisation d'une pale intelligente

L'étude du comportement électromécanique d'une pale équipée d'éléments piézoélectriques repose sur les équations (4.1) et (4.2). La première équation, qualifiée d'équation d'état mécanique, et la seconde, appelée équation d'état électrique, déterminent conjointement le fonctionnement de ces systèmes complexes :

$$m\delta'' + c\delta' + k^E\delta = \alpha v + \beta F \quad (4.1)$$

$$I = \alpha^t \delta' - c_0 V \quad (4.2)$$

δ : le vecteur de déplacement.

m : matrice de la masse.

c : matrice de l'amortissement.

k^E : matrice de la rigidité lorsque les patches piézo-électrique 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.

A : matrice de couplage électromécanique.

Considérons Θ comme la matrice des modes propres de la structure mécanique, en se limitant aux n premiers modes. Réalisons alors le changement de variable suivant :

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

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

Les équations (4.1) et (4.2) deviennent :

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

$$I = \Theta^t q - c_0 V. \quad (4.5)$$

Avec :

$$\Theta = \Theta^t \alpha \quad (4.6)$$

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 suivant :

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

$$C = 2 \text{diag}(\xi) \text{diag}(w^D) \quad (4.8)$$

$$dk^E = \text{diag}((w^E)^2) \quad (4.9)$$

avec (ξ) est amortissement modale, w^E est la fréquence du transducteur en court-circuit et w^D est la fréquence en circuit-ouvert.

Lorsque la tension de l'actionneur V_a est distincte de celle du capteur V_s et que le capteur est évalué au moyen d'un amplificateur de tension (ce qui implique que le courant du capteur est nul) les équations :

$$\begin{aligned}
 M\ddot{q} + C\dot{q} + k^E q &= \theta_\alpha V_\alpha - \theta_s V_s + \beta F. \\
 \theta_s^t - C_{os} V &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

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

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + (k^E + \theta_s(Cos^{-1})\theta_s^t)q = \theta^\alpha V^\alpha + \beta F
 \tag{4.12}$$

Le système d'équation linéaire (4.10) et (4.11) son écrit de la forme :

$$\begin{cases}
 \dot{x} = Ax + Bu & q \\
 y = Cx & x = (p \cdot)
 \end{cases}
 \tag{4.13}$$

Avec :

- Le vecteur de commande $u = [F \ V_\alpha]$ est composé à la fois de la force mécanique extérieure que le système subit et des tension des actionneurs appliquées pour l'amortissement.
- Le vecteur de sortie $y = (q \ \dot{q} \ V_s)$ est composé à la fois des déplacements modaux de la structure avec leurs variations temporelles et des tensions des capteurs utilisés par la suite.
- Les matrices A, B, C sont matrices d'état du système données par :

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ +M^{-1}\beta & -M^{-1}\theta_\alpha \end{bmatrix}
 \tag{4.15}$$

$$C = \begin{bmatrix} I_d & 0 \\ 0 & I_d \\ c_{os}^{-1}\theta_s^t & 0 \end{bmatrix}
 \tag{4.16}$$

La valeur de la tension des actionneurs V_α est calculée par fonction suivant :

$$V_\alpha = C_{o\alpha}^{-1} \theta_\alpha^t q
 \tag{4.17}$$

$C_{o\alpha}$ et C_{os} Sont les matrices des capacités des actionneurs et capteurs utilisés.

4.5 Simulation

4.5.1 L'analyse de la force du vent

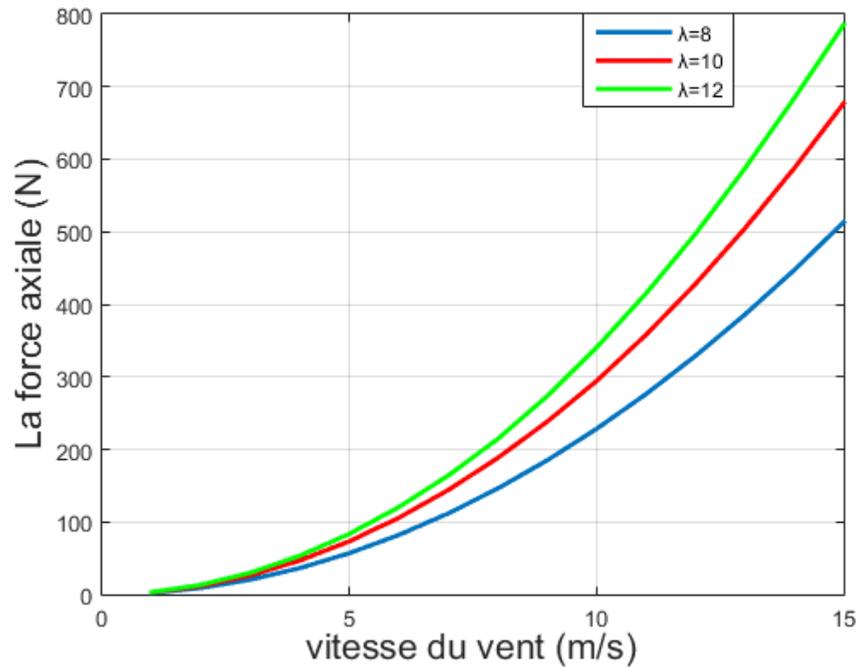


Figure 4.3 : Vitesse du vent et le rapport de vitesse du vent λ . Effet sur la force axiale de sur la pale de profil NACA4412.

L'objectif de ces graphiques est d'analyser l'impact de la valeur de λ sur la force appliquée à la pale en observant les variations à différentes valeurs de λ . Une tendance positive est observée, où une augmentation de la valeur de λ s'accompagne d'une augmentation de la force exercée sur la pale.

4.5.2 Contrôle des vibrations des pales des éoliennes par la méthode SSDI

Première excitation de vent : pour impulsion d'amplitude $3.652562e+01$ (vitesse du vent=4m/s. Et $\lambda=8$)

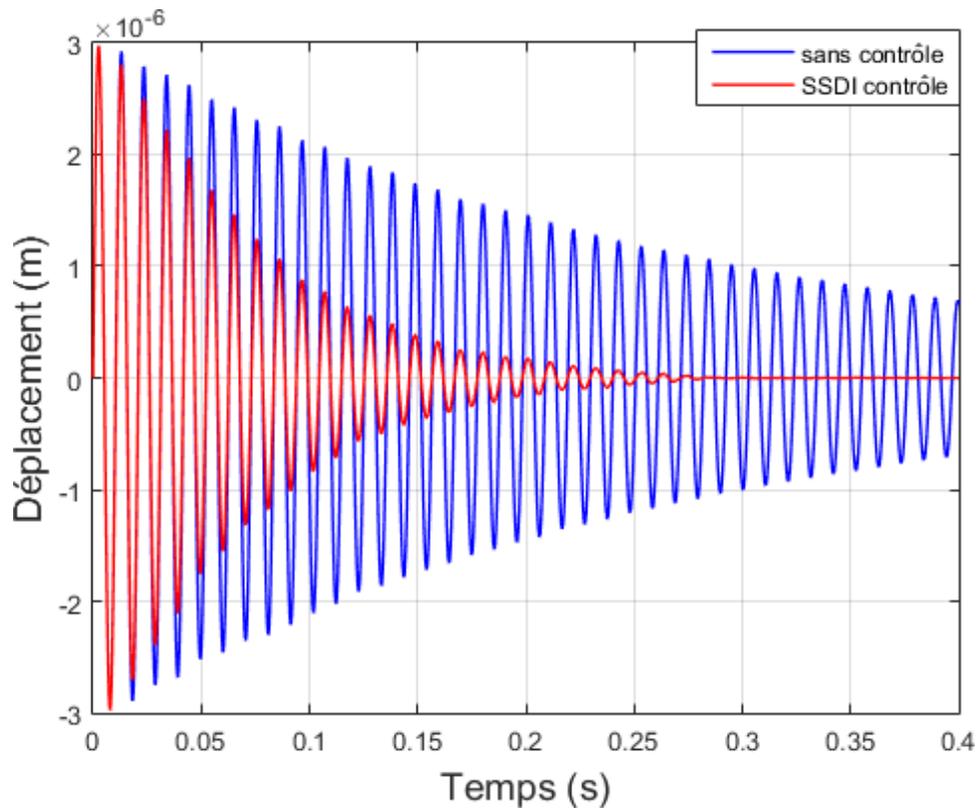


Figure 4.4 : Déplacement pour une vitesse du vent =4m/s et $\lambda=8$

Le signal dans la figure 4.4 représente le déplacement en fonction du temps. On remarque que le signal de déplacement est mieux atténué par la technique SSDI que sans contrôle.

Pour la figure 4.5 représente la tension d'actionneur dans les deux cas sans contrôle et pour le contrôle SSDI modale, on remarque bien que la tension pour SSDI est plus grand que sans contrôle est c'est ça l'objectif des méthodes non linéaires.

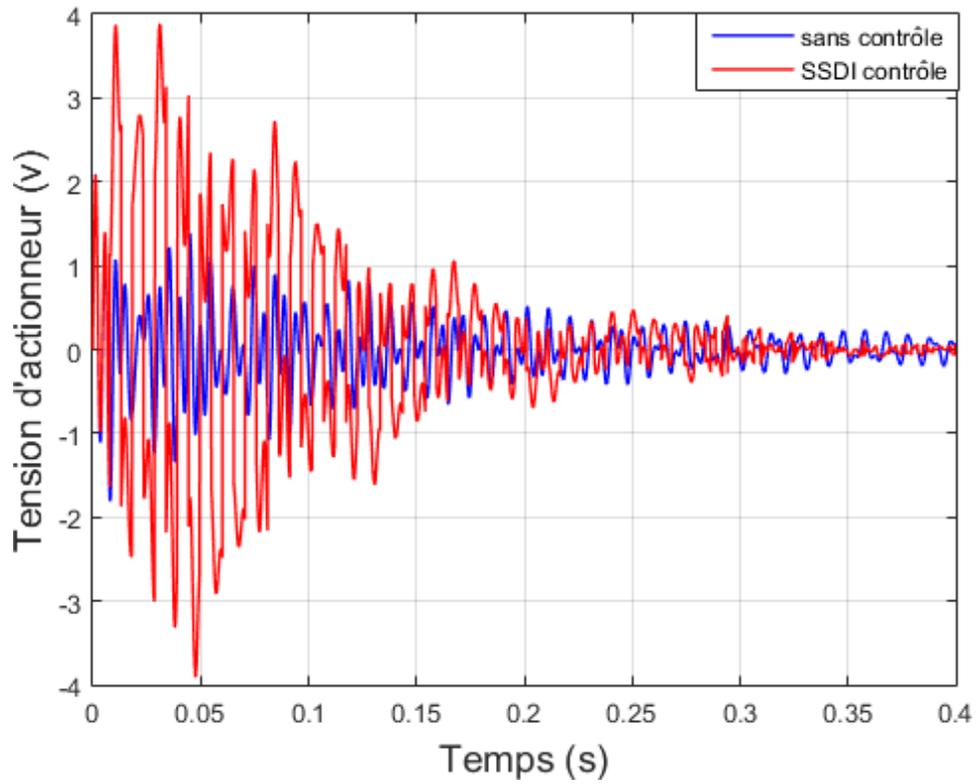


Figure 4.5 : Tension d'actionneur(v) en fonction du temps pour une vitesse du vent =4m/s et $\lambda=8$.

Deuxième excitation de vent : somme de 4 sinus d'amplitudes $2.282851e+00$ ($\lambda=8$ $v=1$ m/s), $2.939620e+00$ ($\lambda=10$ $v=1$ m/s), $3.347480e+00$ ($\lambda=12$ $v=1$ m/s), et $3.347480e+00$ ($\lambda=12, v=1$ m/s)

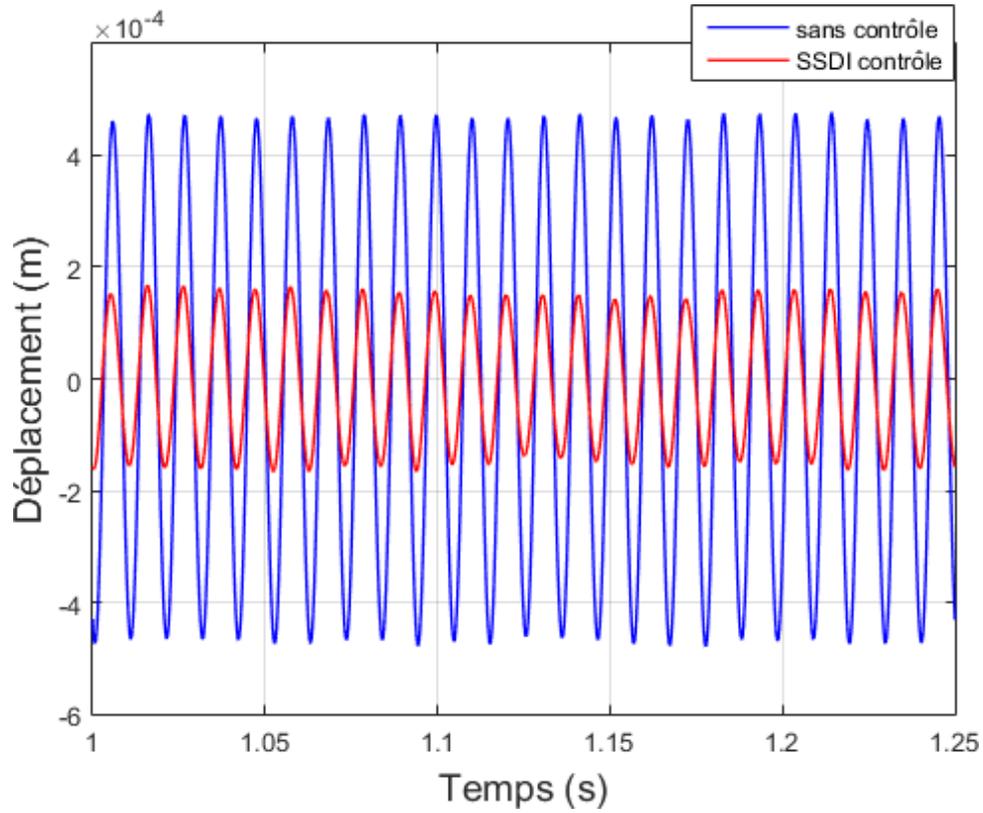


Figure 4.6 : Déplacement pour une force somme de 4 sinus d'amplitudes : $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$.

Le signal dans la figure 4.6 représente le déplacement en fonction du temps pour une vitesse du vent correspondant à la somme de quatre sinus. On remarque que l'amortissement des vibrations avec la méthode SSDI est meilleur que sans contrôle.

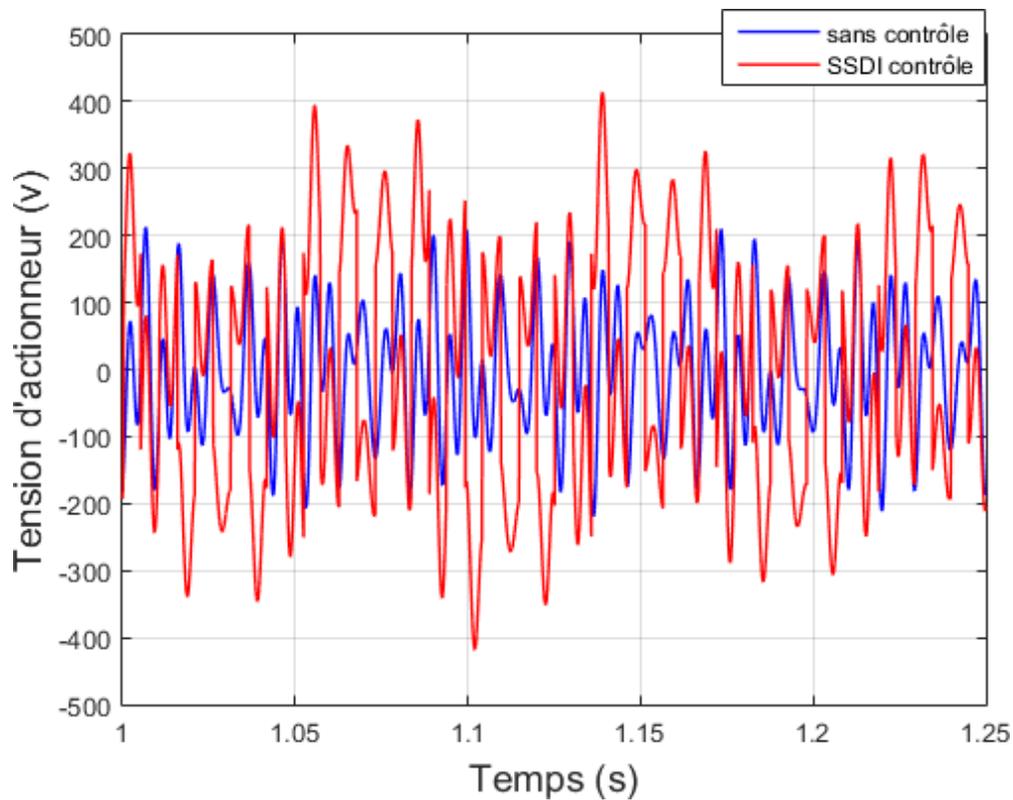


Figure 4.7 : tension d'actionneur en fonction de temps pour une force somme de 4 sinus d'amplitudes :
 $2.282851e+00$, $2.282851e+00$, $3.347480e+00$, et $3.347480e+00$.

Pour la figure 4.7 représente la tension d'actionneur dans les deux cas sans contrôle et pour le contrôle SSDI modale, on remarque bien que la tension pour SSDI est plus grand que sans contrôle est c'est ça l'objectif des méthodes non linéaires.

4.5.3 Contrôle des vibrations de la pale éolienne par les réseaux de neurones

Dans l'étape suivante, on donne les résultats et on détermine les coefficients d'amortissement optimaux qui minimisent la différence entre les vibrations prédites (par le réseau neuronal) et les vibrations réelles mesurées. Cette optimisation aide à ajuster le système pour atteindre les niveaux de vibrations souhaités en ajustant les coefficients d'amortissement appliqués aux forces.

En minimisant la fonction objective, le programme vise à trouver les meilleurs coefficients d'amortissement qui conduisent à des vibrations prédites aussi proches que possible des vibrations réelles, améliorant ainsi la performance et la stabilité du système.

La figure suivante montre les performances de l'apprentissage effectué pour le correcteur RN :

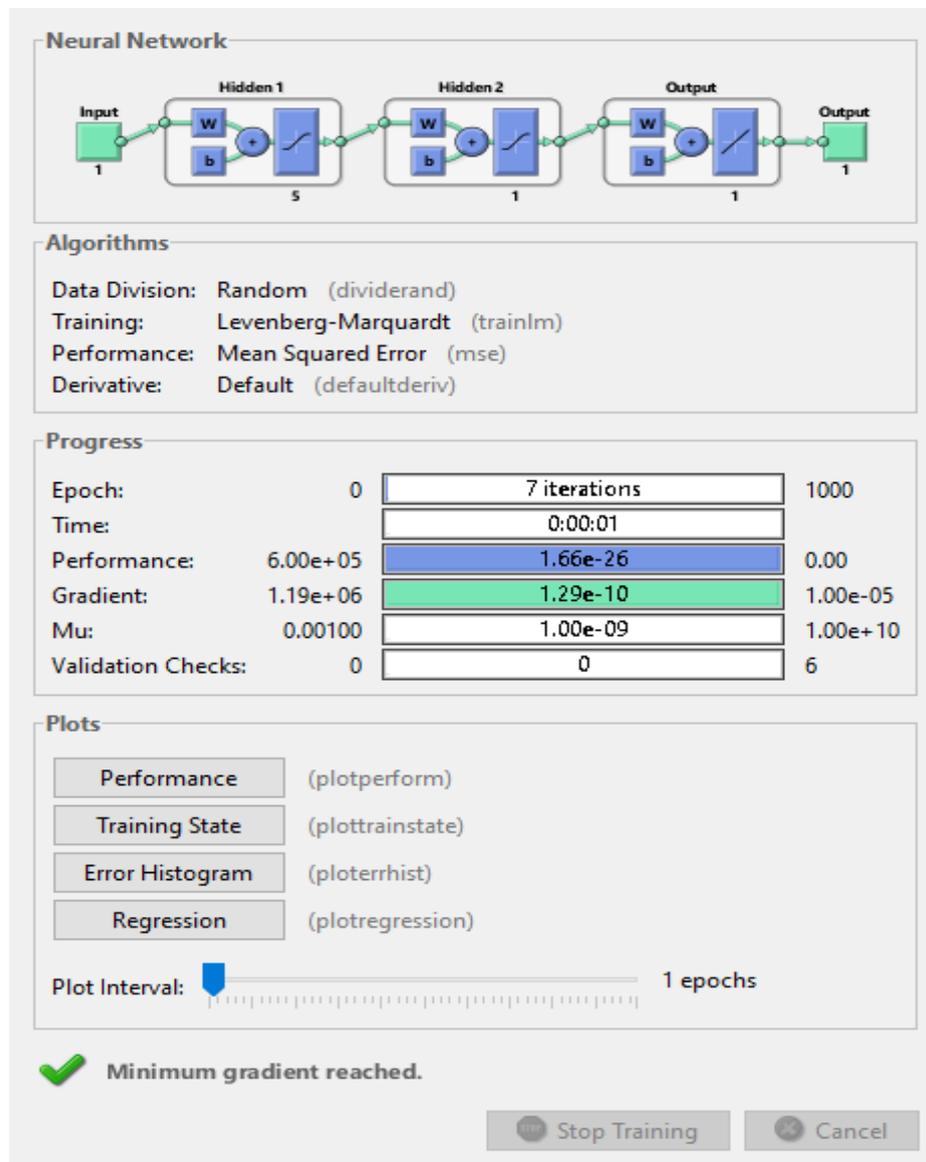


Figure 4.8 : Fenêtre d'entraînement de réseau de neurones.

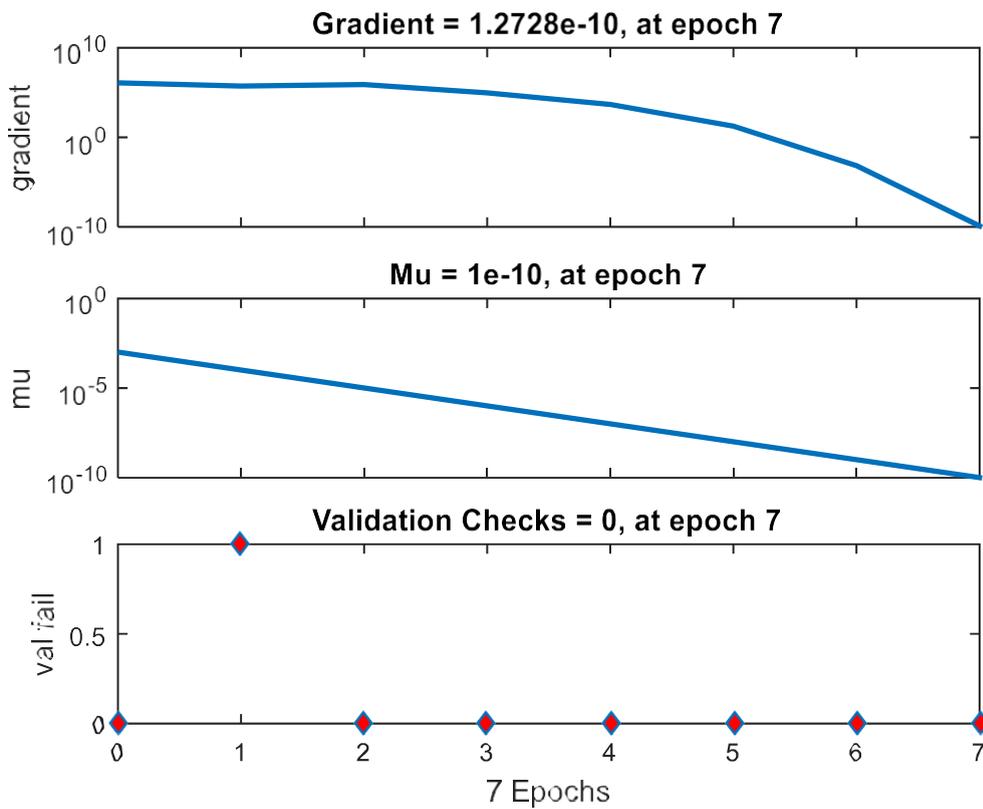


Figure 4.9 : Affichage de la valeur de la fonction objectif

Dans la figure 4.9: nous pouvons observer trois courbes, la première représente les changements du gradient, commençant par une augmentation puis diminuant jusqu'à une valeur-10, la deuxième courbe était initialement élevée, puis a diminué, pour finalement se stabiliser, quant à la troisième, elle est liée à la fonction val fal du réseau neuronal, ces étés formulées de manière plus claire avec une explication améliorée.

Dans le contexte des vibrations et des prédictions de valeurs, lorsque la valeur est plus basse sur le graphique val fal, cela indique que les prédictions des vibrations se rapprochent davantage des valeurs réelles. Cela signifie que le modèle de réseau neuronal est plus précis et performant, car il prédit les vibrations de manière plus fidèle aux données réelles, ce qui est souhaitable pour contrôler les vibrations.

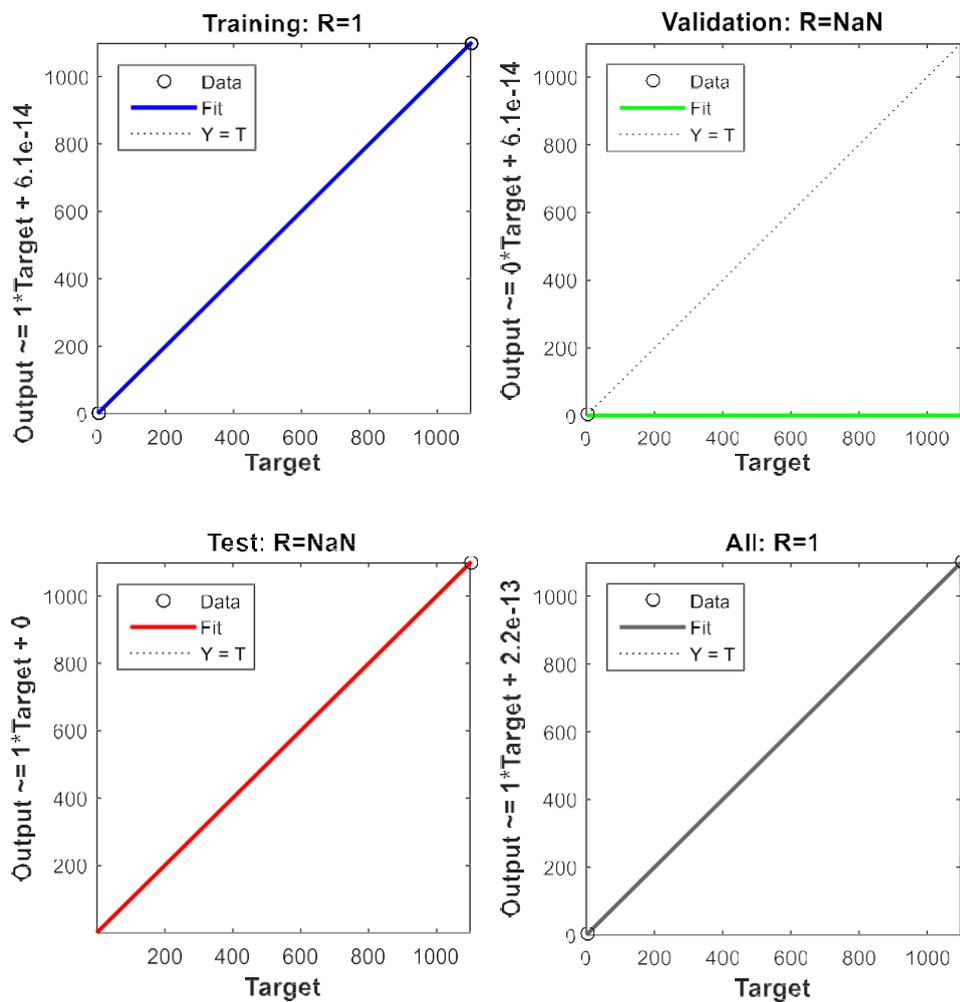


Figure 4.10 : Affichage des valeurs

Dans la figure 4.10, nous observons une valeur de validation de $6.1 \cdot 10^{-14}$, ce qui signifie que la valeur est très proche de zéro. Dans de tels cas, cette valeur peut être considérée comme nulle. Cela indique que le modèle que nous utilisons prédit les données avec une grande précision, car la différence entre la valeur prédite et la valeur réelle est presque négligeable.

Nous remarquons également une valeur de test de 0, ce qui indique également que la valeur zéro. Dans de tels cas, cette valeur peut être considérée comme pratiquement nulle. Cela reflète une grande précision dans la prévision des données.

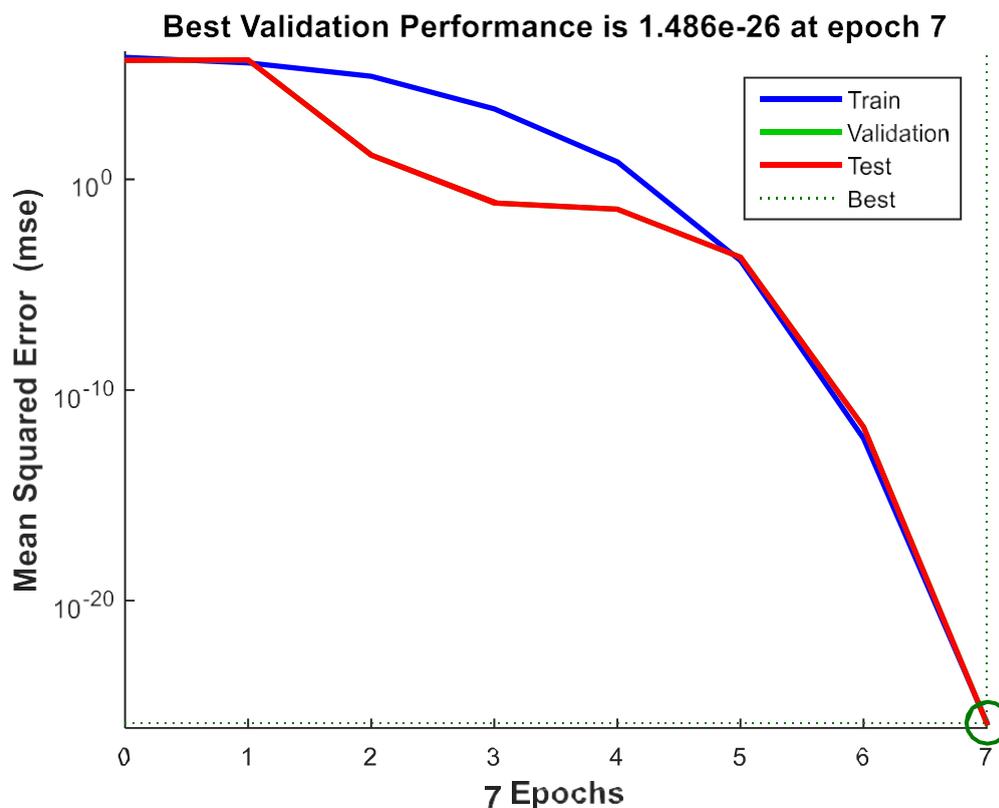


Figure 4.11 : Vibration prédites avec les forces ajustées

Dans la figure 4.11 on observe que la courbe d'entraînement se déplace d'un niveau élevé vers zéro, ce qui signifie l'évolution de la fonction pour le réseau de neurones, en ce qui concerne la courbe rouge correspondant aux tests, on remarque également qu'elle suit la forme de la courbe vert représentant la validation, on constate que sa valeur est presque égale à zéro.

En contexte d'entraînement et de test pour les réseaux de neurones artificiels, le jeu de validation est utilisé pour évaluer les performances du modèle après l'entraînement sur l'ensemble de données d'entraînement, lorsque la valeur de validation est proche zéro, cela signifie que le modèle a de bonne performance. Ce qui reflète une grande précision dans les prédictions.

4.5 Conclusion

Dans le chapitre, définition d'un réseau neuronal, ses avantages et inconvénients, ainsi que le contrôle des vibrations des éoliennes par la méthode SSDI et le contrôle des pales par les réseaux neuronaux. Et donne Les résultats de la simulation.

Conclusion générale

L'énergie mécanique peut être convertie en énergie électrique, ce qui est bénéfique pour les énergies renouvelables. Cependant, il est crucial de minimiser leurs effets négatifs. Dans ce mémoire, l'objectif était de contrôler les vibrations des pales éoliennes en utilisant des matériaux intelligents. Les réseaux neuronaux sont particulièrement intéressants pour améliorer ces systèmes de contrôle et réduire les vibrations de manière plus efficace.

Le premier chapitre introduit les concepts généraux des matériaux intelligents, en détaillant les différents types de ces matériaux et leurs nombreuses applications.

Dans le deuxième chapitre, l'attention se focalise sur les divers types de contrôle, notamment le contrôle actif, passif, semi-actif et semi-passif, ainsi que sur les techniques de contrôle des vibrations telles que SSDI, SSDV, SSDS et SSDI modal. En se concentrant sur les matériaux piézoélectriques, un processus de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique s'opère lorsque la structure est en vibration. En réduisant ou en transférant l'énergie mécanique dans la structure, un amortissement efficace des vibrations est réalisé.

Dans le troisième chapitre, une analyse approfondie de l'énergie éolienne a été effectuée, mettant en lumière les nombreux avantages et inconvénients associés à cette forme d'énergie renouvelable, ainsi que les divers types de turbines utilisés. En plus des avantages environnementaux, nous avons également discuté des défis inhérents à l'énergie éolienne, tels que sa dépendance aux conditions météorologiques. Nous avons examiné en détail les composants essentiels d'une éolienne, incluant la nacelle, les pales, le moyeu et le générateur.

Dans le quatrième chapitre, le sujet abordé était la définition d'un réseau neuronal, ses avantages et inconvénients, ainsi que le contrôle des vibrations des éoliennes par la méthode SSDI et le contrôle des pales par les réseaux neuronaux. Les résultats de la simulation montrent clairement que l'amortissement des vibrations par la méthode SSDI est supérieur à celui obtenu sans contrôle.

Références

- [1] K. Hanini, « coexistences de la phase tétragonale et la phase rhomboédrique à la frontière morphotropique de phase (FMP) dans le système $\text{XPbZrO}_3\text{-YPbTiO}_3\text{-Pb}$ ($\text{Al } 1/5, \text{Cu } 1/5, \text{Sb } 3/5\text{O}_3$ » thèse de magister ; université Mohamed Khider de Biskra Algérie ; (2005).
- [2] F. Boukazouha, « Conception, Réalisation, Modélisation et Caractérisation Expérimental d'un Transformateur de Tension de Type Rosen » 17 01 2016.
- [3] « piézoélectricité : qu'est-ce que c'est ? ». <https://www.futura-sciences.com/sciences/définition/physique-piézoélectricité-4807/>.
- [4] R. BEDINA, « la piézoélectricité pdf » univ Msila ,2016.
- [5] : « <https://www.techno-science.net/glossaire-définition-piézoélectricité-.html> ».
- [6] : B. Kouider , « contrôle active de vibration par les matériaux piézoélectrique », 2012.
- [7] : L. Qian and al , Microstructurale Characteristics and electrical properties of $x\text{Pb}(\text{Mg}^{1/3}\text{Ta}^{2/3})\text{O}_3\text{-(0.1-x)}\text{Pb}(\text{Mn}^{1/3}\text{Sb}^{2/3})\text{O}_3\text{-0.9PB}(\text{Zr } 0.52 \text{ Ti} 0.48)\text{O}_3$ high power piézoélectric ceramics, Mat .Sc .Eng, Vol, 163,(2009),145-150 .
- [8] : BENZEBEIRI, D, synthèse, étude structural et caractérisations des céramiques PZT de type pérovskite $\text{Pb}_{1-x}\text{Ca}_x[(\text{Zr} 0.53, \text{Ti} 0.47) 0.75\text{Sb} 0.25]\text{O}_3$. Thèse de doctorat (Mentouri de Constantine ,2012).
- [9] : M. Abba ; « synthèse, caractérisation et étude des propriétés Piézo-électrique des céramiques de type PZT : $\text{Pb}_{1-y}\text{La}_y[\text{Zr}_x\text{Ti}_z(\text{Mo } 1/3 \text{ IN } 2/3)_{1-(x+z)}]_{1-y/4}\text{O}_3$ » ; thèse de doctorat ; université Mohamed Khider Biskra Algérie ; (2013)
- [10] : Chérif aida, « optimisation du transformateur piézoélectrique, application : contrôle semi passive des vibration », thèse doctorat, 2012
- [11] : pierre Desproges, modèle électromécanique
- [13] : Stéphanie Harari, « contrôle modal semi-actif et actif à faible consommation énergétique par composants piézoélectrique », 12/octobre /2009.
- [14] : SABER MOHAMMADI, semi passive vibration contrôle using shunted piezoelectric materials,2008.
- [15] : L. YAN, « contrôle de vibrations large bande à l'aide d'éléments piézoélectriques utilisant une technique non-linéaire, état de l'art », thèse de doctorat, 2013.
- [16] : M. ATRINDADE, « contrôle hybride actif-passive des vibrations de structures par les matériaux piézoélectriques et viscoélastiques : poutres sandwich /multicouches intelligentes », thèse de doctorat, 2006.
- [17] : Kaixiang LI, « amortissement vibratoire avec échange d'énergie synchronisé entre des éléments piézoélectrique », thèse de doctorat, septembre 2011.

- [18] : S. MOHAMMADI, «Semi-passive vibration contrôle using shunted piezoélectrique materials » INSA. Lyon , France, 2,July ,2008.
- [19] : BENSILINE Rami ; ABDOUNE MOHMOUD, « contrôle de vibration par les méthodes non linéaires », mémoire master 2013.
- [20] : A. I. E. A ZAHRA, « définition du choix type d'une éolienne application dans un site favorable chez technique des éolienne » , 09/09/2020
- [21] : D. MOHAMED, « amélioration de la performance de pale éolienne par considération des paramètres locaux et prend en compte les phénomènes des pertes » , 04/07/2018
- [22] : G. YAICHI, I, « modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur »
- [23] : S fortuné, « Etude et conception d'une central éolienne couple et réseau électrique avec groupes électrogènes de secours : cas de l'hôtel Benin marine de Cotonou » chez conception du nouveau système d'alimentation en énergie électrique de l'hôtel, 24/11/2015
- [24] : M. SAMIR, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à based une MADA » 2009
- [25] : « question § réponse sur les phénomènes scientifique quotidiens » SCTRITONSCIENCE .com récupéré le 11/08/2012
- [26] : N. LAVERURE, « sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faible ou insulaires »2005
- [27] : HADJIDJ.S, « conception, modélisation, simulation et optimisation d'un projet d'une ferme éolienne implantation sur site favorable » juin 2019
- [28] :L. KERNER, « interaction sol-structure sous sollicitations cycliques dynamiques :application aux éolienne offshore fondées sur monopieu. Géotechnique » 2017
- [29] : L. M. TAHAR, « commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système conversion d'énergie .26/06/2012
- [30] : « réduire les vibrations dues au vent pour les ponts et les pales d'éoliennes »
- [31] : M.C. e. B. OMARI, « CONCEPTION, MODELISATION STATIQUE §FABRICATIONDES DES PALES D'EOLIENNE DE TYPE DARRIEUS » chez conception assisté par ordinateur DAO/CAO de deux pales 2015.
- [32] : Y. L. M.§. X. J. Wang, « damage detectionmethod for wind turbine bladesbased on dynamicsanalysis and mode shapedifferencecurvature information. MechanicalSystems and Signal Processing »2014
- [33]: W. DAVID, « small wind turbines Analysis , design , and application » . Introduction to.
- [34] : N. LAVERURE, « sur l'intégration des générateurs éoliennes dans les réseaux faibles ou insulaires »2005
- [35] : M.O.L. HANSEN, « Aérodynamique of wind turbines » 2008.
- [36] : b. ORIER. Etude et application de système hybrides neurosymbolique. Thèse de doctorat, université joseph fourrier.

[37] : M. SIDDO et NOUHOU, « Etude générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état Ecole nationale polytechnique d'Alger.

[38] : H. Mezaache, « les réseaux neurones formels et les systèmes neuro-flous pour l'apprentissage par renforcement », Mémoire soumis en vue de l'obtention du diplôme de magister, université el hadj Lakhdar, Batna, 2008.

[39] : P. CAMPOULICCI, A, circuit theory Approach to Recurrent neural network architecture and learning méthodes, thèse doctorat, université de Bologne, février 1998.

[40] : BENOÏT VIROLE, “ « Réseaux de neurones et PSYCHOMETIE, étude pro-pective des applications possibles des réseaux de neurones formels dans le traitement des données psychométriques, éditions du centre de pssychologie appliquée », Juin 2001.

[41] : Wood, D. (2001) small wind turbines.in advances in wind energy conversion technology, (pp.195-211). Springer, berlin, heidelberg.