

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Sujet :

Atténuation des vibrations des structures en utilisant les matériaux intelligents

Présenté par :

HAMEL Sidi Mohammed

SAIDANI Djamel Eddine

Soutenu le 29/11/2020, devant le jury composé de :

M ; D. ZENDAGUI	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. S. GHEZALI	Maitre assistante A	Univ. Tlemcen	Examinatrice
M. A. MEGNOUNIF	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mme. Z. BENADLA	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Co-encadrant
Mme S. MAAMERI	Doctorante	Univ. Tlemcen	Co-encadrant

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

C'est vraiment faire preuve d'ingratitude que de ne point remercier nos encadreurs Mr Pr A. MEGNOUNIF, et Mme Dr. Z.BENADLA qui nous a beaucoup aidés à terminer le troisième chapitre, et Mme.S.MAAMERI, qui nous a dirigé tout au long de cette étude et nous a donné les grands axes de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mr DJENNANE Mourad qui a eu un grand mérite dans ce travail.

Nous remercions également Mr. le président du jury Pr D.ZENDAGUI et l'examinatrice Mme.S.GHEZALI d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements ainsi que notre grande gratitude reconnaissance envers tous nos enseignants, et tous nos collègues à le Faculté de Technologie Université de Tlemcen

DEDICACES

Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remerciements à :

Ma très chère mère qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ainsi qu'à la mémoire de mon père (رحمه الله).

Mon frère : Walid, sa femme et la petite Aridj.

Ma sœur : kheira, son mari Mohammed et leurs enfants.

Ainsi qu'à toute la famille Saidani et la famille Belhadj et tous mes amis.

« وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ »

SAIDANI DJAMEL EDDINE

DEDICACES

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail

A mes chers parents, et surtout à ma mère, celle qui m'a soutenu sans trop d'admonestations ni remontrances tout de long de mon cursus scolaire.

Celle dont le visage guilleret me mettait en confiance et m'extirpait des affres de l'angoisse et de la solitude moribonde tout en m'inculquant des préceptes qui constituaient autant de garde-fous

A ce visage emblématique et inoubliable, je dédie ce mémoire pour perpétuer son souvenir et m'abreuver à sa source intarissable.

Ô ! Ma mère tu es et tu demeureras le plus beau parangon.

A mes chers frères : Sidi Ahmed et son épouse Kenza et le petit amoureux de la famille Mohamed Siradj, Younes et Soumia, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A mes meilleurs amis : Ismail, Khaled, Nabil, Youcef, Fethi, Bekkay, Krimo, Boucif.

A Samah, celle qui m'a appris à faire bon cœur contre mauvaise fortune et n'eut de cesse d'évincer mon pessimisme en me disant au lieu de dire le verre est à demi vide mieux vaut dire le verre est à demi plein.

« وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ »

Hamel Sidi Mohammed

RESUME

Dans cette étude nous nous intéressons à un nouveau domaine et important dans la construction de génie civil qui est les structures intelligentes. L'objectif de notre travail est de démontrer l'importance du matériau piézoélectrique dans la diminution de vibration des structures. Pour cela nous avons exposé en premier lieu une analyse bibliographique sur les différents types de contrôle et les structures intelligentes. Par la suite, une modélisation numérique a été élaborée par le logiciel de calcul Ansys afin de déterminer les modes et les fréquences naturelle. Cette dernière nous a permis de voir la diminution de l'amplitude da vibration en ajoutant le patch piézoélectrique.

Mots clés : Contrôle, structure intelligente, piézoélectrique, Ansys, Harmonique.

ABSTRACT

In this study we are interested in a new and important field in civil engineering construction which is intelligent structures. The objective of our work is to demonstrate the importance of the piezoelectric matériel in reducing the vibration of structures. For this we first exposed a bibliographic analysis on the different types of control and intelligent structures. Subsequently, numerical modeling was developed using Ansys software in order to determine the natural modes and frequencies. The latter allowed us to see the decrease in the amplitude of the vibration by adding the piezoelectric patch.

Keywords : Control, intelligent structure, piezoelectric, Ansys, Harmonic

المخلص

في هذه الدراسة، نحن مهتمون بمجال جديد ومهم في إنشاءات الهندسة المدنية وهو الهياكل الذكية. الهدف من عملنا هو إثبات أهمية المادة الكهروضغطية في تقليل اهتزاز الهياكل. لهذا، كشفنا أولاً عن تحليل ببليوغرافي لأنواع المختلفة من التحكم والهياكل الذكية. بعد ذلك، تم تطوير النمذجة العددية باستخدام برنامج Ansys لتحديد الأوضاع والترددات الطبيعية. سمح لنا هذا الأخير برؤية انخفاض في سعة الاهتزاز عن طريق إضافة التصحيح الكهروضغطية.

كلمات مفتاحية: تحكم، هيكل ذكي، كهروضغطية، برنامج Ansys، تناغمي.

Notations

- K coefficient de couplage
- d constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte
- s compliance ou susceptibilité élastique
- e constante piézoélectrique
- c constante élastique
- D vecteur de déplacement électrique (charge par unité de surface)
- T vecteur de stress,
- S vecteur de déformation,
- E vecteur du champ électrique,
- e matrice de constante piézoélectrique,
- ϵ matrice diélectrique à déformation constante
- c matrice d'élasticité à champ électrique constant
- u le vecteur des déplacements
- l la longueur de poutre
- ϕ potentiel électrique
- Π une fonction énergétique
- H la densité d'énergie
- $, P_s$ les vecteurs respectifs
- V volume m^3
- P_c le vecteur des forces concentrées
- σ la charge
- δ le principe de Hamilton
- T l'énergie cinétique
- u_e, ϕ_{el} le vecteur de déplacement et le potentiel électrique par à l'élément fini
- u_i, ϕ_i le déplacement nodal et vecteur de potentiel électrique
- N, N_ϕ les matrices de fonction de forme pour le déplacement et champs électriques
- u, ϕ, F, G le déplacement nodal global
- c_{uu} la matrice d'amortissement proportionnelle
- α, β les coefficients de Rayleigh.
- V la tension de retour vers l'actionneur
- F le vecteur de force N
- ν Coefficients de Poisson
- u déplacement axial

Sommaire

<i>Remerciement</i>	<i>ii</i>
<i>DEDICACES</i>	<i>iii</i>
<i>RESUME</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vi</i>
<i>المخلص</i>	<i>vii</i>
<i>Notations</i>	<i>viii</i>
<i>Sommaire</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des Tableaux</i>	<i>xii</i>
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités	2
I. Introduction	3
II. Contrôle des structures	3
II.1 les genres de système de contrôle	3
II.1.1 le système de contrôle passif :	3
II.1.2 Le système de contrôle actif	4
II.1.3- Le système de contrôle semi-actif :	4
I.2.4- Le système hybride	5
III. Structure intelligente	5
III.1 Définition	5
III.2. Les composants fondamentaux d'une structure intelligente	6
IV. Les matériaux intelligents	7
IV.1. Evolution des matériaux dans le temps	7
IV.2. Définition	8
IV.3 Les phases de la conception des matériaux intelligents	9
IV.4. Les différentes catégories de matériaux intelligents	9
IV.4.1. Alliages à mémoire de forme (AMF)	9
IV.4.2 La fibre optique :	10
IV.4.3 La magnétostriction	11
IV.4.4 Piézoélectriques	12
V. La piézoélectricité	13
V.1. Les effets piézoélectriques	13
V.2 Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques :	13
V.3 Dispositifs piézoélectriques	15
VI. Systèmes de contrôle et matériaux intelligents	15
VII. Shunt	16
VII.1. Circuits de shunt	17
VI.2. Techniques d'amortissement shunt piézoélectrique	17

<i>VIII. Conclusion</i>	19
Chapitre II : Etat de l'Art	20
<i>I. Introduction</i>	21
<i>II. Etat de l'art</i>	21
II.1. Poutre attachée à un piézoélectrique :	21
II.2. Poutre a menée des pastille piézoélectrique attachée à un shunt	23
<i>III. Equation générale de couplage électromécanique :</i>	26
<i>IV. Conclusion</i>	31
Chapitre III : Simulation numérique	30
<i>I. Introduction</i>	33
<i>II. Présentation d'ANSYS</i>	33
<i>III. Modélisation de la poutre encastré-libre sans piézoélectrique</i>	33
III.1 Définition de la géométrie	33
III.2. Définition des données caractérisant le modèle	34
III.3. Choix d'élément	34
III.4. Maillage	35
III.5. Condition aux limites et application de la force	35
III.6. Analyse modale	36
III.7. Détermination de l'amplitude de vibration	37
<i>IV. Modélisation de la poutre attachée à un patch piézoélectrique PZT-5H</i>	38
IV.1. Choix d'élément piézoélectrique	38
IV.2. Propriétés mécaniques de piézoélectrique	38
IV.3 Application du patch piézoélectrique (1ere position)	39
IV.3.1. Analyse modale	39
IV.3.2. Analyse harmonique	40
IV.4. Application du patch piézoélectrique (2eme position)	41
IV.4.1. Analyse modale	42
IV.5. Application du patch piézoélectrique (3eme position)	43
IV.5.1. Analyse modale	43
<i>V. Modélisation de la poutre doublement appuyée des deux côtés sans piézoélectrique</i>	45
V.1. Analyse modale	46
<i>VI. Modélisation de la poutre attachée à une pastille piézoélectrique PI-Céramique</i>	48
VI.1. Analyse modale	50
<i>VII. Conclusion</i>	52
<i>Conclusion générale</i>	53
<i>Références bibliographiques</i>	54

Liste des figures

Chapitre I

<u>Figure I. 1 Diagramme de contrôle passif</u>	1
<u>Figure I. 2 Diagramme d'un contrôle actif</u>	2
<u>Figure I. 3 Diagramme schématique d'un système de contrôle semi-actif</u>	2
<u>Figure I. 4 Structure intelligente</u>	4
<u>Figure I. 5 Les composantes de base d'une structure intelligente</u>	5
<u>Figure I. 6 Évolution des matériaux dans le temps</u>	5
<u>Figure I. 7 comparaison entre alliage classique et alliage à mémoire de forme</u>	7
<u>Figure I. 8 fonctionnement de la fibre optique</u>	7
<u>Figure I. 9 schéma d'une fibre optique</u>	7
<u>Figure I. 10 fibres optiques multimode et monomode</u>	8
<u>Figure I. 11 Certains matériaux aux propriétés piézoélectriques</u>	9
<u>Figure I. 12 Type des effets piézoélectrique</u>	9
<u>Figure I. 13 Modes de vibration typiques associés à la forme d'un matériau piézoélectrique</u>	10

Chapitre II

<u>Figure II.1. Une poutre en porte-à-faux en aluminium liée à une paire Co-localisée d'actionneurs piézoélectriques</u>	20
<u>Figure II.2 : deux poutres attache par : (a) deux couches piézoélectriques et (b) des éléments PZT collées sur les deux surfaces (dimensions en mm et pas à l'échelle).</u>	21
<u>Figure II.3. Dessins schématiques du montage expérimental pour : (a) une série R – L et (b) un circuit shunt parallèle R – L.</u>	21
<u>Figure II.4. Poutre munie d'une pastille piézoélectrique : géométrie et conditions aux limites (dimension en mm)</u>	22
<u>Figure II.5. Capteur / actionneur placé près de l'extrémité fixe du la poutre</u>	23
<u>Figure II.6. Capteur / actionneur placé au milieu du la poutre</u>	23
<u>Figure II.7 : Capteur / actionneur placé à l'extrémité libre du la poutre</u>	23

Chapitre III

<u>FigureIII.1 : géométrie de la poutre étudiée</u>	31
<u>FigureIII.2 : Géométrie SOLID186</u>	32
<u>Figure III.3 : maillage de la poutre encastrée-libre sans patch piézoélectrique</u>	33
<u>Figure III.4 : Application du chargement et conditions aux limites.</u>	33
<u>Figure III.5 : Déplacement U_z en fonction de la fréquence</u>	35
<u>Figure III.6 : Géométrie SOLID5</u>	36
<u>Figure III.7 : géométrie de la poutre intelligente (1ere position)</u>	37
<u>Figure III.8: géométrie de la poutre intelligente (2eme position)</u>	39

Liste des Tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I. 1 Différents coefficients de couplage électromécanique suivant la géométrie, le mode de vibration et la polarisation P</i>	10
<i>Tableau I. 2 les types de shunt</i>	13

Chapitre III

<i>Tableau III.1 : Propriétés des matériaux de la poutre en aluminium</i>	32
<i>Tableau III.2 : les fréquences propres de la poutre sans éléments piézoélectriques</i>	33
<i>Tableau III.3 : Les modes fondamentaux</i>	34
<i>Tableau III.4 : Les amplitudes de vibration</i>	35
<i>Tableau III.5. Propriétés des matériaux piézoélectriques PZT-5H</i>	36
<i>Tableau III.6 : Fréquences propres de la poutre avec patch piézoélectrique</i>	37
<i>Tableau III.7 : Modes fondamentaux de la poutre avec patch à 25V et 50V</i>	38
<i>Tableau III.8 : Comparaison des amplitudes vis-à-vis du rajout du patch</i>	38
<i>Tableau III.9 : Fréquences propres du cas de la 2^{ème} position du patch</i>	39
<i>Tableau III.10 : Modes fondamentaux de la poutre en présence de la seconde position du patch</i>	40
<i>Tableau III.11 : les fréquences pour les dix premiers modes propres</i>	41
<i>Tableau III.12 : Modes fondamentaux de la poutre en présence de la 3^{ème} position du patch</i>	42
<i>Tableau III.13 : Récapitulatif des amplitudes sans et avec patch à 25 V</i>	42
<i>Tableau III.14: les fréquences pour les dix premiers modes propres</i>	44
<i>Tableau III.15 : Modes fondamentaux de la poutre double A-double A</i>	44
<i>Tableau III.16 : Comparaison des amplitudes par rapport aux conditions aux limites de la poutre</i>	45
<i>Tableau III.17 : propriétés des matériaux piézoélectriques PI-Céramique</i>	46
<i>Tableau III.18 : les fréquences pour les dix premiers modes propres</i>	47
<i>Tableau III.19 : Modes fondamentaux de la poutre encastree-libre avec PZT PI-Céramique</i>	48
<i>Tableau III.20 : Comparaison entre les deux matériaux piézoélectriques utilisés</i>	48

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la minimisation des risques naturels est l'objectif le plus important pour les ingénieurs en génie civil. Dans ce domaine, les structures dont les dimensions sont de plus en plus importantes, nécessitent une surveillance étroite de la part des exploitants. Ces structures sont en effet soumises à de nombreux risques naturels ou liés à l'activité humaine.

L'importance de notre thème de recherche (Atténuation des vibrations des structures en utilisant les matériaux intelligents) consiste une importance majeure pour des constructions en génie civil, d'où nous voulons connaître l'effet des matériaux intelligents sur le contrôle des structures.

Dans ce contexte, nous allons d'abord commencer par une recherche bibliographique dans lequel nous allons parler sur les contrôles des structures et les genres de système de contrôle. Aussi, nous allons exprimer la structure intelligente et leurs composantes fondamentales. Ensuite, nous allons essayer d'identifier quelques matériaux intelligents en général (Alliage à mémoire de forme, fibre optique, magnétostriction), et en particulier les piézoélectriques.

Dans le 2ème chapitre, nous nous essaierons de rassembler un certain nombre d'études sur le piézoélectrique et le shunt et leurs effets sur les poutres, et découvrir l'équation générale de couplage électromécanique.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter une simulation numérique d'une poutre en aluminium avec une couche piézoélectrique, avec logiciel ANSYS APDL, en changeant les propriétés et la position de piézoélectrique, aussi les conditions aux limites de la poutre.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui présente les grandes lignes du travail effectué et souligne les différents résultats obtenus.

Chapitre I : Généralités

I. Introduction

Le contrôle des vibrations est désormais l'un des domaines les plus importants en ingénierie en particulier en génie civil. Ces dernières années, le contrôle actif de vibration des structures en béton armé est fait par des matériaux piézoélectriques. L'utilisation de ces matériaux est l'un des moyens les plus importants pour contrôler les vibrations dans les systèmes mécaniques, et en raison des propriétés uniques de convertissement électromécaniques.

Le premier objectif de cette synthèse bibliographique est de présenter le contrôle des structures et ces genres. Ensuite, nous parlerons des structures intelligentes.

II. Contrôle des structures

Ces dernières années, les méthodes de contrôles sont devenues une source d'intérêt afin de protéger les structures contre les endommagements et les actions dynamiques. Par conséquent, pendant la construction, nous devons protéger les structures avec des systèmes de protection, en réduisant la réponse. Parmi les méthodes de contrôle innovantes on peut distinguer quatre approches différentes passif, actif et semi-actif, à celles-ci on peut ajouter une quatrième qui est le contrôle hybride.

II.1 les genres de système de contrôle

II.1.1 le système de contrôle passif :

A l'avantage de se passer de toute intervention extérieure, car ce système utilise, de façon efficace certains matériaux bien intégrés qui facilitent la tâche de l'amortissement des vibrations structurales. Mais les systèmes de contrôle passif qui sont au nombre de deux : isolation sismique et dissipation d'énergie sont souvent confrontés à des problèmes d'adaptation puisqu'ils ne peuvent réagir de façon adéquate aux excitations fréquentielles hautement élevées telles que les séismes violents. Tout de même, ce système peu coûteux s'appuie sur le schéma en boucle ouverte (the open loop schème).

L'efficacité de ce dispositif dépend de l'ajustement de ses paramètres afin que le temps de réponse soit approprié et conforme aux attentes relatives à la fois au mouvement d'entrée et au comportement structurel. [1]

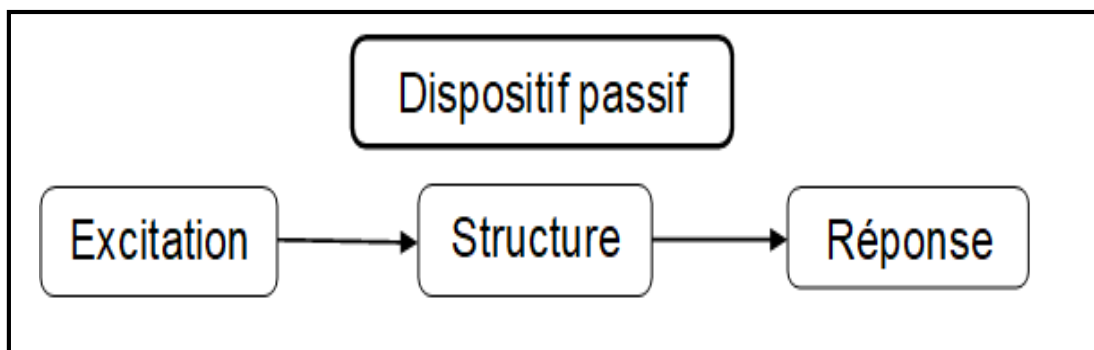


Figure I. 1 Diagramme de contrôle passif [2]

II.1.2 Le système de contrôle actif

Ce système est aux antipodes du système passif, étant donné qu’il est tributaire de l’intervention extérieure, ce qui le rend très coûteux, mais il faut signaler que le système de contrôle actif contrairement au système passif peut s’adapter conséquemment aux perturbations externes. Dommage qu’il dépend d’une source d’énergie externe pour faire fonctionner l’actionneur sinon si on, retient le critère d’adaptabilité, il semble bien plus performant que le système passif. [1]

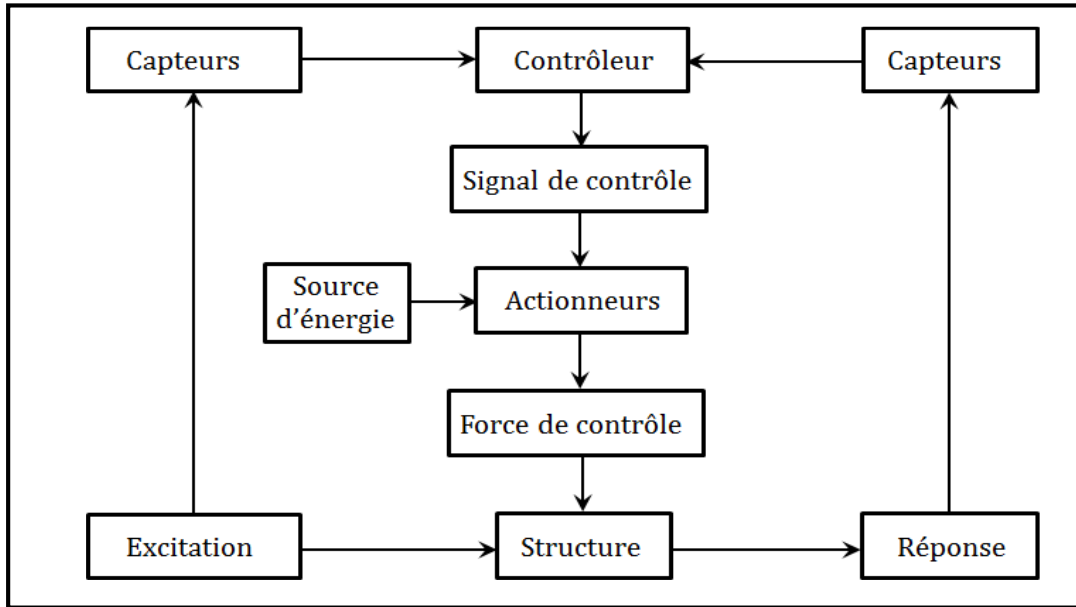


Figure I. 2 Diagramme d'un contrôle actif

II.1.3- Le système de contrôle semi-actif :

Ce système semble être un véritable compromis puisqu’il permet la combinaison des meilleures caractéristiques des systèmes passif et actif. Un dispositif qui connaît en plein essor est en passe d’être sollicité par beaucoup d’entreprises et surtout par le génie civil. Fiables, performants et peu énergivores, les systèmes semi -actifs se déclinent en trois types : système à amortissement variable, système à rigidité verticale, système à frottement variable. [1]

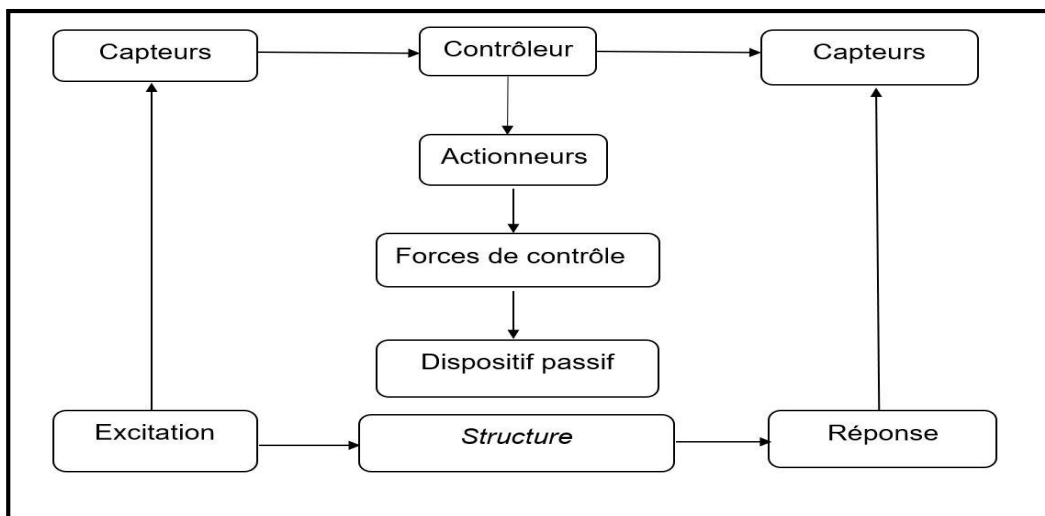


Figure I. 3 Diagramme schématique d'un système de contrôle semi-actif [2]

I.2.4- Le système hybride

Le concept d'hybridité semble finalement très fécond et très pragmatique puisque les dispositifs de contrôle hybride intègrent en leur sein des amortisseurs actifs et semi-actifs, ce qui engendre un comportement structurel. Ainsi les performances sont excellentes qu'il est mi-figue mi-raisin i.e. il exploite à bon escient les propriétés inhérentes à un système actif corroboré par le système semi-actif. Résultat plus que satisfaisant puisqu'il permet les déplacements de base et l'atténuation des pics d'accélération. et comme disent de façon concise, les experts ce système augmente la fiabilité et l'efficacité globale de la structure contrôlée d'autant plus qu'il est capable de réduire de moitié l'amplitude des mouvements des constructions. Mais s'il a l'avantage des deux techniques, il présente l'inconvénient des limites de chacune d'elles. [3]

III. Structure intelligente

Protéger les ouvrages contre d'éventuels cataclysmes ou contre toutes sortes de vibrations qu'elles soient factices ou naturelles, a toujours préoccupé les esprits des ingénieurs civils. L'objectif étant non pas de trouver des palliatifs mais des solutions durables, car un édifice industriel ou un quelconque conglomérat sont le fruit d'investissements colossaux et il serait bien dommage que ces ouvrages qui ont nécessité des efforts titanesques continus dégringolent en un clin d'œil. Cette prise de conscience aigüe est à l'origine d'une recherche fébrile haletante, car il fallait coûte que coûte concevoir des dispositifs parasismiques susceptibles de rompre avec les procédés anciens qui n'ont pas donné entière satisfaction. On a finalement trouvé, après des années de labeur, la clé de voûte qui réside dans les structures intelligentes.

III.1 Définition

Il existe quatre catégories de structures, et c'est en comprenant chacune d'elles que la signification des structures intelligentes nous apparaît clairement :

- **Structure sensible** : Il contient des capteurs ou senseurs susceptibles qui peuvent apporter des informations sur l'environnement ou lui-même au système et transmettre ces informations à son utilisateur ; [2]
- **Structure adaptable** : Il contient des actionneurs, ces actionneurs peuvent modifier leurs propriétés. Par conséquent la structure s'adapte à l'environnement en raison des modifications de ses propriétés ; [2]
- **Structures adaptatives** : une structure adaptative est définie comme «Une structure dont les caractéristiques structurelles géométriques et inhérentes peuvent être modifiées de manière bénéfique en réponse à une stimulation externe par des commandes à distance ou des moyens automatiques, les applications des structures adaptatives sont résumées en quatre parties principales : surveillance de la santé structurale, morphing de forme, contrôle des vibrations (force et déformation) et récupération d'énergie ; [4]

- **Structure intelligente** : peut être considérée comme une structure ou un composant structurel sur lequel sont attachés ou dans lesquels sont intégrés des capteurs et des actionneurs dont les actions sont coordonnées par un système de contrôle imprégnant la structure avec la capacité de répondre spontanément aux stimuli externes exercés sur la structure en proportion à leur ampleur pour compenser les effets indésirables ou pour améliorer les effets souhaités. Par exemple, pour supprimer les niveaux de vibration dans un faisceau élastique mince, plusieurs chercheurs ont démontré la faisabilité d'atteindre des amplitudes réduites en exploitant les capacités de détection et d'actionnement des céramiques piézoélectriques ou des films collés sur sa surface. Lorsque le faisceau est déformé par l'application de forces externes, le capteur piézoélectrique déformé simultanément développe une charge de surface proportionnelle à l'amplitude de la force. Lors du traitement de ce signal reçu du capteur, le système de commande imprime alors une tension appropriée sur l'actionneur piézoélectrique qui induit une déformation et un amortissement contre-actifs dans le faisceau. Les oscillations du faisceau diminuent ensuite rapidement. [5]

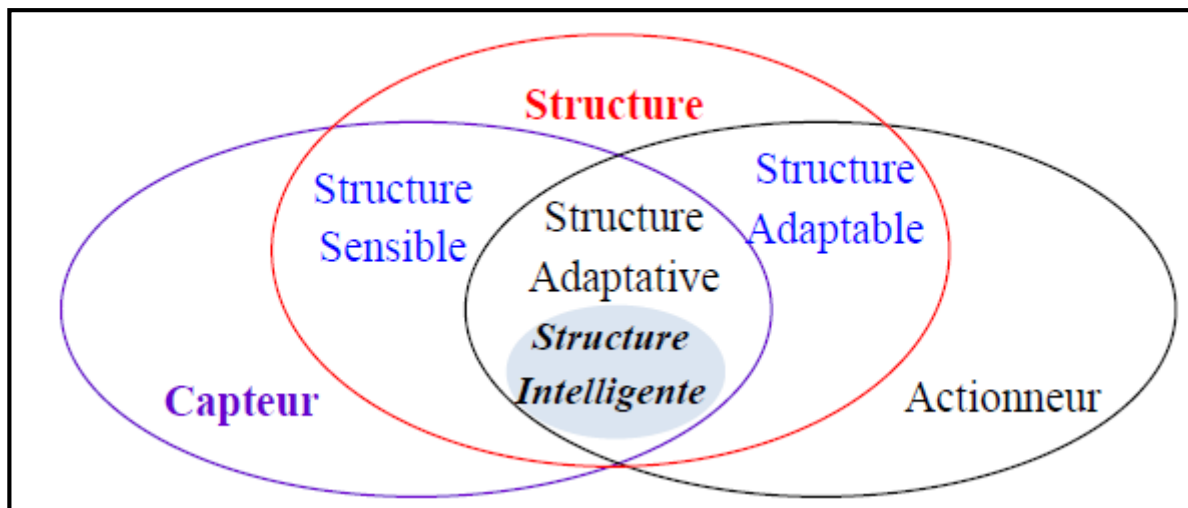


Figure I. 4 Structure intelligente [6]

III.2. Les composants fondamentaux d'une structure intelligente

Une structure intelligente implique cinq éléments clés et chaque élément à un rôle bien précis dans la structure :

- Le matériau structurel ;
- Les actionneurs ;
- Capteurs distribués ;
- Stratégies de contrôle ;
- Électronique de conditionnement de puissance. [2]

Avec ces composants, une structure intelligente a la capacité de répondre aux conditions environnementales et opérationnelles changeantes (telles que les vibrations et changement de forme).

Les microprocesseurs analysent les réponses des capteurs et utilisent un contrôle intégré algorithmes pour commander aux actionneurs d'appliquer des déformations / déplacements / amortissements localisés pour modifier réponse du système élasto-mécanique. Les actionneurs et les capteurs sont fortement intégrés dans la structure par collage ou encastrement de surface sans provoquer de modifications importantes de la masse ou de la structure rigidité du système. [7]

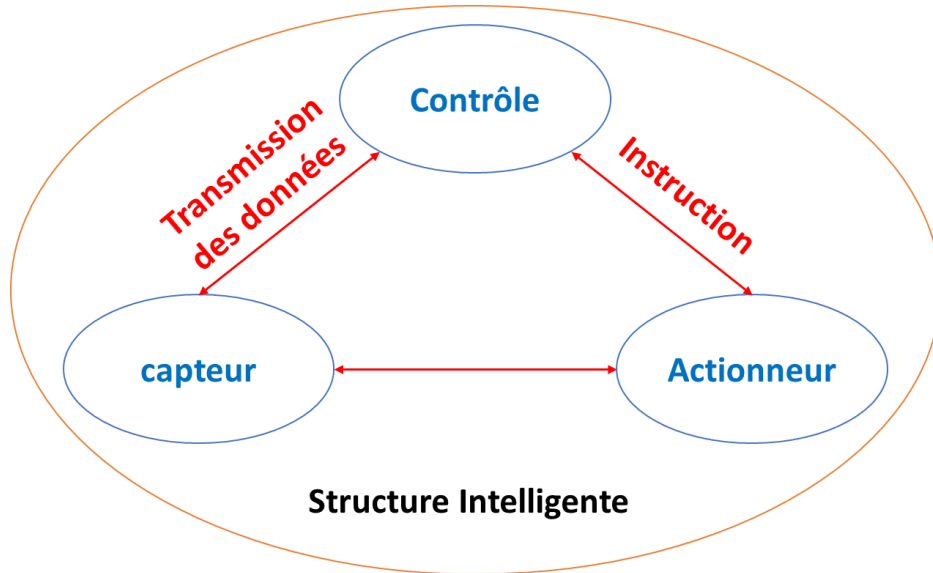


Figure I. 5 Les composantes de base d'une structure intelligente [8]

IV. Les matériaux intelligents

IV.1. Evolution des matériaux dans le temps

La construction des civilisations anciennes a été réalisée avec des matériaux naturels tels que : bois, pierres, cuirs, os, corne, lin ou chanvre. Ces matériaux se sont développés et de nouveaux matériaux comme les métaux, la céramique et les matériaux plastiques sont apparus.

Enfin, après avoir combiné ces substances, les chercheurs ont réussi à découvrir : des matériaux composés. Cependant, les chercheurs et les ingénieurs ont estimé qu'il fallait utiliser de nouveaux matériaux multifonctionnels et capables de s'adapter à leur environnement.

C'est le début des matériaux intelligents : dans les années 80, des travaux étaient menés aux USA dans des secteurs très avancés comme l'espace et la biomédecine. Aujourd'hui les matériaux intelligents se sont répandus dans tous les domaines scientifiques. [9]



Figure I. 6 Évolution des matériaux dans le temps [10]

IV.2. Définition

Les chercheurs désignent les matériaux intelligents ceux ayant la capacité de répondre régulièrement aux stimuli externes. Bien qu'un morceau de marbre ne soit pas affecté lorsque vous le touchez, un matériau intelligent détectera et enregistrera cette touche, puis y répondra en fonction du type de réponse que le matériau a été conçu pour agir.

Nous pouvons considérer le quotient intellectuel d'une substance comme la quantité de discipline dans sa réponse aux facteurs de stress environnants. Ainsi, une substance qui peut ressentir de très légers changements dans son environnement et montrer une réponse claire en conséquence est une substance plus intelligente que les autres. Cependant, l'étape de réponse suit l'étape de "l'acclimatation", qui est la caractéristique dont le matériau devient d'importance industrielle pour lui. Nous, humains, voulons cette réponse conçue pour rétablir l'équilibre à la lumière du changement, au service de notre confort.

Le matériau intelligent peut être affecté par la pression, la tension, la température, la friction ou le champ électromagnétique. Le matériau détecte ces facteurs et d'autres lorsque son intensité atteint un certain point, nous l'appelons seuil, et il commence à réagir sous la forme d'une couleur, d'un changement dans sa structure, sa forme, sa résistance électrique ou autre. Selon cette séquence, le matériau intelligent est impliqué dans la fabrication de systèmes adaptatifs, qui se composent de trois axes principaux.

Tout d'abord, nous trouvons le capteur qui détecte la variable et mesure son intensité, puis l'actionneur, qui modifie le système mécaniquement - c'est-à-dire qu'il provoque un mouvement - en fonction de l'intensité du changement, puis enfin nous trouvons un contrôleur qui reçoit des informations du capteur et des commandes. La réponse de l'opérateur, qui est le cerveau du système. [11]

IV.3 Les phases de la conception des matériaux intelligents

Une fois les propriétés identifiées, on doit ensuite penser aux matières premières comme on doit ne pas oublier de mentionner la fin du cycle de vie de ce matériau. Mais avant toute réalisation, il est nécessaire d'établir, de prime abord, des modélisations appuyées par des simulations numériques. Après cette étape, on passe aux procédés de fabrication tels que la synthèse chimique, le mode de cuisson et éventuellement l'usage d'additifs. Une fois toutes ces tâches accomplies, on procède à la fabrication d'un prototype qui doit être soumis à des vérifications rigoureuses avant tout lancement dans la fabrication en série.

Enfin, avant d'être écoulé sur le marché, ce dispositif doit être conforme aux trois « R » : réduire, réutiliser, recycler.

Pour revenir au concept de matériau intelligent disons que l'appellation n'est ni fortuite ni exagérée puisque le comportement de ces matériaux est similaire à un certain nombre de traits du comportement de l'homme (sensibilité +réactivité + adaptation) c'est la raison pour laquelle on dit que le marbre n'est pas « intelligent » puisqu'il ne peut ni détecter l'impact d'une touche, ni à plus forte raison, l'enregistrer. Donc, quand un matériau est affecté par une pression, une tension, une quelconque température, une friction ou un champ électromagnétique on dit alors qu'il est tout simplement intelligent.

Pour davantage apprécier l'efficacité du matériau intelligent, voici une énumération de ses propriétés : Le matériau intelligent est d'abord versatile et peut s'adapter à son environnement quand il atteint un certain seuil pour finalement réagir selon les sollicitations et les stimuli en présence. Cette réaction devient manifeste lorsque le matériau change de couleur, de structure, de forme ou passe d'une résistance à une autre. Donc la finalité de l'intégration d'un matériau intelligent dans un dispositif de surveillance obéit aux critères suivants : un capteur qui détecte les excitations et se charge de les mesurer, un actionneur qui a pour rôle de modifier le système mécaniquement et un contrôleur qui gère les informations émanant du capteur et des commandes. [12]

IV.4. Les différentes catégories de matériaux intelligents

IV.4.1. Alliages à mémoire de forme (AMF)

Comme leur nom l'indique, ces fameux alliages ont l'étonnante propriété de conserver la trace mnésique, autrement dit ces AMF peuvent revêtir la forme initiale qu'ils ont gardé en mémoire après avoir subi une déformation. Cette alternance très bénéfique a fait que les secteurs de la biomédecine, des sciences spatiales se sont rués vers ces matériaux pour les exploiter à des fins de recherches intenses et très concluantes. Mais le revers de la médaille est que l'on ne pas utiliser ces AMF dans toutes les situations, surtout lorsqu'il est question d'interaction avec les températures.

Donc, on peut tirer parti de ces AMF à condition de combiner d'autres métaux qui puissent résoudre les problèmes de contrainte, de température et de recouvrement. A titre d'information, l'alliage

nickel-titane, ou dit Nitinol, est le type d'alliage le plus important susceptible de mémoriser la forme mais malheureusement, il est très coûteux. Les alliages qui sont très usités également dans ce domaine sont le cuivre-aluminium-nickel. [13]

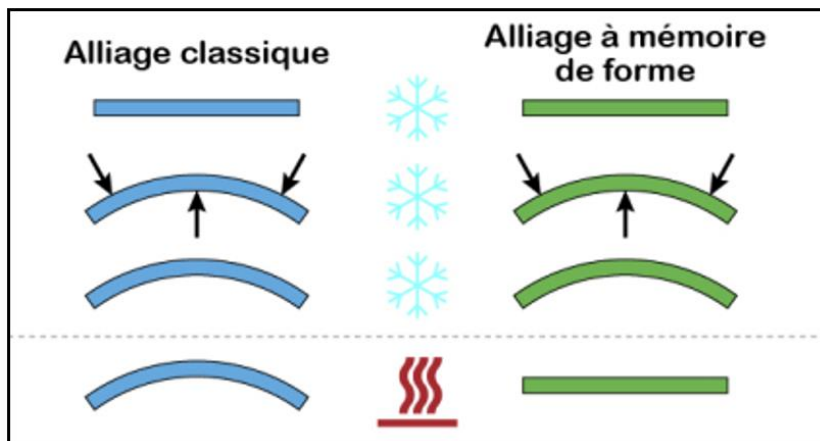


Figure I. 7 comparaison entre alliage classique et alliage à mémoire de forme [14]

IV.4.2 La fibre optique :

C'est un câble qui contient deux tubes. Les gaines dites optiques qui renferme des brins de fibre de la taille d'un poil. Pourquoi cette appellation (la fibre optique) ? Parce que celle-ci ne véhicule pas de l'électricité mais de la lumière d'où le nom d'optique.

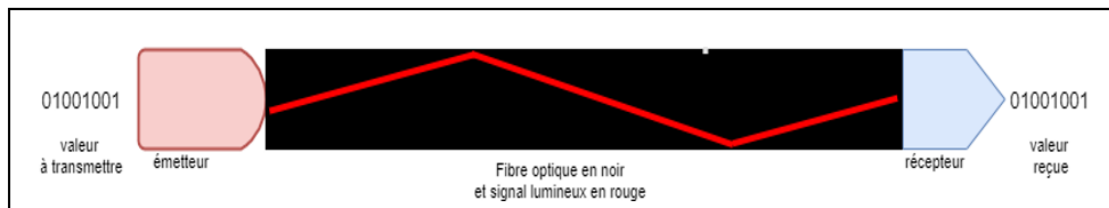


Figure I. 8 fonctionnement de la fibre optique [15]

Un revêtement de la gaine et du câble lui-même est nécessaire pour en assurer la fiabilité. La fibre doit être branchée de telle sorte que l'émetteur puisse convertir le signal qui provient du récepteur en impulsion électrique. Le récepteur, à son tour, reçoit la lumière et convertit le signal lumineux en 0 et 1 ce système binaire signifie pas de lumière=0, 1=impulsion qu'il faut émettre.

La lumière n'emprunte pas une voie rectiligne mais rebondit. Cette caractéristique : le rebond, en l'occurrence, est l'effet des caractéristiques de la fibre. Résultat assez étonnant : la lumière va suivre la fibre même si celle-ci n'est pas droite. [16]

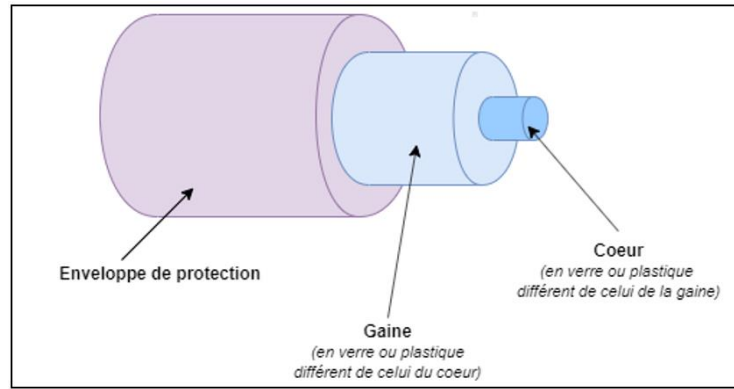


Figure I. 9 schéma d'une fibre optique [17]

IV.4.2.1 Les types de fibres optiques sont au nombre de deux :

- **Le type multimode** : comme son nom l'indique, permet à la lumière de se propager suivant un certain nombre de modes au sein du cœur. Dans le système multimode, il peut y avoir plusieurs signaux en même temps. (Avec des longueurs d'ondes différentes pour les reconnaître). Ces fibres optiques sont plus "grosses" avec des cœurs d'environ 50 microns et des gaines de 70 microns).
- **Le type monomode** : dans ce mode la lumière n'a pas d'autre alternative si ce n'est de se propager de façon rectiligne. Dans les fibres de ce type le cœur et la gaine sont extrêmement fins (10 microns pour le cœur et 70 microns pour la gaine). La fibre optique est l'un des fleurons de la nanotechnologie. [18]

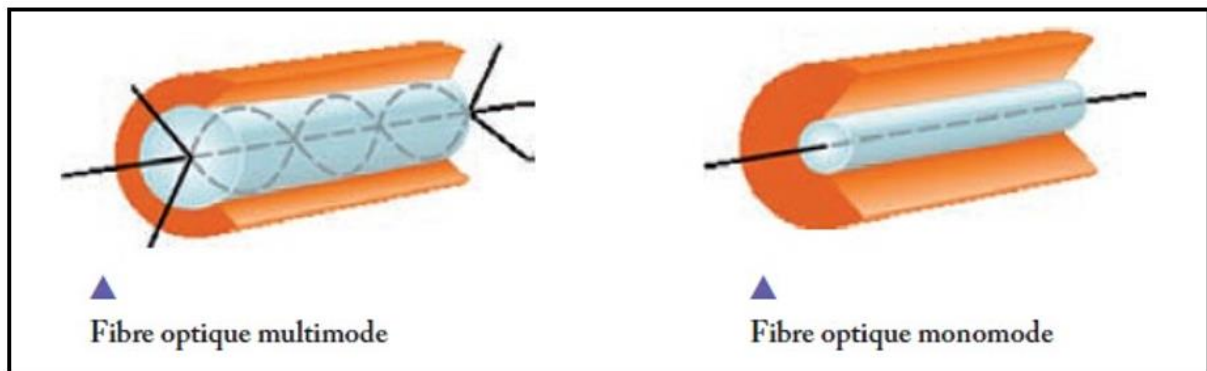


Figure I. 10 fibres optiques multimode et monomode [19]

IV.4.3 La magnétostriction

Tout d'abord une remarque importante : les matériaux magnétostrictifs peuvent se déformer sous l'action d'un champ magnétique. Les différents observateurs ont établi unanimement un fait notoire, à savoir que cette déformation est carrément proportionnelle au carré de puissance des champs appliqués. Ces matériaux, par le truchement de cet atout non négligeable, réagissent à des stimuli extérieurs qu'ils soient acoustiques, vibratoires, mécaniques ou thermiques et par conséquent subissent des changements de formes utiles selon la nature de la source extérieure. L'effet inverse existe aussi : une contrainte mécanique modifie l'état magnétique.

Ajoutons que cette magnétostriction transmet une information concernant l'échange magnétique comme elle peut être utilisée pour modifier l'anisotropie magnétique. Ces matériaux sont nécessaires pour élaborer des actionneurs, des senseurs et des microsystèmes. Autre caractéristique de ces matériaux : le fort couplage non linéaire entre les propriétés magnétiques et mécaniques. Mais la propriété la plus intéressante est qu'ils peuvent convertir une énergie magnétique en énergie mécanique et vice versa. [20]

IV.4.4 Piézoélectriques

Le terme piézoélectricité nous vient du grec « piézein » signifiant presser ou appuyer. Ainsi le terme piézoélectricité désigne la propriété que présentent certains corps de se polariser électriquement soit de générer un champ ou un potentiel électrique sous l'action d'une contrainte mécanique. On parle d'effet piézoélectrique direct. Car l'effet piézoélectrique inverse est également observé. Une tension électrique appliquée à un matériau présentant des propriétés piézoélectriques entraîne une modification des dimensions de ce matériau. [21]

Exemples de certains matériaux aux propriétés piézoélectriques :

- Quartz ;
- Topaze ;
- Tourmaline ;
- Céramiques à structure cristalline ou structures en bronze tungstène ;
- Polymères à base de fibres de caoutchouc, laine, cheveux, bois et soie. [22]



Figure I. 11 Certains matériaux aux propriétés piézoélectriques [23]

V. La piézoélectricité

V.1. Les effets piézoélectriques

Il y a deux effets directs et inverses de la piézoélectricité qui sont illustrés par la figure I.12.

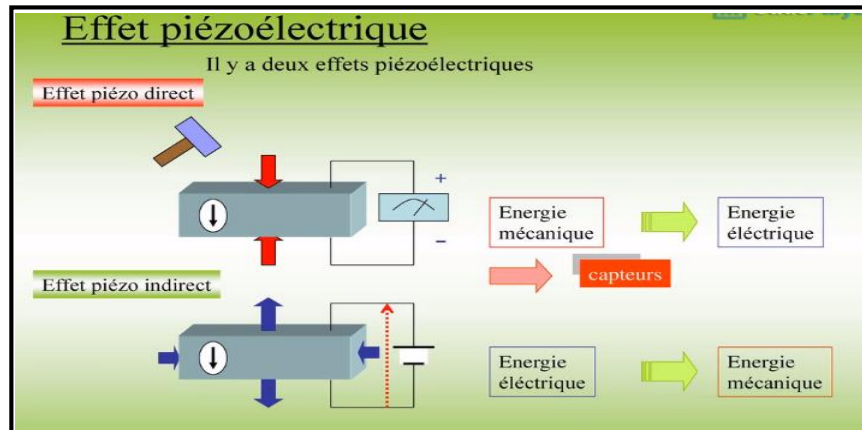


Figure I. 12 Type des effets piézoélectrique [24]

V.2 Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques :

La fréquence élastique de vibration spécifique pour un matériau piézoélectrique est sujette au matériau et à sa forme. En effet on distingue plusieurs modes de vibrations d'un matériau piézoélectrique qui dépendent de leur forme, de la direction de polarisation et de la direction du champ électrique. [25]

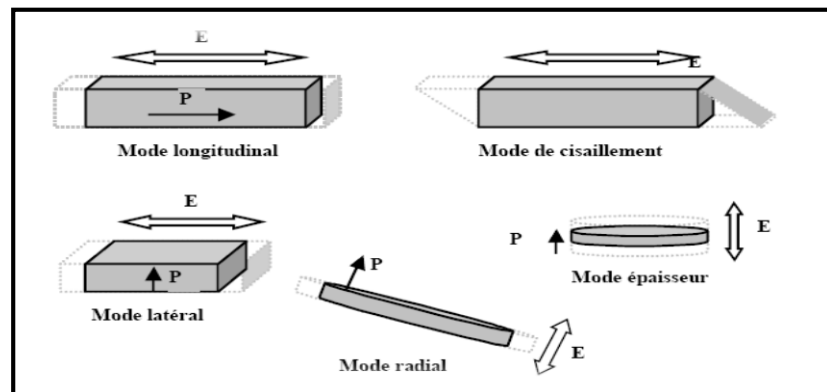


Figure I. 11 : Modes de vibration typiques associés à la forme d'un matériau piézoélectrique [25]

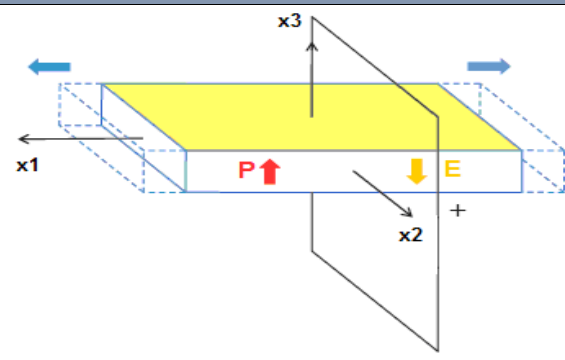
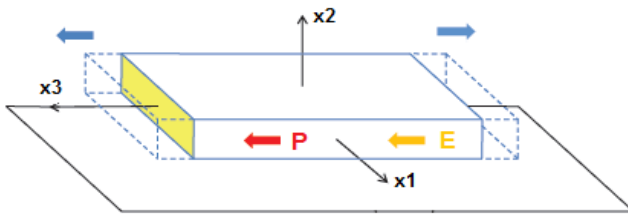
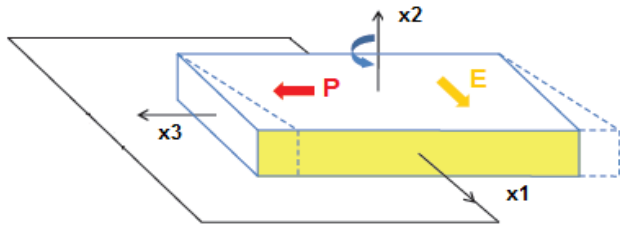
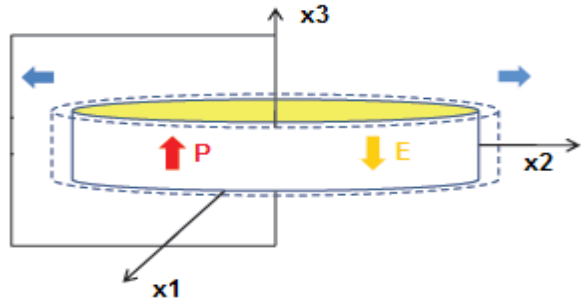
La figure montre les modes de vibration typiques relatifs à la géométrie des matériaux piézoélectriques. Barreaux, disques et cylindres sont les formes plus utilisées dans la construction des transducteurs électromécaniques.

Le couplage électromécanique est caractérisé par un coefficient de couplage noté K_{ij} ; Ce coefficient mesure la capacité d'un matériau piézoélectrique de transformer l'énergie mécanique qu'il reçoit en énergie électrique et inversement. [26]

$$K = \frac{\text{Energie transformée}}{\text{Energie fournie}}$$

Ce coefficient varie en fonction de la géométrie des matériaux et de leur mode de vibration, le tableau suivant représente Les différentes expressions du facteur de couplage. [26]

Tableau I. 1 Différents coefficients de couplage électromécanique suivant la géométrie, le mode de vibration et la polarisation P [27]

Modes de vibration	Coef de couplage k
 <p>Mode transversal</p>	$K_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\omega_{33} s_{11}^E}}$
 <p>Mode longitudinal</p>	$K_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\omega_{33} s_{33}^E}}$
 <p>Mode de cisaillement</p>	$K_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{\omega_{11} s_{44}^E}}$
 <p>Mode radial</p>	$K_p = K_{31} \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{s_{12}}{s_{11}}}}$

d : Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte

s : Compliance ou susceptibilité élastique.

e: Constante piézoélectrique.

c: constante élastique

V.3 Dispositifs piézoélectriques

Les dispositifs piézoélectriques ont pour rôle essentiel la dissipation d'énergie, laquelle est générée par la déformation de pastilles. L'objectif étant la réduction des vibrations de la structure. Toutefois cet objectif ne peut être réalisé sans la mise en valeur du couplage entre mode de vibration et circuit électrique. Cette procédure est déterminante pour la réduction des vibrations.

En provoquant l'écoulement de charges dans un matériau piézoélectrique collé à une structure, il est possible d'extraire de petites puissances (du micro ou milliwatt).

Ces dispositifs singulièrement rentables se démarquent des autres systèmes parce qu'ils sont versatiles et cette versatilité s'avère très utile étant donné que ces systèmes peuvent mettre à contribution des capteurs, des transducteurs pour la récupération d'énergie mécanique et thermique. Des efforts actuels tendent à miniaturiser ces dispositifs pour les rendre moins encombrants et plus efficaces. Cette miniaturisation implique ce qu'on appelle l'usinage qui se base sur des méthodes éclectiques.

En ce qui concerne l'actionnement, rappelons qu'il en existe différents genres ; à savoir l'actionnement électrostatique (et c'est ce qui nous intéresse ici), l'actionnement thermique et l'actionnement par matériaux actifs.

Le développement des capteurs et actionneurs ont permis l'émergence de dispositifs autoalimentés donc autonomes. La portée de cette autonomie est appréciable au niveau de la fiabilité, de la portabilité (systèmes embarqués). Autre avantage non moins important, on peut maintenant procéder à l'installation de dispositifs dans des lieux qui autrefois paraissaient inaccessibles.

Rappelons encore une fois que la spécificité des dispositifs piézoélectriques est qu'ils contiennent des matériaux qui sont déformables à l'envi et cette déformation génère des effets très bénéfiques (l'effet direct et l'effet inverse). Les matériaux piézoélectriques ont l'avantage de coupler fortement les grandeurs mécaniques et électriques [28]

VI. Systèmes de contrôle et matériaux intelligents

Depuis la mise à contribution des matériaux intelligents, les systèmes de contrôle (actif, passif semi-actif et hybride) ne cessent de susciter l'engouement des capitaines de l'industrie et des experts en génie civil. La raison étant surtout que ces systèmes ont des propriétés très intéressantes telles que l'amortissement et la dissipation d'énergie et sont, en plus de cela, ponctuellement fiables et très performants.

Bien que les matériaux intelligents soient assez nombreux, on doit cependant accorder la primauté aux matériaux piézoélectriques pour concevoir aisément des capteurs et des actionneurs à toute fin utile. Sans actionneur ni capteur, le système est tout simplement de la ferraille. La ductilité de ces matériaux est telle qu'elle peut entraîner une modification spontanée de leurs propriétés physiques, de

leur viscosité et de leur connectivité. Ces propriétés sont à même de répondre, avec une certaine vélocité, aux excitations naturelles ou factices telles que les variations de température ou, en sus les contraintes mécaniques. En un mot, ils sont parfaitement adaptés au contrôle des vibrations et ceci est l'essentiel.

Rappelons quand même, qu'avant l'avènement desdits matériaux, on se contentait du contreventement, pour consolider la rigidité des édifices. Aujourd'hui cette technique semble bien révolue, grâce aux méthodes innovantes qui ont supplanté des systèmes pas assez fiables et un tantinet performant. Une énumération des solutions alternatives qui prennent en compte les concepts d'amortissement et d'actionnement est donc nécessaire. Voici un extrait qui met en évidence les atouts et les inconvénients de chaque système :

- **le contrôle actif** peut difficilement être envisagé comme une solution fiable de protection parasismique des bâtiments en raison de la quantité de puissance nécessaire pour le fonctionnement des actionneurs et des risques de perdre la puissance lors d'un séisme majeur. Donc il faut mettre l'accent sur le rapport coût/performance des dispositifs : Tout ce qui brille n'est pas or. [1]
- **Le système semi-actif** n'exige pas une consommation accrue d'énergie comme l'exige le système actif, d'autant plus que l'énergie peut être stockée séparément dans une batterie et cet avantage assure l'indépendance du système dit semi-actif.

Quant au système actif, il est non seulement excessivement coûteux mais aussi très vulnérable, puisqu'il est la plupart du temps sujet à des pannes électriques (power failure) autrement dit ce système connaît beaucoup de couacs lors de son exploitation et c'est bien la raison pour laquelle la communauté des ingénieurs du génie civil ne lui accorde pas une importance soutenue. [1]

- **Le système de contrôle passif** n'est pas très coûteux d'une part et d'autre part il est susceptible de réduire les vibrations de la structure par absorption et dissipation de l'énergie. Cependant, l'efficacité d'un tel système dépend de l'ajustement des paramètres afin de répondre de façon appropriée aux différentes sollicitations attendues (comportement structural et mouvement d'entrée) [1]

VII. Shunt

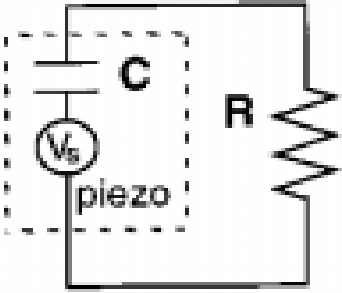
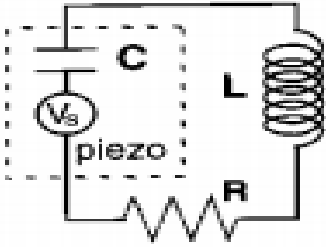
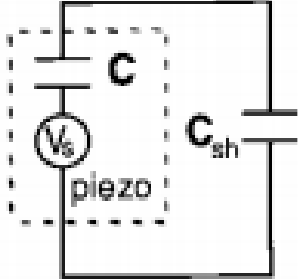
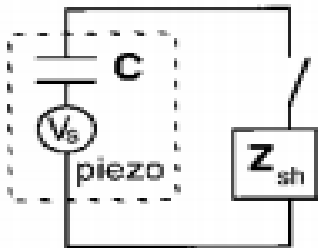
On appelle shunt un circuit qui vient se mettre en parallèle d'un autre ; dans le cas qui nous intéresse, cela signifie que pour réduire les vibrations d'une structure, on la munit d'éléments piézoélectriques, puis ces éléments sont connectés à un circuit simple. [29]

VII.1. Circuits de shunt

Il y a quatre circuits de shunt de base, à savoir les circuits inductifs, résistifs, capacitifs et commutés, et chacun un circuit shunt pourrait donner lieu à un comportement mécanique différent :

- **Shunt résistif** où une résistance électrique dissipera de la puissance par effet Joule
- **Shunt inductif** ou résonant où une inductance permet d'augmenter le courant circulant dans le shunt, et donc la dissipation par la résistance
- **Shunt à commutation** une catégorie particulière de shunts où le circuit peut être ouvert ou fermé de manière synchronisée avec les vibrations de la structure. On peut citer notamment le cas des shunts "Synchronized Switch Damping on Short" (SSDS) et "Synchronized Switch Damping on Inductor" (SSDI), où le circuit associé est respectivement une résistance, ou bien une résistance et une inductance

Tableau I. 2 Les types de shunt [31]

Shunt résistif	Shunt inductif
	
Shunt capacitif	Shunt commuté
	

VI.2. Techniques d'amortissement shunt piézoélectrique

Les techniques d'amortissement shunt piézoélectrique étaient une branche importante dans le contrôle des vibrations de la structure par des matériaux intelligents en connectant une impédance électrique optimisée entre des éléments piézoélectriques, qui sont liés à ou intégrés dans la structure, un effet d'amortissement évident a été observé lorsque la structure vibre autour de sa fréquence naturelle. Ces techniques ne nécessitent aucun capteur de rétroaction. Et ne nécessitent que quelques composants

électroniques simples. Certains d'entre eux sont de pures méthodes de contrôle passif qui éliminent la source d'alimentation et les problèmes de stabilité. La technique d'amortissement shunt préliminaire est proposée par Forward en 1979.

Dans cette recherche, ils ont essayé à la fois un shunt inductif et un contrôle de rétroaction actif pour amortir la réponse dynamique de la structure. Leurs travaux jettent les bases des futures recherches sur les techniques d'amortissement shunt. En 1988, Uchino et Ishii expérimentalement a démontré la faisabilité de l'amortissement résistif, partant de l'effet de couplage électromécanique entre la structure et les éléments piézoélectriques liés, Hagood et Al ont systématiquement analysé les comportements des circuits d'amortissement shunt résistifs et inductifs. Leurs travaux se sont concentrés sur les principes des circuits shunt et l'optimisation des paramètres du circuit. [32]

VIII. Conclusion

« L'absence de système est toujours système » semble être une devise qui peut chapeauter ce qui a été passé en revue précédemment. En effet, dans le domaine du génie civil, il n'y a pas un élément, si anodin soit-il, qui ne fasse partie intégrante d'un système. Un système ou dispositif est soit fiable ou pas, performant ou pas. Et cette fiabilité est tributaire de la qualité du matériau et de sa capacité de résilience, comme elle est le plus souvent tributaire de la nanotechnologie capable aujourd'hui de fabriquer des dispositifs miniaturisés qui peuvent tenir dans la paume d'une main. C'est dire qu'on a pu résorber définitivement le problème de l'encombrement et on a pu constater que cette révolution technique (la nanotechnologie) a chamboulé l'ordre des choses, et a pu rénover les systèmes de contrôle (passif, actif...) qui constituent, à vrai dire, l'ossature des amortissements parasismique. Car l'absence de système de contrôle constitue une carence et entrave toute initiative surtout celle de l'anticipation. Oui ! Toute anticipation, puisque dans le domaine du génie civil on doit incessamment anticiper pour réagir ultérieurement et éviter les décisions intempestives et vaines. Donc, il faut tout un arsenal d'équipements basés sur les meilleurs matériaux d'une part, et d'autre tout un train de mesures audacieuses pour parer à toute éventualité catastrophique. Viscosité, ductilité, conductibilité, rapport coût/performance sont des paramètres qu'on ne doit pas négliger quand il s'agit d'acquérir des matériaux destinés à l'accomplissement d'une « noble mission » : celle de la prévention et de l'amortissement des vibrations destructrices. Aussi, ne faut-il pas oublier que le concept de matériau intelligent est lié intrinsèquement à l'idée de versatilité et c'est ce qui fait la singularité du matériau piézoélectrique. Cette versatilité réside dans deux effets éminemment rentables : le passage du mécanique à l'électrique et vice versa. La versatilité de l'homme n'est pas comme la versatilité du matériau, loin s'en faut. Un homme versatile est un homme qui change d'opinion et d'attitude à chaque instant, ce qui fait qu'on peut dire qu'il est inconstant et imprévisible et n'est pas un être sur qui l'on doit compter, tandis qu'un matériau intelligent versatile « assume » ses fonctions de façon constante et peut passer du mécanique à l'électrique ce qui lui confère une souplesse et une performance inégalée. Donc la différence entre les deux est que la versatilité de l'homme n'est pas du tout rentable et reflète un aspect morbide de celui qui en est affecté, en revanche la versatilité du matériau piézoélectrique est rentable. Ainsi devons-nous saluer les hommes qui ont découvert ce matériau, les saluer sempiternellement ne serait-ce que pour cette propriété longtemps insoupçonnée.

Chapitre II : Etat de l'Art

I. Introduction

Toute une kyrielle de chercheurs ont travaillé d'arrache-pied (et nous leur rendons ici hommage) pour ôter les aspérités rencontrées contre lesquelles un certain nombre d'entre eux a buté durant leur long cheminement théorique et spéculatif (une pléthore d'hypothèses qui ne facilitent guère la tâche, souvent déroutante et décourageante à plus d'un titre). En effet, le domaine prospecté n'est pas du tout une sinécure puisqu'il a trait à l'ardu problème du contrôle de structures et par ricochet a aussi trait au couplage électromécanique adjacent au problème de la piézoélectricité et de ses innombrables ramifications. Pour ne pas trop s'étaler sur ces recherches fastidieuses, on va présenter dans ce chapitre les travaux les plus pertinents et les plus rentables aussi bien au plan épistémologique qu'au plan pragmatique, puisqu'il s'agit d'associer le concept de poutre à la piézoélectricité et au shunt, qui, il faut le dire, constitue en lui-même (le shunt) une rupture avec les procédés archaïques.

II. Etat de l'art

Voici compilées les dates les plus importantes qui constituent autant de repères chronologiques :

II.1. Poutre attachée à un piézoélectrique :

En 2013, **Mr Bouhedma Sofiane**, a pu grâce à des procédés ingénieux mais grâce aussi à certains détours (utilisation intensive de patchs) étudier de plus près le comportement de la poutre encastree libre et ceci moyennant une marge d'erreur quasi insignifiante. Tout en se basant sur la méthode archi connue des éléments finis, celui-ci a réussi à établir un fait indéniable : à savoir que la configuration optimum ou minimum d'un quelconque matériau y compris ses dimensions a un impact immanquable sur le comportement de la poutre. Rappelons toutefois que la poutre en question sustente une charge répartie de façon uniforme tout au long de sa structure. Les faits établis par ledit chercheur semblent dire, en filigrane, qu'il y a un lien de corrélation certain entre un matériau piézoélectrique et l'application qui lui sied. [33]

Trois ans plus tard, plus précisément en 2016, c'est au tour de deux chercheurs, nommément **Sharkh Tausee et M.R.K Agrawal**, de mener une étude dont le préluce est d'établir une connexion à l'aide de deux patchs piézoélectriques à une poutre encastree libre en vue de confirmer ou bien infirmer certaines hypothèses de départ plus ou moins crédibles. Rappelons que l'extrémité de la poutre, qui est l'objet de l'étude, est soumise à une certaine charge. Après quoi, le tandem (nos deux chercheurs) applique, tour à tour, une tension de 25 volts et de 50 volts au sein de l'épaisseur du patch PZT, autrement dit dans le sens de la polarisation.

Une fois le protocole expérimental achevé, nos deux chercheurs tirent des conclusions édifiantes et assez impromptues puisqu'ils remarquent, à leurs corps défendants, que plus la tension est élevée plus les vibrations subissent une atténuation notoire. Cependant, il faut noter que la tension maximale appliquée doit correspondre à la capacité du patch PZT qui dépend intrinsèquement, à son tour, du type de matériau et des dimensions appropriées. [34]

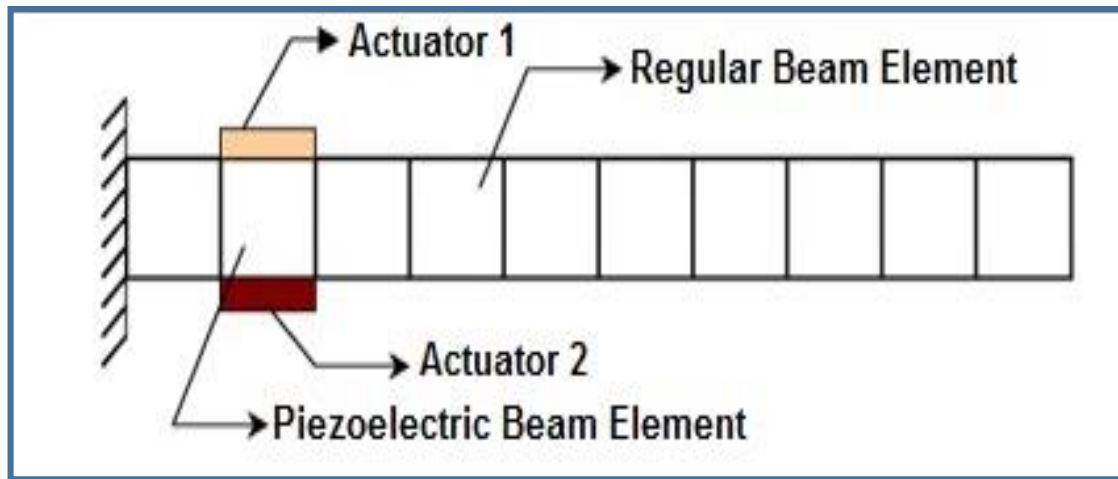


Figure II.1. Une poutre en porte-à-faux en aluminium liée à une paire Co-localisée d'actionneurs piézoélectriques [34]

Les deux études qu'on vient d'aborder sont, à vrai dire, quasiment superposables puisqu'elles se rejoignent au confluent d'une même vérité scientifique établie : à savoir que le matériau et ses spécificités jouent un rôle considérable quant à l'impact qu'ils peuvent avoir sur la cinématique des poutres. Epaisseur du patch, sens de la polarisation et nature du matériau tels sont les paramètres qui doivent être pris en considération avant toute incursion dans le domaine des dispositifs parasismiques. Ne dit-on pas que celui qui veut voyager loin, doit ménager sa monture.

Toujours en 2016, un autre chercheur du nom de **Bendine kouider** entreprend d'étudier, par le truchement d'ANSYS (logiciel très usité par les chercheurs) les vibrations dites libres qui se manifestent juste au niveau d'une plaque composite encadrée sur le côté sénestre de la poutre. S'ensuit après cette étape la discrétisation de la plaque moyennant 64 éléments qui correspondent aux nombres entiers 01, 02.....jusqu'à l'antépénultième à savoir 63 suivi de son consécutif 64.

Constat : les réactions transitoires générées par la plaque composite sont soumises à un mode de variation assez singulier. En effet ces réponses varient de façon inversement proportionnelle par rapport aux actionneurs. Ce constat peut être succinctement formulé comme suit : quand le nombre d'actionneurs va crescendo il s'ensuit un decrescendo des réponses de la plaque composite (une atténuation des vibrations). [35]

En 2009, le chercheur **Mohammed Lakhdar Sahli** s'intéresse aux poutres en aluminium encadrée libre. Ces deux poutres peuvent être mues par des actionneurs piézoélectriques. Les poutres sont entièrement enrobées de couches piézoélectriques. En sus de cela, nous trouvons deux pastilles piézoélectriques qui adhèrent à une région limitée de la poutre.

Enfin, la validation du modèle s'est faite moyennant une comparaison entre les résultats acquis et les simulations numériques via le logiciel LS Dyna. Le mérite de ce chercheur est d'avoir montré, grosso modo que la déformée de la poutre en flexion résulte principalement de l'augmentation de la

tension. Quant à la deuxième configuration basée sur les pastilles piézoélectriques, on assiste à une variation du centre de l'actionneur dans l'intervalle évalué à 10-90 mm.

Les problèmes de déviation extrême de la poutre lui font remarquer que sa valeur augmente en fonction de la position de la position de l'actionneur (ici nous mettons l'accent sur la position et non sur l'actionneur en lui-même). [36]

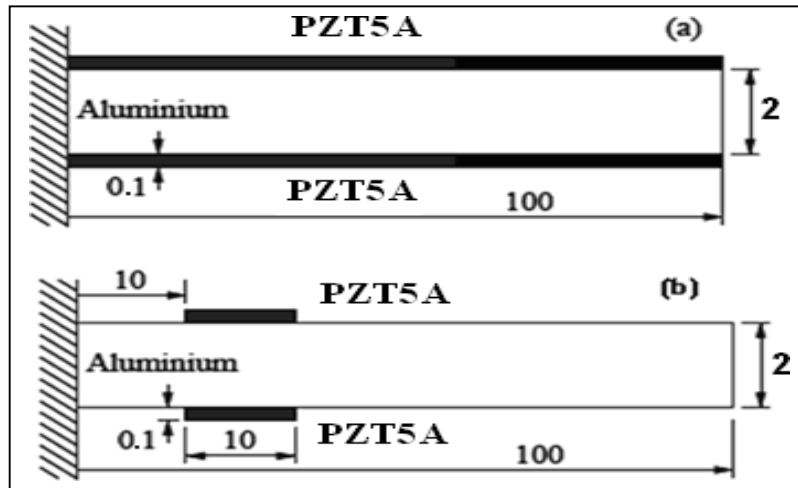


Figure II.2 : deux poutres attachées par : (a) deux couches piézoélectriques et (b) des éléments PZT collés sur les deux surfaces (dimensions en mm et pas à l'échelle). [36]

II.2. Poutre a menée des pastille piézoélectrique attachée à un shunt

En 2002, M.C.H Park s'attèle à examiner minutieusement le comportement de deux circuits destinés à répercuter les secousses résonantes. Pour atteindre son objectif tracé, il se dote d'une paire de piézocéramiques PZT 5 H collées de part et d'autre de la structure de la poutre en aluminium. Cette adhésion (collage) n'a été rendue possible que grâce aux adhésifs epoxy. Le flanc de la piézocéramique doit être distant d'au moins 0,1 cm par rapport à l'extrémité fixe de la poutre. Cette extrémité est serrée verticalement grâce à un shaker électromagnétique. Le câblage de la poutre est tel qu'il permet de générer des champs opposés dans piézocéramique supérieure et inférieure.

Tout cet arsenal de précautions et de procédés factices aident le chercheur à constater que l'amplitude de vibrations diminue dès que la résistance au shunt diminue mais fait surprenant plus la résistance augmente plus il y a atténuation des vibrations shunt parallèle R-L. Toutefois le hic est que lorsque la résistance du shunt s'approche asymptotiquement de l'infini dans la série R-L, il advient à ce moment-là que le courant ne passe pas. On sait d'ores et déjà que lorsque l'on a affaire à un shunt parallèle ouvert il n'y a pas de dissipation d'énergie. [37]

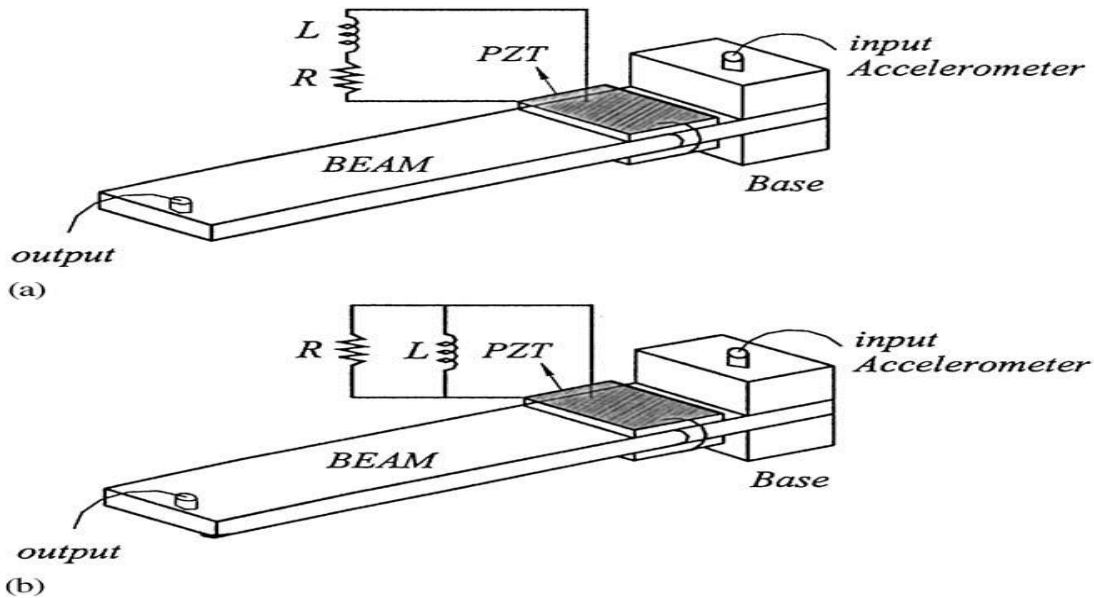


Figure II.3. Dessins schématiques du montage expérimental pour : (a) une série R – L et (b) un circuit shunt parallèle R – L. [37]

En (2014) **M. Luciano PEREIRA DA SILVA** a étudié une poutre encastree libre shuntée. Ladite poutre est dotée uniquement d'une pastille piézoélectrique, sa matière est en aluminium.

Cette la note que ce dispositif associant pastille et shunt a pour fin l'atténuation des vibrations relatives premières mode de flexion de la poutre. [38]

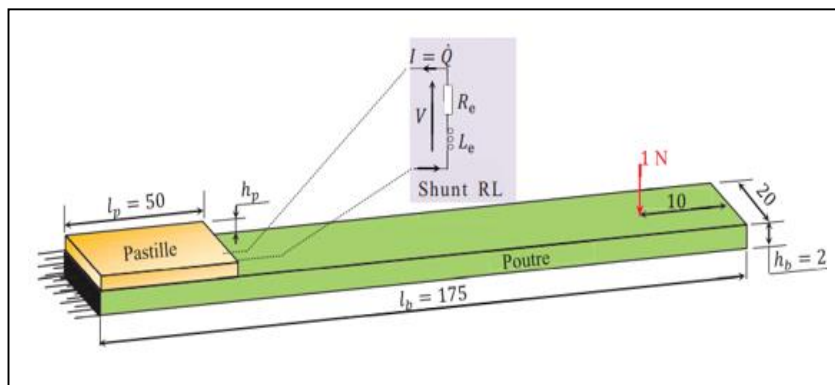


Figure II.4. Poutre munie d'une pastille piézoélectrique : géométrie et conditions aux limites (dimension en mm) [38]

En 2002, **Mutherjee et Joshi** proposent une méthode originale qui consiste à optimiser les structures piézoélectriques. Cette optimisation ne peut avoir lieu sans la minimisation de ce qu'on appelle le déplacement global. A noter que cette minimisation est basée sur le concept d'erreur résiduelle de déplacement.

Les résultats obtenus par le biais de Matlab montrent que la réduction significative des vibrations ne peut avoir lieu sans un ajustement qui puisse établir une harmonie avec la fréquence naturelle. Par ailleurs certains résultats ont bien montré que l'efficacité du contrôle est tributaire de l'emplacement où

se trouve le patch PZT mais aussi tributaire de l'ajustement du shunt, autrement l'accordement adéquat et précis dudit shunt. [39]

En 2008, le **journal de electroceram** publie études expérimentales menées dans le département de génie aérospatial de l'Université technique du Moyen-Orient sur les structures intelligentes, La structure en forme de poutre étudiée était constituée d'une bande d'aluminium (507 x 51 x 2 mm) similaire à une configuration en porte-à-faux avec huit spots piézoélectriques fixés à la surface (25 x 20 x 0,5 mm, type BM500).

Les études théoriques concernant la modélisation et la conception des structures intelligentes sont finalement effectuées par le biais de la méthode des éléments finis, méthode qui s'est avérée comme un véritable outil d'analyse des matériaux piézoélectriques d'autant plus que cette méthode offre une analyse complète à propos du couplage thermomécanique et électrique des structures. Les études que nous avons menées sur des vibrations in vacuo ont été facilitées par l'utilisation du software ANSYS.

Ils ont trouvé que l'influence du placement et de la taille des pastilles piézoélectriques ont inévitablement un impact sur les réponses de la poutre intelligente. Il nous a été donné d'observer qu'au fur et à mesure que les pastilles se rapprochent de l'extrémité serrée et que leur taille augmente, alors la réponse de la poutre intelligente augmente.

D'après le journal (Research in Engineering and Technology), les trois chercheurs Saurabh Kumar, Rajeev Srivastava, R.K.Srivastava, étudiés les déplacements portés sur une poutre encastré-libre divisée en trois éléments finis. Le temps de réponse de la structure n'est pris en compte qu'après avoir assuré la liaison entre le capteur et l'actionneur dans différents emplacements à savoir près de l'extrémité fixe, au milieu et à l'extrémité libre.

Cette étude corroborée par des diagrammes est utile à plus d'un titre, puisqu'elle porte sur le contrôle des vibrations de tous genres qui peuvent émaner de différentes structures telles que les machines modernes, les ouvrages d'art, les vaisseaux spatiaux, les ponts, les équipements maritimes, les machines-outils, les structures en haute mer (off-shore structures), les immeubles très élevés (high rise buildings). Toutefois, Il faut bien dire que dans cette présente étude, on s'est évertué à examiner le contrôle actif des vibrations qui se produisent au niveau d'une poutre cantilever sur laquelle sont collées deux pastilles piézoélectriques. Ce qui nous a permis d'observer, après un court laps de temps, une réponse primordiale, mais lorsqu'on a appliqué une force de contrôle assez suffisante on a pu alors constater une suppression progressive des vibrations. Après on a pu conclure que l'obtention des meilleures performances est due à la position de la paire de pastilles piézoélectriques et la meilleure position (c'est-à-dire la plus rentable est celle qui se trouve à l'extrémité fixe de la structure). [40]

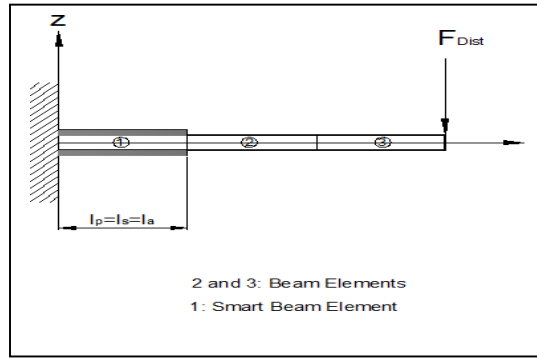


Figure II.5. Capteur / actionneur placé près de l'extrémité fixe de la poutre [40]

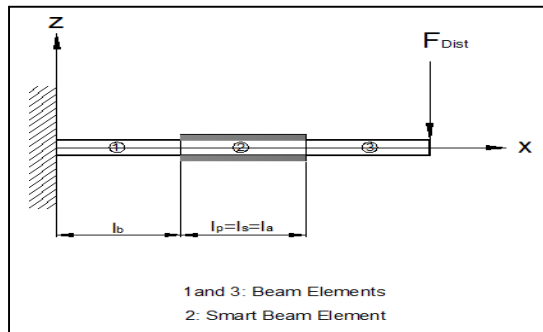


Figure II.6. Capteur / actionneur placé au milieu de la poutre [40]

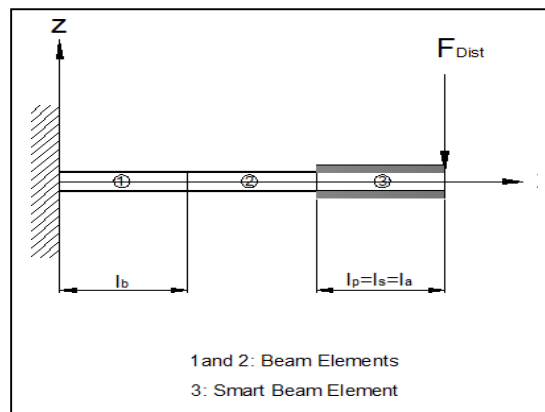


Figure II.7 : Capteur / actionneur placé à l'extrémité libre de la poutre [40]

III. Equation générale de couplage électromécanique :

L'idée de force ou de robustesse est le résultat d'appariement, de combinaisons heureuses et d'éventuels couplages qui aboutissent à des résultats fiables et très performants. Il en est de même du matériau piézoélectrique. Celui-ci ne peut atteindre un rendement optimum que s'il est configuré suivant un coefficient de couplage. Donc ces couplages ne se font pas de façon hasardeuse mais se font par l'entremise d'équations électromécaniques, équations qui nous aident réellement à mesurer l'impact de cette efficacité. Grosso modo, ces coefficients de couplage décrivent deux phénomènes, à savoir : la quantité d'énergie mécanique qu'un matériau est capable de transformer en champ électrique et inversement. Ces équations concernant les couplages ont fait l'objet d'étude exhaustive pour aboutir

finalement aux propositions suivantes et en supposant que les forces mécaniques et électriques soient équilibrées à tout moment, la forme générale des équations piézoélectriques linéaires s'écrit :

$$\begin{aligned} D &= e^t S + \varepsilon E \\ T &= c S - e E \end{aligned} \quad (1)$$

Où,

- D: vecteur de déplacement électrique (charge par unité de surface),
- T: vecteur de stress,
- S: vecteur de déformation,
- E: vecteur du champ électrique,
- e: matrice de constante piézoélectrique,
- ε : matrice diélectrique à déformation constante
- c: matrice d'élasticité à champ électrique constant.

Pour ce qui des relations ayant trait aux champs mécaniques et électriques moyennant des dispositifs piézoélectriques, elles tiennent dans la paire de formule suivantes :

$$\begin{aligned} S &= L u \\ E &= -\nabla \phi \end{aligned} \quad (2)$$

Nous disposons d'un opérateur différentiel reliant le vecteur de déformation au déplacement vecteur u, et ϕ est le potentiel électrique.

Pour dériver l'équation dynamique du système, une fonction énergétique Π est définie comme suit :

$$\Pi = \int_V P_b dV - \int_{S_1} u^t P_S dS - u^t P_c - \int_{S_2} \phi \sigma dS \quad (3)$$

Où H Sien la densité d'énergie définie comme :

$$H = 1/2 S^t c S - 1/2 E^t \varepsilon E - S^t e E \quad (4)$$

P_b et P_S sont les vecteurs respectifs des forces du corps et de la surface appliquées au volume V et surface S1, P_c est le vecteur des forces concentrées et σ est la charge de surface à la surface S2.

Par l'utilisation de principe de Hamilton qui consiste à s'appuyer sur les approximations via les éléments finis, on peut obtenir les équations dynamiques d'éléments finis du support piézoélectrique.

Le principe de Hamilton est formulé comme suit :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - \Pi) dt = 0 \quad (5)$$

Où l'énergie cinétique T peut être transcrite de la façon suivante

$$T = 1/2 \int_v \rho \mathbf{u}^T \mathbf{u} dV \quad (6)$$

Où ρ est la masse volumique, \mathbf{u} est le vecteur vitesse. En utilisant l'équation (6), l'équation (5) peut être réécrite comme suit :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \Pi dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} T dt = - \int_{t_1}^{t_2} \int_v \rho \delta \mathbf{u}^T \ddot{\mathbf{u}} dV \quad (7)$$

Lors de l'utilisation de l'intégration par pièces avec des conditions aux limites appropriées pour l'énergie densité H , on peut montrer que :

$$\delta H = \delta \mathbf{S}^T \mathbf{T} - \delta \mathbf{E}^T \mathbf{D} \quad (8)$$

L'approximation par le truchement d'éléments finis, sous forme générale, pour le déplacement et le potentiel électrique est transcrite moyennant les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{el} &= \mathbf{N}_u \mathbf{u}_i \\ &= \mathbf{N}_\phi \phi_i \quad (9) \end{aligned}$$

Où \mathbf{u}_{el} et ϕ_{el} sont les vecteurs de déplacement et le potentiel électrique appartenant à l'élément fini. Dans l'équation (9), \mathbf{u}_i et ϕ_i indiquent le déplacement nodal et les vecteurs de potentiel électrique, et \mathbf{N}_u et \mathbf{N}_ϕ sont respectivement les matrices de fonction de forme pour le déplacement et les champs électriques. En conséquence, Eq. (2) peut être réécrit comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{el} &= [\mathbf{L} \mathbf{N}_u] \mathbf{u}_i = \mathbf{B}_u \mathbf{u}_i \\ &= - [\nabla \mathbf{N}_\phi] \phi_i = -\mathbf{B}_\phi \phi_i \quad (10) \end{aligned}$$

L'utilisation de l'équation (10) avec Eq. (5) donne les équations dynamiques pour le dispositif piézoélectrique localisé au milieu après assemblage :

$$\mathbf{M}_{uu} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{uu} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{u\phi} \phi = \mathbf{F} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_{\phi u} \mathbf{u} - \mathbf{K}_{\phi\phi} \phi = \mathbf{G} \quad (12)$$

Où \mathbf{u} , ϕ , \mathbf{F} et \mathbf{G} sont respectivement le déplacement nodal global, le potentiel électrique, la force et vecteurs de charge appliqués. Les matrices et vecteurs de l'élément fini dans les équations (11) et (12), sont transcrits comme suit :

$$\begin{aligned}
[M_{uu}]_{el} &= \int_{V_{el}} \rho N_u^T N_u dV, [K_{u\phi}]_{el} = \int_{V_{el}} B_u^T e B_\phi dV, \\
[K_{uu}]_{el} &= \left[\int_{V_{el}} B_u^T c B_u dV \right], [K_{\phi\phi}]_{el} = \int_{V_{el}} B_\phi^T \varepsilon B_\phi dV \\
G_{el} &= - \int_{S_{2el}} N_\phi^T \sigma ds, F_{el} = \int_{V_{el}} N_u^T P_b dV + \int_{S_{1el}} N_u^T P_s ds + N_u^T P_c
\end{aligned} \quad (13)$$

Comme il n'y a pas de charge appliquée sur le capteur piézoélectrique, alors $G = 0$ pour la couche de capteur, la sortie du capteur peut être écrite depuis Eq. (12) comme :

$$\phi = k_{\phi\phi}^{-1} k_{\phi u} u \quad (14)$$

La relation entre la tension appliquée et la charge est donnée par :

$$G = C_P V \quad (15)$$

Où cP est la capacité du matériau piézoélectrique. Les équations de substitution (11.12) et (15) en Eq. (11) donnent l'équation pour la couche d'actionneur comme suit :

$$M_{uu} \ddot{u} + c_{uu} \dot{u} + [K_{uu} \quad K_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi\phi}] u = F + c_P K_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} V \quad (16)$$

Où c_{uu} est la matrice d'amortissement proportionnelle supposée être :

$$c_{uu} = \alpha M_{uu} + \beta K_{uu} \quad (17)$$

Où α et β sont les coefficients de Rayleigh.

Dans l'équation (16), la tension peut être utilisée comme tension de retour vers l'actionneur. L'entrée dans le contrôleur est considérée comme la dérivée temporelle de la sortie du capteur piézoélectrique (ϕ) et la sortie du contrôleur est renvoyée à l'actionneur piézoélectrique (V). Dans l'hypothèse d'une loi de retour négative pour le contrôleur et en utilisant Eq. (14), la tension de retour vers l'actionneur est obtenue comme suit :

$$V = -K\phi = -K k_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi u} u \quad (18)$$

Où la matrice de gain de rétroaction constante peut être déterminée pour différents types de contrôleurs.

La combinaison des équations (18) et (16) donne l'équation du mouvement pour un système en boucle.

$$M_{uu} \ddot{U} + [C_{uu} + C_p K_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi u}] \dot{U} + [K_{uu} + K_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi u}] U = f \quad (19)$$

Pour les méthodes de contrôle linéaires dans l'espace des états telles que LQR, LQG et H_∞ , l'équation du mouvement doit être écrite sous la forme d'un espace d'état. Pour convertir l'équation (III.16) sous forme d'espace à états, les vecteurs de force et de tension de réaction sont formulés ainsi :

$$F = D_f f$$

$$V = D_v v \quad (20)$$

Où D_f et D_v sont les matrices de position pour la force et la tension. Tandis que, Eq. (16) est exprimé sous forme d'un espace d'état :

$$\dot{z} = Az + Bv$$

$$y = Cz + Dv \quad (21)$$

Où A, B, C et d indiquent l'état, l'entrée de l'actionneur, la sortie du système et les matrices de transmission, Z qui définit les vecteurs d'état et de sortie système. L'état les matrices z et de vecteur A et B se trouvent sous la forme :

$$Z = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M_{uu}^{-1} K_{uu}^* & -M_{uu}^{-1} C_{uu} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_{uu}^{-1} C_p K_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi u} Dv \end{bmatrix} \quad (22)$$

Où I est la matrice d'identité, et K_{uu}^* est défini comme :

$$K_{uu}^* = k_{uu} + k_{u\phi} k_{\phi\phi}^{-1} k_{\phi u} \quad (23)$$

Les lois LQR et LQG peuvent être appliquées à l'équation (21) pour trouver le gain optimal matrice K. Un contrôleur PID peut également être conçu en utilisant soit Eq. (16) ou (21). [41]

IV. Conclusion

Il n'est pas exagéré de dire que le concept de couplage est la pierre angulaire relative au rendement optimum. Avant l'avènement dudit couplage, on se contentait de simples palliatifs et on évinçait l'idée de combinaison et de couplage qui pourtant peuvent décupler les performances des dispositifs piézoélectriques. Mais finalement, grâce aux diverses contributions de chercheurs mais grâce aussi à leur audace, l'idée de couplage a fini par s'imposer. Le concept de dérivation (shunt) a aussi fait son apparition et est maintenant abondamment exploité. Oui abondamment exploité si bien qu'il est devenu un terme leitmotiv, car on s'en sert dans le domaine du génie civil pour résoudre les problèmes des vibrations et de leurs amortissements. Chemin faisant, on s'est mis à miniaturiser certaines pièces qui ont abouti, finalement, à ce qu'on appelle aujourd'hui les pastilles piézoélectriques. Ces pastilles se sont avérées très utiles, car peu encombrantes mais se dressait à l'horizon l'ardu problème des patchs et de leurs emplacements sur la structure. On s'est alors aperçu qu'une pastille localisée à l'extrémité de la poutre n'a pas le même impact que celle localisée au milieu de la poutre comme quoi la présence de matériau est en elle-même insuffisante ou pour mieux dire une condition nécessaire mais non suffisante, car d'autres paramètres doivent être pris en compte et cela veut dire qu'on doit traiter à la fois l'aspect hard et l'aspect soft (les calculs et la logique). Ajoutons à cela qu'on ne doit aucunement omettre de prendre en compte certains modes de comportements comme les modes de variations transitoires.

Bref, la frise chronologique qu'on a exposée plus haut montre le long et lent cheminement des chercheurs qui se sont heurtés à d'énigmatiques problèmes liés aux patchs piézoélectriques et à leurs ajustements, sauf que des solutions inattendues peuvent surgir au gré des soubresauts de la recherche qui peuvent galvaniser de plus belle le chercheur qui n'en demande pas moins

Chapitre III : simulation Numérique

I. Introduction

Vu l'importance du contrôle des vibrations des structures flexibles, ce chapitre présente une simulation numérique d'une poutre en aluminium attachée à un élément piézoélectrique. Dans le but d'étudier le comportement mécanique de ce dernier et l'importance d'un matériau électrique nous allons utiliser le logiciel ANSYS-15 pour analyser plusieurs conditions aux limites et différents matériaux piézoélectriques en changeant leur position.

II. Présentation d'ANSYS

La simulation est effectuée par le logiciel ANSYS-15 à l'aide du langage de conception paramétrique Ansys (APDL).

ANSYS est un programme d'analyse par éléments finis à usage général de puissantes capacités de pré-traitement et de post-traitement. Le programme peut être utilisé dans toutes les domaines de l'ingénierie : structurelle, mécanique, électrique, électromagnétique, électronique, biomédical, ...etc.

Il propose de nombreux types d'analyses telles que statique, modale, harmonique, transitoire, spectrale, flambement de valeurs propres et sous-structuration.

L'analyse peut être linéaire ou non linéaire. Le logiciel est organisé en plusieurs processeurs, Une analyse ANSYS typique implique l'utilisation de trois processeurs :

1. Pré-traitement (processeur PREP7), où l'utilisateur fournit des données telles que la géométrie, la propriété du matériau et les types d'éléments au programme ; maillage des éléments, crée des nœuds, applique des contraintes.
2. Solution (processeur SOLUTION), où l'utilisateur définit le type d'analyse et applique les charges et lance la solution par les éléments finis.
3. Post-traitement (processeurs POST1 ou POST26), où l'utilisateur examine les résultats de l'analyse à travers des affichages graphiques et des listes dans les tableaux.

ANSYS peut s'interfacer avec des nombreux logiciels de CAD tels que Solidworks, Pro/Engineering, IDEAS...etc., et importer et exporter de nombreux formats de fichier, tels que : IGES, SAT, et STL. [41]

III. Modélisation de la poutre encasturé-libre sans piézoélectrique

III.1 Définition de la géométrie

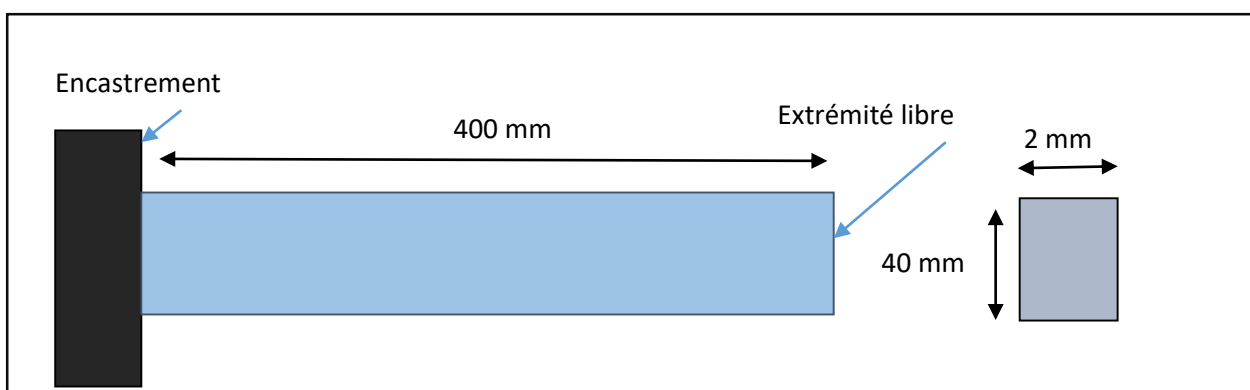


Figure III.1 : géométrie de la poutre étudiée

III.2. Définition des données caractérisant le modèle

Le tableau montre les propriétés mécaniques de la poutre considérée :

Tableau III.1 : Propriétés des matériaux de la poutre en aluminium. [34]

Matériau	Constante	Notation	Valeur
Aluminium	Module de Young	E	68e9 (N/m ²)
	Densité	ρ	2800 (kg/m ³)
	Coefficients de Poisson	ν	0.32

III.3. Choix d'élément

Dans cette simulation l'élément (SOLID186) a été utilisé pour la modélisation de la poutre en aluminium. C'est un élément solide 3-D d'ordre supérieur à 20 nœuds qui présente un comportement de déplacement quadratique. Cet élément est défini par 20 nœuds, ayant trois degrés de liberté par nœud dans les trois directions nodales x, y et z (Figure III.3). [42]

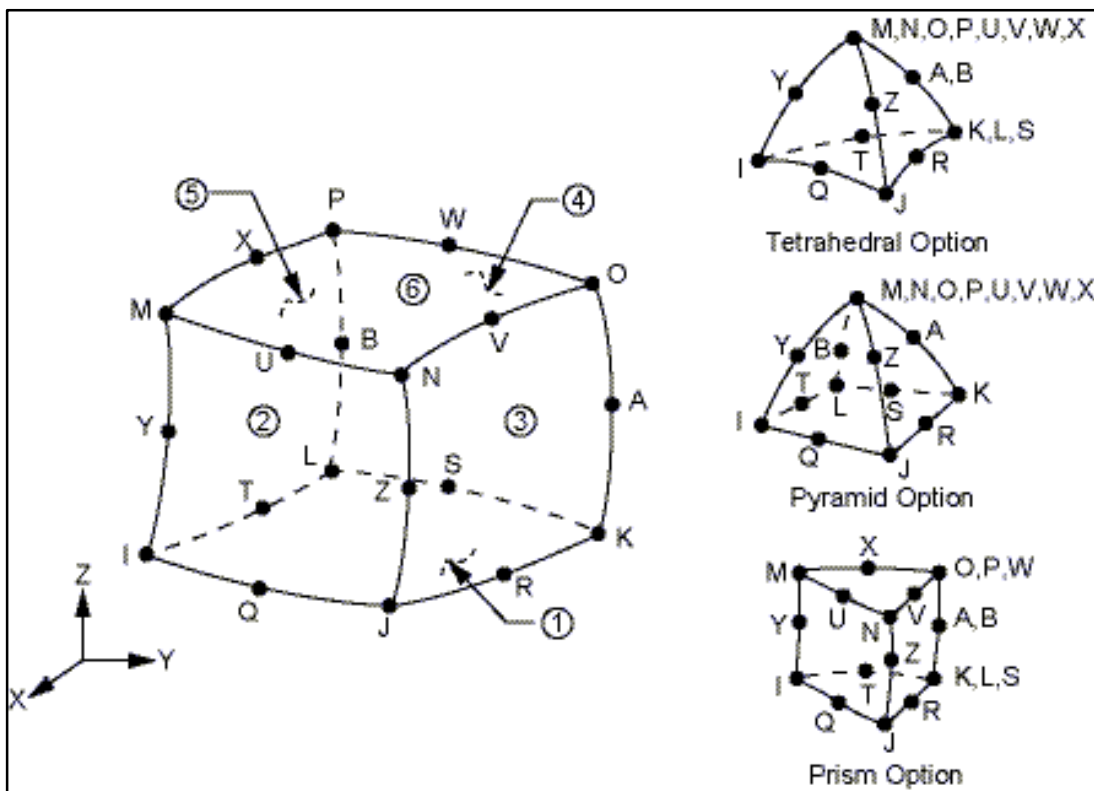


Figure III.2 : Géométrie SOLID186. [42]

III.4. Maillage

La poutre est maillée par 160 éléments (Figure III.3), chaque élément parallélépipède ($1 \times 1 \times 2$ cm), la structure possède 3 degrés de libertés mécaniques (u_x, u_y, u_z).

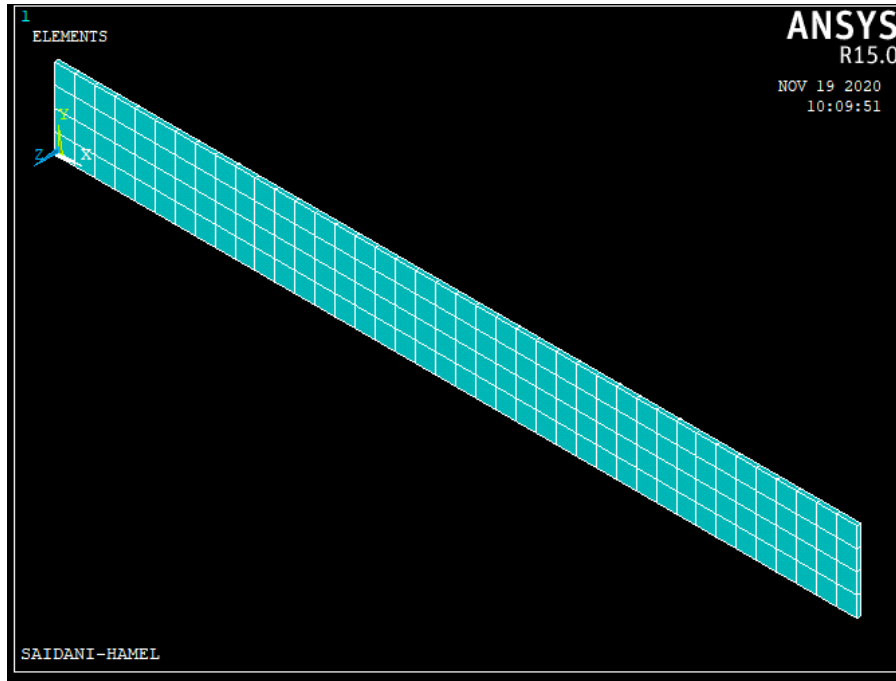


Figure III.3 : maillage de la poutre encastree-libre sans patch piézoélectrique

III.5. Condition aux limites et application de la force

La figure III.4 montre un encastrement d'une extrémité de la poutre et à l'autre extrémité, nous appliquons une force externe dans la direction z égale à 1N.

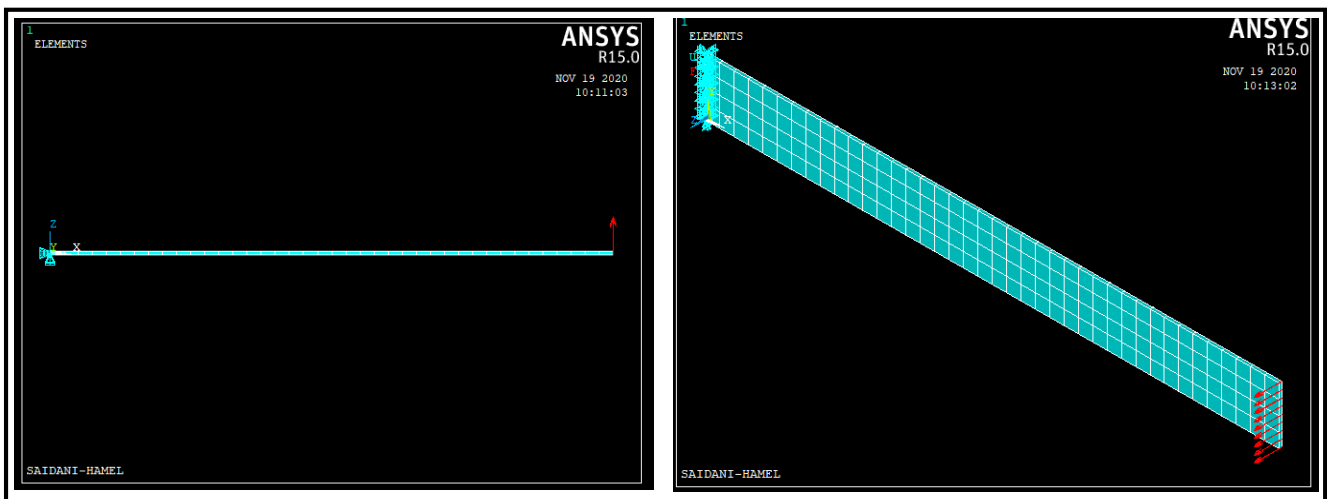


Figure III.4 : Application du chargement et conditions aux limites.

III.6. Analyse modale

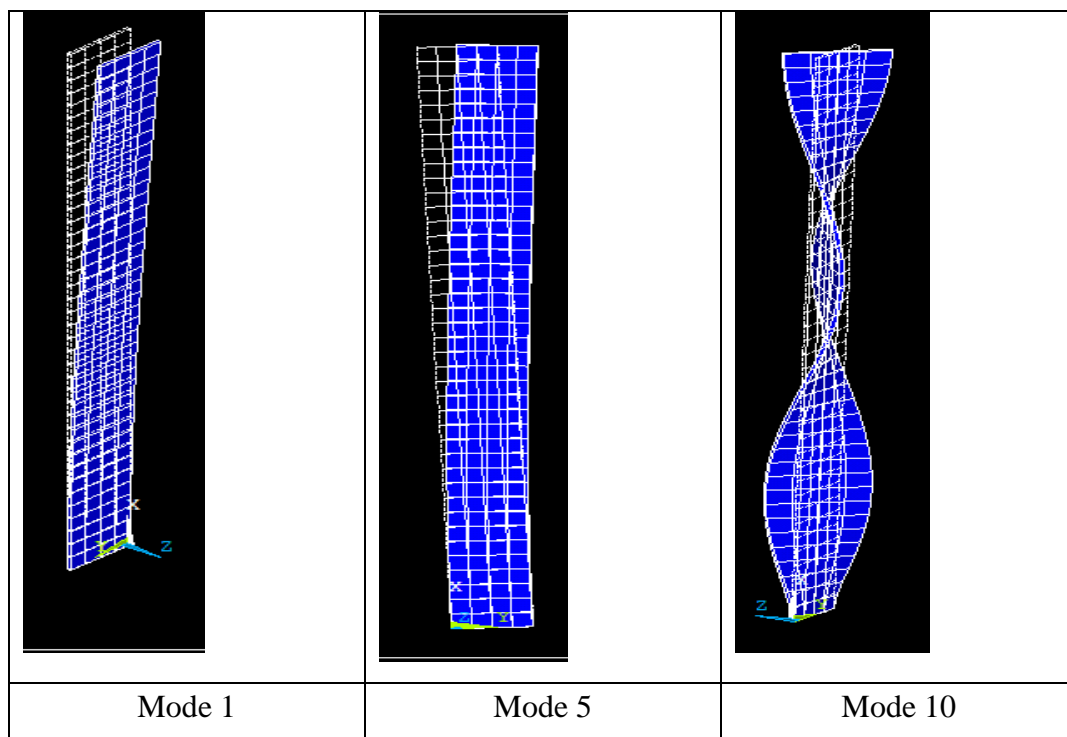
Le Tableau III.2 présente les fréquences qu'on a obtenues pour les dix premiers modes propres :

Tableau III.2 : les fréquences propres de la poutre sans éléments piézoélectriques

Mode	Fréquences (Hz)
1	10.0565
2	62.998
3	176.507
4	192.026
5	197.828
6	346.352
7	573.578
8	579.262
9	858.550
10	975.942

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Les modes fondamentaux



III.7. Détermination de l'amplitude de vibration

Nous avons effectué une analyse harmonique en appliquant une charge à l'extrémité libre d'intensité 1N et nous avons pris la première fréquence (10 Hz) qui donne des déplacements maximaux vis-à-vis des autres fréquences (Figure III.5). Ensuite, nous avons divisé cette fréquence en 10 pas qui varient de 1 à 10Hz. Le tableau III.4 présente les amplitudes de vibration trouvées.

Figure III.5 : Déplacement U_z en fonction de la fréquence

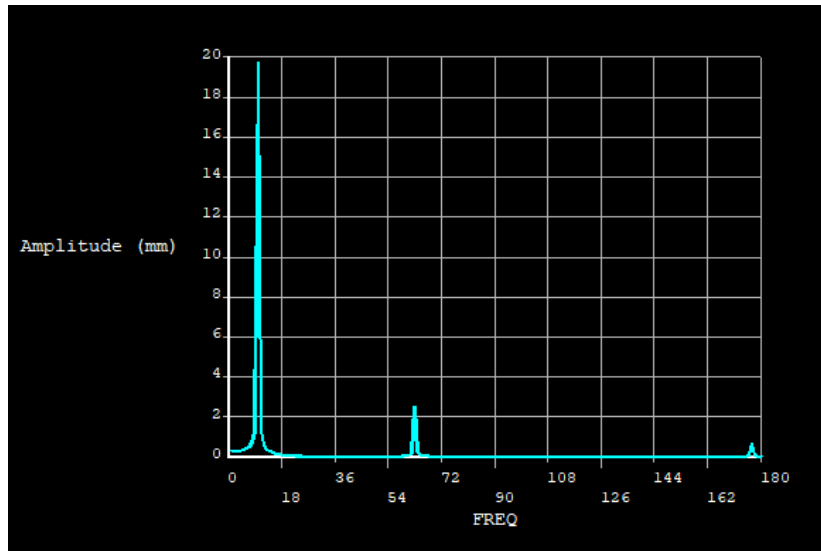


Tableau III.4 : Les amplitudes de vibration

Fréquences (Hz)	Amplitude (m)
1.9	0.275838
2.8	0.287998
3.7	0.306753
4.6	0.334687
5.5	0.376617
6.4	0.442272
7.3	0.554240
8.2	0.779136
9.1	1.43450
10.0	23.0667

IV. Modélisation de la poutre attachée à un patch piézoélectrique PZT-5H

IV.1. Choix d'élément piézoélectrique

Le patch piézoélectrique est modélisé à l'aide d'élément (SOLID 5). Cet élément a une capacité de champ magnétique, thermique, électrique, piézoélectrique et structural 3D avec un couplage limité entre les champs. L'élément a huit nœuds avec jusqu'à six degrés de liberté à chaque nœud (UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG) (Figure III.6). [42]

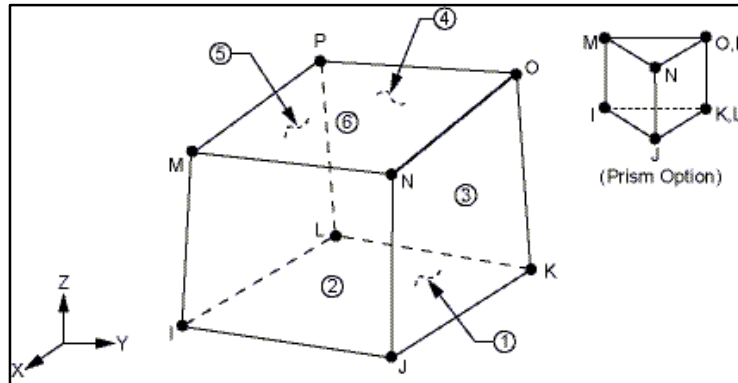


Figure III.6 : Géométrie SOLID5. [42]

IV.2. Propriétés mécaniques de piézoélectrique

Tableau III.5. Propriétés des matériaux piézoélectriques PZT-5H. [34]

Matériau	Constante	Notation	Valeur	
PZT-5H	Longueur	L	20 mm	
	Largeur	B	40 mm	
	Épaisseur	E	0.15 mm	
	Densité	ρ	7500 (kg/m ³)	
	Matrice de conformité			x 10 ⁻¹² (m ² /N)
	S ₁₁	16.5		
	S ₁₂	-4.78		
	S ₁₃	-8.45		
	S ₂₂	16.5		
	S ₂₃	-8.45		
	S ₃₃	20.7		
	S ₄₄	2.33		
	S ₅₅	43.5		
	S ₆₆	42.6		
	Matrice de déformation piézoélectrique			x 10 ⁻¹² (m/V)
	d ₁₃	-274		
	d ₂₃	-274		
	d ₃₃	593		
	d ₅₂	720		
	d ₆₁	720		
Permittivité à déformation			(F/m)	
x	1977.4			
y	1977.4			
z	2395.4			

IV.3 Application du patch piézoélectrique (1ere position)

Dans cette partie, nous avons rajouté un patch de dimensions $(20 \times 40 \times 1,5) \text{ mm}^3$ que nous avons collé vers l'extrémité encastrée comme c'est montré en figure III.7.

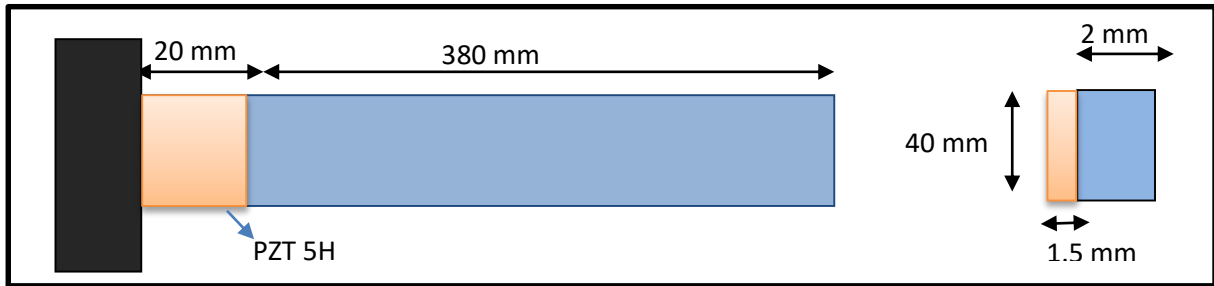


Figure III.7 : géométrie de la poutre intelligente (1ere position)

IV.3.1. Analyse modale

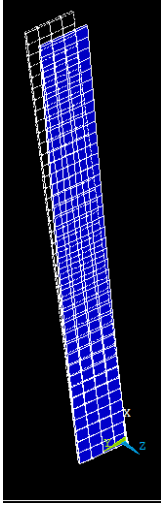
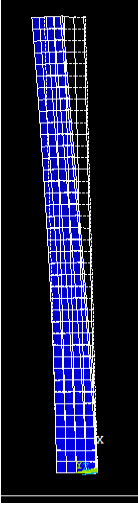
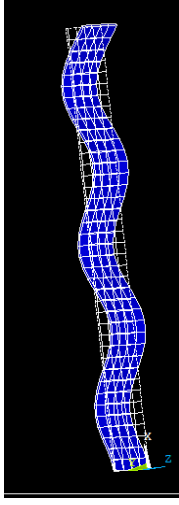
Le tableau III.6 présente les fréquences qu'on a obtenues pour les dix premiers modes propres :

Tableau III.6 : Fréquences propres de la poutre avec patch piézoélectrique

Mode	Fréquences (Hz) (25v et 50v)
1	10.140
2	63.316
3	176.922
4	194.881
5	196.732
6	346.304
7	572.213
8	588.461
9	854.768
10	991.084

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées du tableau III.7.

Tableau III.7 : Modes fondamentaux de la poutre avec patch à 25V et 50V

		
Mode 1	Mode 5	Mode 9

IV.3.2. Analyse harmonique

On applique une tension de 25V et 50V dans le sens de l'épaisseur du patch PZT, c'est-à-dire dans le sens z, les résultats sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Comparaison des amplitudes vis-à-vis du rajout du patch

Fréquences (Hz)	Amplitude (m)		
	Sans patch	Avec patch (25v)	Avec patch (50v)
1.9	0.275838	0.272039	0.271961
2.8	0.287998	0.283816	0.283734
3.7	0.306753	0.301945	0.301856
4.6	0.334687	0.328868	0.328771
5.5	0.376617	0.369102	0.368992
6.4	0.442272	0.431674	0.431543
7.3	0.554240	0.537210	0.537044
8.2	0.779136	0.744787	0.744551
9.1	1.43450	1.31821	1.31778
10.0	23.0667	9.30361	9.30054

À travers le tableau on remarque une diminution de l'amplitude de la vibration quand, on introduit le patch par rapport au cas sans patch piézoélectrique, et on remarque aussi une légère diminution de l'amplitude de la vibration si on augmente la tension.

IV.4. Application du patch piézoélectrique (2eme position)

On prend la même poutre et le même matériau piézoélectrique, mais on change la position du matériau piézoélectrique pour connaître l'effet de la position du patch sur les résultats.

La figure III.8 présente la nouvelle position du patch sur la face supérieure de la poutre. Celui-ci a été déplacé à 190 mm de l'extrémité encastree de la poutre. La figure III.9 présente le maillage adopté pour ce cas.

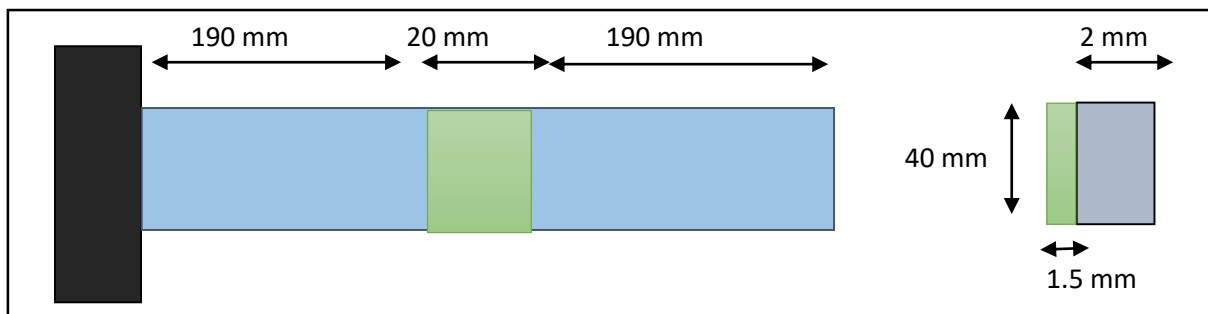


Figure III.8: géométrie de la poutre intelligente (2eme position)

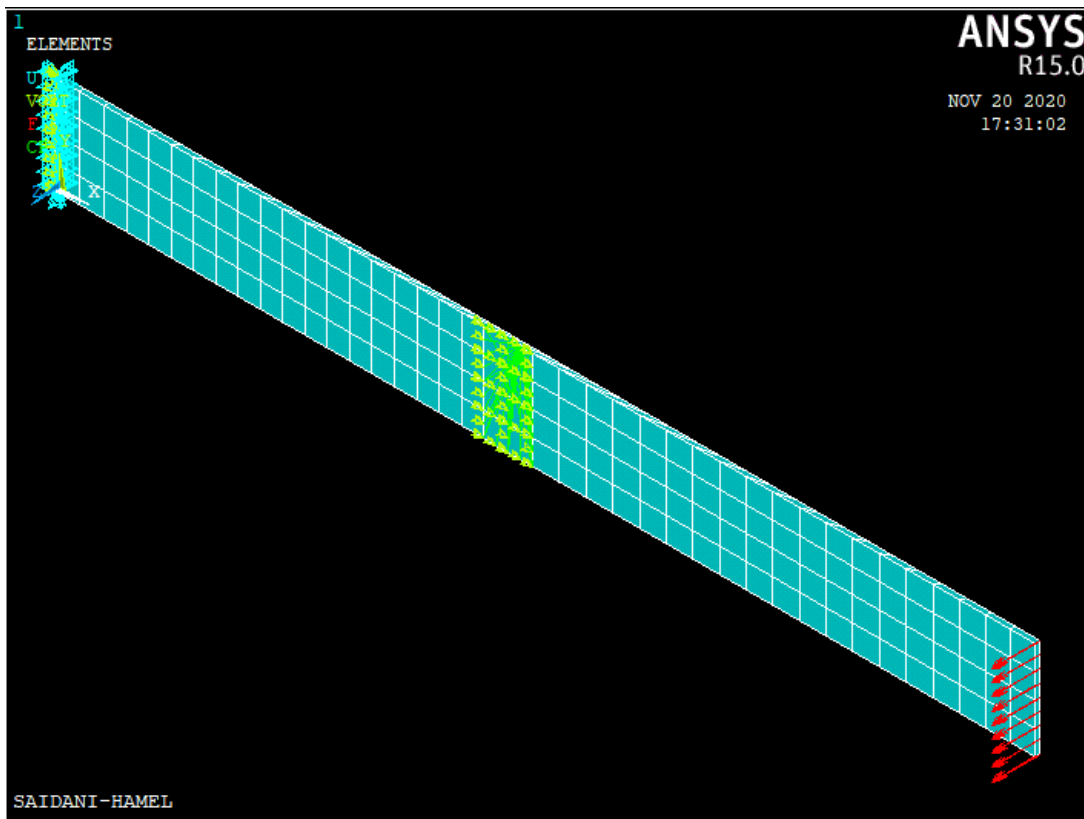


Figure III.9 : maillage de la poutre pour le second emplacement du patch piézoélectrique

IV.4.1. Analyse modale

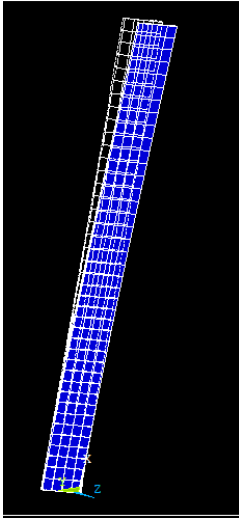
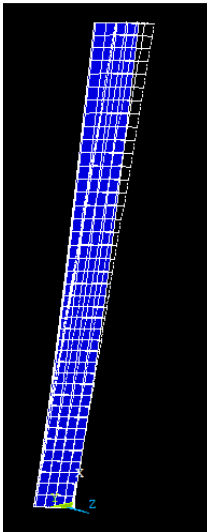
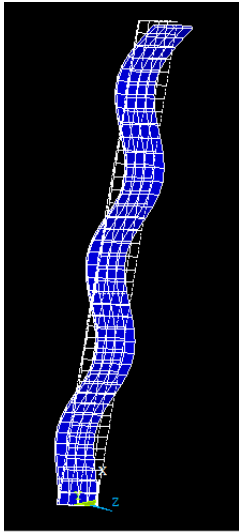
Le tableau III.9 présente les fréquences qu'on a obtenu pour les dix premiers modes propres. Les valeurs trouvées sont plus importantes vis-à-vis du cas précédent (1^{ère} position). Mais, il est à signaler que la 1^{ère} fréquence vaut toujours 10 Hz.

Tableau III.9 : Fréquences propres du cas de la 2^{ème} position du patch

Mode	Fréquences (Hz)
1	10.060
2	62.793
3	175.991
4	195.836
5	197.685
6	344.548
7	569.111
8	580.788
9	848.785
10	1008.462

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Modes fondamentaux de la poutre en présence de la seconde position du patch

		
Mode 1	Mode 5	Mode 9

IV.5. Application du patch piézoélectrique (3eme position)

Ce cas correspond à l'emplacement du patch à l'extrémité libre de la poutre (figure III.10). La figure III.11 présente le maillage de la poutre dans ce cas-là.

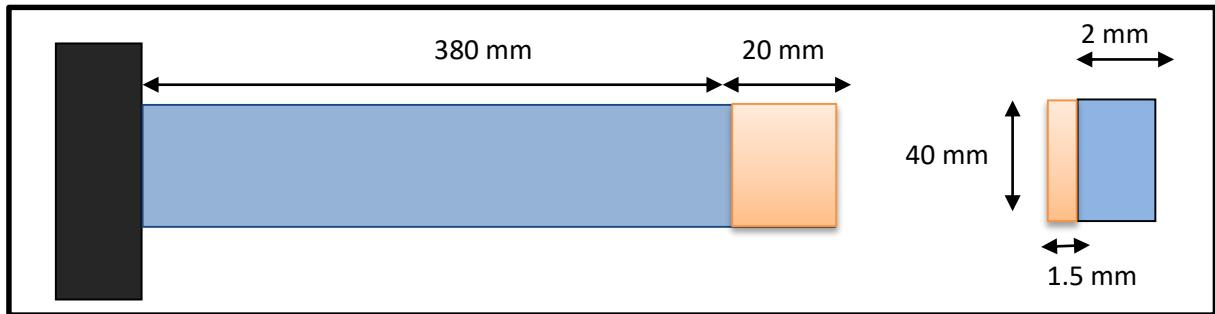


Figure III.10 : géométrie de la poutre intelligente (3eme position)

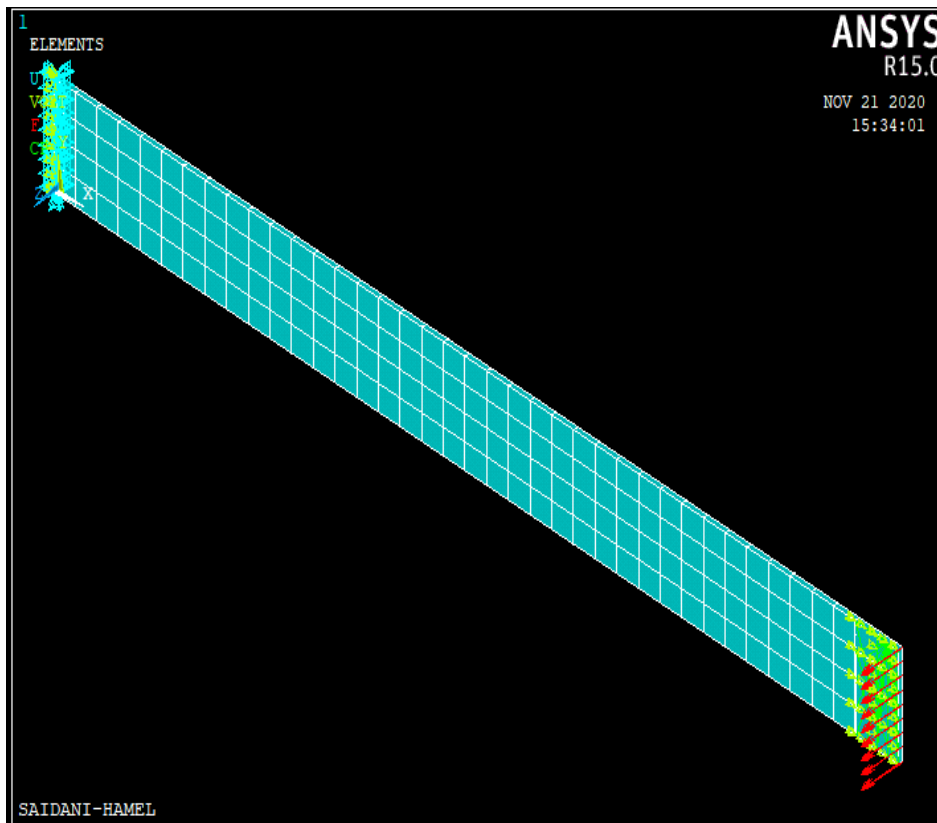


Figure III.11 : maillage de la poutre pour le 3^{ème} emplacement du patch piézoélectrique

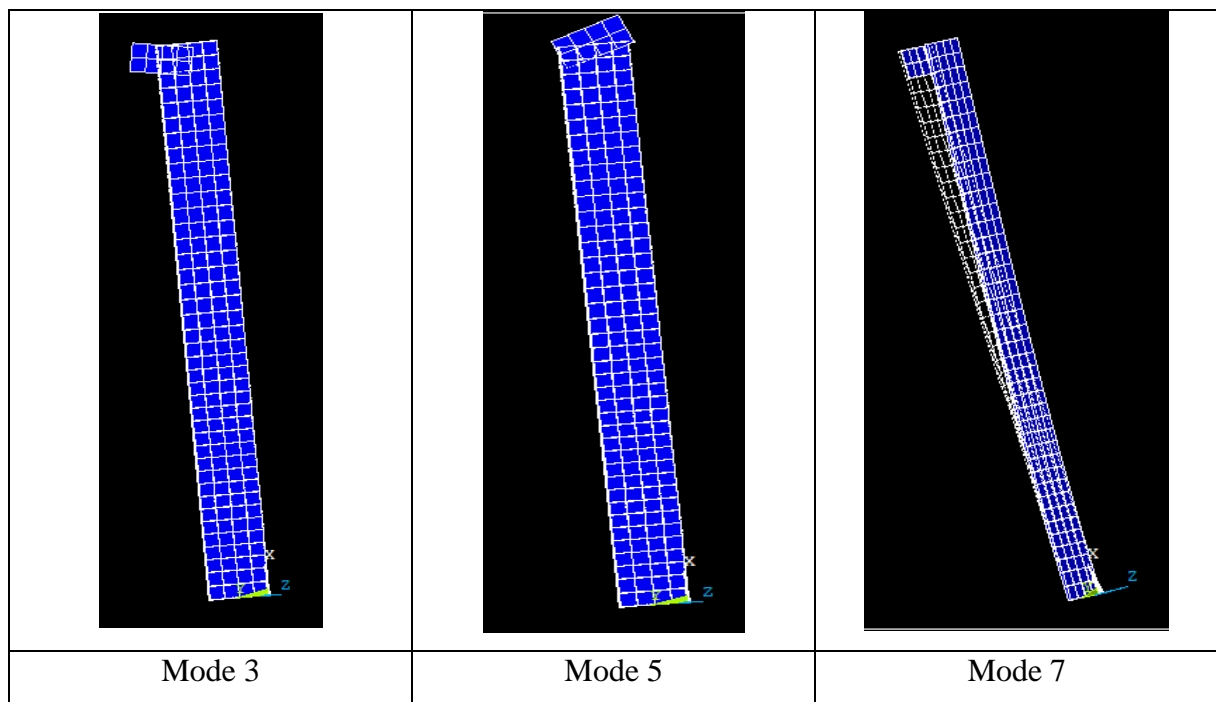
IV.5.1. Analyse modale

Tableau III.11 présente les fréquences qu'on a obtenu pour les dix premiers modes propres :

Tableau III.11 : les fréquences pour les dix premiers modes propres

Mode	Fréquences (Hz)
1	0
2	0
3	0
4	0.021
5	0.028
6	0.034
7	10.056
8	62.998
9	176.507
10	192.026

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées du tableau III.12.

Tableau III.12 : Modes fondamentaux de la poutre en présence de la 3^{ème} position du patch

Par la suite, nous récapitulons les différents résultats présentés précédemment. Nous comparons les amplitudes pour les 3 positions de patch utilisées.

Tableau III.13 : Récapitulatif des amplitudes sans et avec patch à 25 V

Fréquences (Hz)	Amplitude (m)			
	Sans patch	Avec patch (25v)		
		1 ^{ère} position	2 ^{ème} position	3 ^{ème} position
1.9	0.275838	0.272039	0.273953	0.275835
2.8	0.287998	0.283816	0.286014	0.287995
3.7	0.306753	0.301945	0.304614	0.306748
4.6	0.334687	0.328868	0.332314	0.334683
5.5	0.376617	0.369102	0.373884	0.376611
6.4	0.442272	0.431674	0.438951	0.442262
7.3	0.554240	0.537210	0.549861	0.554229
8.2	0.779136	0.744787	0.772382	0.779107
9.1	1.43450	1.31821	1.41904	1.43439
10.0	23.0667	9.30361	21.3678	23.0399

Grâce aux résultats indiqués dans le tableau (III.13), nous remarquons une diminution de l'amplitude de la vibration dans les trois positions du patch piézoélectrique par rapport à l'amplitude de la vibration sans piézoélectrique. Plus la fréquence augmente, plus la diminution devient importante.

On note également l'importance du positionnement du pizeo, dans la troisième position la diminution apparaît très faible. En revanche, la première position présente une bonne diminution de l'amplitude de la vibration, notamment pour les grandes fréquences (10 Hz).

V. Modélisation de la poutre doublement appuyée des deux côtés sans piézoélectrique

Dans cette partie, nous allons étudier le cas d'une poutre double A-double A. Les mêmes caractéristiques que précédemment sont utilisées. Nous présentons dans la figure III.14 la géométrie du cas d'étude.

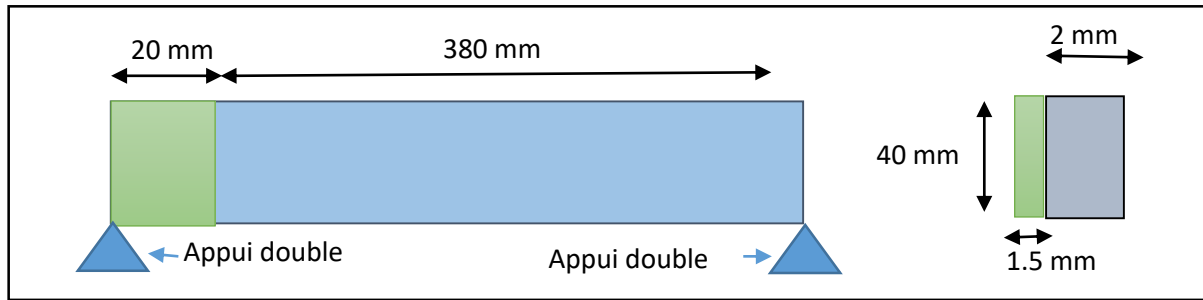


Figure III.12 : géométrie de la poutre intelligente double A-double A

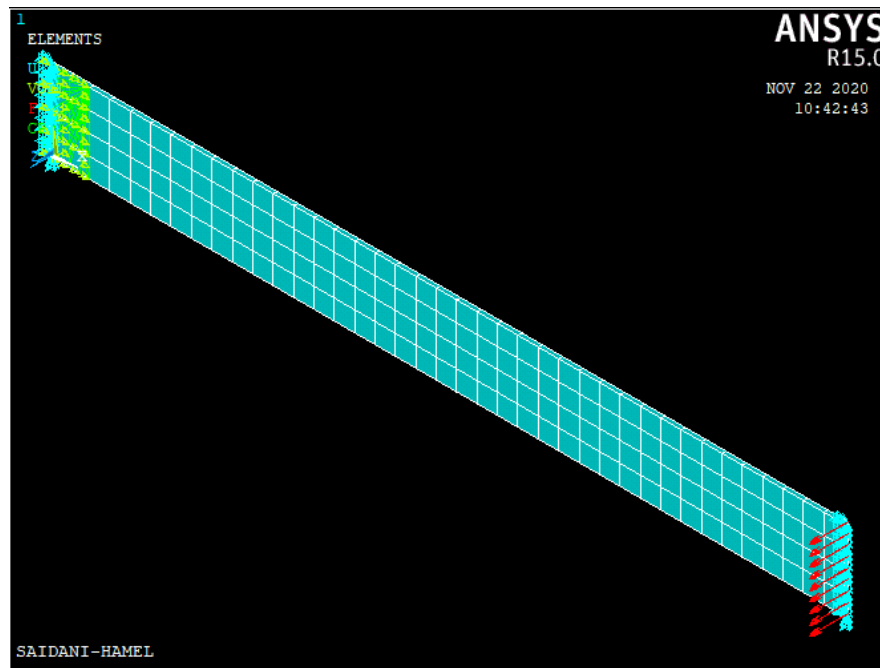


Figure III.13 : maillage de la poutre intelligente double A-double A

V.1. Analyse modale

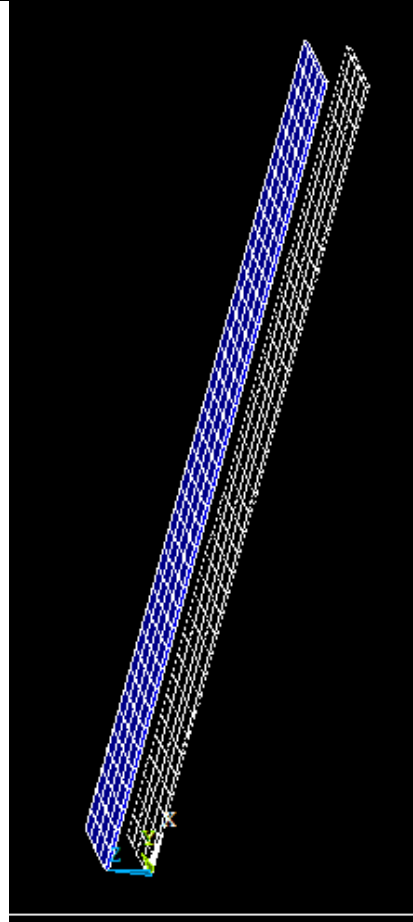
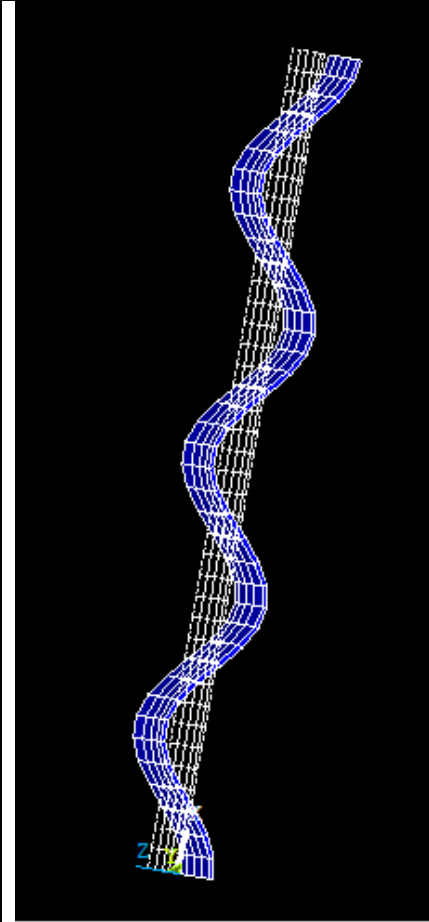
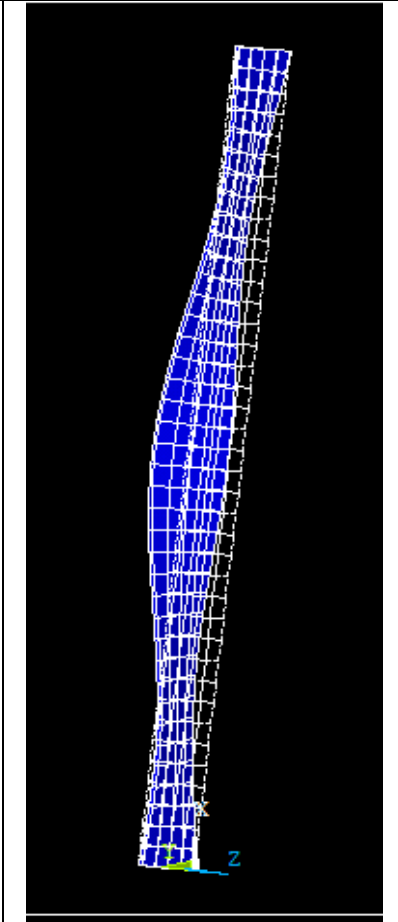
Le tableau III.16 présente les fréquences qu'on a obtenu pour les dix premiers modes propres dans le cas de la poutre double Appui-double Appui

Tableau III.14: les fréquences pour les dix premiers modes propres

Mode	Fréquences (Hz)
1	0.0083
2	28.129
3	112.683
4	253.988
5	397.433
6	452.442
7	708.434
8	801.337
9	1022.272
10	1198.536

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées dans le tableau III.17 :

Tableau III.15 : Modes fondamentaux de la poutre double A-double A

		
Mode 1	Mode 9	Mode 10

Le tableau III.18 présente la comparaison entre les 2 cas de poutres étudiées, encastree-libre, et doublement appuyée des deux extrémités. Nous remarquons que les valeurs varient en fonction des conditions d'appuis. Apparaît une amélioration dans les amplitudes quand, on rajoute le matériau piézoélectrique

Aussi, pour le 1er cas d'étude (poutre encastree-libre) l'amélioration de l'amplitude de vibration est intéressante principalement pour les deux dernières fréquences (9.1 Hz et 10.0 Hz), en effet on passe de 23.0667 Hz sans patch à 9.30361 Hz. Alors que pour les premières fréquences la diminution n'est pas importante. Le 2ème cas (appuyée-appuyée) affiche des améliorations minimales vis-à-vis du rajout du patch piézoélectrique.

Tableau III.16 : Comparaison des amplitudes par rapport aux conditions aux limites de la poutre

Fréquences (Hz)	Amplitude (m)			
	Encastrée - libre		Appui double- Appui double	
	Sans patch	Avec patch	Sans patch	Avec patch
1.9	0.275838	0.272039	1.783	1.765
2.8	0.287998	0.283816	0.811	0.8031
3.7	0.306753	0.301945	0.456	0.452
4.6	0.334687	0.328868	0.289	0.285
5.5	0.376617	0.369102	0.196	0.194
6.4	0.442272	0.431674	0.140	0.138
7.3	0.554240	0.537210	0.103	0.101
8.2	0.779136	0.744787	0.0774	0.076
9.1	1.43450	1.31821	0.0588	0.058
10.0	23.0667	9.30361	0.0449	0.044

VI. Modélisation de la poutre attachée à une pastille piézoélectrique PI-Céramique

Pour clarifier l'importance du choix d'un matériau piézoélectrique sur le comportement de la poutre, on étudiera la même première poutre mais en changeant le matériau piézoélectrique (PI-Céramique).

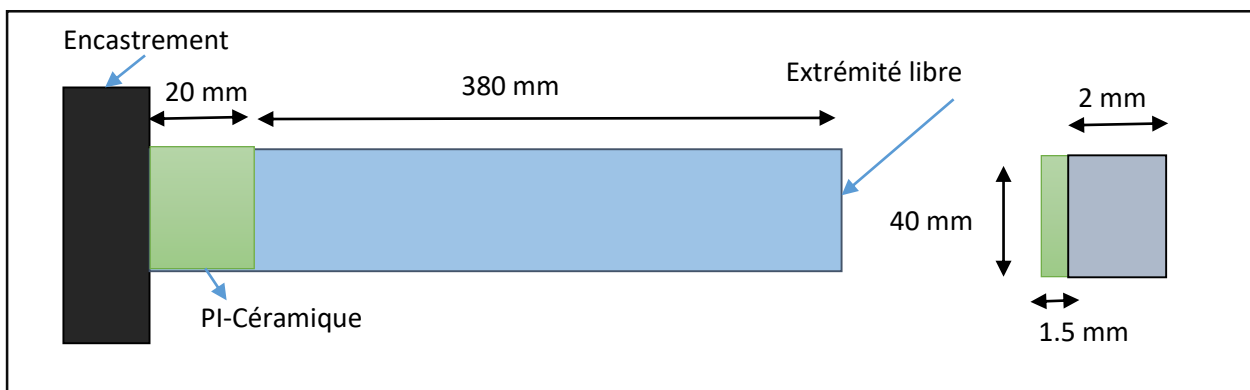


Figure III.14: géométrie de la poutre avec patch PI-Céramique

Les caractéristiques du matériau piézoélectrique utilisé sont représentées dans le tableau III.19.

Tableau III.17 : propriétés des matériaux piézoélectriques PI-Céramique. [43]

Matériau	Constante	Notation	Valeur
PI céramique, 2010	Densité	ρ	7500 (kg/m ³)
	FACTEUR DE PERTE DIÉLECTRIQUE	δ	0.02 x 10 ⁻¹² (m ² /N)
	Matrice de conformité		x 10 ⁻¹² (m ² /N)
	S11	15	
	S12	-4.5	
	S13	-5.7	
	S22	19	
	S23	-5.7	
	S33	19	
	S44	39	
	S55	39	
	S66	49.4	
	Matrice de déformation piézoélectrique		x 10 ⁻¹⁰ (m/V)
	d13	-2.1	
	d23	-2.1	
	d33	5	
	d52	5.8	
	d61	5.8	
	Permittivité à déformation		(F/m)
	x	1977.4	
	y	1977.4	
	z	2395.4	

VI.1. Analyse modale

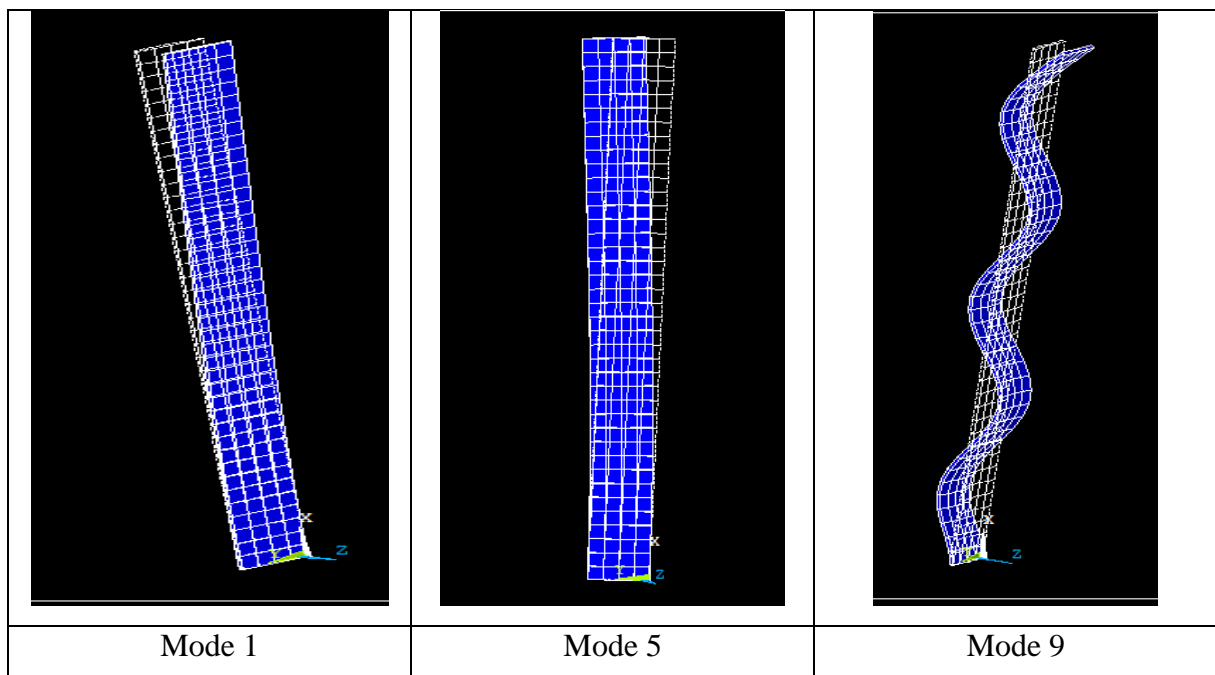
Tableau III.18 présente les fréquences qu'on a obtenu pour les dix premiers modes propres :

Tableau III.18 : les fréquences pour les dix premiers modes propres

Mode	Fréquences (Hz)
1	10.137
2	63.331
3	177.013
4	192.394
5	196.642
6	346.521
7	572.552
8	580.4711
9	855.1681
10	977.642

Les formes des modes fondamentaux de la vibration libre de la poutre sont montrées dans le tableau III. 19.

Tableau III.19 : Modes fondamentaux de la poutre encastree-libre avec PZT PI-Céramique



Le tableau III.20 présente la comparaison entre les deux matériaux utilisés comme matériaux piézoélectriques.

Tableau III.20 : Comparaison entre les deux matériaux piézoélectriques utilisés

Fréquences (Hz)	Amplitude (m)		
	Sant patch	Avec PZT-5H (25v)	Avec PI Céramique, 2010
1.9	0.275838	0.272039	0.272192
2.8	0.287998	0.283816	0.283983
3.7	0.306753	0.301945	0.302133
4.6	0.334687	0.328868	0.329092
5.5	0.376617	0.369102	0.369384
6.4	0.442272	0.431674	0.432059
7.3	0.554240	0.537210	0.537805
8.2	0.779136	0.744787	0.745925
9.1	1.43450	1.31821	1.32176
10.0	23.0667	9.30361	9.48181

À travers les résultats, on remarque une diminution de l'amplitude de la vibration de la poutre dans les deux cas de matériaux, mais l'utilisation du PZT 5H améliore légèrement mieux les amplitudes que le cas du PI Céramique.

VII. Conclusion

La vibration de la poutre peut être contrôlée par des PZT comme cela a été démontré dans ce chapitre. D'une part, le comportement d'une poutre dépend de ses conditions d'appuis. Et d'autre part, le changement du type et de position des patches piézoélectriques a un impact certain sur celle-ci. Également, plus la tension est élevée, plus la diminution de l'amplitude de vibration est favorable.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons tiré quelques points importants, qui constituent l'aboutissement des concepts établis, et qui ouvrent la voie aux futures recherches.

Au premier lieu, nous avons fait une recherche bibliographie sur le contrôle des structures, structures intelligentes et les matériaux intelligents

Ensuite, nous avons ciblé la recherche sur l'importance de l'effet piézoélectrique sur le comportement des poutres.

Après tout ça, nous avons étudiés une poutre avec un piézoélectrique pour obtenir l'amplitude de vibration selon le positionnement et les propriétés du piézoélectrique et les conditions aux limites

D'après nos résultats le changement des propriétés et des positions des patchs piézoélectriques joue un rôle important sur le comportement de la poutre et sur la diminution de l'amplitude des vibrations. D'autre part, le comportement de la poutre dépend des conditions au limite.

Références bibliographiques

- [1] **Yzan Mahmoud Al_Gasin, 2015** : improving seismic response of structures by semi active control ;
- [2] **Reteri Khadidja, 2013** : comportement dynamique des structures intelligentes : poteaux-poutre en tenant compte de l'effet de l'interaction sol-structure ;
- [3] **Emmanuel Gourdon, 2006** : control passif de vibration par pompage énergétique ;
- [4] **2Q. Wang & P. Teuffel, Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics. Vol. 12, No. 2 (2017) 235-245 © 2017 WIT Press, www.witpress.com ISSN: 1755-7437 (paper format), ISSN: 1755-7445 (online), http://www.witpress.com/journals DOI: 10.2495/DNE-V12-N2-235-245 ADAPTIVE STRUCTURES AND DESIGN CONCEPT OF TRANSFORMABLE JOINTS ;**
- [5] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-1903-2#editorsandaffiliations>;
- [6] **Presentation-PrMegnounif** :Contrôle dynamique et structures intelligent ;
- [7] **Hans Peter Monner & Peter Wierach** : German Aerospace Center (DLR), Institute of Composite Structures and Adaptive Systems ;
- [8] **Mohamed Lakhdar SAHLI, 2009** : MODELISATION ET CONTROLE DE SANTE DES MATERIAUX COMPOSITES HYBRIDES A PROPRIETES ADAPTABLES : MATERIAUX INTELLIGENTS, SOUS L'EFFET DES EFFORTS EXTERIEURS PRESENTEE Mohamed Lakhdar SAHLI
- [9] **Intervention de Joël de Rosnay** à la Conférence Université de tous les savoirs (CNAM), 4 Octobre 2000 (<https://www.carrefour-du-futur.com/conférences/les-matériaux-intelligents> ;
- [10] <https://www.olikrom.com/les-pigments-intelligents-une-evolution-societale/> ;
- [11] <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-materiaux-intelligents-55/page/2/> ;
- [12] <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/materiau-intelligent> ;
- [13] <http://www.nitifrance.com/v2/fr-definition+alliage+a+memoire+de+forme.html?PHPSESSID=5c9d1c978f50be9f32c8de02a2fbc153> + <https://www.wikiplanet.click/enciclopedia/ar/سببقة متذكرة للشكل> ;
- [14] https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/13740/mod_resource/content/0/CH2_fr_mai_2013/co/cours_ch2_3_2_fr.html ;
- [15] https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Fonctionnement_de_la_fibre_optique/1003540
- [16] <https://www.lemagit.fr/definition/Fibre-optique>;
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Schema-dune-fibre-optique_fig8_281184561
- [18] <https://www.blackbox.fr/fr-fr/page/28531/Information/Technique/black-box-explique/Cables-fibre-optique/fibre-multimode-ou-monomode-> ;
- [19] <https://www.filiere-3e.fr/2014/06/18/quelle-difference-fibre-optique-multimode-fibre-optique-monomode/> ;
- [20] https://www.researchgate.net/publication/229511759_Magnetostrictive_Materials ;

- [21] <https://www.wikiwand.com/fr/Piézoélectricité> ;
- [22] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-piezoelectricite-4807/> ;
- [23] **Djeffal Nouzha -Selatnia Naserin 2016**, Déformation électro élastique d'un corps solide anisotrope par la méthode des éléments finis ;
- [24] <https://slideplayer.fr/slide/12019830/> ;
- [25] **Boulila Mohamed, 2006** : modélisation d'une micro-antenne base de structure piézoélectrique ;
- [26] **Faiza boukazouha, 2016** : conception, réalisation, modélisation et caractérisation expérimentale d'un transformateur de tension de type rosen ;
- [27] **Faiza Boukazouha, 7-01-2016** : Conception, Réalisation, Modélisation et Caractérisation Expérimentale d'un Transformateur de Tension de Type Rosen
- [28] **Olivier THIERRY** : Réduction des vibrations de structures composites complexes par dispositifs piézoélectriques shuntés. Application aux aubes de turbomachines ;
- [29] **Julien Ducarne** : Modélisation et optimisation de dispositifs non-linéaires d'amortissement de structures par systèmes piézoélectriques commutés ;
- [30] <https://perso.crans.org/ducarne/partie2.pdf> ;
- [31] **Kaixiang Li , 26 Sep 2012** : Structural vibration damping with synchronized energy transfer between piezoelectric patches
- [32] https://www.researchgate.net/publication/316868403_Shunt_Damping_Vibration_Control_Technology_A_Review ;
- [33] **Bouhedma Sofiane** : Exemple de calcul d'une poutre piézoélectrique avec la méthode des éléments finis
- [34] **Shaikh Tauseef & R.K.Agrawal**: Active vibration controle of smart cantilever beam
- [35] **Bendine kouider** : Contribution à l'étude du contrôle actif de structures composites par incorporation des matériaux intelligents
- [36] **Mohamed Lakhdar Sahli** : modélisation et contrôle de sante des matériaux composites hybrides a propriétés adaptables : matériaux intelligents, sous l'effet des efforts extérieurs
- [37] **Journal of Sound and Vibration 268 (2003) 115–129**: Dynamics modelling of beams with shunted piezoelectric elements
- [38] **Luciano PEREIRA DA SILVA** : Atténuation du bruit et des vibrations de structures minces par dispositifs piézoélectriques passifs : modèles numériques d'ordre réduit et optimisation
- [39] www.journals.elsevier.com/composite-structures
- [40] **Le journal de electro Ceram**: Smart structures and their applications on active vibration control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU

[41] **Massoudi Mohammed**, Baghdadi Zine El Abidine, 2018 : Modélisation du comportement dynamique d'une poutre revêtue par pastilles piézoélectrique.

[42] Bibliothèque ansysapdl

[43] <https://www.youtube.com/watch?v=JEvVicDzY10&list=LL&index=7>