Thèse de l'Université de Lyon

ECOLE DOCTORALE

ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE ET AUTOMATIQUE DE LYON

DIPLOME DE DOCTORAT

Soutenue publiquement le 14 octobre 2015

par

Mateusz Piotr ZIELIŃSKI

Système distribué actif sans fil basse consommation pour l'amortissement des vibrations

Thèse dirigée par : Fabien Mieyeville, David Navarro et Olivier Bareille

JURY

Marise Bafleur (Présidente)	Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes
Laurent Latorre (Rapporteur)	Université Montpellier II
Imad Tawfiq (Rapporteur)	Ecole Supméca de Saint-Ouen
Emmanuel Foltete (Examinateur)	Ecole Nationale de Mécanique et des Microtechniques
Fabien Mieyeville (Examinateur)	Ecole Centrale de Lyon
David Navarro (Examinateur)	Ecole Centrale de Lyon
Olivier Bareille (Examinateur)	Ecole Centrale de Lyon

« La pensée est comme la flamme : elle ne se diminue pas en se communiquant. »

Edouard Herriot

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, M. Fabien Mieyeville, M. David Navarro et M. Olivier Bareille. Ils ont toujours été présents pour me porter une oreille attentive et ses esprits critiques m'ont poussé à approfondir mes recherches.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du Institut Nanotechnologies de Lyon (INL) et du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), permanents et doctorants, qui, soit par leur aide, soit par leur encouragement ou encore par leur amitié ont rendu mon travail plus agréable.

Je remercie enfin ma famille et mes amis pour leur support pendant toute la durée de ma thèse et particulièrement pendant la rédaction du manuscrit.

INTRODUCTION GENERALE 6

CHAPITRE I L'ETAT DE L'ART 9

1 Introduction aux réseaux de capteurs sans fil 10

1.1. Applications des réseaux 11
1.2. Architecture des réseaux 14
1.3. Architecture d'un nœud WSN 20
1.4. Présentations des matériels du nœud WSN 21
1.5. Autonomie des nœuds WSN 27
1.6. Récupération d'énergie 29

2 Introduction à l'amortissement des vibrations 33

2.1. Systèmes d'amortissement des vibrations dans les voitures 33
2.2. Classement des systèmes d'amortissement 35
2.3. Systèmes mécaniques 36
2.4. Systèmes électromécaniques 37
2.5. Comparaison de systèmes d'amortissement 39
2.6. Méthodes d'amortissements en utilisant un élément piézoélectrique 41

3 Positionnement de la problématique 48

3.1. Hypothèses 48
3.2. Grands lignes de la conception 49
3.3. Objectifs 50
3.4. Etapes 51

CHAPITRE II SYSTEME MECANIQUE EQUIPE DE PIEZOELECTRIQUES 53

1 Description du système mécanique 54

1.1. Présentation globale du système 54
1.2. Schéma de principe de manipulations 57

2 Résultats de simulations du système mécanique 59

2.1. Présentation du modèle implémenté 59
2.2. Modes de vibrations du système simulé 60
2.3. Simulations des éléments piézoélectriques 64

3 Résultats de mesure du système mécanique 66

3.1. Réponse du système mécanique 66
3.2. Tension générée par les éléments piézoélectriques 70
3.3. Comparaison des résultats de simulations et de mesures 72

4 Cahier de charges pour un système électronique 73

CHAPITRE III CONCEPTION ET REALISATION DU RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL POUR LE CONTROLE ACTIF DE VIBRATIONS 74

1 Introduction : un schéma synoptique du nœud sans fil proposé 75

2 Résultats d'études d'élément piézoélectrique 76
2.1. Circuit équivalent de l'élément piézoélectrique 76
2.2. Caractéristique d'élément piézoélectrique 78
2.3. Connexion d'un composant piézoélectrique avec le nœud WSN conçu 84

3 Introduction aux modules de nœud WSN 86
3.1. Module de mesure de vibrations 86
3.2. Module de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations 90
3.3. Module de gestion de périphériques 92
3.4. Module de communication sans fil 93

4 Prototypage du nœud WSN conçu 94
4.1. Intégration des modules dans un nœud complet 94
4.2. Résultats de simulations de nœud conçu 95
4.3. Mise en œuvre du nœud WSN complet 99
4.4. Comparaison des résultats de simulations et de mesures 106
4.5. Description du logiciel implémenté 106

5 Conclusion du chapitre 109

CHAPITRE IV VALIDATION DU SYSTEME INTEGRE 110

1 Configuration expérimentale 111

2 Validation du système de mesures de vibrations 112

3 Validation du système d'amortissement de vibrations 114
3.1. Effet local d'amortissement 114
3.2. Effet global d'amortissement 120
3.3. Chronogramme de la vitesse en amortissement de vibrations 122

4 Validation du système de récupération d'énergie 127
4.1. Mesures de la valeur d'énergie 127
4.2. L'influence du module de mesure de vibrations 131
4.3. Bilan d'énergétique du nœud 132

5 Conclusion du chapitre 136

CHAPITRE V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 138

1 Conclusions 139

2 Perspectives 140
2.1. Les objectifs à court terme 140
2.2. Les objectifs à long terme 140

BIBLIOGRAPHIE 142

ANNEXE I. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX UTILISES. 149

ANNEXE II. MODES DES VIBRATIONS DE LA STRUCTURE ET DE LA SUSPENSION. 150

LISTE DE FIGURES..... 151

LISTE DE TABLES 154

Introduction générale

Des nombreuses techniques d'amortissement de vibrations dans les applications automobiles se sont développées ces dernières années. Elles permettent d'améliorer la traction des véhicules et le confort des voyageurs. Des plus, les nouvelles solutions de systèmes actifs d'amortissement de vibrations permettent également de minimiser le poids de la structure mécanique. Cela peut conduire à la réduction de la consommation d'énergie des nouveaux véhicules. Un grand effort a été mis en place pour améliorer les méthodes et les solutions existantes. Ces systèmes sont, le plus souvent, centralisés, câblés et équipés d'une unité de calcul en temps réel.

Nous proposons dans cette thèse un système distribué d'amortissement de vibrations conçu et réalisé en utilisant le réseau de capteurs sans fil à basse consommation (WSN d'anglais : Wireless Sensor Network).

L'état de l'art présenté dans le chapitre I explique les principes des phénomènes utilisés. Nous introduisons les WSN, leurs architectures et le matériel utilisés. Nous nous concentrons sur la problématique de la durée de vie du nœud WSN. Ensuite, nous expliquons les méthodes utilisées pour prolonger la durée de la vie du nœud WSN, dont la récupération d'énergie. Ensuite nous présentons l'état des recherches actuelles sur les systèmes d'amortissement de vibrations utilisés dans les applications d'automobile. Nous montrons et comparons les différentes techniques d'amortissement de vibrations. Le chapitre I est conclut par la présentation de la conception du système proposé et les solutions choisies. Nous expliquons les grandes lignes de la conception et les objectifs de la thèse. Les étapes de travail sont aussi présentées.

Le chapitre II porte sur la construction expérimentale utilisée pour la vérification d'un système proposé. Nous utilisons un système mécanique de type plaque équipée des piézoélectriques. Cette structure mécanique avec le support et les fixations fournit un modèle simplifié de châssis d'une voiture. Au début nous effectuons les simulations pour valider la conception de la construction expérimentale. Une fois, les simulations effectuées, nous passons à l'étape de construction d'un système mécanique réel. Puis, nous faisons la validation d'un système réalisé par les mesures. Les résultats de simulations et de mesures donnent les exigences pour la partie électronique du système d'amortissement de vibrations distribué proposé.

Le chapitre III contient la description de la partie électronique du système, c'est-à-dire, la réalisation d'un réseau de capteurs sans fil basse consommation. Ce chapitre présente l'étude des éléments piézoélectriques installés sur la structure mécanique. Puis, nous présentons la conception d'un nœud du réseau. La conception est validée par les simulations. Après avoir validé le nœud WSN numériquement nous passons à l'étape du prototypage. Nous présentons le nœud prototypé, lequel est ensuite validé par les mesures. La comparaison des simulations et mesures permet la validation de la qualité de la conception et la réalisation d'un nœud WSN.

Ensuite, dans le chapitre IV, en utilisant le système mécanique expliqué dans le chapitre II et le réseau de capteurs sans fil présenté dans le chapitre III, nous vérifions le système ainsi intégré. Nous présentons l'efficacité du système réalisé. Nous validons les trois principales capacités : la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

Le chapitre V présente les conclusions de ce travail et les perspectives de recherche. Nous indiquons les objectifs à court terme qui contient principalement les modifications mineures du système réalisé. Les objectifs à long terme contiennent la description de la conception généralisée du système proposé afin d'atteindre l'objectif de la réduction des vibrations dans les automobiles.

Chapitre I

L’état de l’art

1 Introduction aux réseaux de capteurs sans fil

Aujourd'hui, grâce aux récents progrès des techniques sans fil, de nouveaux produits exploitant des réseaux de capteurs sans fil sont employés pour récupérer des données environnementales. Pour le magazine Technology Review du MIT [1], un réseau de capteurs sans fil est l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler. Il répond à l'émergence ces dernières décennies de l'offre et d'un besoin accru d'observation et de maîtrise des phénomènes physiques et biologiques dans différents domaines.

Actuellement, des réseaux de capteurs sans fil (de l'anglais WSN : Wireless Sensor Network) sont couramment utilisés dans de nombreuses applications pour les solutions industrielles et celles ressortissant du génie civil. Un réseau de capteurs est composé de nœuds WSN qui sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement. Ce dispersement aléatoire des capteurs nécessite que le protocole utilisé pour les réseaux de capteurs possède des algorithmes d'auto organisation. Comme ces réseaux sont plus vulnérables aux attaques que les réseaux filaires, les protocoles de communication déployée doivent donc fournir une sécurité appropriée.

Afin d'augmenter la sûreté des déploiements, les capteurs doivent être très robustes et de plus, ils doivent aussi pouvoir fonctionner dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d'utilisation. En plus des contraintes environnementales, une contrainte très importante est l'économie d'énergie pour les batteries. Un réseau permet de mesurer, de traiter des données et de réagir dans des circonstances prédéterminées. Les réseaux de capteurs sont utilisés pour surveiller les conditions physiques ou environnementales telles que la température, le bruit, la vibration, la pression, le mouvement, les polluants, etc.[2].

Cette section présente les WSN, leurs applications, architectures et matériels. Nous commencerons par présenter les applications et les configurations possibles. Puis, nous introduisons l'architecture des WSN et la comparaison des matériels des systèmes existant. L'autonomie du nœud WSN, les techniques pour prolonger leur durée de vie et les méthodes de la récupération d'énergie concluent cette section.

1.1. Applications des réseaux

La technologie actuelle des capteurs fournit une solution pour concevoir et développer de nombreux types d'applications de capteurs sans fil. Bien que les exemples suivants présentent seulement un extrait des applications possibles, ils sont suffisants pour montrer les grands principes et les caractéristiques communes d'applications des réseaux.

1.1.1. Contrôle de l'environnement

Les capteurs sans fil sont utilisés, entre autres, pour contrôler la qualité de l'air, détecter des pollutions, fuites de gaz ou de produits chimiques. Ils sont installés, par exemple, au-dessus d'un emplacement industriel ou dans la ville. Ces applications permettent de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution d'une catastrophe. Voici quelques exemples de mise en œuvre de ces types de réseaux.

La startup « HiKoB » propose des plateformes logicielles et matérielles composées de capteurs autonomes qui renseignent sur les caractéristiques d'une zone géographique donnée. Ces réseaux, gérés intégralement par une plateforme « Cloud », sont par exemple utilisés à Lyon en France pour renforcer les prévisions de météo vis-à-vis des risques de verglas en vue du salage des routes [3].

L'association « Airparif » assure le contrôle de la qualité de l'air respiré en région Ile-de-France à proximité des voies de trafic routier grâce à plus de 60 stations de mesure. Le contrôle très fréquent des appareils permet une bonne fiabilité malgré l'évolution constante des paramètres, notamment au niveau des particules (nature, taille et nombre), ce qui représente un des défis majeurs de l'activité [4].

1.1.2. Contrôle de structure mécanique

L'objectif principal réside dans le diagnostic des faiblesses d'un système observé comme par exemple l'identification et la localisation de déformations et de déplacements de vibration dans des matériaux ou des structures hétérogènes. Ce contrôle peut être utilisé pour des ponts, chemins de fer, routes de montagnes, bâtiments et autres ouvrages d'art. Les exemples de mise en œuvre de ces types de réseaux sont présentés ci-dessous.

L'entreprise National Instruments fournit un système WSN « NI CompactRIO », destiné à la maintenance préventive et le contrôle des machines industrielles [5].

Sukun Kim *et al.* [6] ont proposé un WSN de surveillance de l'état de structures mécaniques. Ce système a été conçu, implémenté, déployé et testé entre autres sur l'arche principale longue de 1275 mètres et la tour Sud du Golden Gate Bridge en Californie.

En domotique, I.F. Akyildiz *et al.* [7] montrent des WSN utilisés de la même manière pour la surveillance de maisons ou immeubles.

1.1.3. Applications métier

On pourrait imaginer devoir stocker des denrées nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température (par exemple dans les silos). Dans ces applications, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont dépassés.

Comme exemple d'un système pour la surveillance de processus ou de paramètres environnementaux, nous pouvons signaler l'entreprise Sefram Instruments & Systèmes avec son système « Datanet ». Ce système, basé sur un dispositif, permet l'acquisition de données en temps réel applicable jusqu'à 65000 unités. Dans un tel contexte, les capteurs mis en réseaux mesurent la température et l'humidité d'un environnement et exploitent le protocole Zigbee [8].

1.1.4. Surveillance des risques naturels

Un réseau autonome peut être créé en dispersant les nœuds WSN dans la nature, par exemple à partir d'hélicoptère. Des capteurs peuvent signaler des événements tels que feux de forêts, tempêtes ou inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.

Un réseau de capteurs sans fil a été installé et testé sur un volcan au Mexique. Les chercheurs de l'Université Harvard ont vérifié la possibilité de mesurer l'éruption en utilisant le réseau de capteurs sans fil [9].

L'autre exemple de détection d'événement sismique est un système proposé par D. Wang *et al.* [10]. Ce système est conçu pour le transport par chemin de fer,

dans le cas de détection de mouvement sismique le réseau envoie l'alerte aux trains roulant à grande vitesse.

1.1.5. Détection d'intrusions

En plaçant des capteurs, à différents points stratégiques, ceux-ci peuvent ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer (par exemple) sans avoir à recourir à de coûteux dispositifs de surveillance vidéo.

B. M.M. El-Basioni *et al.* [11] présentent un système complexe pour la maison intelligente : un réseau de capteurs sans fil proposé est utilisé pour contrôler l'accès et détection d'intrusion.

1.1.6. Agriculture de précision (precision farming)

Les réseaux peuvent être installés sur les terres agricoles. Les nœuds WSN peuvent ensuite vérifier l'état du champ (déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité). L'autre exemple est un réseau utilisé pour suivre les animaux lesquels sont équipés de capteurs pour connaître en tout temps, leur position.

Jaime Lloret *et al.* [12] ont développé un système de contrôle pour les vignobles. Un micro climat nécessaire pour le bon développement des plantes est contrôlé par les réseaux de capteurs sans fil distribué sur la totalité du vignoble.

S.S.O. Burgess *et al.* [13] proposent un exemple de surveillance d'écosystème forestier. Ce système de surveillance est bâti autour de deux composants : un système central de surveillance ou de contrôle, des nœuds WSN fixes installés en haut des arbres, lesquels envoient régulièrement des données capturées.

Le système pour suivre les animaux « ZebraNet » comprend les colliers de suivi portés par les animaux sauvages pour l'étude sur un grand territoire [14]. Grâce à ce système, les mouvements des animaux sont enregistrés.

1.1.7. Surveillance médicale

Les capteurs de réseaux, implanté sous la peau, fournissent des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h [15]. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.

« Code Bleu » est une plateforme développée pour le contrôle de la santé [15]. Les auteurs présentent plusieurs nœuds WSN fournissant les mesures de la fréquence cardiaque, de la saturation du sang en oxygène, des mouvements et d'activité musculaire.

1.2. Architecture des réseaux

Ce paragraphe porte sur les architectures des réseaux de capteurs sans fil. La première partie de ce chapitre montre les principes d'architecture des réseaux de capteurs sans fil. La deuxième partie se concentre sur la structuration de ces réseaux.

1.2.1. Architecture globale des réseaux

Un exemple d'architecture globale de réseaux de capteurs sans fil est représenté sur la Figure I.1. Comme un nœud WSN unique n'est pas un dispositif puissant, et ne peut pas couvrir une application complète, il est intéressant de considérer les potentialités d'un WSN. Ainsi, un WSN est composé d'un ensemble de nœuds capteurs. Chaque nœud WSN peut capter les données différentes en utilisant des capteurs spéciaux. Puis, chacun de ces nœuds WSN de capteur envoie les données à nœud WSN passerelle (gateway), par l'intermédiaire d'une architecture multi sauts (multi-hops). Ensuite, le nœud WSN passerelle transmet ces données à la tête de réseau où les données récupérées sont traitées pour être analysées et prendre des décisions. La structure et la construction des réseaux de capteurs sans fil sont variées ; elles dépendent de l'application du système réalisé par le WSN.

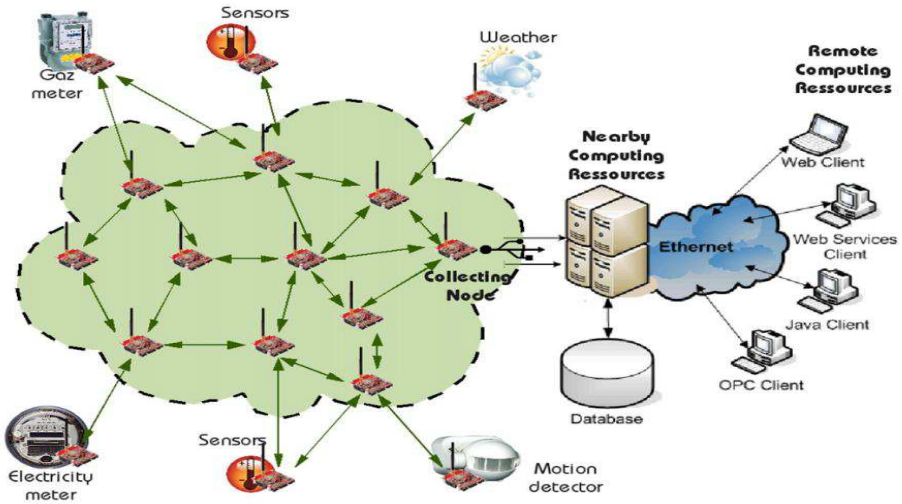


Figure I.1. La structure globale du réseau de capteur sans fil [18].

1.2.2. Communication dans les WSN

La communication dans tous les systèmes informatiques et électroniques est basée sur un modèle OSI (de l'anglais : Open Systems Interconnection). C'est un modèle de communications entre dispositifs proposé par l'ISO (de l'anglais : International Organization for Standardization) qui décrit les fonctionnalités nécessaires à la communication et à l'organisation de ces fonctions. Le modèle OSI décrit le chemin entre des logiciels dans des dispositifs différents à savoir un changement de type de données transitant entre les couches.

La Figure I.2 montre le modèle OSI complet et le modèle simplifié pour les WSN. Nous voyons que le modèle complet est composé de sept couches. Dans le modèle simplifié, les couches présentation, session et transport sont regroupées dans une seule couche dénommée soutien de l'application.

La première couche « physique » répond à la transmission des signaux sous forme binaire (elle spécifie tous les composants réseau nécessaires pour effectuer la transmission électrique, optique, avec ou sans fil). La deuxième couche du modèle simplifié est celle de la liaison de données (MAC Layer). La couche MAC Layer fournit l'adressage et des mécanismes de contrôle d'accès au canal, qui permet à plusieurs terminaux ou des nœuds de réseau de communiquer au sein d'un réseau d'accès multiple qui intègre un support partagé.

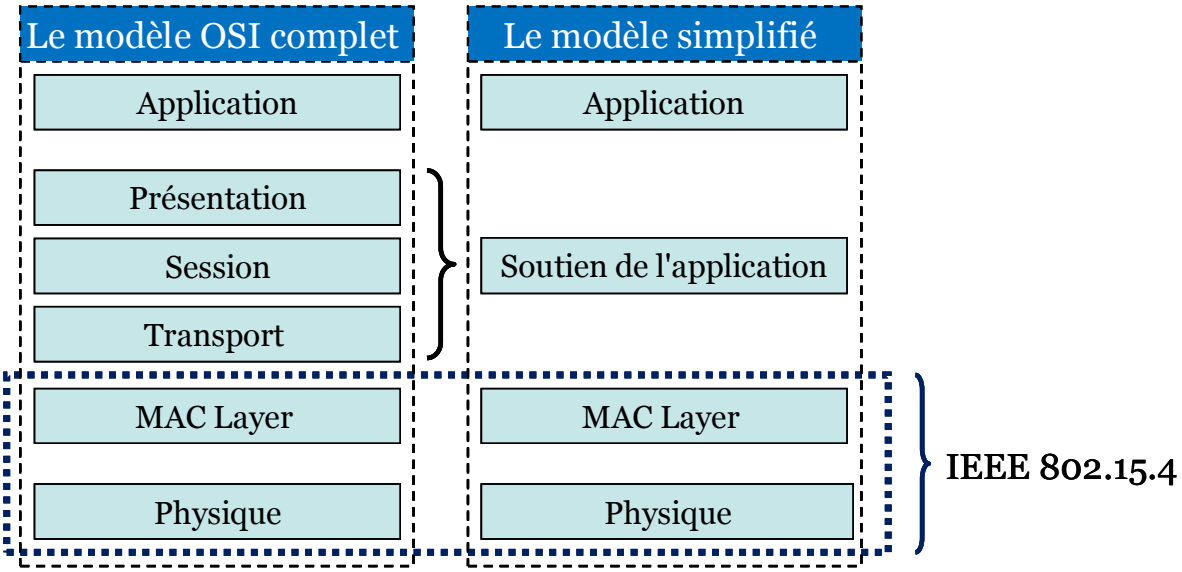


Figure I.2. La description du modèle OSI complet et celui simplifié pour les WSN.

La couche de liaison de données (MAC Layer) fournit aussi les moyens fonctionnels et procéduraux pour le transfert de données entre des entités d'un réseau et, dans certains cas, les moyens de détecter et potentiellement corriger les erreurs qui pourraient survenir au niveau de la couche physique. Les deux premières couches de modèle OSI sont décrites dans les normes IEEE 802. La couche « Soutien de l'application » gère les communications de proche en proche, généralement entre machines : routage et adressage des paquets (contrôlés par les protocoles de communication). La couche « application » est le point d'accès aux services réseaux (logiciel de l'utilisateur).

Un des soucis majeurs traités dans les communications sans fils informatiques est celui de la bande passante. Néanmoins, certaines applications comme en domotique, sécurité, agriculture, monitoring, etc. n'ont pas réellement de problème de bande passante mais plutôt un besoin de moindre coût et de basse consommation d'énergie, compte tenu du temps de réponse des dispositifs à mesurer. Toutefois, les standards existants ne sont pas appropriés à cause de leur complexité, leur coût élevé, et la consommation d'énergie induite.

Le désir d'unifier les techniques existantes a conduit à la création d'une alliance « ZigBee Alliance ». C'est une association d'industriels travaillant ensemble pour développer un standard global et ouvert pour les communications sans fils avec un coût réduit et une basse consommation de l'énergie. « ZigBee » est aussi un nom de protocole de haut niveau permettant la communication entre petits capteurs : il est dédié aux réseaux personnels sans fil à faible débit de données et à consommation réduite, basée sur la norme IEEE 802.15.4 [16].

La Figure I.3 montre la comparaison des standards différents en fonction des coûts, complexité et consommation d'énergie.

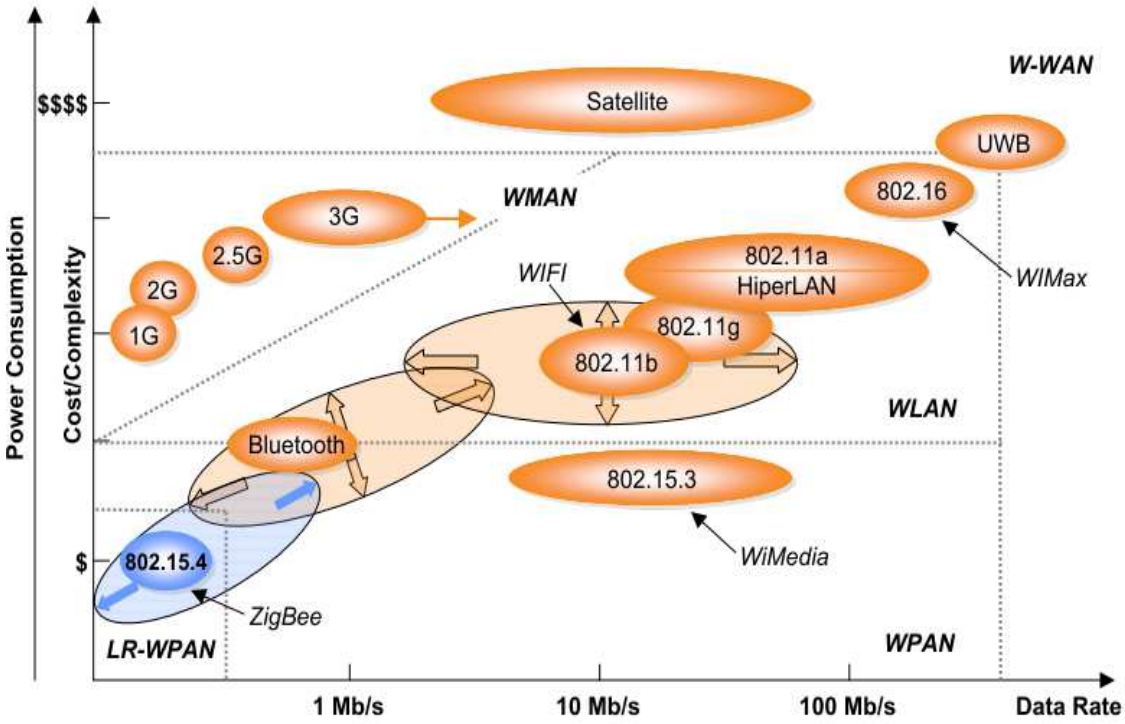


Figure I.3. La carte des standards en fonction de critères, débit de données, consommation d'énergie, coût et complexité [16].

La Table I.1 présente une comparaison détaillée de protocoles sélectionnés. Selon cette figure, nous pouvons bien identifier les avantages de la norme IEEE 802.15.4 dédié au WSN : un grand nombre de nœuds reliés entre eux, une autonomie significative et la petite taille de la mémoire requise.

Protocole	**Zigbee**	**Bluetooth**	**Wi – Fi**
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11 a/b/g
Besoins mémoire	4 – 32 Kb	250 Kb+	1 Mb +
Autonomie avec pile	Années	Jours	Heures
Nombre de nœuds	65000 +	7	32
Vitesse de transfert	250 Kb/s	1 Mb/s	11-54 et+ Mb/s
Portée	100 m	10 – 100 m	300 m

Table I.1. La comparaison détaillée de différents protocoles de la communication sans fil [19].

Voici d'autres caractéristiques de la norme IEEE 802.15.4 :

- les topologies en étoile, en maille,
- le protocole de négociation complet,
- l'usage des fréquences : 2,4 GHz, 915 MHz, 868 MHz,
- le CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance) – une méthode d'accès à un média.

De plus, la norme a défini deux types de dispositifs en fonction de leur application (ils sont largement utilisés dans le protocole de « Zigbee ») :

- FFD (Full Function Device) – le dispositif ayant toutes les fonctions possibles. Il peut assumer trois rôles dans un réseau : coordinateur PAN, routeur ou dispositif relié à un capteur (plus petite fonction possible).
- RFD (Reduced Function Device) – le diapositif ayant des fonctions limitées. Il est prévu pour des applications simples comme signaler l'état d'un capteur, contrôler l'activation d'un actionneur.

Pour créer un réseau composé d'au moins d'un FFD et de plusieurs RFD, ces fonctionnalités doivent utiliser le même canal physique parmi ceux définis selon la bande de fréquence choisie. Le FFD peut dialoguer avec des RFD et d'autres FFD, tandis que le RFD dialogue avec un FFD uniquement.

La Figure I.4 montre les différents modes supportés par la norme IEEE 802.15.4 en utilisant le mécanisme CSMA-CA pour contrôler l'accès au canal radio. Le mécanisme du CSMA-CA vérifie que le support est disponible avant de commencer l'envoi d'une trame. Il permet également de détecter ou bien d'éviter les collisions de messages dans le canal de transmission.

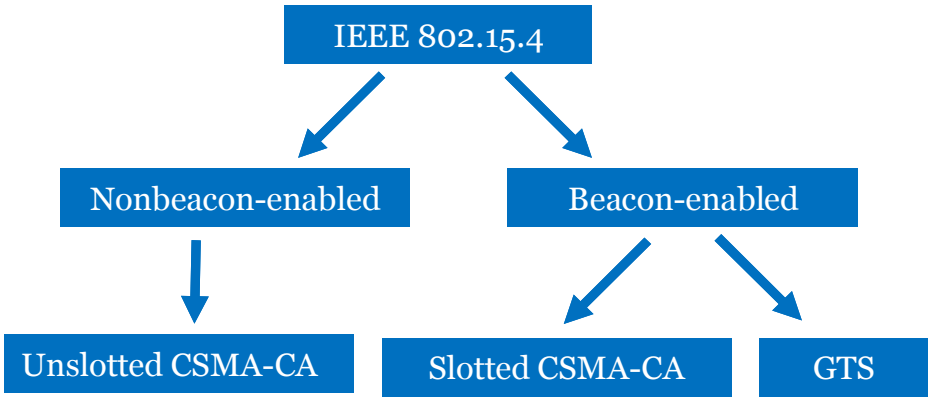


Figure I.4. Les différents modes supportés par la norme IEEE 802.15.4.

Selon cette division, nous voyons que deux modes sont disponibles :

- **« sans balise » (Nonbeacon-enabled)**

La méthode de réseau « sans balise » signifie que le coordinateur reste, par défaut, dans l'état d'attente de données. Le dispositif qui veut transmettre, vérifie si le canal est libre sinon il attend une période aléatoire (définie par la norme) avant de vérifier à nouveau. Lorsque le coordinateur veut transmettre à un nœud WSN, il attend que le nœud WSN rentre en contact. Ce mode est utilisé pour les capteurs qui

dorment la majorité du temps. Quand un évènement arrive, les capteurs se réveillent instantanément et envoient une trame d'alerte. Le problème de cette solution est que l'accès au canal n'est pas garanti (dépend de la densité du réseau) et des communications.

- **« avec balise » (Beacon-enabled).**

Le deuxième mode du réseau fonctionne avec « une balise » pour synchroniser les nœuds WSN avec le coordinateur. Dans le réseau IEEE 802.15.4, les dispositifs sont indépendants, mais pour communiquer sur le réseau, ils doivent connaître le moment pour se réveiller (la transmission des données). Il est nécessaire de se synchroniser par rapport au réveil du coordinateur. Une synchronisation périodique est réalisée grâce à la « superframe » (Figure I.5). Pour économiser l'énergie, les nœuds WSN recevront une indication à partir de quel moment le coordinateur rentre en hibernation. Ainsi, savent-ils quand ils peuvent rentrer en hibernation ou effectuer des transmissions et se réveiller avant la réception de la « superframe ».

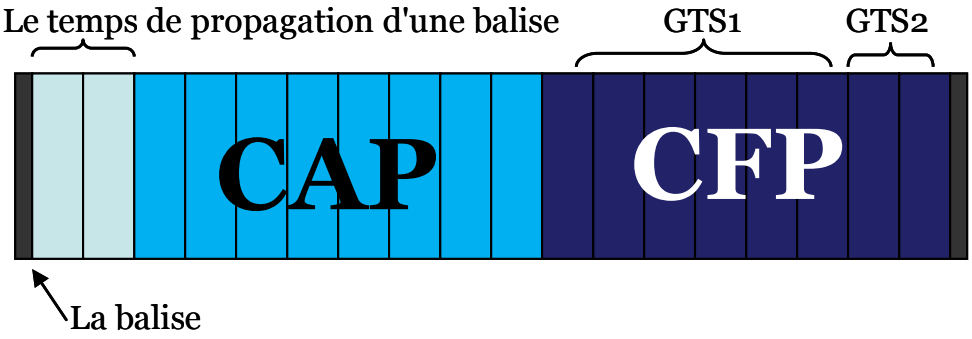


Figure I.5. La structure de la superframe IEEE 802.15.4.

La « superframe » est en fait la période d'activité du coordinateur qui couvre 16 slots de temps. Celle-ci se divise en deux parties :

- la CAP (Contention Access Period) similaire au mode sans balise : tous les dispositifs peuvent transmettre de façon aléatoire.
- la CFP (Contention Free Period) appelée GTS (Guaranteed Time Slot) permettant de garantir l'accès au canal à un dispositif pendant une durée déterminée.

Ils existent plusieurs méthodes pour la configuration des CAP et des CFP. Nous pouvons utiliser le réseau équipé soit le CAP, soit le CFP. Il existe aussi la possibilité du système mixte équipé des CAP et CFP.

1.3. Architecture d'un nœud WSN

Indépendamment de l'application du réseau, il faut définir une structure générale d'un nœud WSN (Figure I.6).

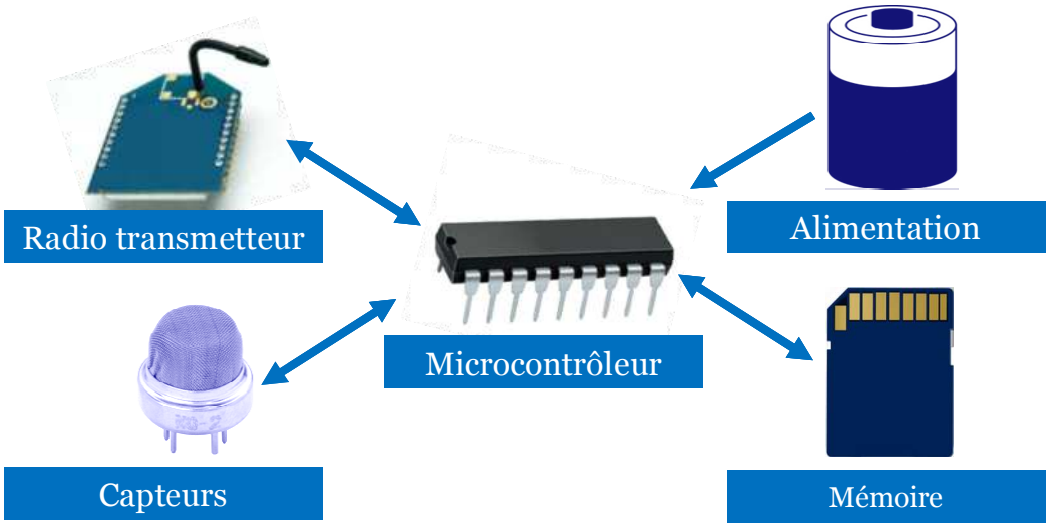


Figure I.6. La structure générale d'un nœud WSN.

Le nœud WSN contient :

- un capteur,
- un microcontrôleur,
- un système de communication sans fil,
- une unité d'alimentation,
- une mémoire externe, si l'application le nécessite.

Le régime de travail d'un nœud WSN est divisé en plusieurs intervalles de temps et est géré par un microcontrôleur qui commute entre les états de fonctionnement.

Le premier état de fonctionnement est la conversion des valeurs physiques en signaux électriques en utilisant les capteurs. Le deuxième état est le traitement des données (choix d'actions, sauvegarde des données dans la mémoire interne) et la conversion analogique-numérique. Ensuite, les données sont envoyées par un transmetteur radio. La plupart du temps, le nœud WSN est dans l'état d'économie d'énergie (sleeping mode). Souvent pendant cet état, l'énergie est récupérée à partir de sources renouvelables. Par ailleurs, les nœuds WSN sont alimentés depuis des

batteries, les unités d'alimentation doivent donc être équipées d'un système de contrôle d'énergie. L'objectif des concepteurs des nœuds WSN est la consommation d'énergie minimale [17].

1.4. Présentations des matériels du nœud WSN

L'architecture générale d'un nœud WSN présentée sur la Figure I.6 montre les différentes parties du nœud WSN. Nous allons expliquer les critères qui permettent la comparaison des nœuds WSN. Puis, sur la base de ceux-ci, la comparaison des dispositifs va être effectuée. La comparaison des matériels provient de plusieurs documents [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

1.4.1. Critères de comparaison

- **Capteurs**

Un capteur convertit des valeurs physiques en signaux électriques (des valeurs outil pour un système embarqué). Nous pouvons dire que la qualité d'un capteur est mesurée en fonction des paramètres : la résolution de la mesure et la linéarité de mesure (ils définissent la précision de mesure). Nous pouvons identifier aussi les autres critères, comme la facilite de mise en œuvre et la consommation d'énergie.

- **Microcontrôleurs**

Un microcontrôleur a le rôle d'enregistrer les données en mémoire locale, de les traiter et de les préparer pour la communication. La comparaison des microcontrôleurs peut être effectuée par le nombre de bits de bus de données de l'unité arithmétique logique. Les autres éléments utilisés pour classifier les microcontrôleurs sont la vitesse d'horloge, la taille de la mémoire interne et la consommation d'énergie. Un autre critère important pour les réseaux de capteurs sans fil est aussi l'existence d'un convertisseur analogique numérique intégré (convertisseur A/N).

- **Transmetteurs radio**

Un transmetteur radiofréquence fournit une communication bidirectionnelle entre les nœuds WSN. La comparaison entre les unités des communications sans fil peut être effectuée par des fréquences de communication, une distance maximale entre les modules, le débit de données maximal et la consommation d'énergie.

1.4.2. Comparaison des capteurs

Les nœuds WSN sont utilisés pour mesurer différentes valeurs physiques. Ainsi sont-ils équipés des capteurs de ces valeurs. Nous pouvons distinguer deux types de capteurs (en fonction du signal en sortie) : analogique et numérique. Le capteur analogique fournit en sortie le signal analogique correspondant à la valeur mesurée (souvent c'est une tension électrique). De leur côté, les capteurs numériques utilisent un protocole de la communication en série (par exemple : SPI, I2C, 1-wire) pour communiquer avec le microcontrôleur.

De plus, il est possible de distinguer les détecteurs de la valeur physique (nous mesurons la plage d'entrée) et les capteurs de l'état (ils indiquent si la condition est remplie).

En raison de la grande variété de capteurs disponibles, et leurs paramètres conditionnées souvent par les normes internationales (par exemple, pour les détecteurs de gaz : BS EN 50194-1:2009), nous allons présenter une simple comparaison de capteurs souvent utilisés dans les WSN (Table I.2).

Producteur	***Type***
Capteurs de lumière	
TAOS	*Ambient Light Sensor TSL2550 (numérique)*
TAOS	*TSL250R optical sensor (analogique)*
Capteurs de température	
Microchip	*TC74 Tiny Serial Digital Sensor*
Texas Instruments	*LM35 Precision Centrigrade*
Capteurs d'humidité	
D-Robotics UK	*DHT11 Humidity and Temperature Sensor*
Silicon Labs	*Si7006 family ; Humidity and Temperature*
Capteurs de pression	
Intersema	*MS5534a*
Intersema	*MS5534b*
Capteurs de gaz	
Airtest	*CO2 engine*
Figaro	*TGS4161*
Telaire	*6004A*

Table I.2. Les exemples des capteurs utilisés dans les WSN.

1.4.3. Comparaison des microcontrôleurs

La Figure I.7 montre la comparaison de la taille de bus de données des microcontrôleurs utilisés pour les nœuds WSN. La majorité de microcontrôleurs ont le bus de données de 8 bits. Les microcontrôleurs de 8 bits sont généralement en

mesure de satisfaire aux exigences simples des WSN (les faibles exigences de calcul et la basse consommation d'énergie).

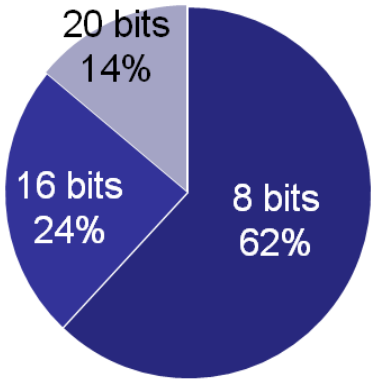


Figure I.7. La comparaison de la taille de bus de données des microcontrôleurs. Références de [18] à [28].

La fréquence d'horloge du microcontrôleur dans les nœuds WSN est variée. Elle dépend des exigences du système (par exemple : de la fréquence d'échantillonnage si un convertisseur interne du microcontrôleur est utilisé). Elle est aussi étroitement liée à la consommation d'énergie.

On peut montrer que la consommation d'énergie est une fonction de la fréquence d'horloge [29]. Dans certains systèmes, la fréquence du microprocesseur est une valeur variable (le nœud WSN permet de régler la fréquence de fonctionnement en fonction de tâches en cours pour minimaliser la consommation d'énergie [30]).

La Table I.3 donne le tableau de comparaison des microcontrôleurs. Les dispositifs présentés sont facilement disponibles sur le marché et sont largement utilisés dans les nœuds de WSN commercialisés.

	Bus de données	*Fréq.*	*Consommation d'énergie (1 MHz; 3 V)*		*Mémoire*	*ADC*
			Mode actif	*Mode veille*	*Flash/SRAM*	
PIC16LF88 Microchip	*8 bits*	*8 MHz*	*0,8 mW*	*0,9 µW*	*7KB/368B*	*10 bits*
AVR Atmega 128 Atmel	*8 bits*	*8 MHz, 16 MHz*	*2,1 mW*	*3,96 µW*	*128KB/4KB*	*10 bits*
MSP430 Texas Instruments	*16 bits*	*1 MHz*	*0,99 mW*	*0,33 µW*	*16KB/512B*	*24 bits*

Table I.3. Comparaison des microcontrôleurs utilisés dans les WSN.

Les nœuds WSN présentés dans les références permettent de comparer aussi la résolution des convertisseurs A/N (Figure I.8). La résolution de la mesure doit répondre aux exigences du système. Cependant, dans les WSN, pour cause de consommation d'énergie, les convertisseurs internes du microcontrôleur sont souvent utilisés.

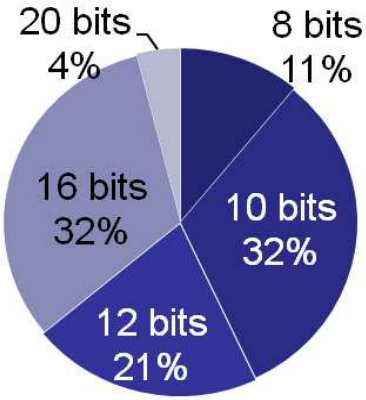


Figure I.8. La répartition des résolutions des convertisseurs A/N. Références de [18] à [28].

La fréquence d'échantillonnage dans les systèmes dépend principalement de celle du signal mesuré. Rappelons le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon : « la fréquence d'échantillonnage doit être deux fois plus grande que la fréquence du signal mesuré ». Par conséquent, le nombre de canaux d'un convertisseur détermine le nombre des signaux à mesurer.

Les autres paramètres importants des convertisseurs A/N sont la plage d'entrée du convertisseur ADC et le temps de conversion. Nous introduisons ces critères en donnant un exemple de calcul pour le microcontrôleur PIC16LF88 avec un convertisseur interne de 10 bits et l'oscillateur interne RC [99].

Le convertisseur peut être configuré pour travailler avec différentes tensions référentielles. Ainsi, en utilisant la tension d'alimentation de 3,3 V comme valeur de référence et une conversion de 10 bits, nous pouvons effectuer la mesure avec la précision de 3,2 mV (la valeur correspondant au bit de poids faible).

La mesure en 10 bits peut être effectuée en 67,72 µs (valeur estimée à partir de la documentation de fabricant). Ce temps inclut la phase d'acquisition (environ 19,72 µs) et la phase de conversion (la conversion dure 12 × 4µs = 48 µs). Nous notons que le temps de la conversion dépend de la période d'oscillateur utilisé. La valeur de 4µs est donnée par le fabricant pour le microcontrôleur rythmé par l'horloge interne RC.

1.4.4. Comparaison des communications radio

La comparaison des fréquences utilisées pour la communication sans fil dans les WSN est présentée Figure I.9. Cette comparaison est basée selon les références mentionnées (voir l'introduction du Chapitre I1.4).

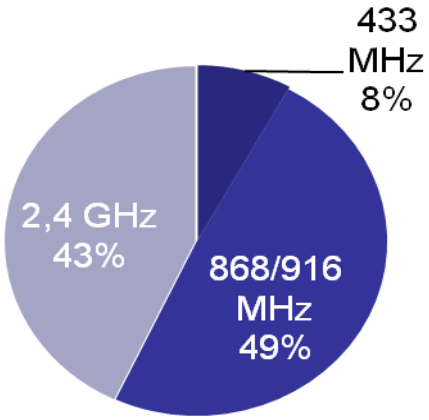


Figure I.9. La comparaison des fréquences de communication sans fil. Références de [18] à [28].

Les WSN utilisent les bandes de fréquences ISM (industrial, scientific and medical). Ce sont des bandes qui peuvent être utilisées pour des applications industrielles, scientifiques, médicales, domestiques ou similaires, à l'exception des applications de radiocommunication, sans avoir à demander d'autorisation auprès des autorités compétentes, qui dépendent de la position géographique [31].

La division mondiale des fréquences sans licence utilisée dans les WSN est cartographiée Figure I.10.

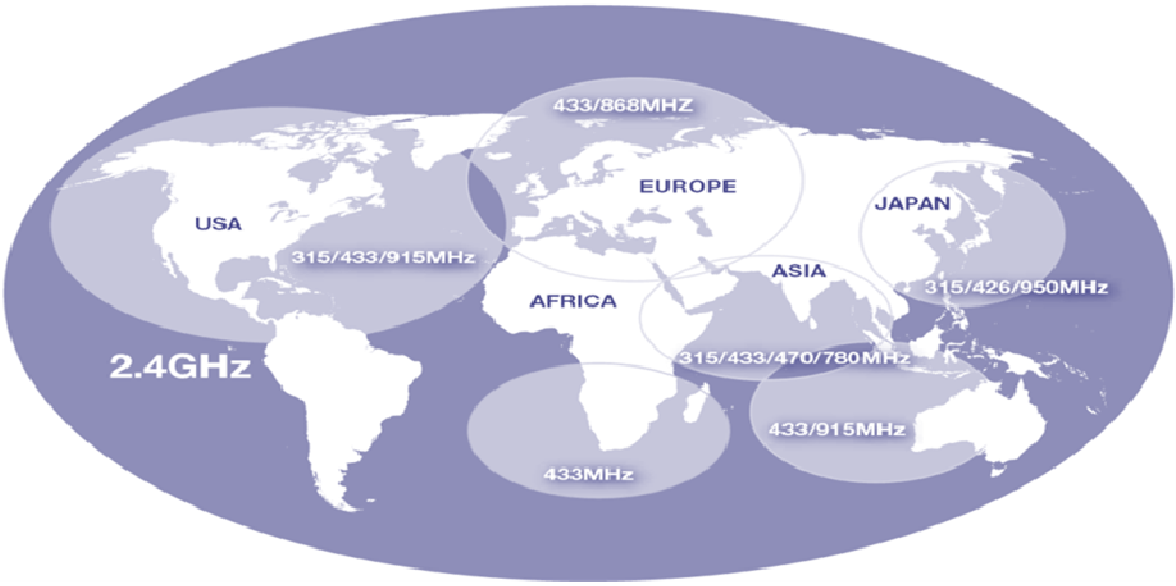


Figure I.10. La division mondiale des fréquences sans licence utilisée dans les WSN [98].

Nous voyons que la fréquence de 2,4 GHz est universellement disponible dans le monde entier, alors que les autres fréquences dépendent de la région. Il est intéressant de mentionner aussi que la puissance maximale de l'émetteur permise par les normes internationales dépend de la fréquence et de l'application du système. Pour les applications standards des valeurs de la puissance de l'émetteur est 10mW à 433Mhz, 25mW à 868MHz et 100 mW à 2,4 GHz.

Les nœuds WSN possèdent aussi des limites géométriques ; dans diverses applications, la dimension de nœud WSN est la valeur critique. En conséquence, la taille de l'antenne du transmetteur radio ne peut pas être ignorée. À titre de comparaison, l'antenne de λ/4 pour la fréquence de 433 MHz mesure 17,3 cm, celle de 868 MHz, 8,2 cm et 2,4 GHz, 3,1 cm.

Le désir de la réduction de taille des nœuds WSN a introduit les antennes miniaturisées de types suivants.

- **PCB (de l'anglais Printed circuit board).**

Ce sont les antennes intégrées sur la carte de circuit imprimé. Les avantages les plus importants de ce type d'antennes sont une structure simple et un coût de fabrication faible. Les antennes PCB peuvent être recommandées aussi grâce à leur facilité de réglage. Le plus grand inconvénient est la fragilité, car tous les éléments installés dans le voisinage de l'antenne ont de l'influence sur sa performance [95]. Pour donner un exemple de la taille, une antenne PCB pour la fréquence de 2,4 GHz a des dimensions 19 mm × 11 mm.

- **Céramique (Chip antenna)**

L'antenne céramique est un petit composant distinct. Nous pouvons trouver plusieurs types d'antennes céramiques, entre autre : monopoles, IFA (inverted "F" antennas), PIFA (planar inverted "F" antennas). Les antennes céramiques peuvent être placées dans la proximité des autres composants sans perdre de l'efficacité. Ils sont moins fragiles que les antennes PCB pour les conditions environnementales habituelles. L'inconvénient de ce type des antennes est leur prix élevé [96]. L'exemple de dimensions de l'antenne céramique pour la fréquence de 2,4 GHz : 7mm × 3mm × 2mm.

L'équation des télécommunications (appelée aussi formule de Friis) [97] rappelle que l'augmentation de la fréquence réduit la distance de la communication. Cela confirme la popularité de la fréquence 868 MHz dans les systèmes en plein

air [13]. Nous notons également que le débit de données est modifié en fonction de la distance de communication et indépendant de la fréquence. Par exemple en utilisant la fréquence 2,4 GHz pour la distance de 10 m le débit de données théorique est 250 kBps. Selon cette formule, nous pouvons estimer que pour la distance de 100 m le débit théorique est seulement 38,4 kBps [98].

Bien qu'il existe de nombreux types de modules de transmetteur radio utilisés dans les WSN, nous pouvons identifier les modules disponibles facilement sur le marché et les comparer. La Table I.4 contient la comparaison de la consommation d'énergie des trois dispositifs choisis : les modules de basse consommation d'énergie de type de communication RF de 2,4 GHz.

	Tension d'alim [V]	*Sleep mode [µA]*	*RX mode [mA]*	*TX mode [mA]*
MRF24J40 Microchip	*2,4 - 3,6*	*2*	*19*	*23*
CC2420 Texas Instruments	*2,1 - 3,6*	*426*	*19,7*	*17,4*
RFM73-D Hope Microelectronics	*1,9 - 3,6*	*2,5*	*22*	*23*

Table I.4. Comparaison des modules de basse consommation d'énergie de type de communication RF de 2,4 GHz.

1.5. Autonomie des nœuds WSN

Depuis plusieurs années, grâce aux nouvelles solutions, les matériels disponibles pour créer les WSN fournissent des fonctionnalités techniques appropriées (la basse consommation d'énergie). Le problème est alors de créer des applications qui sont en mesure de profiter de tous les avantages des dispositifs disponibles (les microcontrôleurs, les transmetteurs radio). Il s'est rapidement avéré que le plus grand inconvénient des WSN est le manque d'énergie (la durée de vie étant limitée par les batteries).

En résumé, la comparaison de matériels effectuée dans la section précédente a permit d'identifier le transmetteur radio comme la partie le plus gourmande d'énergie. Il a besoin d'environ 69 mW en mode de transmission des données (le module MRF24J40, la tension d'alimentation 3,3 V ; le courant consommé 23 mA). Pour comparer, le microcontrôleur PIC16LF88 consomme environ 0,8 mW en mode actif (la tension d'alimentation 3,3 V ; le courant 230 µA ; la fréquence d'horloge 1 MHz).

1.5.1. Limitations d'autonomie des nœuds WSN

Bien que les batteries aient tendance à se développer dans les dernières années, elles ne sont pas toujours capables de répondre aux exigences des WSN [32]. L'autonomie des nœuds WSN est toujours limitée par le stockage d'énergie.

La Figure I.11 montre la comparaison générale des différents dispositifs de stockage d'énergies existantes. Selon cette figure nous pouvons noter que les nouvelles solutions permettent d'avoir la densité d'énergie plus élevée. Les auteurs de l'article [93] introduisent la comparaison des dispositifs utilisés pour stocker de l'énergie : les batteries électrochimiques, les piles à combustible, les micromoteurs à chaud et les sources radioactives. Cette comparaison montre que, malgré leur taille, les batteries sont toujours, à l'heure actuelle, optimale pour les WSN. L'article montre que l'augmentation de la capacité de batterie conduit à la l'augmentation de la taille, du poids et du coût du nœud WSN.

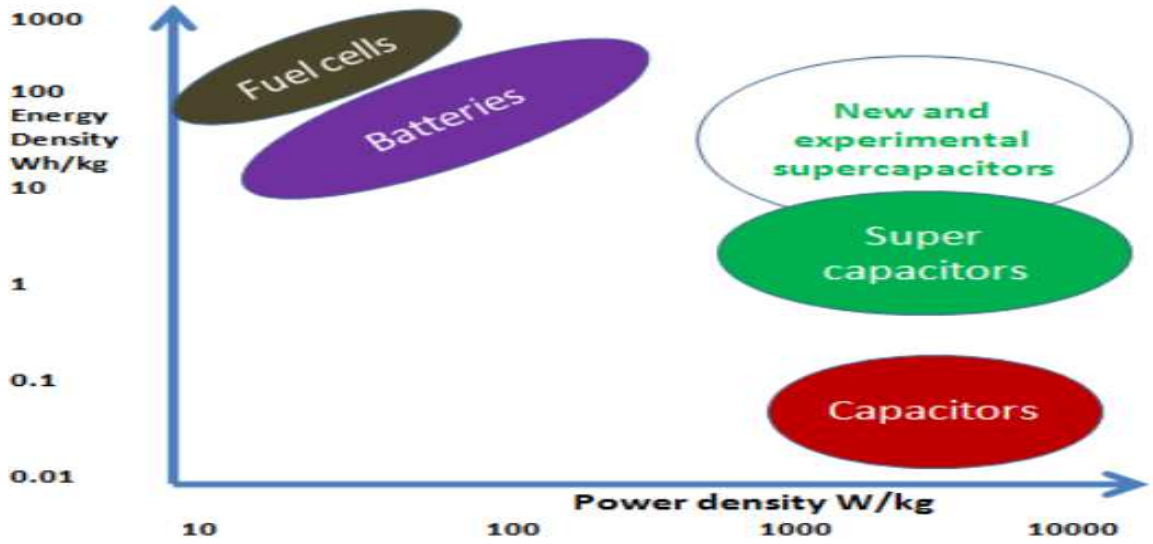


Figure I.11. La densité d'énergie vs densité de puissance pour les différents dispositifs de stockage d'énergie [32].

1.5.2. Techniques utilisées pour prolonger l'autonomie

Le désir de prolonger la durée de vie des nœuds WSN a introduit de nouvelles solutions. Les ingénieurs utilisent les dispositifs dédiés à l'application de basse consommation d'énergie. Par exemple la technologie nanoWatt de Microchip (introduite en 2009) a permis de réduire la consommation d'énergie des microcontrôleurs [33].

Parallèlement à l'introduction de nouvelles solutions matérielles, nous pouvons distinguer plusieurs techniques utilisées dans les WSN pour diminuer la consommation d'énergie comme par exemple :

- les protocoles de communication dédié aux WSN et pour les applications de basse consommation d'énergie : SMAC [34] , BMAC [35], XMAC [36], WiseMAC [37], IEEE 802.15.4 [38],
- la diffusion des données [39],
- le protocole de routage [40],
- la gestion intelligente d'énergie [41],
- la stratégie de rapport cyclique [42],
- le taux adaptatif du capteur [43],
- les nœuds WSN redondants [44].

Les techniques mentionnées ci-dessus peuvent prolonger la durée de vie du nœud WSN (l'intervalle de temps entre le replacement des batteries), mais les obstacles à l'énergie restent inchangés. Les systèmes équipés d'un réservoir d'énergie avec une capacité finie souffrent de plusieurs inconvénients. Par exemple, le rapport cyclique faible implique une réduction de la fiabilité de la mesure etc.

Une autre solution, très intéressante, pour répondre au problème de la durée de vie du nœud WSN est **la récupération d'énergie**. Elle se réfère à l'exploitation de l'énergie à partir de l'environnement (les sources renouvelables) : cette énergie est convertie en énergie électrique est utilisée pour l'alimentation du nœud WSN.

1.6. Récupération d'énergie

Nous pouvons distinguer deux configurations de systèmes de récupération d'énergie : sans ou avec un tampon (buffer) d'énergie.

- Un système sans tampon d'énergie : l'énergie convertie est suffisante pour alimenter le nœud WSN en continu (mais il ne fonctionne jamais en continu),
- Un système équipé d'un tampon d'énergie : l'énergie convertie n'est pas suffisante pour alimenter perpétuellement le nœud WSN. Ainsi, l'utilisation d'un tampon d'énergie est nécessaire.

La Figure I.12 présente les diagrammes de ces deux configurations de systèmes en ce qui concerne la récupération d'énergie. Nous pouvons noter que dans un seul nœud WSN, il est possible d'utiliser plusieurs tampons d'énergie [45]. Le nœud WSN équipé d'un tel système est limité en énergie jusqu'à la prochaine possibilité de la récupération (l'intervalle de la récupération). Par conséquent, il peut maximiser les performances durant cet intervalle en fonction de l'énergie disponible.

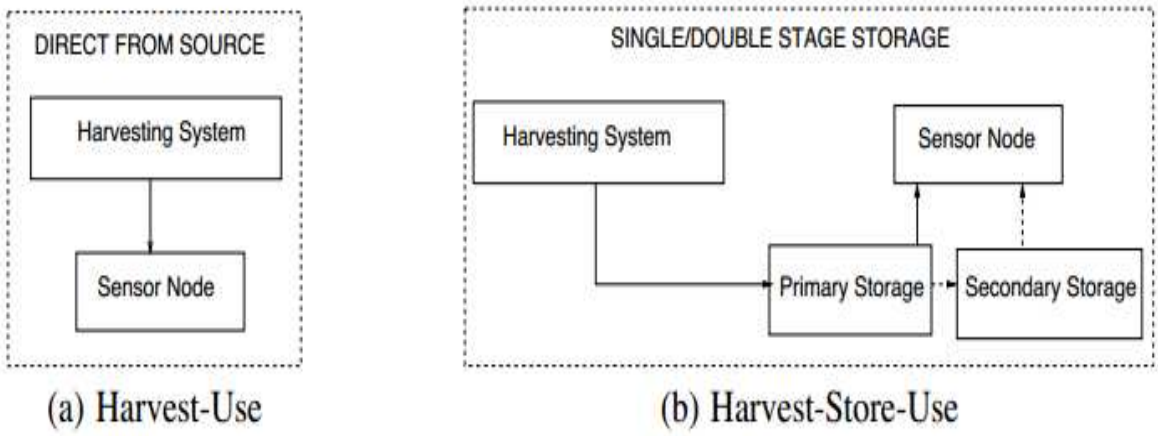


Figure I.12. Le système de la récupération d'énergie : a) sans, b) avec les tampons [45].

1.6.1. Sources d'énergie et ordre de grandeur

Dès lors, un élément essentiel d'un système de récupération d'énergie est la source d'énergie elle-même. Elle dicte le niveau et le taux d'énergie disponible, car les sources d'énergie possèdent des caractéristiques différentes selon la contrôlabilité, la prévisibilité et le niveau.

Il existe plusieurs sources possibles d'énergie. Nous pouvons distinguer les sources d'énergie de l'environnement comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie électromagnétique, l'énergie vibratoire. L'autre possibilité est la récupération d'énergie depuis les sources d'énergie du mouvement humain : la pression artérielle, la chaleur du corps, le souffle et le mouvement du corps. Nous pouvons aussi trouver des systèmes qui récupèrent l'énergie depuis la différence de température ou les ondes électromagnétiques (l'énergie RF).

La Table I.5 contient une liste et la comparaison de plusieurs sources utilisées.

Power Source	P/cm^3 ($\mu W/cm^3$)	E/cm^3 (J/cm^3)	$P/cm^3/yr$ ($\mu W/cm^3/Yr$)	Secondary Storage Needed	Voltage Regulation	Comm. Available
Primary Battery	-	2880	90	No	No	Yes
Secondary Battery	-	1080	34	-	No	Yes
Micro-Fuel Cell	-	3500	110	Maybe	Maybe	No
Heat engine	-	3346	106	Yes	Yes	No
Radioactive(^{63}Ni)	0.52	1640	0.52	Yes	Yes	No
Solar (outside)	15000 *	-	-	Usually	Maybe	Yes
Solar (inside)	10 *	-	-	Usually	Maybe	Yes
Temperature	40 * †	-	-	Usually	Maybe	Soon
Human Power	330	-	-	Yes	Yes	No
Air flow	*380 ††*	-	-	Yes	Yes	No
Vibrations	200	-	-	Yes	Yes	No

* Denotes sources whose fundamental metric is power per **square** centimeter rather than power per **cubic** centimeter.
† Demonstrated from a 5 °C temperature differential.
†† Assumes air velocity of 5 m/s and 5 % conversion efficiency.

Table I.5. Liste et comparaison de sources d'énergie récupérable [93].

Ainsi, le choix de la source d'énergie récupérable dépend des exigences et des contraintes de l'application. De plus, les méthodes de la récupération d'énergie dépendent du type de source.

1.6.2. Implémentations en vue de la récupération d'énergie

Selon le type de la source, différentes méthodes de la récupération d'énergie peuvent être appliquées.

- **L'énergie solaire**

La conversion de l'énergie solaire vers l'électrique est effectuée par les panneaux solaires. Un panneau solaire agit comme une source de courant. La valeur de courant produite est directement proportionnelle à sa taille et l'intensité de la lumière incidente. Les exemples des nœuds récupérant l'énergie solaire sont : Prometheus [45], HydroWatch [47], Heliomote [48], Ambimax [49], Everlast [50] and Sunflower [51].

Les nœuds WSN présentés sont équipés de tampons d'énergie et utilisent différentes techniques pour l'optimalisation de la récupération, comme : conversion DC/DC, MPPT (Maximum Power Point Tracking), régulateur PFM (Pulse Frequency Modulated).

- **L'énergie éolienne**

L'énergie électrique peut être récupérée à partir de l'énergie éolienne à l'aide des rotors, et des turbines convertissent le mouvement circulaire en énergie électrique. L'énergie électrique est générée par le principe de l'induction électromagnétique. Les exemples d'implémentation de nœuds WSN alimentés par l'énergie éolienne sont présentés dans les références : [49], [52], [53], [54]. Les auteurs présentent les solutions utilisées pour la génération d'énergie électrique.

- **L'énergie des ondes électromagnétiques (l'énergie RF)**

Dans les systèmes de récupération d'énergie à partir des ondes électromagnétiques, les nœuds WSN utilisent l'énergie transmise, afin de pouvoir l'alimenter lui-même. L'énergie est obtenue à partir de l'inductance mutuelle des antennes en boucle. Il existe plusieurs applications de récupération d'énergie depuis les différentes ondes électromagnétiques [55], [56].

- **L'énergie thermique (L'effet thermoélectrique)**

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique présent dans certains matériaux. Cet effet permet la génération d'électricité en utilisant les dispositifs appelés « thermopile ». Une « thermopile » est un dispositif électronique qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique grâce à l'effet Seebeck. Cependant, la tension électrique générée est faible, ainsi ces systèmes utilisent un convertisseur DC/DC (dont les convertisseurs à pompe de charge) [94].

- **L'énergie vibratoire**

Les films et les céramiques piézoélectriques sont utilisés pour la conversion d'énergie vibratoire en électrique. Les vibrations étant produites par chaque dispositif mécanique, leur utilisation pour l'alimentation des systèmes devient très intéressante.

Les nœuds WSN alimentés grâce à l'élément piézoélectrique utilisent différentes méthodes pour la conversion d'énergie comme les convertisseurs AC/DC [57], convertisseurs DC/DC [58], SCE (Synchronized Charge Extraction) [59], Single Supply Pre-Biasing [60], SSHI (Synchronized Switching Harvesting on Inductor) avec ses modifications [61], Optimal résistive charge bien d'autres [62].

2 Introduction à l'amortissement des vibrations

Presque tous les systèmes mécaniques sont des structures vibrantes. La nature de ces mouvements dépend de la structure, des matériaux, des dimensions, des conditions aux limites et des excitations. Les vibrations mécaniques indésirables introduisent de la fatigue des matériaux dans l'utilisation des structures mécaniques, par exemple :

- le mouvement de la structure empêche son usage approprié,
- le matériau dépasse ses seuils de fatigue ce qui peut entraîner des dommages : déformation irréversible ou rupture,
- le déplacement de la structure menace ses voisins,
- la fréquence des vibrations menace les animaux ou les humains par la génération du bruit acoustique.

L'amortissement de vibration est une action qui permet la suppression de diverses menaces par la réduction de l'amplitude des déformations périodiques. Aujourd'hui la majorité des systèmes mécaniques est équipée de systèmes d'amortissement de vibrations. Par exemple, dans les voitures, ces systèmes sont installés et utilisés depuis de nombreuses années. Cela provient de la nécessité de sécurité et de l'amélioration de la traction des véhicules. Cependant, en même temps, ces systèmes sont introduits pour augmenter le confort des voyageurs.

2.1. Systèmes d'amortissement des vibrations dans les voitures

La littérature montre plusieurs solutions existantes pour réduire les vibrations et le bruit dans le châssis des voitures. Un système actif contrôle le bruit du moteur en utilisant l'algorithme feed-forward comme proposé en 1988 [65]. Ce système était composé de microphones et de haut-parleurs installés à l'intérieur d'une automobile. La réduction maximale de 10 dB a été enregistrée pour la fréquence de 100 Hz (respectivement 3000 tr/min du moteur). La réduction globale a atteint 4 dB.

Shi-Hwan Oh [88] explique une solution de système actif pour le contrôle du bruit routier. Le système est composé des quatre capteurs de référence, deux capteurs

d'erreur et deux actionneurs. Dans cette étude, une voiture est entraînée à la vitesse de 60 kilomètres par heure. Les mesures de bruit à l'intérieur du véhicule ont déterminé que les basses fréquences sont dominantes (autour de 250 Hz). Les auteurs ont obtenu la réduction du bruit de 5-6 dB selon la position des capteurs d'erreur.

De son côté, Svaricek [89] présente un autre système actif de contrôle de vibration en utilisant un absorbeur. La voiture expérimentale est équipée d'un absorbeur actif placé à la liaison entre le moteur et le châssis. L'unité de calcul de haute performance est appliquée dans le système (dSpace MicroBox). Une réduction significative de jusqu'à 37 dB est atteinte seulement pour les fréquences très basses (moins de 50 Hz). Les inconvénients de cette solution sont le temps de l'adaptation de l'algorithme FxLMS et la bande de fréquences limitée.

L'amélioration des matériaux intelligents a conduit à de nouvelles solutions basées sur des éléments piézoélectriques [90]. Les études ont déterminé que le carter d'huile est la source la plus importante des vibrations dans le moteur de la voiture. Une solution de type contrôle actif en utilisant les éléments piézoélectriques est proposée. Le système expérimental a réduit les vibrations de 12 dB en utilisant le contrôle co-localisé. Respectivement pour le contrôle adaptatif « feedback » la réduction de 20 dB a été obtenue et pour le contrôle adaptatif « feedforward », 24 dB. Toutefois, les auteurs attirent l'attention sur les coûts élevés du système proposé, lesquels entravent l'introduction de production en série. De plus, la génération des vibrations et des bruits pour les fréquences supérieures a été notée.

M. Misol utilise les éléments piézoélectriques dans un système de contrôle de vibration du pare-brise [91]. Les auteurs ont reporté une réduction des vibrations de 7,45 dB (116 Hz) et 4,36 dB (145 Hz). L'algorithme « state-feedback » a été implémenté. Le système de test est composé de six accéléromètres, un capteur de force, un microphone et trois actionneurs. Un ordinateur personnel est utilisé comme une unité de calcul.

Par ailleurs, Weyer et Monner travaillent sur les vibrations dans un toit d'une voiture [92]. Ils ont noté qu'ils existaient des fréquences propres communes pour le moteur et pour la structure d'un véhicule. Cela peut provoquer la propagation des vibrations. Les auteurs disposent un système actif de contrôle des vibrations dans le toit en utilisant les éléments piézoélectriques. L'algorithme « FxLMS » est

implémenté dans une unité de calcul dSpace 1005 Power PC System. Pour la bande de fréquence 42-62 Hz, une réduction de l'ordre de 20-30 dB est atteinte. Le système est composé de six couples piézoélectriques (capteur et actionneur).

A partir des exemples susmentionnés, nous pouvons distinguer deux sources principales de vibrations dans les applications automobiles : les moteurs et le bruit généré par la surface des routes (bruit de roulement). Les inconvénients de ces systèmes sont entre autres les suivants :

- Les unités de calcul de puissance élevée,
- La grande quantité de câblage,
- Le temps d'adaptation long,
- La diminution de l'efficacité pour des fréquences supérieures à 50 Hz,
- L'origine de la génération des vibrations,
- Les coûts élevés de production en série.

Cependant, le système de contrôle actif des vibrations dans l'application automobile est souhaité par le marché, et un grand effort a été mis en place pour améliorer les méthodes et les solutions existantes.

2.2. Classement des systèmes d'amortissement

Figure I.13 montre le classement des systèmes d'amortissement présentés dans cette section.

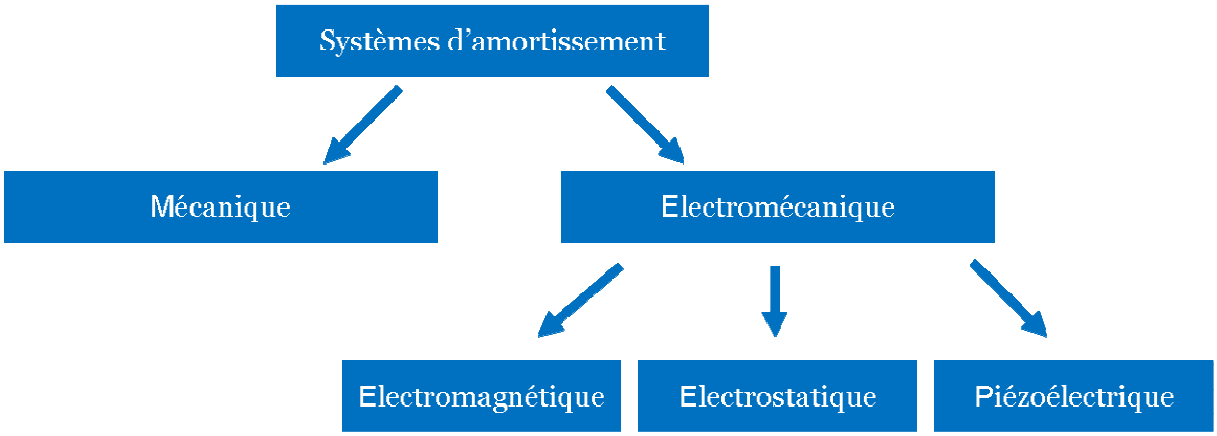


Figure I.13. Classement des systèmes d'amortissement des vibrations.

2.3. Systèmes mécaniques

Les systèmes mécaniques d'amortissement des vibrations sont basés sur les matériaux absorbant d'énergie mécanique. Nous pouvons les trouver dans toutes les structures mécaniques existantes. Rappelons que les systèmes les plus simples et les plus anciens d'amortissement des vibrations utilisent les matériaux viscoélastiques (ressorts, pare-chocs, amortisseurs de vibrations).

Les matériaux viscoélastiques sont destinés à dissiper l'énergie mécanique des vibrations sous forme de chaleur. Outre l'augmentation de la durée des structures, ils permettent d'atténuer le bruit et les vibrations. Ils trouvent des applications dans tous les domaines de l'ingénierie et des systèmes mécaniques, l'automobile, l'aéronautique ou le génie civil. Nous pouvons distinguer plusieurs types de matériaux utilisés pour amortir les vibrations : métaux, polymères, céramiques [63].

Aujourd'hui dans le domaine automobile, les matériaux viscoélastiques sont utilisés pour l'isolement des vibrations entre le moteur et la caisse, dans les amortisseurs, dans les tôles de carrosserie, à l'intérieur de l'habitacle etc. La Figure I.14 montre un exemple d'utilisation de matériau viscoélastique pour l'amortissement de vibration dans un joint de transmission.

L'utilisation des ces matériaux introduit plusieurs limitations. Ils sont capables d'amortir seulement les basses fréquences. Ils augmentent le poids et les dimensions du système mécanique. De plus, l'efficacité de ces systèmes dépend de plusieurs phénomènes physiques tels que la température, la fatigue, la vitesse de déformation, etc. Les études actuelles s'efforcent de trouver des systèmes qui remplacent les systèmes de vibrations mécaniques par de nouvelles méthodes plus contrôlables.

Figure I.14. Le joint de transmission équipé du matériau viscoélastique.

2.4. Systèmes électromécaniques

Des alternatives aux méthodes d'amortissement des vibrations par les systèmes mécaniques (où l'énergie mécanique est convertie en énergie thermique) sont basées sur les systèmes électromécaniques. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est à la base du fonctionnement de ces systèmes.

Nous disons que le système peut convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, quand le passage de la charge électrique génère l'action de la force mécanique (ou vice versa).

Il existe plusieurs types de ces systèmes selon le type de couplage :

- électromagnétiques,
- électrostatiques,
- effet piézoélectrique.

La description des principes de ces systèmes est illustrée dans les sous-sections suivantes. Ensuite, nous présentons la comparaison de ces méthodes.

2.4.1. Electromagnétique

La conversion électromagnétique est décrite par de loi de Lenz Faraday[1], qui permet de rendre compte des phénomènes macroscopiques d'induction électromagnétique. Un exemple de système avec un aimant mobile est donné Figure I.15. Selon la loi de Lenz Faraday, la tension électrique va être générée aux bornes de la bobine à la suite du mouvement de l'aimant. En fin de compte, la valeur de la tension est une fonction de la vitesse de variation du flux magnétique.

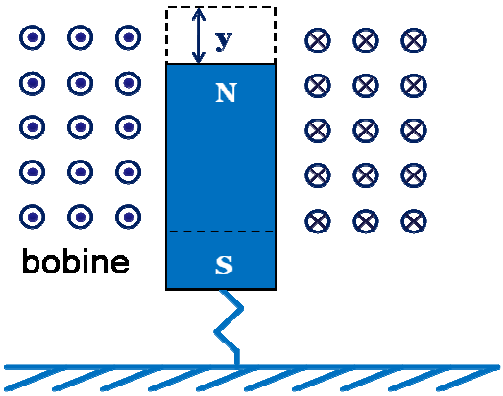


Figure I.15. Le système de la conversion électromagnétique.

[1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz-Faraday, URL accédée le 10 novembre 2015

2.4.2. Electrostatique

Les systèmes électrostatiques sont basés sur la loi de Coulomb[2] qui explique la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement. Les systèmes utilisant ce phénomène contiennent deux électrodes à distance (Figure I.16). La première est fixée tandis que l'autre est mobile. En changeant la distance entre les deux électrodes, on change la valeur de la capacité du circuit. L'inconvénient de cette méthode est la nécessité de fournir la tension électrique aux électrodes.

Dès lors, le transfert d'énergie dépend fortement du rapport entre la capacité maximale et minimale (les propriétés mécaniques du système). Les actionneurs électrostatiques ne sont pas affectés par les températures ambiantes et ils ont une très faible consommation de courant. Ils peuvent générer de grandes forces, mais ces forces sont généralement limitées à de très courtes distances.

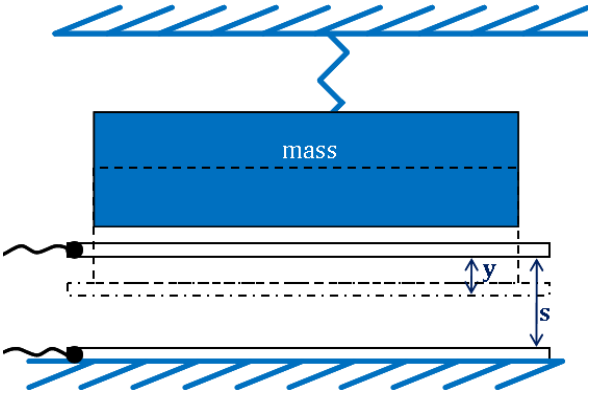


Figure I.16. Le système de la conversion électrostatique

2.4.3. Effet piézoélectrique

Les piézoélectriques ont la propriété de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. La polarisation d'un élément piézoélectrique sous l'action d'une force mécanique appliquée est appelée un effet piézoélectrique direct. La déformation d'un élément piézoélectrique à cause de la charge électrique est appelée un effet piézoélectrique inverse [64]. La Figure I.17 montre les conséquences sur un matériau piézoélectrique et sur un non piézoélectrique sous l'action de la force mécanique.

[2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Coulomb, URL accédée le 10 novembre 2015

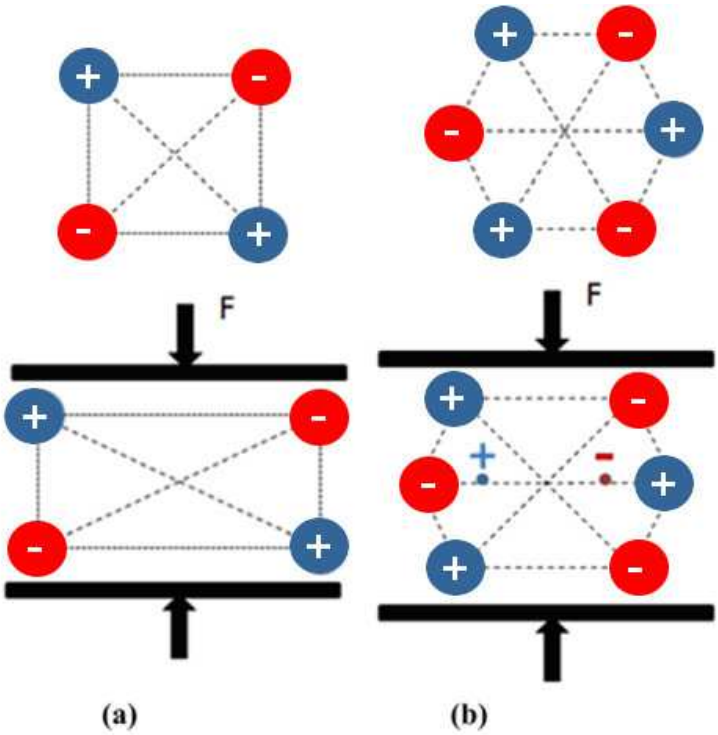


Figure I.17. Exemple du cristal sous l'action de la force mécanique. (a) non piézoélectrique. (b) piézoélectrique.

2.5. Comparaison de systèmes d'amortissement

Une tendance générale dans l'industrie automobile est la conception des véhicules plus économes en carburant. L'un des principaux moyens par lesquels des améliorations peuvent être réalisées est la réduction du poids des éléments de carrosserie. Cependant, cette réduction dégrade leur capacité d'atténuer les vibrations basse fréquence. Les systèmes mécaniques ne conviennent qu'à certaines fréquences et ajoutent du poids au véhicule, donc leur usage est mal adapté [65]. Cela a conduit à la recherche de nouvelles méthodes.

Les amortisseurs électromécaniques semblent être une alternative valable à ceux viscoélastiques, en raison de :

- l'absence de tous les problèmes de fatigue et de frottements motivée par l'absence de contacts mécaniques,
- la faible sensibilité aux conditions de fonctionnement,
- la grande possibilité de réglage même pendant le fonctionnement,
- et la prévisibilité du comportement.

Les potentialités attractives des systèmes amortisseurs électromécaniques ont motivé un effort de recherche considérable au cours de la dernière décennie. Les

applications cibles vont du domaine des machines tournantes à celle des suspensions de véhicules [66].

Les systèmes électromagnétiques ont conduit à un contrôle possible dans les systèmes d'amortissement [67]. En utilisant ces systèmes, il est possible d'amortir les vibrations, mais également de récupérer l'énergie électrique depuis les vibrations mécaniques, caractéristique très souhaitable dans les applications automobiles [68]. Cependant, ils présentent de grands inconvénients, comme il a été dit, à savoir la grande masse et la taille [69]. Ainsi, ces derniers ne sont pas considérés comme une bonne solution pour le système proposé.

Les applications des systèmes électrostatiques sont très limitées, parce que la force diminue fortement avec la distance. Un bon exemple d'application d'un actionneur électrostatique est l'isolement mécanique de MEMS (Microsystème électromécanique) [70]. En raison de la distance de fonctionnement de quelques micromètres, ces systèmes ne sont pas bien adaptés pour les applications automobiles.

Les systèmes piézoélectriques présentent certains avantages tels que la bonne résolution, la force de sortie élevée, et la réponse rapide aux changements de la tension d'entrée. De plus, la consommation d'énergie pour maintenir une déformation à une position fixe est très faible. La possibilité de récupération d'énergie électrique est un avantage supplémentaire [71]. L'inconvénient est la petite amplitude des déformations (500 pm/V) [72]. Cependant, nous notons la facilité d'utilisation d'éléments piézoélectriques dans notre conception :

- les bonnes propriétés d'amortissement des vibrations,
- la possibilité de la récupération d'énergie efficace,
- et les propriétés mécaniques satisfaisantes (l'installation facile sur le châssis de voiture).

Les sections suivantes introduisent les détails de l'utilisation d'éléments piézoélectriques dans les systèmes d'amortissement de vibrations.

2.6. Méthodes d'amortissements en utilisant un élément piézoélectrique

Il existe plusieurs méthodes d'amortissement des vibrations en utilisant un élément piézoélectrique. La Figure I.18 rappelle le classement des systèmes d'amortissement de vibrations. Elle souligne aussi qu'il existe plusieurs types de méthodes d'amortissement en utilisant un élément piézoélectrique.

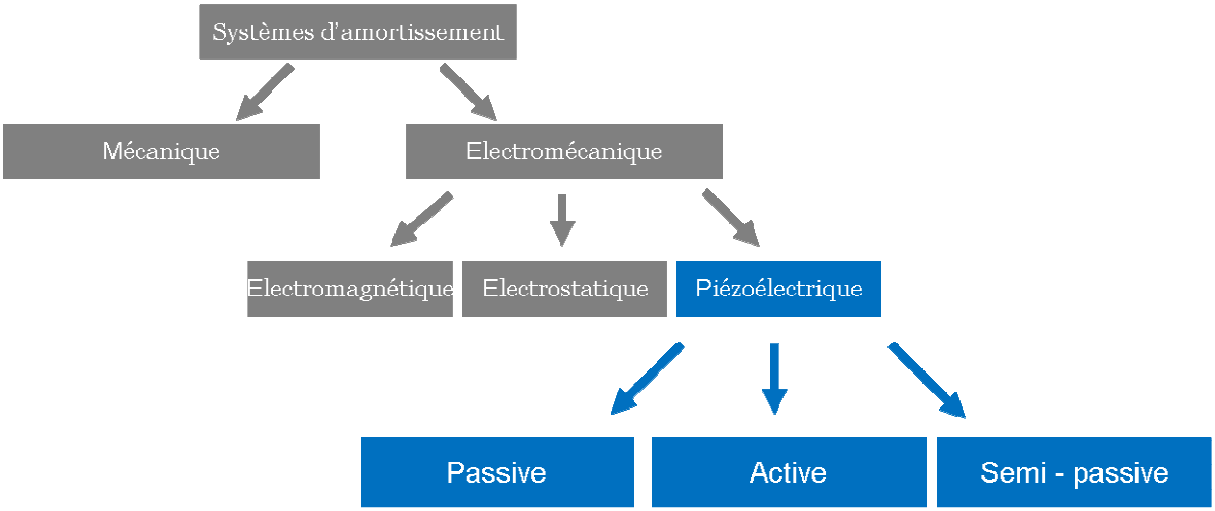


Figure I.18. Classification des systèmes d'amortissement des vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique

Selon cette figure, nous pouvons distinguer trois types de techniques d'amortissement de vibration : passives, actives et semi passives.

- **passive**

La technique passive contient les éléments passifs (résistances, condensateurs, inductances). Ils sont reliés directement à l'élément piézoélectrique. L'énergie convertie par un élément piézoélectrique est dispersée dans ces éléments passifs. L'avantage de ces systèmes est la simplicité de leur structure. Les inconvénients sont la grande taille et le manque d'adaptabilité.

- **active**

Le contrôle actif est généralement plus efficace que les méthodes passives, mais la différence fondamentale est la nécessité d'une source externe d'énergie pour l'entraînement des vérins de commande (l'élément piézoélectrique). Néanmoins, ces systèmes sont complexes, leur mise en œuvre difficile : ils s'appuient sur une chaîne complexe comprenant : capteurs, unité de calcul, amplificateurs et actionneurs. Le

principe de contrôle actif est d'utiliser une source externe pour générer les forces qui interfèrent avec l'onde de vibration pour la minimiser.

- **semi passive**

Pour pallier certaines limitations techniques, sont nés les systèmes semi passifs. Ces méthodes reposent sur un traitement non linéaire de la tension électrique générée par des éléments piézoélectriques. Ils combinent les avantages des techniques passives et actives. Ils ajoutent aux techniques passives, la capacité de contrôle en utilisant la très petite quantité de l'énergie par rapport aux méthodes actives.

La comparaison du principe de ces trois types de techniques d'amortissement de vibrations est présentée sur la Figure I.19.

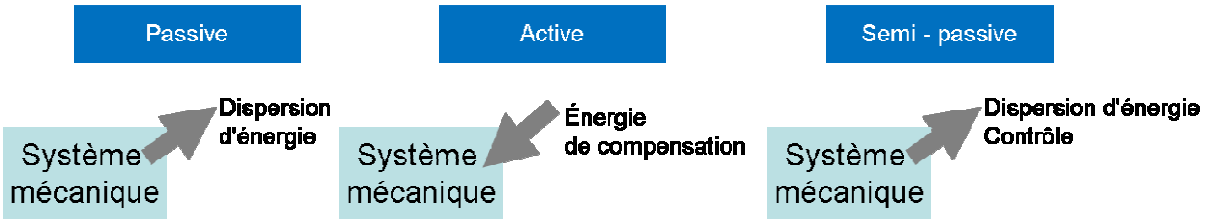


Figure I.19. Comparaison du principe de trois techniques d'amortissement de vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique. .

La Figure I.20 donne les exemples de ces trois types de méthodes [73]. Les détails techniques d'amortissement de vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique sont présentés dans les sous-sections suivantes.

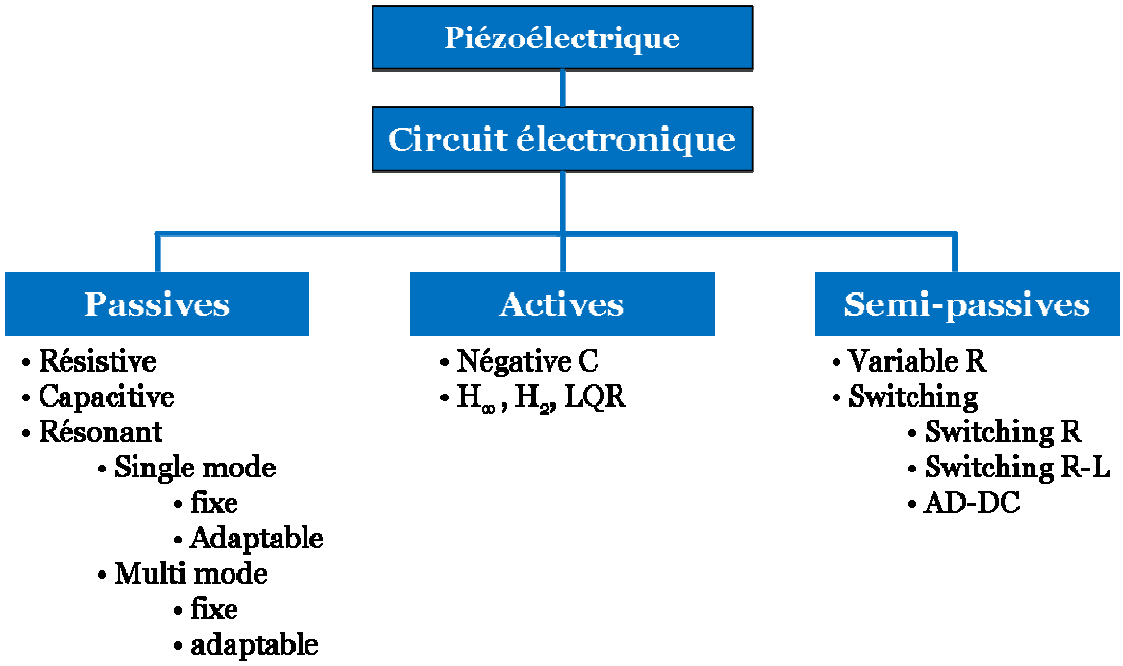


Figure I.20. Classement de différentes techniques d'amortissement de vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique [73].

2.6.1. Méthodes passives

Les méthodes passives utilisent les circuits électriques passifs connectés directement aux bornes du piézoélectrique. L'énergie électrique générée par l'élément piézoélectrique est dissipée dans ces circuits. Le système passif résistif avec ses caractéristiques est similaire au système viscoélastique. Le système passif capacitif change la valeur de la rigidité de l'élément piézoélectrique [74]. En définitive, ce sont les systèmes plus simples, et leur efficacité est la plus faible.

D'autres méthodes sont basées sur les circuits résonants. Ils augmentent la valeur d'énergie transférée entre la capacitance interne de l'élément piézoélectrique et le circuit électronique externe. Les composants de shunt les plus largement utilisés sont les inductances et les résistances (ce qui provient directement de la nature capacitive de l'élément piézoélectrique) [75].

Les Figure I.21a et Figure I.21b montrent le principe de ces deux types des circuits résonants. Ces circuits sont capables de fournir la réduction d'amplitude de vibration pour un seul mode de vibration[3]. Pour augmenter la possibilité d'amortissement des vibrations les systèmes multi modes passifs ont été introduits [76]. Ils contiennent plusieurs branches R-L, chacune correspondant à différent mode de vibrations. L'exemple de ces types de circuits donne Figure I.21c.

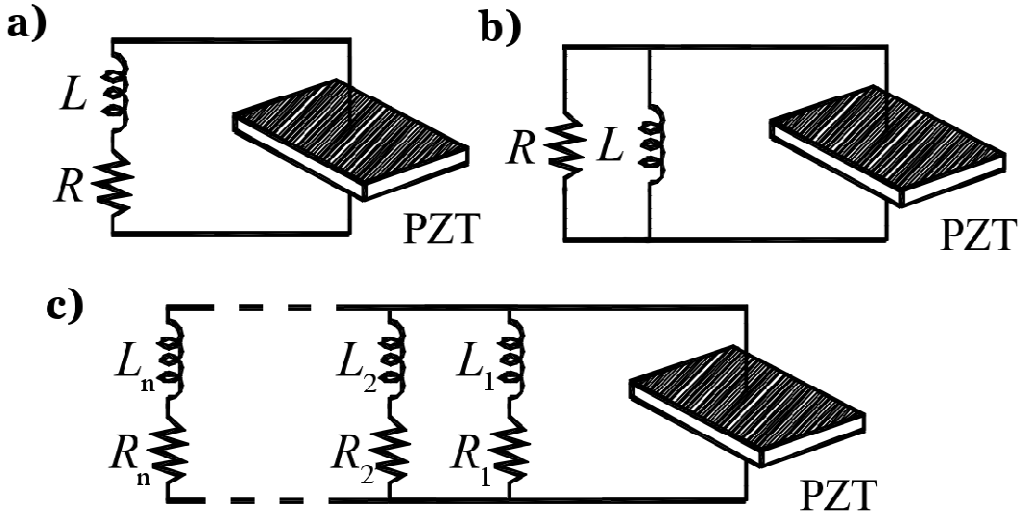


Figure I.21. Les schémas des (a) serial (b) parallèle (c) multimodal passive résonant « shunting » systèmes.

[3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Mode_normal, URL accédée le 10 novembre 2015

2.6.2. Méthodes actives

Comme dit précédemment, les méthodes d'amortissement de vibration de type actif s'appuient sur une chaîne complexe comprenant : capteurs, unité de calcul, amplificateurs et actionneurs. Les éléments piézoélectriques peuvent être utilisés comme capteurs (effet piézoélectrique direct) ou comme actionneurs (effet piézoélectrique inverse). Grâce à l'unité de calcul, les actionneurs sont contrôlés en temps réel. Les informations sur l'état actuel du système sont fournies par des capteurs. Ils existent deux possibilités de contrôle (Figure I.22) [65]:

- **feedforward** - une méthode de mesure des vibrations existantes en utilisant les capteurs, et de génération des excitations en opposition (nécessité d'un signal de référence et d'un signal d'erreur pour s'adapter).
- **feedback** - une méthode de régulation de la réponse mécanique du système couplée par une boucle de contre-réaction.

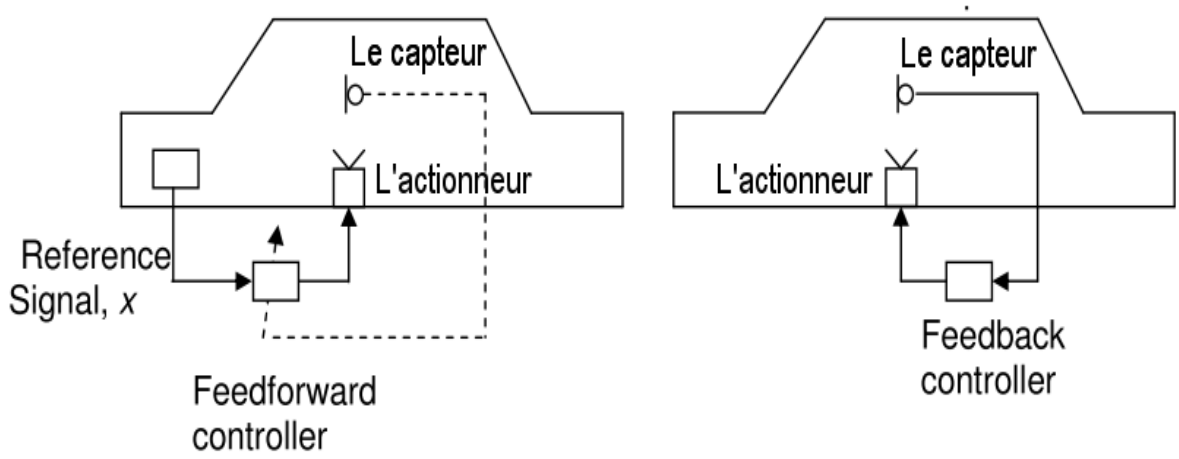


Figure I.22. Les systèmes de contrôle actif de canal unique : a) feedforward, b) feedback [80].

Les unités de calcul utilisent différents algorithmes. L'exemple d'un système actif d'un contrôle de vibration en utilisant l'algorithme H_∞ est présenté dans [77]. L'utilisation des algorithmes basés sur le feedback de la vitesse et le LQR (Linear Quadratic Regulator) est donnée dans [78] et [79]. Les systèmes présentés tiennent en compte la réduction de vibrations dans le système mécanique de type plaque. De plus, plusieurs solutions d'amortissement de vibrations en utilisant la méthode active sont détaillées dans un article de Fuller et Flotow [80] (L'article porte sur les principes théoriques, la comparaison et les applications des systèmes actifs).

L'autre méthode active d'amortissement de vibrations en utilisant les éléments piézoélectriques consiste à utiliser une capacitance négative [81]. Cette méthode permet de minimaliser la capacitance globale du circuit et d'augmenter la quantité d'énergie transférée. Les auteurs de l'article soulignent les différents avantages et inconvénients de cette méthode.

2.6.3. Méthodes semi passives

Le contrôle de vibration semi passif consiste en un basculement du circuit électronique en temps réel. Cela permet de changer la charge électrique aux bornes de l'élément piézoélectrique. Ce changement peut être réalisé par :

- l'adaptation d'impédance (par exemple en utilisant un condensateur variable),
- le traitement non linéaire de la tension sur l'élément piézoélectrique (par exemple en utilisant un interrupteur électrique).

La Figure I.23 donne un exemple de système semi passif adaptatif présenté par Davis et Lesieutre [82]. Les auteurs utilisent des interrupteurs pour adapter la capacitance du circuit. L'autre exemple d'un système semi passif adaptatif a été réalisé par Niederberger [83]. Dans ce deuxième cas, une valeur de l'inductance est adaptée.

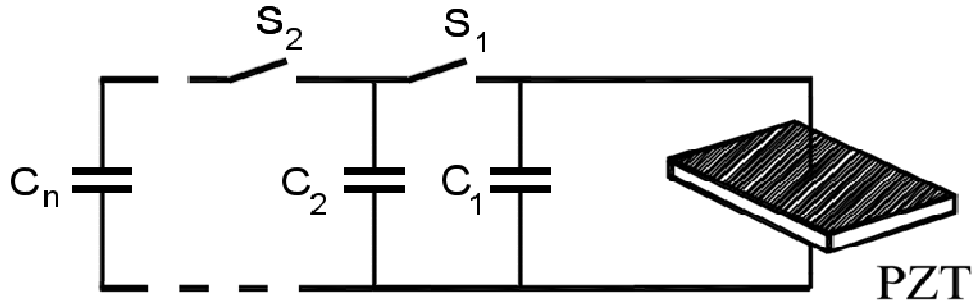


Figure I.23. Les exemples des systèmes semi passifs adaptatifs.

A titre de généralisation, les méthodes semi passives non linéaires sont baptisées SSD pour Synchronized Switch Damping. Elles consistent à connecter électriquement un élément piézoélectrique au circuit électriquement passif en utilisant un interrupteur électrique.

Ces types des circuits non linéaires peuvent être divisés en deux types principaux dépendant du circuit passif utilisé : un court-circuit ou une inductance passive.

- **Court-circuit (SSDS : Synchronized Switch Damping on short circuit)**

L'élément piézoélectrique a une raideur haute lorsqu'il est en circuit ouvert, et une raideur basse en court-circuit. Cette propriété a été utilisée dans un circuit semi passif d'amortissement de vibrations réalisé par Clark [84]. La Figure I.24a présente un élément piézoélectrique dans un circuit ouvert. Dans cet état, pendant le mouvement du système mécanique, l'élément piézoélectrique est utilisé : cela permet de stocker d'énergie dans cet élément. Lorsque le mouvement du système cause un retour d'énergie depuis l'élément piézoélectrique, un interrupteur est activé. Le système change son état (Figure I.24b), et l'élément piézoélectrique passe à l'état de la raideur basse ; l'énergie est dissipée et les vibrations sont amorties.

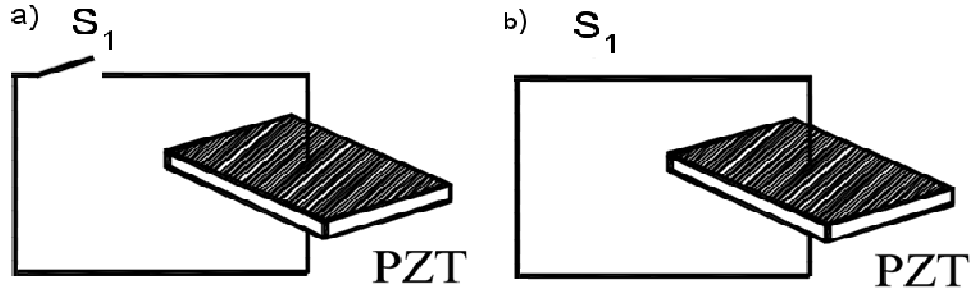


Figure I.24. Système d'amortissement de vibrations semi passive SSDS.

- **Inductance passive (SSDI : Synchronized Switch Damping on Inductor)**

Un circuit résonant est composé de la capacité interne de l'élément piézoélectrique et d'une inductance externe (Figure I.25). Cela permet de relier les bornes du piézoélectrique et l'inductance externe durant une partie de la période des oscillations mécaniques (elles dépendent de la fréquence de vibrations) et permet aussi de les déconnecter durant le reste de la période.

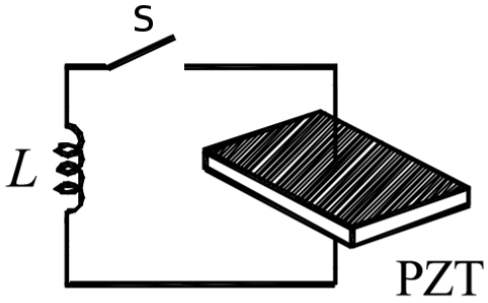


Figure I.25. Le système d'amortissement de vibrations semi passif SSDI

Cette méthode a été présentée en détail dans la thèse d'A. Badel [85]. Grâce à l'utilisation d'un circuit résonant, la valeur d'énergie passant entre l'élément

piézoélectrique et le circuit électronique va augmenter, rendant ainsi l'amortissement de vibration plus efficace.

Les modifications de la méthode SSDI sont aussi utilisables dans les circuits de récupération d'énergie depuis les vibrations (voir la section §1.6.2). De plus, plusieurs méthodes basées sur SSDI ont été proposées, par exemple SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductance).

La méthode SSHI utilise le même principe d'un transfert énergétique et ne diffèrent que par les caractéristiques du circuit électronique. E. Lefeuvre *et al.* dans leur article, donnent une comparaison de différentes variations des méthodes non linaires de la récupération d'énergie dont SSHI [86].

La littérature scientifique présente d'autres méthodes d'amortissement de vibration grâce à un traitement non linéaire de la tension. Par exemple, voir le SSDV (Synchronized Switch Damping on Voltage) [87]. Cependant, cette méthode ne satisfait pas à la condition de faible consommation d'énergie.

3 Positionnement de la problématique

Maintenant que l'état de l'art a été présenté, il est nécessaire de revisiter notre objectif initial. Dans cette section, nous allons expliciter tous les volets des spécifications, à savoir dresser la liste des hypothèses de travail, revoir les objectifs de notre travail et brosser les grandes lignes de la conception de notre plateforme d'expérimentation.

3.1. Hypothèses

Comme dit précédemment, le contrôle actif des vibrations devient très important dans de nombreux domaines de l'ingénierie (l'automobile, la surveillance de l'état des structures mécanique). Plusieurs solutions de contrôle actif des vibrations ont été proposées et testées avec des résultats prometteurs. Cependant, ces systèmes sont centralisés, câblés et ont besoin de puissance de calcul importante. La mise en œuvre du contrôle actif des vibrations dans un réseau de capteurs sans fil est un défi pour les concepteurs. L'ensemble du système de contrôle doit être conçu pour répondre à des exigences très strictes à la fois du contrôle actif et du réseau de capteurs.

En effet, l'utilisation du contrôle actif des vibrations peut conduire à réduire le poids des voitures, conséquence des méthodes passives conventionnelles. Cela pourrait pousser à alléger les véhicules et à les rendre plus économes en carburant.

Nous faisons l'hypothèse que la transformation d'un système centralisé en système distribué, composé des nœuds de faible puissance, peut améliorer certains aspects du contrôle actif : diminution de la consommation d'énergie, des coûts de production et de maintenance.

Notre approche distribuée contient des nœuds WSN intelligents : ils fournissent l'action locale, grâce à laquelle la quantité des informations à transférer (par rapport à l'approche centralisée) diminue.

La faisabilité de nœuds WSN autonomes pour la mesure des vibrations et l'amortissement des vibrations constituent le but de notre recherche.

3.2. Grands lignes de la conception

La Figure I.26 présente l'approche globale du système distribué pour le contrôle actif des vibrations pour l'application automobile.

Ce dispositif a deux niveaux :

- Un réseau de capteurs sans fil permettant la mesure des vibrations et une action locale de faible puissance sur le système,
- Un réseau d'actionneurs piézoélectriques de forte puissance permettant une action globale sur le système.

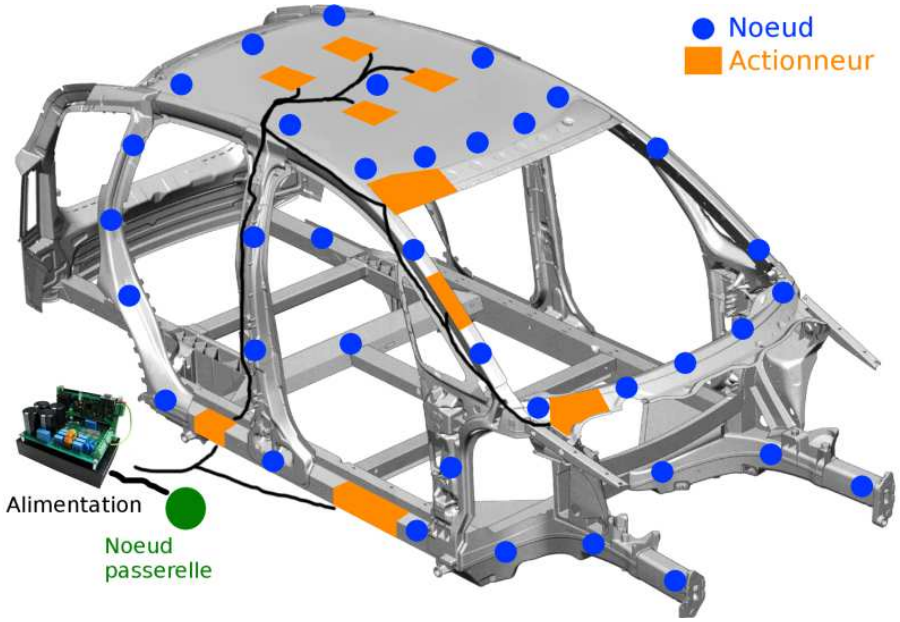


Figure I.26. Approche globale du système d'amortissement de vibrations.

Dans l'application, les nœuds WSN sans fil seront mis en œuvre sur le châssis de la voiture. Ils forment une topologie en étoile vers le nœud WSN central. Tous les nœuds WSN dans le système possèdent un système de récupération d'énergie et sont équipés d'un système d'atténuation des vibrations. De plus, ils sont capables de mesurer le niveau de vibrations. Ils forment le premier niveau du contrôle actif des vibrations.

Les nœuds WSN mesurent des vibrations, et si nécessaire, envoient les données au nœud WSN central qui est responsable du deuxième niveau de contrôle actif des vibrations (le système filaire de haute puissance). Les nœuds WSN n'ont pas d'énergie pour fonctionner s'il n'y a pas de vibrations dans le système, mais dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'annihiler des vibrations.

3.3. Objectifs

Les exigences de la récupération d'énergie et l'amortissement de vibration conduisent à l'utilisation des éléments piézoélectriques dans le système conçu. Le piézoélectrique est un matériau utilisé avec succès à la fois dans le système d'amortissement de vibrations et dans celui de la récupération d'énergie. Bien qu'il existe d'autres systèmes électromécaniques basés sur l'effet électrostatique ou électromagnétique, la facilité de mesure de vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique confirme notre choix.

Selon l'état de l'art, nous savons que les méthodes SSD permettent d'améliorer l'efficacité de systèmes d'amortissement de vibrations et de la récupération d'énergie. La méthode la plus populaire grâce à ces bonnes propriétés de la récupération d'énergie est la méthode SSHI dans la configuration en série. Les chercheurs ont introduit plusieurs modifications de cette méthode qui permettent de l'améliorer [86]. Nous choisissons la méthode SSHI en série.

La méthode SSHI a besoin d'un signal de contrôle. Les systèmes présentés dans la littérature sont contrôlés soit par un dispositif puissant comme l'ordinateur [85] soit par un circuit analogique intégré [100]. Les systèmes avec un pilote puissant consomment beaucoup d'énergie donc ne remplissent pas l'exigence principale de notre conception. Les systèmes avec un circuit analogique intégré sont souvent limités par la tension élevée générée par l'élément piézoélectrique. De plus, il est impossible d'accorder les paramètres de ce circuit analogique dans le système déjà réalisé.

Le premier objectif est donc d'utiliser un microcontrôleur pour contrôler la méthode SSHI. Cette solution présente plusieurs avantages en comparaison des méthodes existantes comme :

- Le réglage d'algorithme de commutation,
- La basse consommation d'énergie tout en conservant la puissance de calcul,

Ensuite, les systèmes présentés dans la littérature ont besoin d'un capteur d'accélération externe pour générer le signal de contrôle. Cela augmente le coût et la taille du système. Le deuxième objectif est donc de trouver une solution qui permette d'utiliser un seul élément piézoélectrique pour la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

L'état de l'art montre aussi que les systèmes actifs d'amortissement de vibrations existantes se bornent à être centralisés : ils utilisent des connexions filaires entre un dispositif de contrôle et les éléments piézoélectriques. Les algorithmes utilisés travaillent en temps réel ; ainsi leur remplacement par le système sans fil n'est pas possible. Le troisième objectif est le portage d'un système centralisé en système distribué en utilisant un WSN (notamment pour la distribution de la puissance de calcul).

En outre, les systèmes existants utilisent toujours tous les actionneurs disponibles sans porter attention au mode de vibrations. Le quatrième objectif de la thèse est la conception d'un système spatial d'amortissement de vibrations, qui permet de s'accorder selon le mode de vibrations existant dans le système mécanique.

Le cinquième et dernier objectif est la réduction de la consommation d'énergie par le système d'amortissement de vibrations. En particulier, nous voudrions vérifier la faisabilité de nœuds WSN autoalimentés qui fournissent les trois principales capacités : la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

3.4. Etapes

Maintenant que nous avons défini les objectifs de la thèse, nous pouvons établir ses étapes principales :

- La conception d'une structure métallique simplifiée (par rapport à un châssis d'automobile) et l'assemblage du système mécanique équipé des éléments piézoélectriques,
- La caractérisation du système assemblé pour identifier les formes de vibrations ainsi que les exigences pour un nœud du réseau de capteurs sans fil,
- La conception et réalisation du réseau de capteurs sans fil pour un système distribué de contrôle actif des vibrations,
- L'étude et la validation du système d'amortissement de vibrations complet. Le système est réalisé en utilisant le réseau des nœuds WSN conçus. Cela inclut la mesure de vibration, l'amortissement de vibrations, la récupération d'énergie.

Les étapes présentées correspondent aux chapitres de la thèse. Le chapitre II fournit la présentation et la caractérisation du système mécanique conçu. Puis, dans le chapitre III nous allons expliquer le réseau de capteurs sans fil. Le chapitre IV porte sur la validation du système d'amortissement de vibrations complet. Enfin, la conclusion présentera les acquis de ce travail et donnera des pistes de recherche pour le futur.

Chapitre II

Système mécanique équipé de piézoélectriques

Ce chapitre introduit le système mécanique utilisé pour la vérification de nos hypothèses concernant la conception du système d'amortissement des vibrations en utilisant le réseau de capteurs sans fil. Dès lors, nous allons présenter la conception d'une structure de type plaque sollicitée en vibrations, ses dimensions et les caractéristiques physiques des matériaux utilisés. Puis, nous allons présenter les simulations des éléments finis du modèle de système mécanique conçu. Les résultats de simulations multi physiques réalisées en utilisant logiciel « COMSOL 5» sont présentés, l'analyse de fréquences propres et l'analyse de la physique de l'élément piézoélectrique. La deuxième partie de ce chapitre porte sur les méthodes et les outils des mesures. La fonction de transfert identifie les fréquences résonantes du système. Ensuite, en utilisant les mesures en domaine fréquentiel, nous allons identifier les modes de vibrations de la plaque, de la structure et de la suspension.

D'une manière générale, grâce aux simulations et aux mesures, nous pouvons :

- Valider la possibilité d'utiliser le système mécanique conçu pour les tests de performance de système d'amortissement de vibrations,
- Etablir les exigences pour la partie électronique du système d'amortissement de vibrations. Un cahier de charge est présenté à la fin de ce chapitre.

1 Description du système mécanique

L'objectif de cette partie est de décrire le système que nous avons conçu et réalisé. Nous commencerons par une présentation globale dont nous allons détailler les composants.

Le système mécanique de type plaque utilisé pendant les manipulations a été fournit par le laboratoire comme une partie déjà réalisée. La caractérisation de ce système est donc nécessaire pour vérifier la possibilité d'installation d'un système d'amortissement de vibrations. Par conséquent, nous allons vérifier la possibilité d'utilisation de notre conception de système distribué sans fil destiné à l'amortissement de vibrations sur la structure mécanique non optimisé.

Bien que l'architecture imposée contienne déjà la plaque équipée des éléments piézoélectrique, nous devrons choisir la solution pour le support et la suspension. Nous allons présenter le système proposé, ensuite en utilisant les simulations, nous allons vérifier numériquement la compatibilité mécanique vibratoire du système. Cela nous permet d'évaluer la performance de la solution du contrôle vibratoire. Ensuite, nous allons passer à la réalisation d'un système conçu et les mesures.

1.1. Présentation globale du système

La Figure II.1 présente le système mécanique de type plaque et la structure de suspension et de support, réalisé pour la vérification de la conception du système d'amortissement des vibrations en utilisant le réseau des capteurs sans fil. Cette figure présente le modèle du système, et la photo du système réalisé.

Nous pouvons distinguer les deux parties principales du système comme suit.

- **Structure mécanique : plaque en aluminium équipée des éléments piézoélectriques**

L'idéal aurait été de prendre un châssis d'une automobile existante (voir la Figure I.31). Mais devant la complexité de l'analyse, nous avons choisi une forme beaucoup plus simple : une plaque carrée est fabriquée en aluminium EN-7075 (Zircal). L'alliage 7075 est un alliage d'aluminium avec le zinc comme élément d'alliage principal [101]. Il a une solidité comparable à de nombreux aciers. Le côté de

la plaque a une longueur de 332 mm. Les détails physiques du matériau utilisé sont inclus dans l'Annexe I.

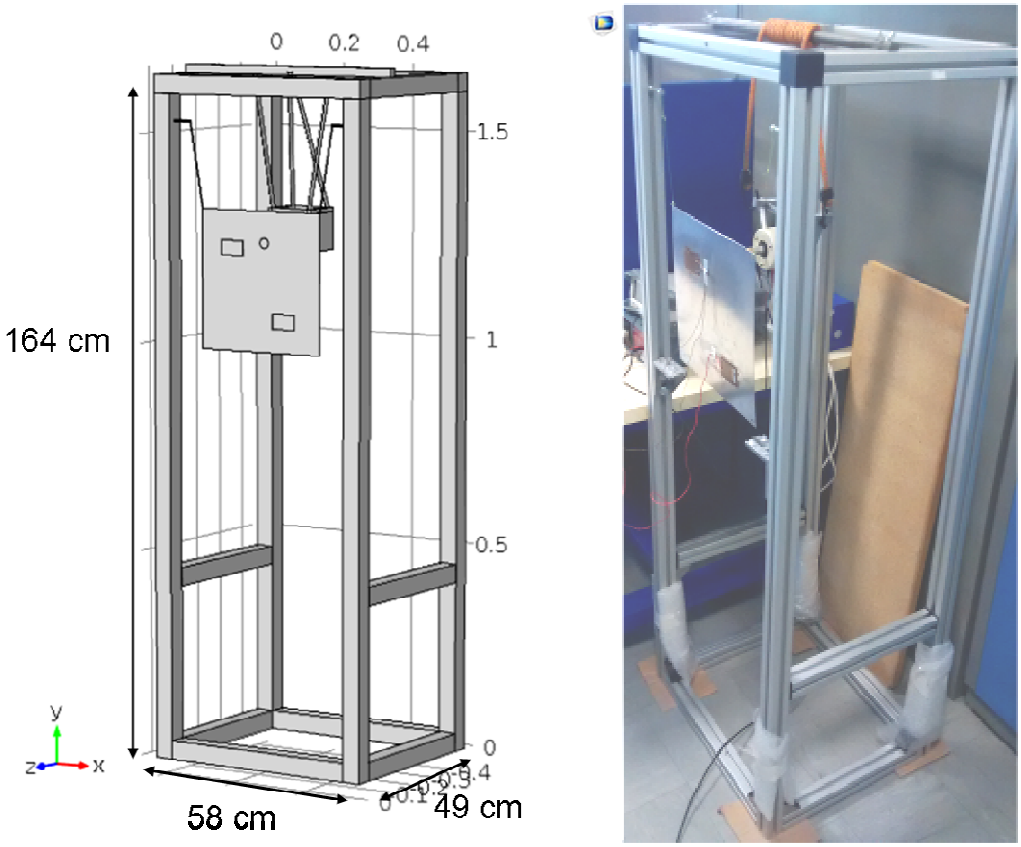


Figure II.1. Le système mécanique : la structure modélisée et la photo du système réalisé.

Les éléments piézoélectriques sont collés sur la plaque en aluminium. Cette distribution des éléments piézoélectriques permet de vérifier l'effet à la fois local et global d'amortissement des vibrations.

Les transducteurs « DuraACT P-876.A15 » fabriqués par « PI Ceramic » sont utilisés dans ce montage [102]. Ces éléments ont la surface de céramique piézoélectrique de 1500 mm² et les dimensions globales 61 mm × 35 mm × 0,8 mm. Ils sont composés de la céramique inorganique PZT (Titano-Zirconate de Plomb). Ce sont des transducteurs élastiques qui peuvent également être fixés sur les surfaces courbées. Ils peuvent fonctionner avec la tension électrique entre -250 V jusqu'à 1000 V. La valeur de la capacité interne est de 45 nF. Les autres propriétés du matériau piézoélectrique utilisé sont présentées l'Annexe I.

La Figure II.2 montre les dimensions détaillées de la plaque en aluminium, la position des éléments piézoélectriques et de point d'excitation.

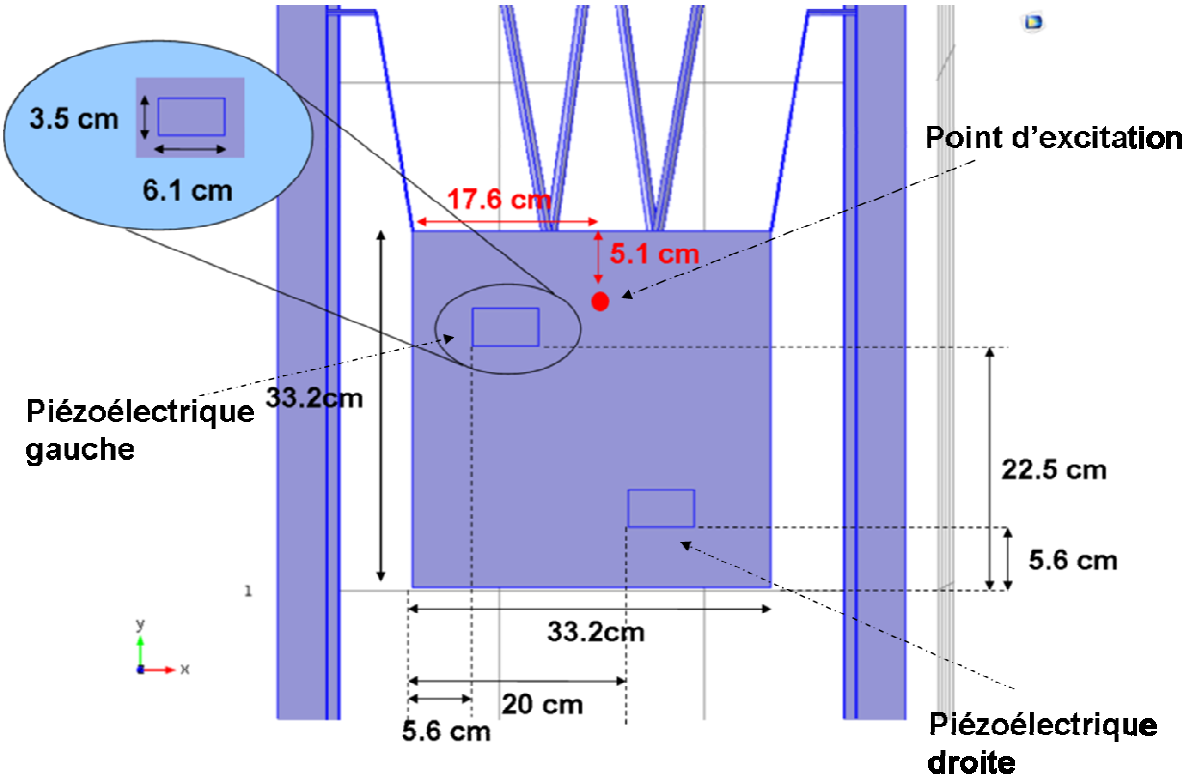


Figure II.2. Les dimensions détaillées de la plaque en aluminium : la position des éléments piézoélectriques et de point d'excitation.

- **Support, suspension avec fixations**

Le châssis simplifié est construit avec des profils en aluminium. Ils ont les dimensions 45 mm × 45 mm. Le matériau des profils est plus précisément l'aluminium EN-6060 (AlMgSi) [101] ; les éléments d'alliage sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). Les détails physiques du matériau utilisé sont inclus dans l'Annexe I.

Les fixations entre le pot vibrant et le châssis sont réalisées en utilisant quatre fils de nylon de diamètre 10 mm [103]. Les fixations entre la plaque et le châssis sont fabriquées en utilisant les deux fils de nylon de diamètre 1 mm. Les détails physiques du matériau utilisé sont inclus dans l'Annexe I.

Le pot vibrant installé dans le système est de type « M20/PA300E » fabriqué par la société « Data Physics » [104]. Selon la documentation du constructeur, la valeur maximale de la force sinusoïdale générée par le pot vibrant est de 240 N, la vitesse maximale 2446 ms^{-1}. Le pot vibrant peut générer les signaux jusqu'à 1000 Hz.

1.2. Schéma de principe de manipulations

La figure Figure II.3 présente le schéma de principe de manipulations. Selon cette figure, nous pouvons distinguer les dispositifs utilisés pendant les mesures. La génération de la force d'excitation est effectuée en utilisant le générateur de fonctions générales «Rigol DG1032». Le signal produit par le générateur est ensuite amplifié en utilisant l'amplificateur de 30W construit par «Data Physics». La sortie de l'amplificateur est connectée directement avec le pot vibrant installé sur la structure mécanique.

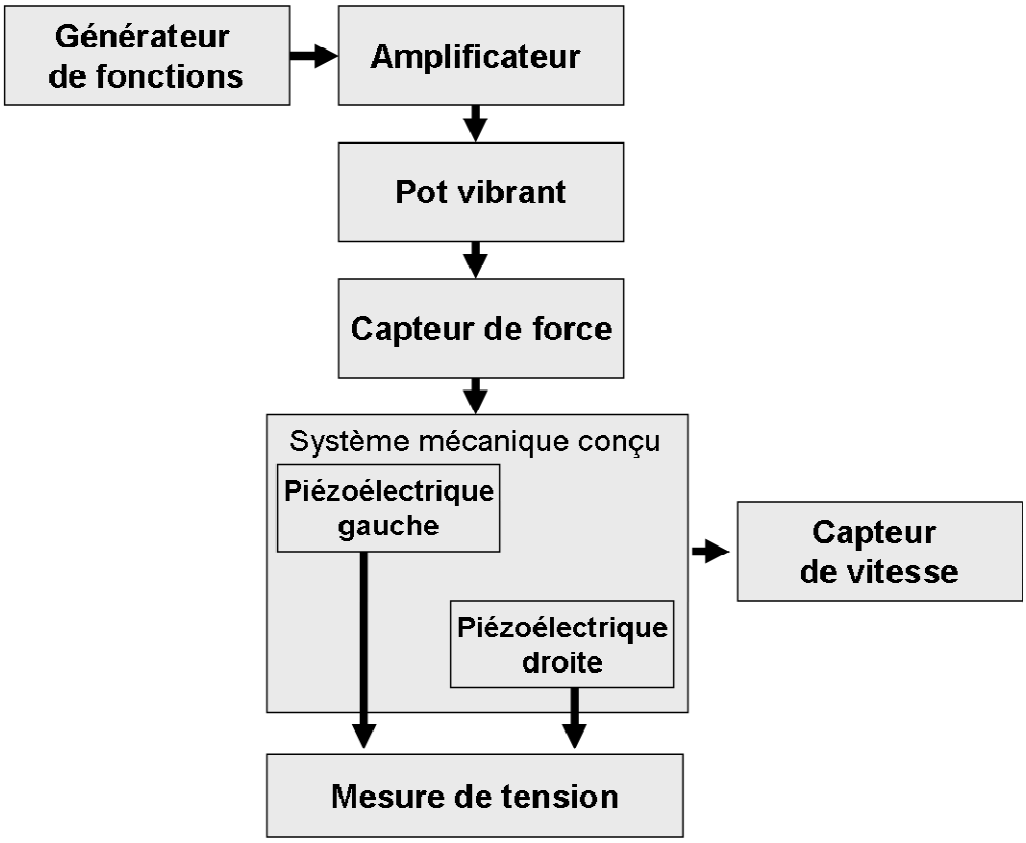


Figure II.3. Schéma de principe pour l'expérimentation.

Selon ce schéma, nous savons que deux capteurs sont utilisés pour les mesures. Un capteur de force mesure le signal d'entrée (la force d'excitation). Le deuxième est un capteur de vitesse laser, utilisé pour les mesures sans contact des vibrations de la plaque en aluminium équipée des éléments piézoélectrique.

- **Capteur de force**

Un capteur de force « PCB 208C02» est utilisé dans le système [105]. Il est installé entre le pot vibrant et la plaque en aluminium (Figure II.4). Il permet de

mesurer la valeur de la force générée. La sensibilité des mesures est de 11,08 mVN^{-1}. La sortie de capteur est lue en utilisant un oscilloscope électronique.

Figure II.4. Photo du capteur de force installé.

- **Capteur de vitesse**

Les vibrations sur la plaque en aluminium sont mesurées en utilisant un laser. Le vibromètre laser compact « CLV-3D » produit par « Polytec » est utilisé [106]. Il est préconisé pour les mesures simultanées sans contact avec les vibrations, grâce à un faisceau laser qui pointe la structure lorsqu'elle est en mode vibration.

Les mesures sont effectuées pour l'axe *z*, selon les coordonnées présentées sur la Figure II.2. Les points de mesures sont choisis selon les exigences de mesures effectuées. La Figure II.5 présente la photo de l'instrument utilisé. La sensibilité des mesures est de 5 $mms^{-1}V^{-1}$. La sortie de capteur est lue en utilisant l'oscilloscope électronique.

Figure II.5. La photo du vibromètre laser utilisé.

2 Résultats de simulations du système mécanique

Les simulations sont utilisées pour confirmer la compatibilité vibratoire du support et le système mécanique de type plaque et pour vérifier la capacité des réponses des éléments piézoélectriques (génération de la tension électrique).

Nous allons effectuer les deux types de simulations en utilisant le logiciel « COMSOL 5 ». La simulation de modes propres du système sera utilisée pour identifier le mode de vibrations du système. La simulation de la physique du piézoélectrique permettra de modéliser l'effet piézoélectrique et les propriétés électriques des éléments piézoélectriques.

2.1. Présentation du modèle implémenté

La Figure II.6 présente un modèle implémenté dans le logiciel « COMSOL 5». Celui-ci correspond au système mécanique paramétré par les dimensions géométriques et propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés (les caractéristiques des matériaux utilisés sont présentées dans l'Annexe I).

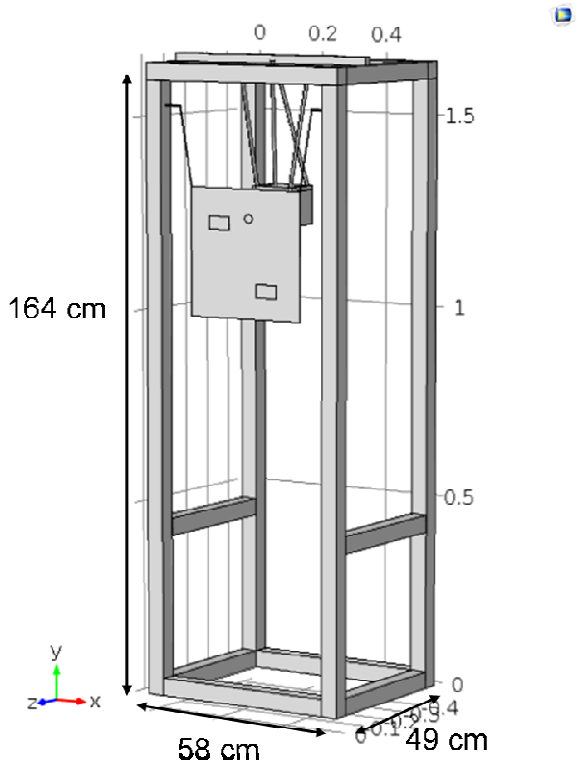


Figure II.6. Le modèle du système mécanique.

Les différences entre le modèle de simulation et les composants utilisés pour la réalisation d'un système mécanique sont les suivantes :

- La forme des profilés en aluminium est simplifiée en un parallélépipède,
- Les vis pour les connexions entre les profils sont négligées,
- La construction du pot vibrant est simplifiée en un seul cylindre en aluminium,
- Le modèle n'inclut pas le capteur de force,
- L'isolation de la céramique piézoélectrique est négligée,
- Les fixations entre le châssis et les éléments en nylon sont simplifiées.

Le logiciel « COMSOL 5.0 » permet d'implémenter les simulations multi physiques. Dès lors, nous implémentons :

- La physique de la mécanique du solide pour assurer les simulations des modes de vibrations.
- La physique du piézoélectrique pour modéliser l'effet piézoélectrique et les propriétés électriques des éléments piézoélectriques.

2.2. Modes de vibrations du système simulé

L'analyse des fréquences propres du système mécanique est effectuée. Les résultats permettent d'identifier celles-ci ainsi que les formes de modes des vibrations. Grâce aux simulations, nous pouvons déterminer la position des éléments piézoélectriques en relation avec les modes de vibrations.

2.2.1. Modes de vibrations de la plaque

Les simulations effectuées ont permis d'identifier les trois fréquences de vibrations modales : 47,937 Hz, 113,65 Hz, 247,95 Hz. Nous allons présenter les résultats de ces simulations. Les formes de déformations pour ces fréquences sont présentées respectivement sur la Figure II.7, la Figure II.8 et la Figure II.9. Nous présentons aussi le zoom de la plaque en aluminium pour identifier la position et les déformations des éléments piézoélectriques installés sur la plaque.

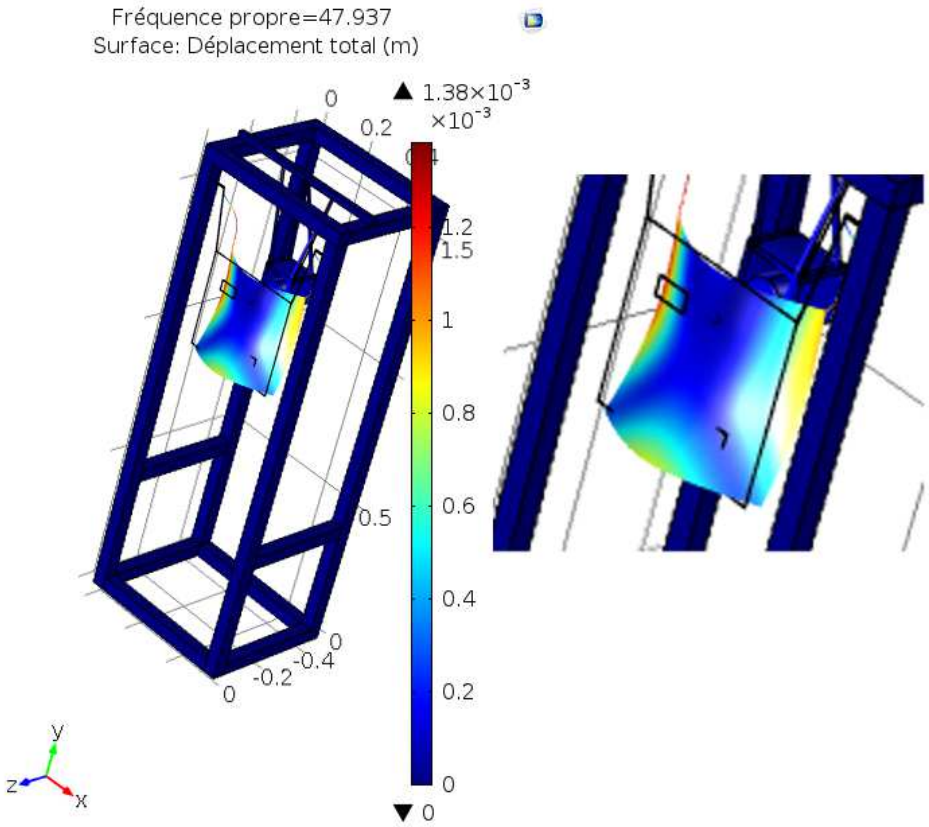


Figure II.7. Les résultats de simulations des fréquences propres. La fréquence de 47,937 Hz.

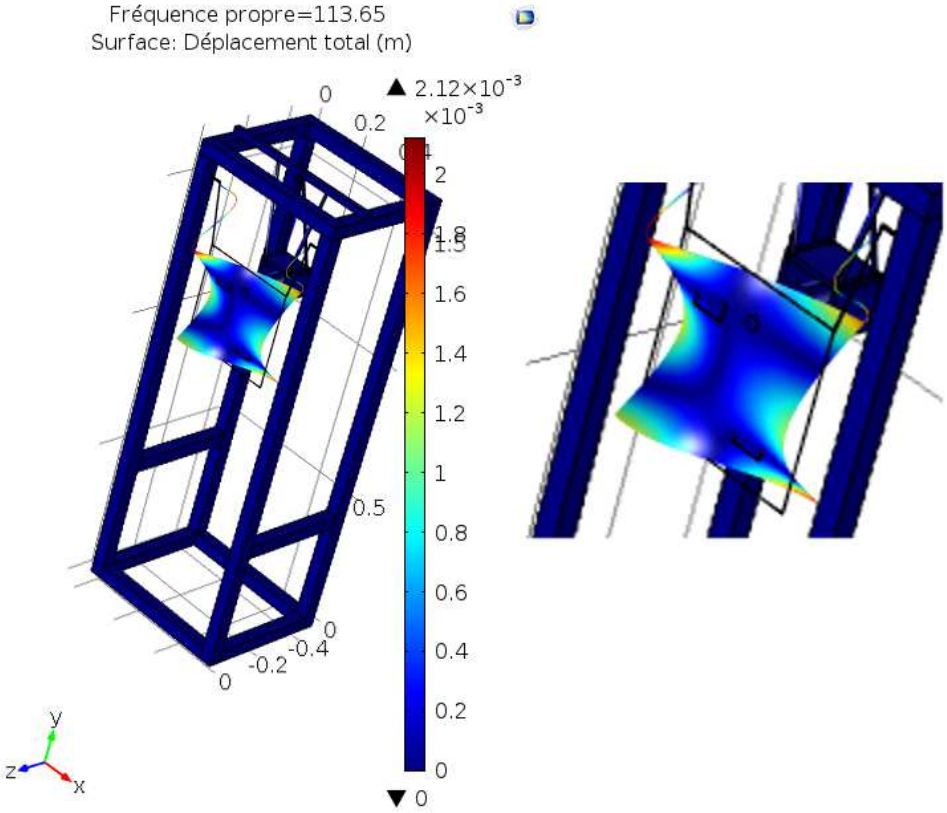


Figure II.8. Les résultats de simulations des fréquences propres. La fréquence de 113,65 Hz.

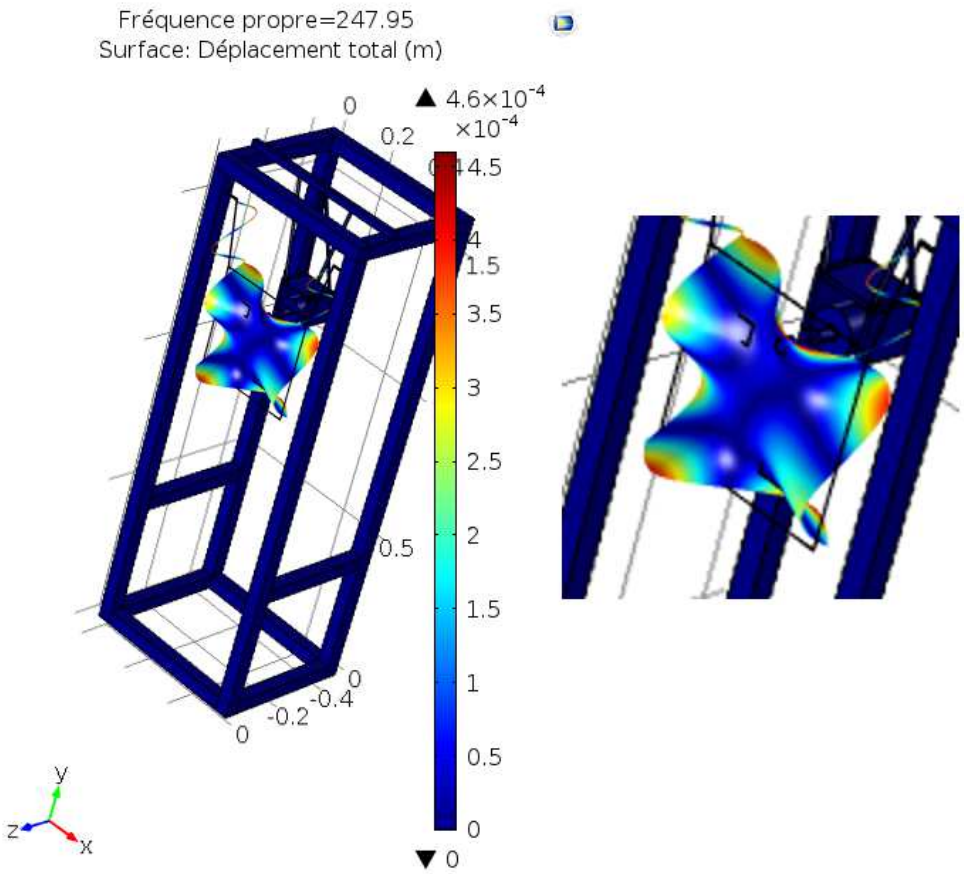


Figure II.9. Les résultats de simulations des fréquences propres. La fréquence de 247,95 Hz.

Grâce aux résultats de simulations, nous pouvons voir la forme des déformations du système mécanique. Les résultats de simulations montrent que pour les fréquences modales identifiées la plaque en aluminium est bien déformée. En même temps, le châssis reste indéformé.

Nous pouvons aussi voir la déformation des éléments piézoélectriques et leur position par rapport du ventre d'onde de vibrations. L'effet piézoélectrique maximal est attendu pour les déformations locales de système mécanique quand la déformation de l'élément piézoélectrique est signifiante.

Les résultats permettent de supposer que pour ces fréquences modales, l'énergie mécanique n'est portée que par les déformations de la plaque en aluminium. Par conséquent, le système mécanique vibre en un seul mode de vibrations. La fréquence du signal électrique générée par les éléments piézoélectriques doit correspondre à la fréquence de mode de vibrations.

2.2.2. Modes de vibrations de la structure et de la suspension

Les simulations ont permis d'identifier les fréquences de modes de vibrations de la structure et de la suspension. Les résultats montrent que pour ces fréquences, le système est déformé en plusieurs parties. Ainsi, l'énergie est répartie sur la structure du système.

La Figure II.10 présente l'exemple de la forme de déformation pour la fréquence de 136,74 Hz.

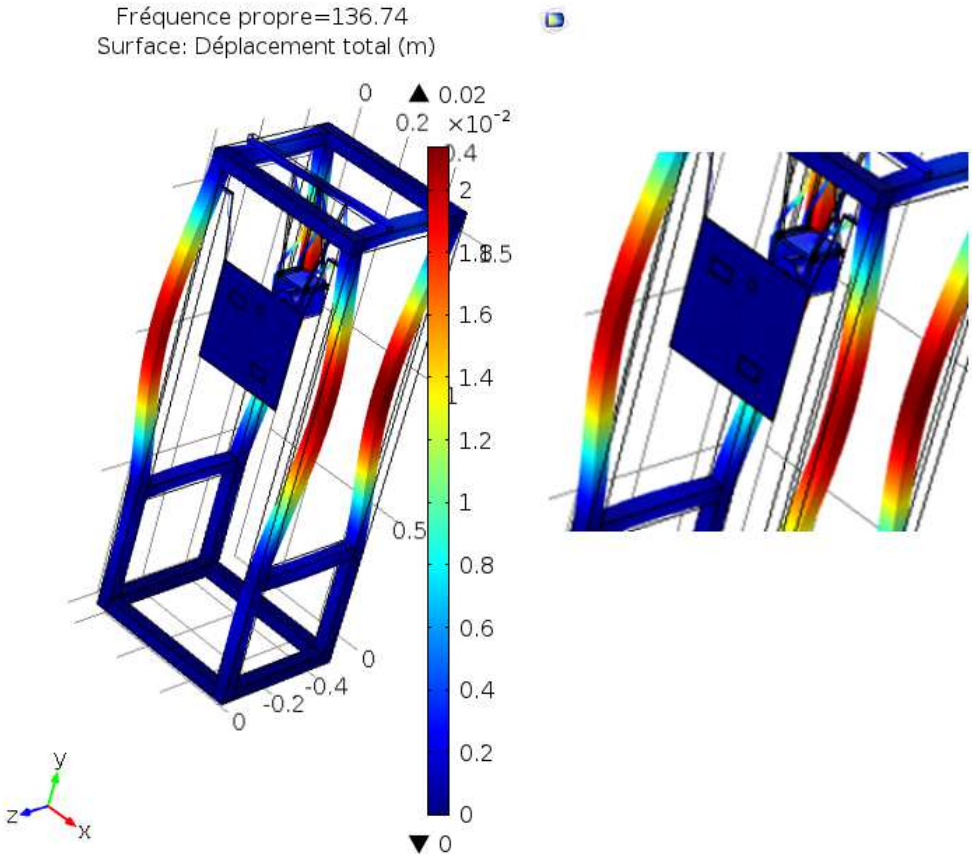


Figure II.10. Les résultats de simulations des fréquences propres. La fréquence de 167,66 Hz.

Les résultats de simulations pour les autres fréquences identifiés en simulations sont présentés dans l'Annexe II.

Pour résumer, lorsque le système est excité avec ces fréquences, l'énergie mécanique est répartie sur les différentes parties de la structure mécanique. Ainsi, nous pouvons supposer que la tension générée par les éléments piézoélectrique est

composée de plusieurs signaux harmoniques correspondants aux déformations de plusieurs parties différentes du système mécanique.

2.3. Simulations des éléments piézoélectriques

Lorsque la réponse du système mécanique est simulée et les formes de vibrations ont été identifiées, nous pouvons passer aux simulations des éléments piézoélectriques.

La Figure II.11 montre les valeurs simulées du potentiel électrique des éléments piézoélectriques installés sur la plaque en aluminium. Sur cette figure, nous avons identifié les pics correspondant aux vibrations modales de la plaque.

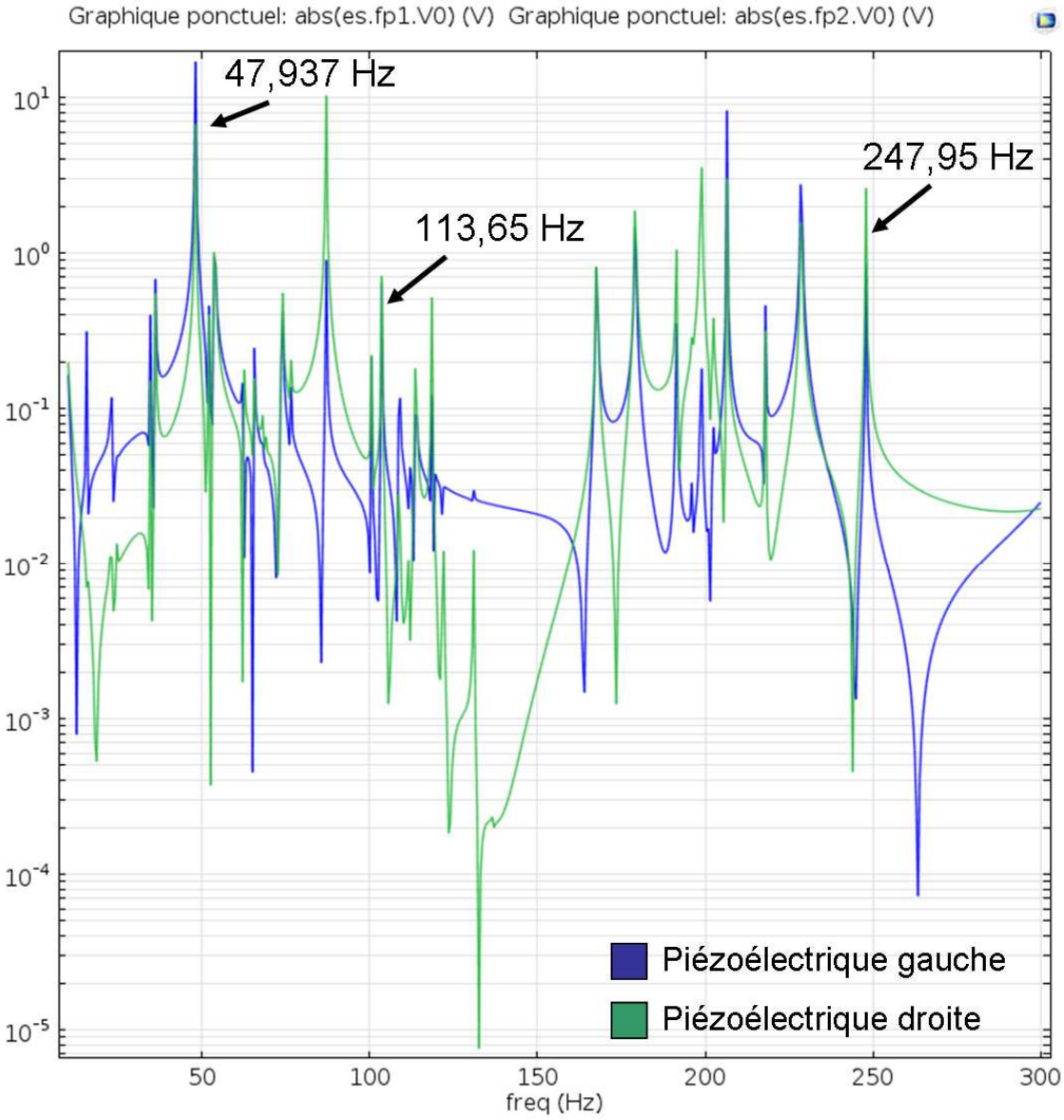


Figure II.11. Le potentiel électrique d'éléments piézoélectriques simulés.

L'analyse fréquentielle est réalisée pour étudier les résultats de la simulation de la réponse du système excité. La force d'amplitude 0,41 N est ajoutée au modèle présenté selon l'axe *z* dans le point d'excitation. En effet, cette valeur d'amplitude correspond à la valeur moyenne mesurée par le capteur de force pendant les essais de mesures.

Les résultats présentés sur cette figure valident la conception du système mécanique réalisé. La réponse des éléments piézoélectrique (la tension générée) contient les valeurs significative pour plusieurs pics correspondent aux différents modes du système mécanique simulé. Les différences entre les tensions générées par les deux éléments piézoélectriques sont liées aux formes de déformation (les modes de vibrations). Les résultats présentés valident aussi la compatibilité vibratoire du support et la plaque en aluminium.

Alors quand les simulations ont confirmé la conception du système, nous pouvons passer à la réalisation d'un système mécanique. Nous allons assembler un système analogue à celui simulé et ensuite nous allons le caractériser par les mesures.

3 Résultats de mesure du système mécanique.

Une fois les simulations effectuées, nous traiterons successivement de la réponse du système mécanique réalisé et les tensions générées par les piézoélectriques installés.

3.1. Réponse du système mécanique

La fonction de transfert du système mécanique est mesurée pour identifier les fréquences de résonance du système. La force sinusoïdale d'amplitude fixée est générée. La fréquence de la force varie entre 10 Hz et 300 Hz. La vitesse des vibrations est mesurée en un point situé au milieu de l'élément piézoélectrique de gauche (Figure II.12). La valeur de la force appliquée est mesurée en utilisant le capteur de force installé.

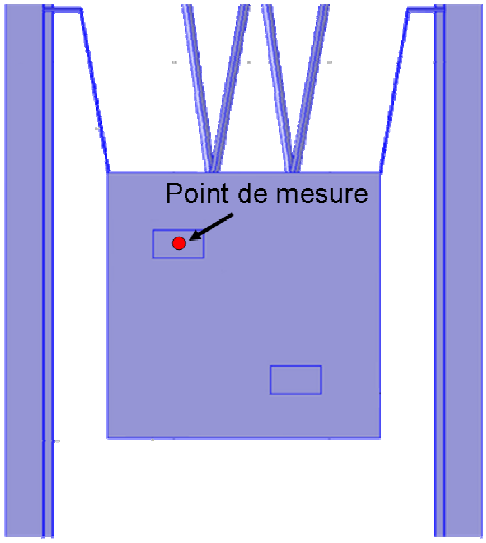


Figure II.12. Le point de mesure de la vitesse de vibrations.

La Figure II.13 présente les résultats des mesures effectuées de la fonction de réponse en fréquence. Cette figure présente un rapport entre les valeurs de la vitesse des vibrations de la plaque et la force appliquée. La courbe est représentée en échelle logarithmique (dB). La caractéristique mesurée permet d'identifier les fréquences résonantes du système. Selon cette fonction de transfert, nous pouvons identifier les pics correspondant aux fréquences de résonance du système.

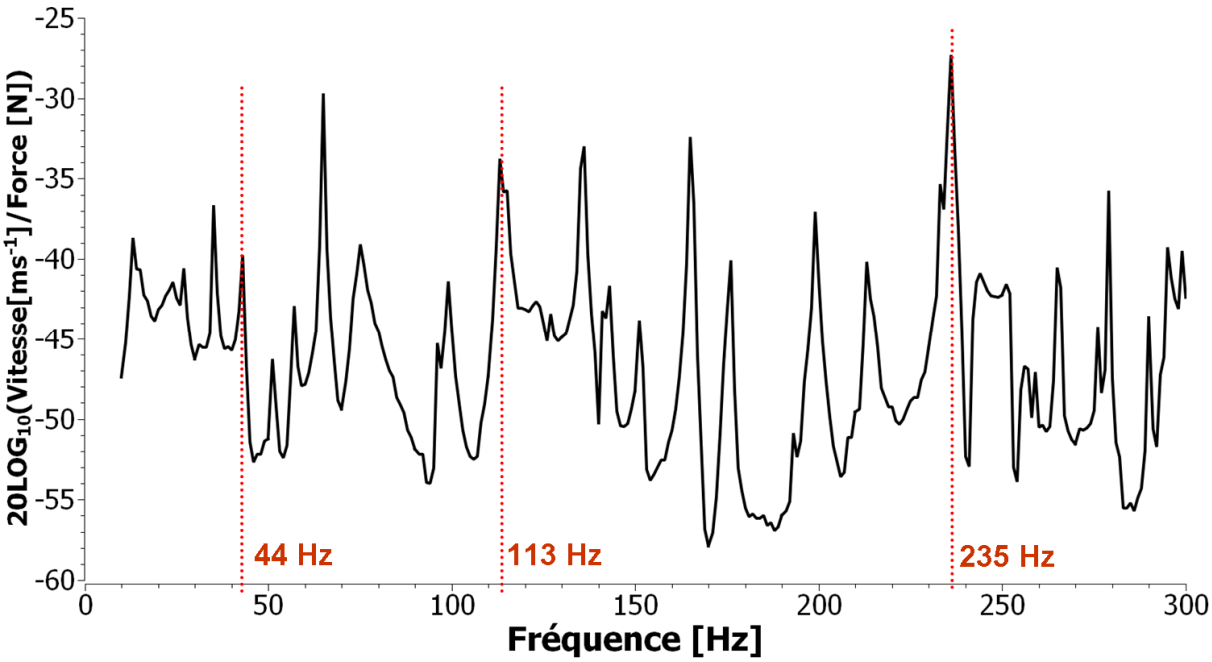


Figure II.13. La fonction de réponse en fréquence du système mécanique.

Pour identifier les modes de vibrations, une FFT (Fast Fourier Transform) de vitesse est ensuite calculée. Les résultats montrent les deux réponses possibles du système : les vibrations mono-fréquentielles et les vibrations multi-fréquentielles, que nous allons expliciter.

3.1.1. Vibrations mono fréquentielles

Les vibrations mono fréquentielles sont identifiées pour les fréquences de la force d'excitation: 44 Hz, 113 Hz et 235 Hz. La Figure II.14 présente les calculs de FFT des vitesses de vibrations mesurées.

Les caractéristiques FFT contiennent aussi des pics de faible amplitude. Cependant la différence d'amplitude entre ces derniers et le pic majeur permet de les négliger (les différences des amplitudes sont présentées sur les figures).

Dans les vibrations modales de la plaque (mono-fréquentielles), nous supposons que toute l'énergie mécanique est transférée selon un seul mode de vibrations.

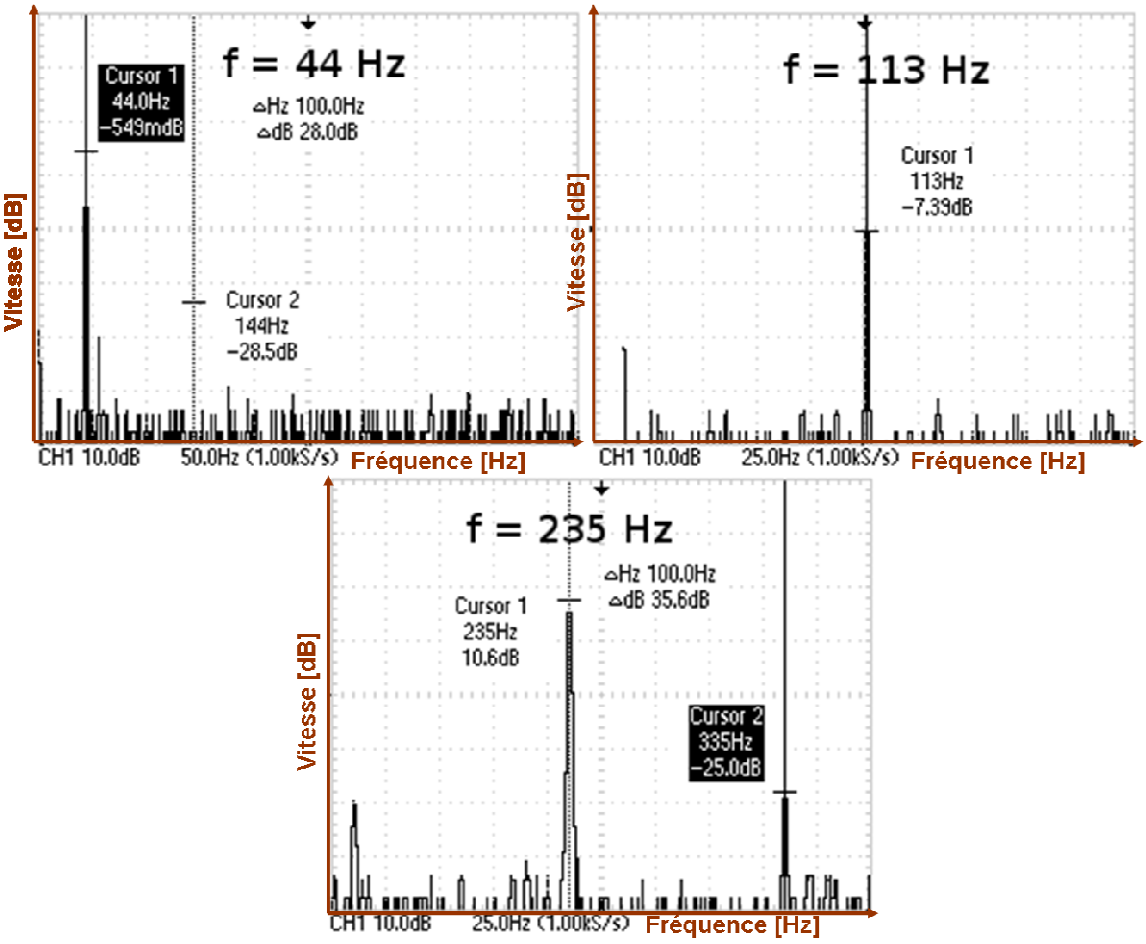


Figure II.14. Les vibrations mono-fréquentielles identifiées.

3.1.2. Vibrations multi-fréquentielles

L'examen FFT de vitesse pour les autres pics de fonction réponse en fréquences (33 Hz, 57 Hz, 65 Hz, 75 Hz, 135 Hz, 165 Hz, 199 Hz, 213 Hz, 266 Hz, 297 Hz) permet d'identifier les vibrations multi-fréquentielles. Les Figure II.15 et Figure II.16 montrent les résultats obtenus pour les fréquences mentionnées.

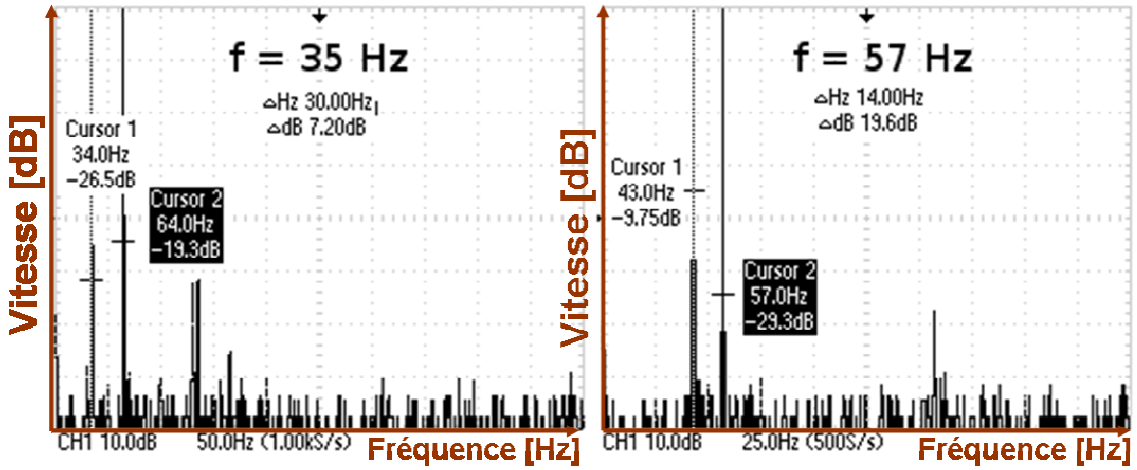


Figure II.15. Les vibrations multi-fréquentielles. Partie 1.

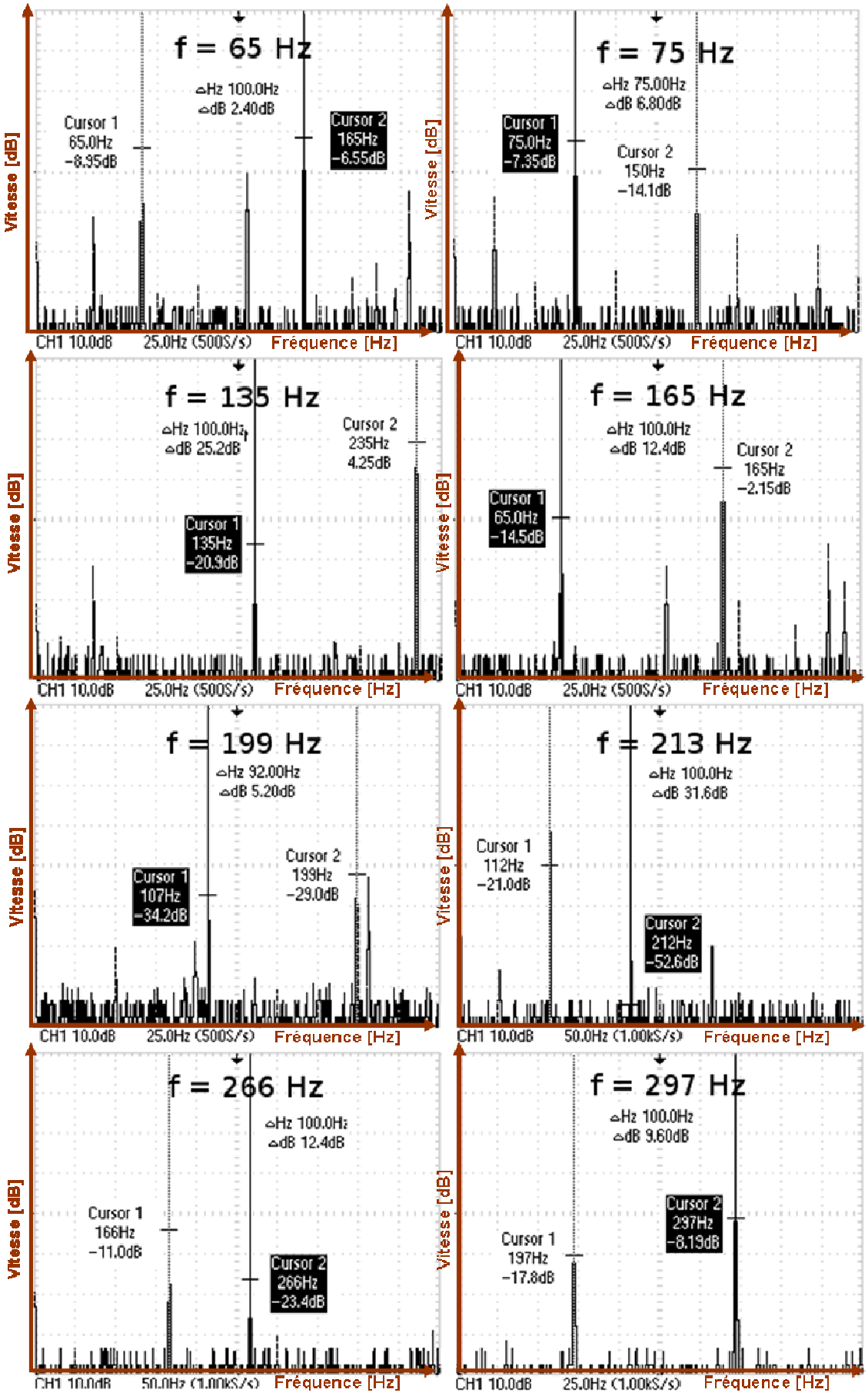


Figure II.16. Les vibrations multi-fréquentielles. Partie 2.

Les figures ci-dessus présentent la réponse du système mécanique pour l'excitation sinusoïdale.

Nous pouvons identifier plusieurs pics sur chaque caractéristique. Dans certains cas, la fréquence de pics plus forts ne correspond pas à la fréquence de la force d'excitation. Dès lors, l'énergie est donc distribuée entre plusieurs modes de vibrations couplés identifiés.

3.2. Tension générée par les éléments piézoélectriques

Lorsque la plaque en aluminium est excitée, les éléments piézoélectriques concernés sont également déformés. La déformation de ces éléments piézoélectriques provoque la génération d'une tension électrique.

Cette section porte sur les mesures de la tension générée par les éléments piézoélectriques. La fonction de transfert est comparée avec la tension générée. Puis, les tensions des deux éléments piézoélectriques sont présentées.

3.2.1. Comparaison de la tension piézoélectrique et la fonction de transfert

La Figure II.17 illustre la tension électrique mesurée aux bornes de l'élément piézoélectrique gauche et la fonction de transfert. Les deux valeurs sont normalisées avec la valeur de la force d'excitation et présentées en échelle logarithmique (dB).

Selon la figure présentée, nous pouvons noter que la forme de la tension générée par l'élément piézoélectrique correspond à la forme de la fonction de transfert.

La valeur de la tension est donc reliée directement à la réponse du système. Bien que la différence d'amplitude, entre les deux caractéristiques, puisse être observée, les fréquences de résonance restent inchangées.

Comme nous avons une structure mécanique imposée déjà caractérisé, nous pouvons identifier les fréquences pour lesquelles le contrôle pourrait être plus efficace (le couplage électromécanique est plus efficace).

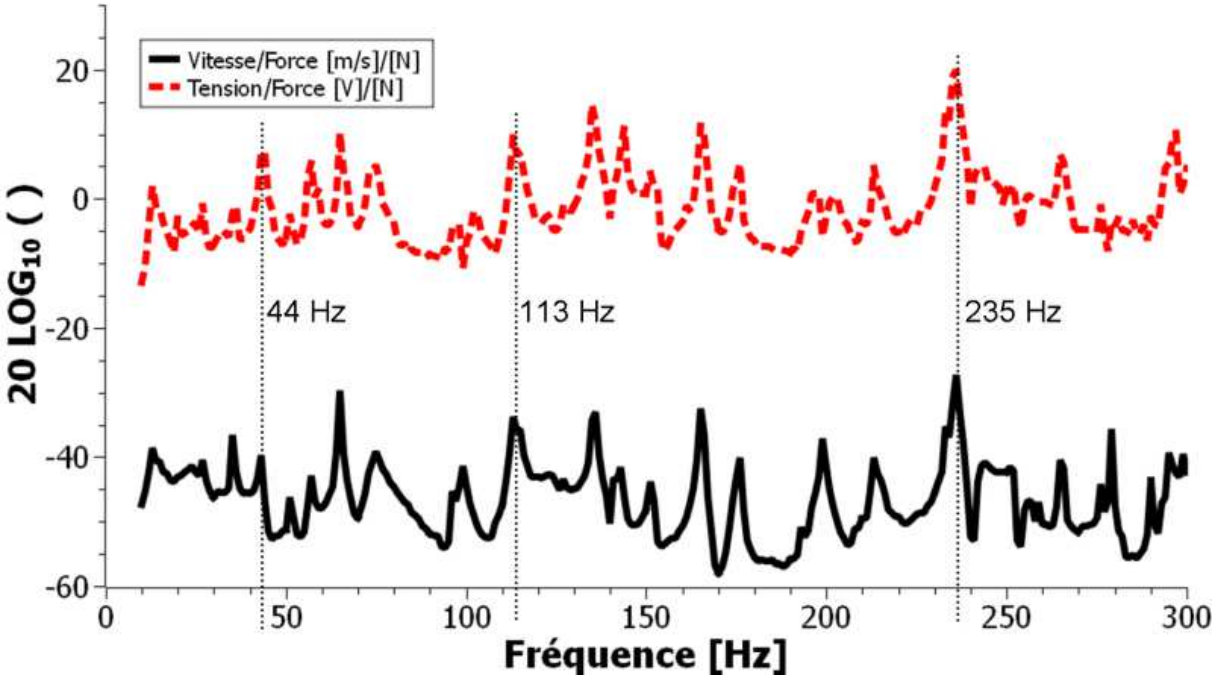


Figure II.17. La tension électrique du piézoélectrique gauche et la fonction de transfert du système mécanique.

3.2.2. Mesure de la tension aux bornes des deux éléments piézoélectriques installés

Rappelons que le système mécanique proposé contient deux piézoélectriques. La Figure II.18 montre les tensions générées par deux éléments piézoélectriques en fonction de la fréquence de la force d'excitation.

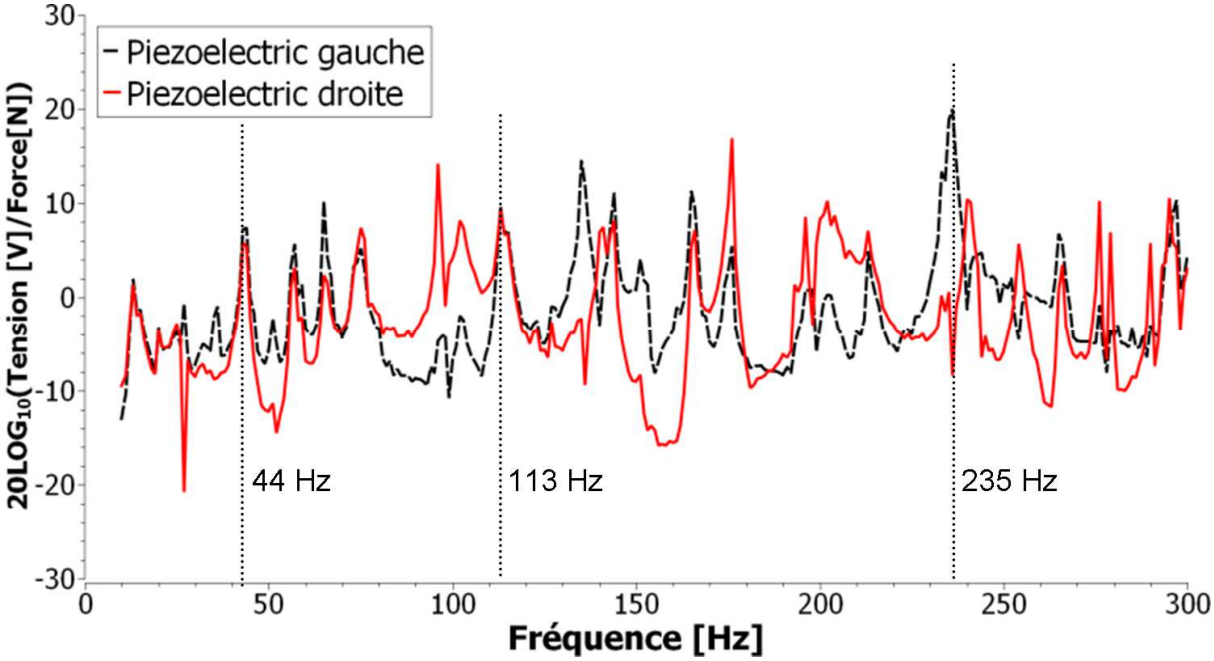


Figure II.18. Les tensions électriques mesurées aux bornes des éléments piézoélectriques.

Selon la caractéristique montrée, nous pouvons identifier les différences entre les valeurs des tensions générées par les deux éléments piézoélectriques. Bien que les pics aient les mêmes fréquences, la différence d'amplitude entre les deux tensions mesurées est bien visible. Ces différences sont reliées aux formes de modes des vibrations de la plaque.

On constate aussi que pour les vibrations mono-fréquentielle, la tension générée par les éléments piézoélectriques a une forme sinusoïdale. Quand le système répond en plusieurs fréquences de vibrations, la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique est composée d'harmoniques. Les éléments piézoélectriques présentent des dimensions importantes qui ne peuvent pas être négligées. Cependant, la tension générée est une fonction des déformations sur la surface de l'élément piézoélectrique. Dès lors, la tension générée correspond à la déformation de la plaque et celle-ci se déforme quand le système vibre selon plusieurs modes de vibrations.

3.3. Comparaison des résultats de simulations et de mesures

Nous pouvons maintenant comparer les valeurs de fréquences mesurées avec les résultats de simulations.

La Table II.1 présente l'écart relatif entre les valeurs de fréquences simulés et mesurés pour les vibrations mono-fréquentielles.

Fréquences mesures [Hz]	*44*	*113*	*235*
Fréquence simulée [Hz]	*47,93*	*113,65*	*247,95*
L'écart relatif	*8,9 %*	*0,6 %*	*5,5 %*

Table II.1. L'écart relatif entre les fréquences mesurées et simulées.

La Table II.2 présente le calcul d'écart relatif entre les fréquences mesurées et simulées pour des vibrations multi-fréquentielles. Nous voyons que les simulations restent en d'accord acceptable avec les mesures effectuées.

Fréquences mesures [Hz]	*35*	*57*	*65*	*75*	*135*	*165*	*199*	*213*
Fréquences simulées [Hz]	*34,48*	*53,68*	*65,84*	*76,42*	*136,74*	*167,66*	*200,9*	*217,96*
L'écart relatif	*1,5%*	*5,8%*	*1,2%*	*1,89%*	*1,29%*	*1,61%*	*0,98%*	*2,33%*

Table II.2. L'écart relatif entre les fréquences mesurées et simulées.

Nous pouvons identifier la similarité entres les simulations et mesure notamment dans les valeurs de fréquences identifiés.

Bien que les fréquences simulées ne soient pas égales à celles mesurées, l'écart relatif reste acceptable. Ainsi, nous pouvons supposer que la forme de déformation de la plaque dans le système réalisé correspond bien à la forme donnée par les simulations.

4 Cahier de charges pour un système électronique

Le système mécanique équipé des éléments piézoélectriques a été réalisé selon les exigences obtenues sur la base d'état de l'art présenté dans le premier chapitre de cette thèse. Les mesures effectuées permettent de caractériser ce système. Les simulations effectuées offrent une explication plus détaillée des phénomènes observés. Nous avons identifié les modes de vibrations du système et les formes de déformation. La tension des éléments piézoélectriques est mesurée et comparée avec la réponse du système et avec les valeurs simulées.

Nous avons observé une bonne corrélation entre les calculs et les essais dans l'estimation de fréquences et des déformations pour lesquelles les éléments piézoélectriques sont plus efficaces. Toutefois les performances du système du contrôle et du nœud WSN électronique doivent être vérifiées.

Nous avons prouvé que le système mécanique de type plaque imposé avec les systèmes de support et de suspension conçus peut être utilisable pour la validation d'efficacité d'un système d'amortissement de vibrations distribué composé de réseau de capteurs sans fil. Le chapitre III présente la conception et la réalisation de ce réseau.

Les résultats de ce chapitre permettent d'identifier les exigences et les caractéristiques pour un nœud WSN de système d'amortissement de vibrations :

- Gamme de fréquence de vibrations : 10 Hz ÷ 300 Hz,
- La tension électrique opérationnelle : ± 15 V,
- La forme de la tension générée : sinusoïdale éventuellement avec déformations,
- La FFT du signal électrique généré : peut avoir plusieurs pics de forte amplitude.

Chapitre III Conception et réalisation du réseau de capteurs sans fil pour le contrôle actif de vibrations

Ce chapitre présente la conception et la réalisation du réseau de capteurs sans fil pour le contrôle actif de vibrations ; dans le but de valider cette architecture, un prototype de réseau de capteurs sans fil de contrôle actif distribué de vibrations sera mis en place. En premier lieu, nous introduisons les fonctionnalités et les exigences d'un nœud du réseau de capteurs sans fil. Puis, la conception d'un nœud WSN est exposée. Les circuits électroniques proposés sont simulés. Ensuite, nous introduisons la réalisation d'un prototype du nœud. Afin, les résultats des simulations seront comparés aux mesures sur le prototype.

1 Introduction : un schéma synoptique du nœud sans fil proposé

En ce qui concerne la conception du système distribué d'amortissement de vibrations, le nœud WSN fournit plusieurs fonctionnalités. Il est capable de mesurer les vibrations, les amortir et récupérer l'énergie provenant des vibrations en utilisant un seul élément piézoélectrique. Selon ces exigences nous pouvons établir un schéma synoptique d'un nœud WSN (Figure III.1).

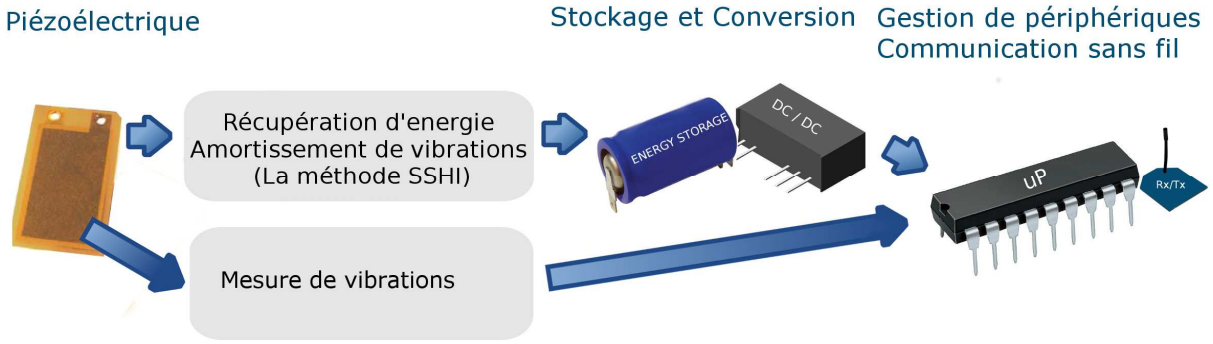


Figure III.1. Le diagramme d'un nœud WSN proposé.

Nous pouvons donc distinguer plusieurs modules du nœud WSN, à savoir :

- gestion de périphériques,
- communication sans fil,
- stockage et conversion d'énergie,
- mesure de vibrations,
- amortissement de vibrations et la récupération d'énergie depuis les vibrations (la méthode SSHI).

Le premier chapitre de cette thèse a introduit la structure générale d'un nœud sans fil. L'état de l'art a permis aussi d'identifier les différentes solutions utilisées. Ensuite, le chapitre II a abordé le cahier des charges provenant du système mécanique. Dans cette section, il sera nécessaire de présenter l'étude de l'élément piézoélectrique d'un point de vue électrique, et les solutions des circuits électroniques. Ensuite, les détails des solutions choisies pour toutes les parties du nœud WSN seront expliqués.

2 Résultats d'études d'élément piézoélectrique

Pour identifier les exigences pour les modules de la mesure de vibration, de la récupération d'énergie, et de l'amortissement de vibrations, et aussi pour trouver une solution de la connexion de ces trois modules en utilisant un seul l'élément piézoélectrique, nous allons étudier en détail d'un point de vue électrique d'élément piézoélectrique installé sur le système mécanique. Tout d'abord, nous introduisons le modèle équivalent générique électrique de l'élément piézoélectrique.

2.1. Circuit équivalent de l'élément piézoélectrique

La Figure III.2 présente un modèle équivalent électrique générique d'élément piézoélectrique proposé par Butterworth-Van Dyke [107]. Le piézoélectrique est, dans ce cas, modélisé par une capacité fixe C_o qui traduit son comportement électromagnétique, associée en parallèle avec une branche R-L-C série qui représente le comportement vibratoire de l'élément.

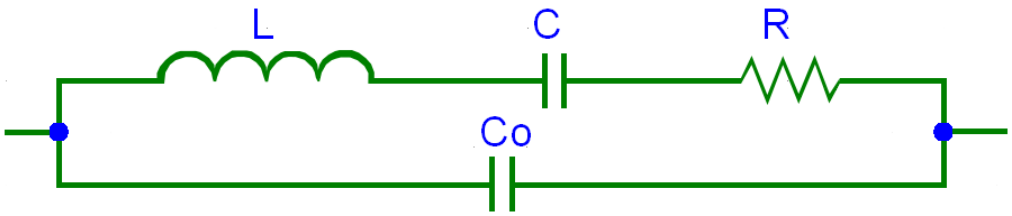


Figure III.2. Le circuit équivalent de l'élément piézoélectrique.

De plus, le modèle contient un condensateur C_o équivalent à la capacité entre les deux électrodes de l'élément piézoélectrique. Ensuite, l'inductance L traduit l'existence de l'inertie mécanique, le condensateur C traduit l'existence des forces de rappel, alors que la résistance R vient des pertes du cristal piézoélectrique.

L'impédance Z du modèle est exprimée par l'équation (III.1). À cause de la valeur très faible des pertes, nous simplifions l'équation prenant R = 0.

$$Z = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{j\left(\omega^2 L C_0 - \left(1 + \frac{C_0}{C}\right)\right)} \qquad \text{(III.1)}$$

Selon cette équation, nous pouvons noter que l'impédance a une valeur nulle pour la pulsation de résonance ω_r et une valeur infinie pour la pulsation d'antirésonance ω_a. Nous avons défini donc deux pulsations : ω_r pour la résonance série et ω_a pour la résonance parallèle, appelées ci-dessus résonance et antirésonance. Les formules de ces pulsations sont représente par l'équation **(III.2)**.

$$\omega_r^{\,2} = \frac{1}{LC} \; ; \; \omega_a^{\,2} = \frac{C_0 + C_s}{LC_0C_s} \qquad \textbf{(III.2)}$$

La Figure III.3 présente la courbe d'impédance pour le modèle d'oscillateur piézoélectrique présenté.

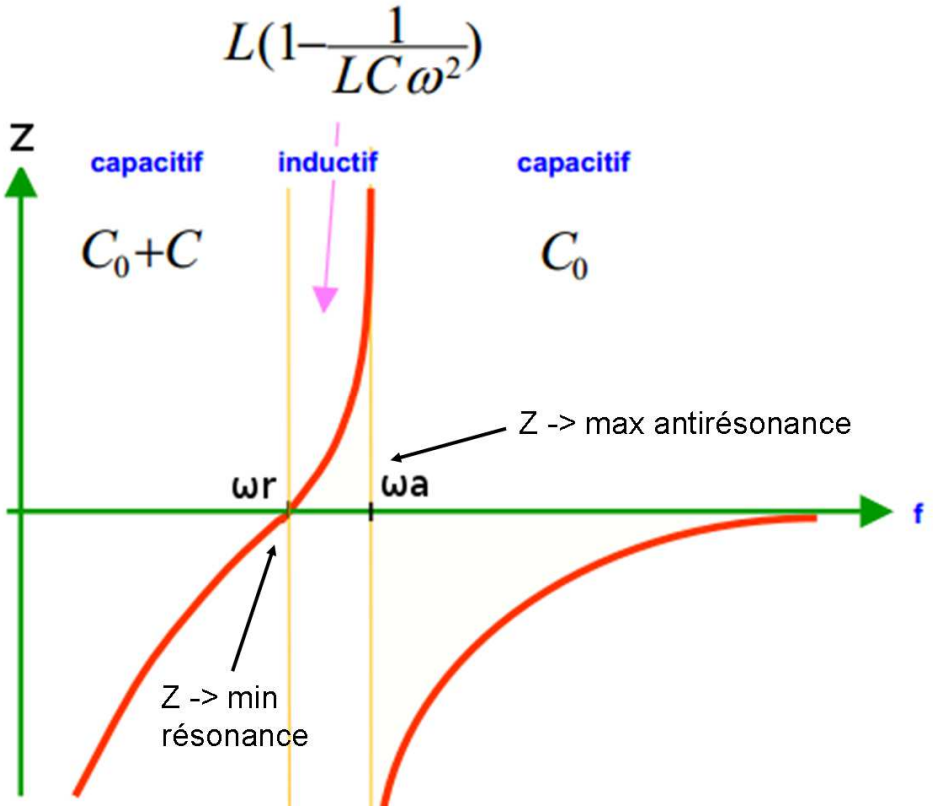


Figure III.3. L'impédance théorétique de l'élément piézoélectrique modélisé [108].

Selon cette caractéristique, nous voyons que l'élément piézoélectrique a un caractère inductif (l'impédance est positive) pour les fréquences comprises entre ω_r et ω_a. Dès lors, pour les fréquences inférieures à la fréquence ω_r et supérieure à la fréquence ω_a, l'élément piézoélectrique présente un caractère capacitif (l'impédance a une valeur négative).

Après avoir présenté les principes de l'élément piézoélectrique et son modèle électrique équivalent, nous passons aux mesures de l'élément piézoélectrique fixé sur notre système mécanique.

2.2. Caractéristique d'élément piézoélectrique

La Figure III.4 présente un schéma du circuit électrique utilisé pour identifier la caractéristique du piézoélectrique (DuraACT P-876.A15) fixé sur le système mécanique. Le montage utilisé est un montage classique d'étude d'un résonateur [109].

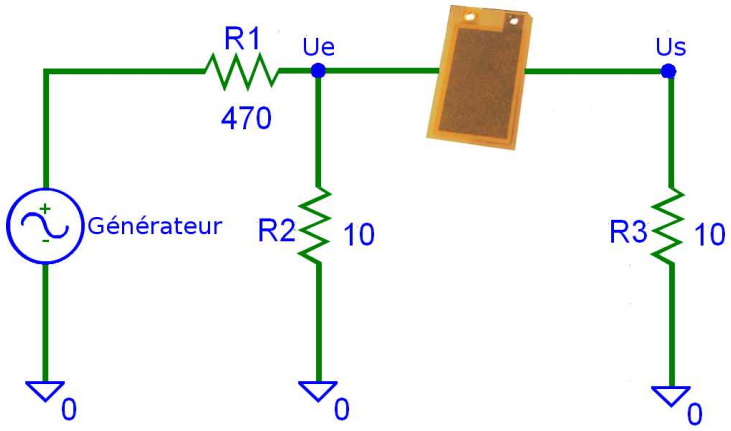


Figure III.4. Le schéma électrique utilisé pour étudier un élément piézoélectrique [109].

En utilisant le générateur, nous appliquons une tension alternative sinusoïdale d'amplitude fixée sur les bornes de l'élément piézoélectrique. En mesurant les tensions U_S et U_E pour les différentes fréquences, nous pouvons identifier la caractéristique de transfert de cet élément en amplitude et en phase.

La Figure III.5 présente les résultats de mesures de la phase de l'élément piézoélectrique.

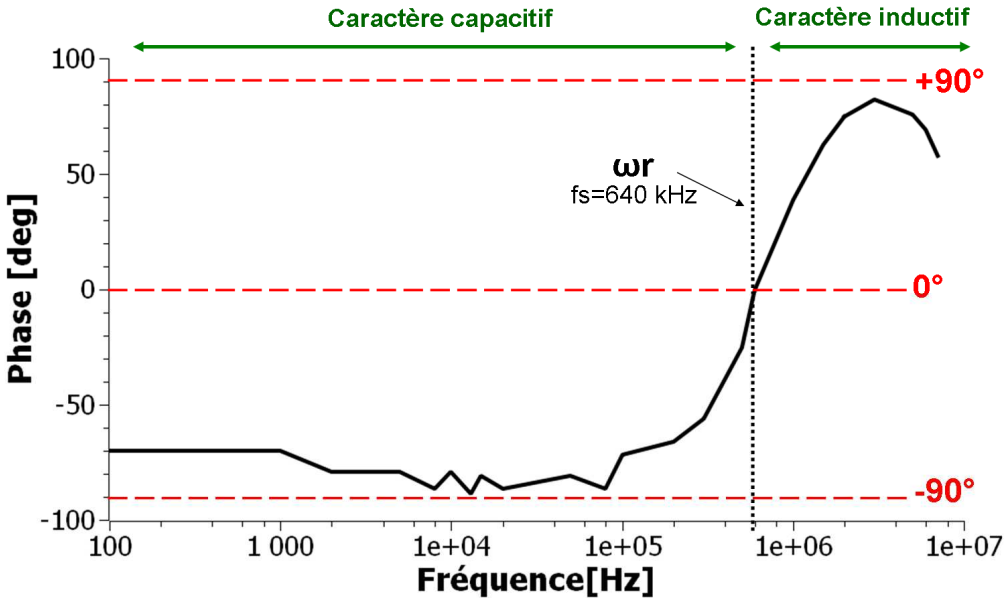


Figure III.5. La caractéristique de phase de l'élément piézoélectrique fixé sur la plaque en aluminium.

Nous avons mesuré la fréquence résonante correspondant à la pulsation de résonance ω_r de 640 kHz. La mesure a confirmé aussi le caractère capacitif de l'élément piézoélectrique pour les fréquences inférieures à la pulsation de résonance ω_r.

La Figure III.6 présente les résultats de mesures de la caractéristique d'amplitude de l'élément piézoélectrique fixé sur la plaque en aluminium.

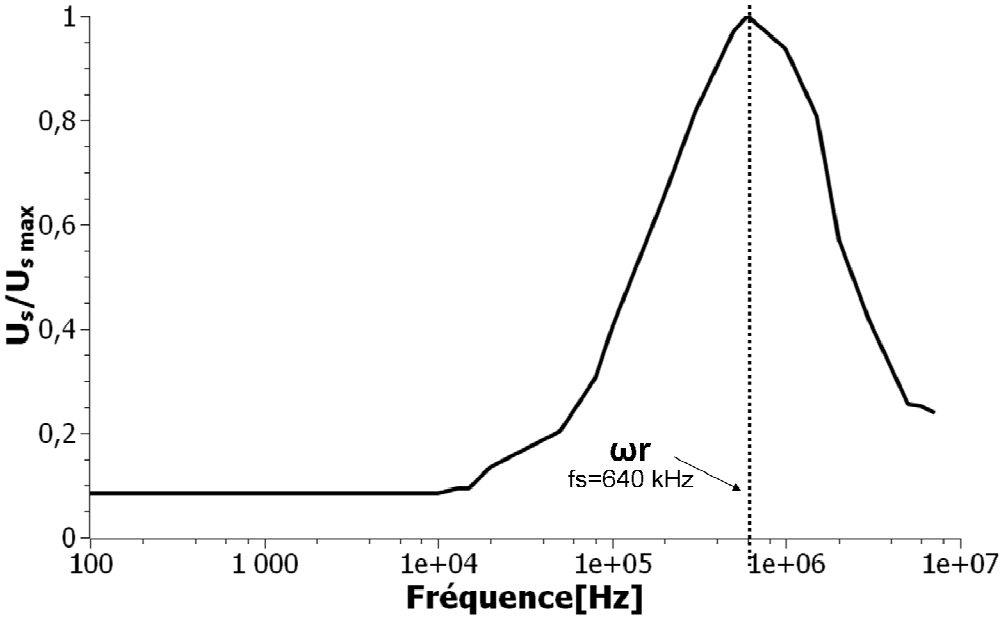


Figure III.6. La caractéristique d'amplitude de l'élément piézoélectrique fixé sur la plaque en aluminium.

La figure montrée a confirmé la discussion précédente. Nous pouvons identifier que la valeur d'amplitude est maximale pour la pulsation ω_r. Rappelons, que pour cette fréquence la valeur d'impédance est minimale. Nous notons aussi que la caractéristique d'amplitude est plate pour les fréquences inférieures à 10 kHz.

Maintenant nous pouvons définir le schéma équivalent d'élément piézoélectrique dans les conditions du système mécanique réalisé.

2.2.1. Modèle simplifié et adapté à l'application de l'élément piézoélectrique

Selon les résultats présentés dans le deuxième chapitre de la thèse, nous savons que les fréquences de modes de vibrations de la plaque en aluminium (en considérons les fréquences jusqu'à 300 Hz) sont inférieures à la valeur de la fréquence résonante *fs* 640 kHz. Ainsi, pour ces fréquences, l'élément piézoélectrique

a un caractère capacitif et une réponse d'amplitude plate (voir la Figure III.5 et la Figure III.6).

Par conséquent, l'élément piézoélectrique dans ces conditions, peut être modélisé avec une source de courant réelle et une capacitance C_o en parallèle. La Figure III.7 présente ce modèle simplifié [110]. Le courant alternatif *i(ωt)* est généré à la suite de l'effet piézoélectrique (conversion d'énergie mécanique en énergie électrique).

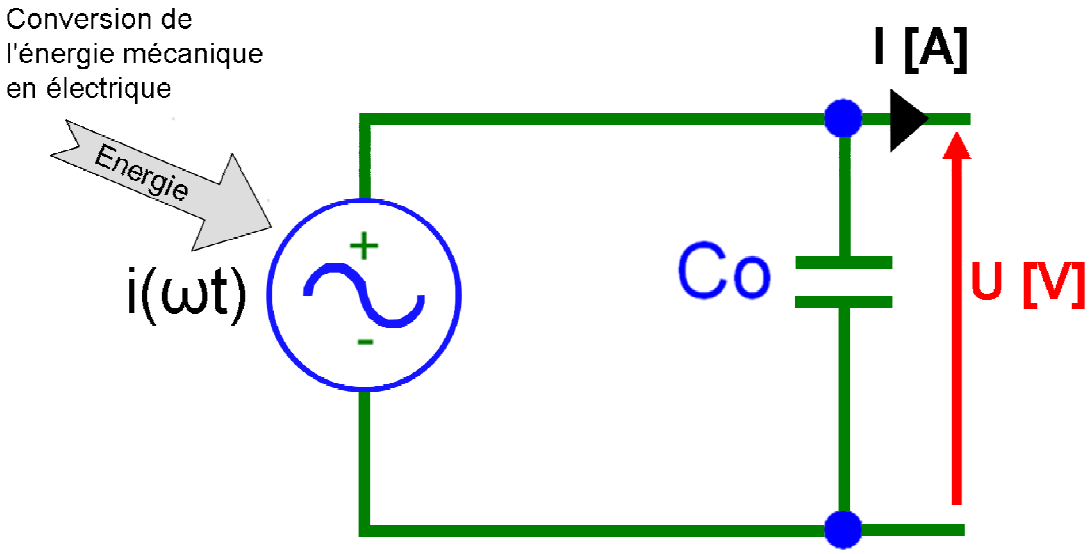


Figure III.7. Le circuit équivalent simplifié à l'élément piézoélectrique [110].

Maintenant que le modèle est proposé, nous pouvons le confirmer par les mesures de sortie de l'élément piézoélectrique fixé sur la plaque en aluminium.

2.2.2. Caractéristiques électriques de sortie du piézoélectrique

La prochaine étape est de mesurer les caractéristiques électriques en sortie de l'élément piézoélectrique. Le courant et la tension sont générés par les déformations de l'élément dues à la force d'excitation. Ainsi, nous allons étudier l'élément piézoélectrique avec la charge résistive qui modélise la résistance d'entrée du nœud WSN. Le schéma de mesure est présenté sur la Figure III.8. Les résultats des mesures de la caractérisation électrique courant-tension sont présentés Figure III.9.

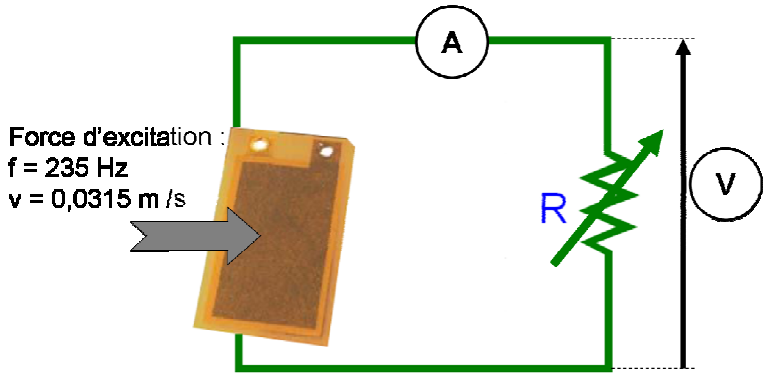


Figure III.8. Le montage de la mesure. L'ampèremètre A et le voltmètre V sont utilisés pour caractériser la sortie de l'élément piézoélectrique.

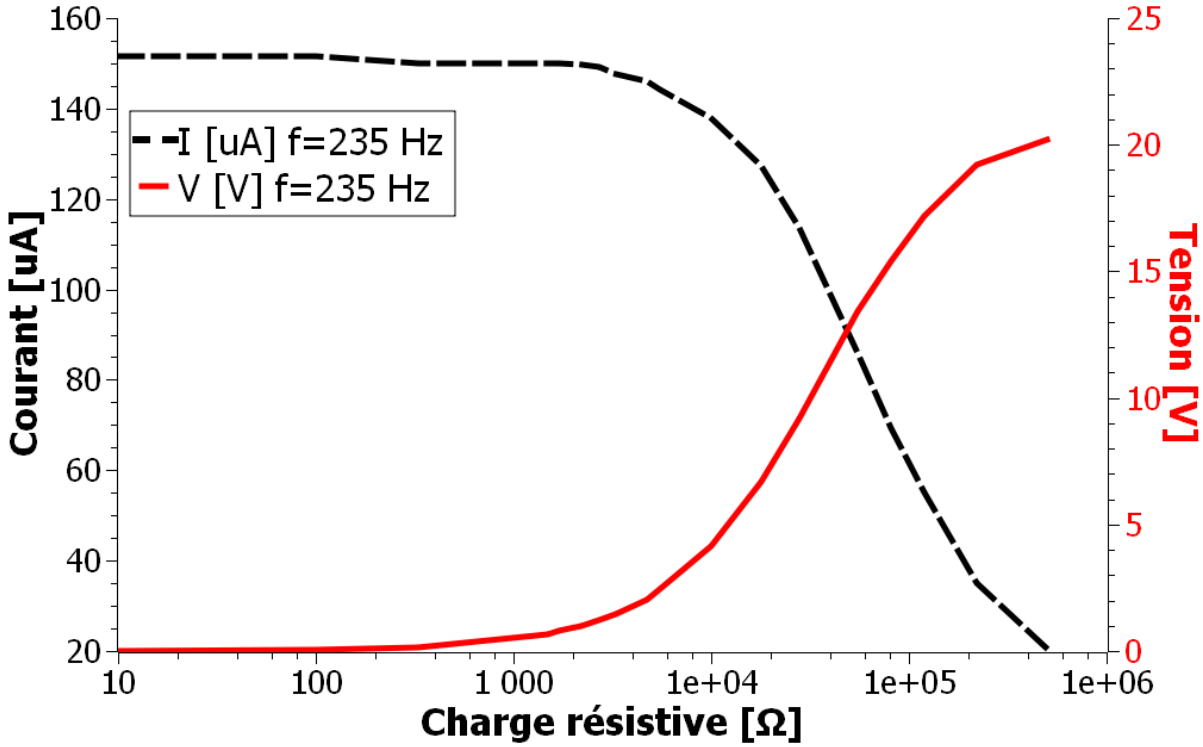


Figure III.9. Le caractéristique courant-tension de l'élément piézoélectrique chargé par une résistance. La force d'excitation : v = 0,0315 m /s ; f = 235 Hz.

Ces courbes montrent les valeurs de courant et de tension mesurés aux bornes de l'élément piézoélectrique. Selon cette mesure, nous constatons que l'élément étudié se comporte comme une véritable source de courant. Les valeurs mesurées sont en cohérence avec le modèle présenté en Figure III.7.

Nous notons aussi que, à partir de ces mesures, il est possible de calculer la puissance réelle dissipée sur la charge résistive. Ainsi, l'étape prochaine sera d'étudier la puissance électrique générée en sortie de l'élément piézoélectrique fixé sur la plaque en aluminium.

2.2.3. Puissance électrique de sortie

Nous allons maintenant étudier les changements de la valeur de la puissance électrique en fonction des paramètres du système mécanique. Selon la conception du système proposé, nous pouvons identifier les paramètres variables dans le système mécanique : la vitesse et la fréquence de force d'excitation.

Les mesures sont effectuées en utilisant le montage présenté sur la Figure III.8. La puissance réelle est calculée comme le résultat de la multiplication du courant et de la tension. Les mesures sont effectuées pour la charge résistive donc nous mesurons la puissance réelle.

- **Puissance de sortie en fonction de la vitesse de vibrations**

La Figure III.10 présente la puissance calculée pour les différentes valeurs de la vitesse de force d'excitation.

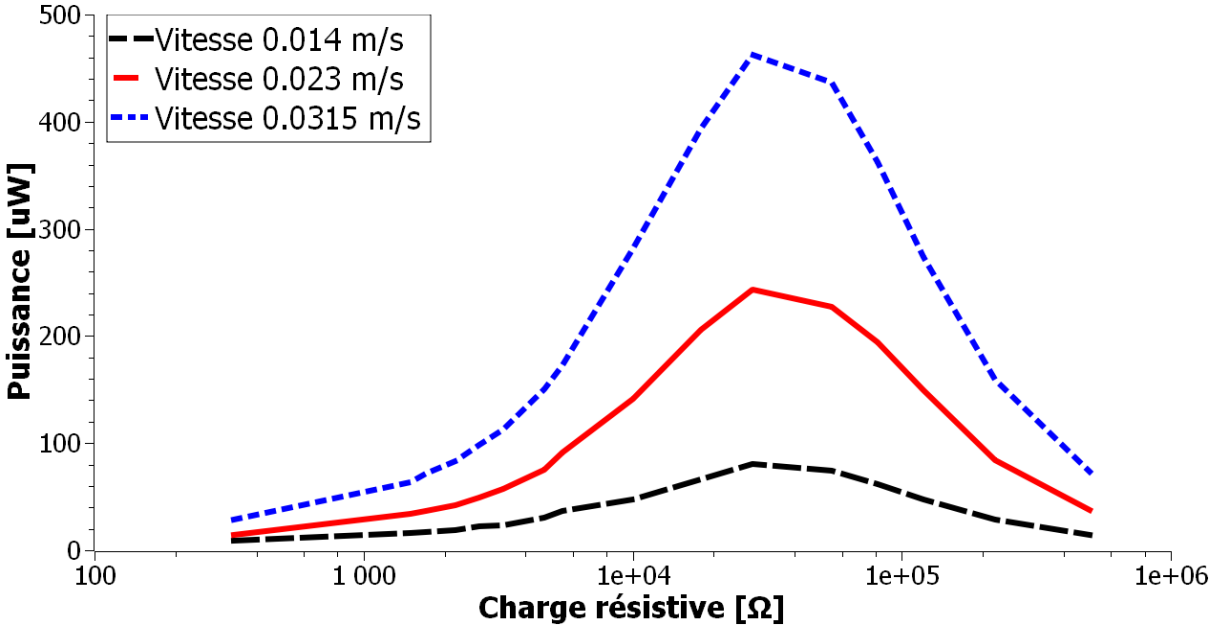


Figure III.10. La puissance électrique en sortie de l'élément piézoélectrique pour les valeurs différentes de la vitesse (la fréquence f = 235 Hz).

Il existe donc une valeur optimale de la charge pour laquelle l'énergie disponible est maximale. Les mesures montrent que la charge pour laquelle la valeur d'énergie électrique est maximale reste inchangée pour les différentes valeurs de la vitesse de vibrations (l'amplitude de la force d'excitation). Cela confirme que l'impédance de sortie de l'élément piézoélectrique reste inchangée pour les différentes valeurs de la vitesse de force d'excitation.

- **Puissance de sortie en fonction de la fréquence de vibrations**

La Figure III.11 montre la puissance calculée pour les différentes valeurs de la fréquence de force d'excitation.

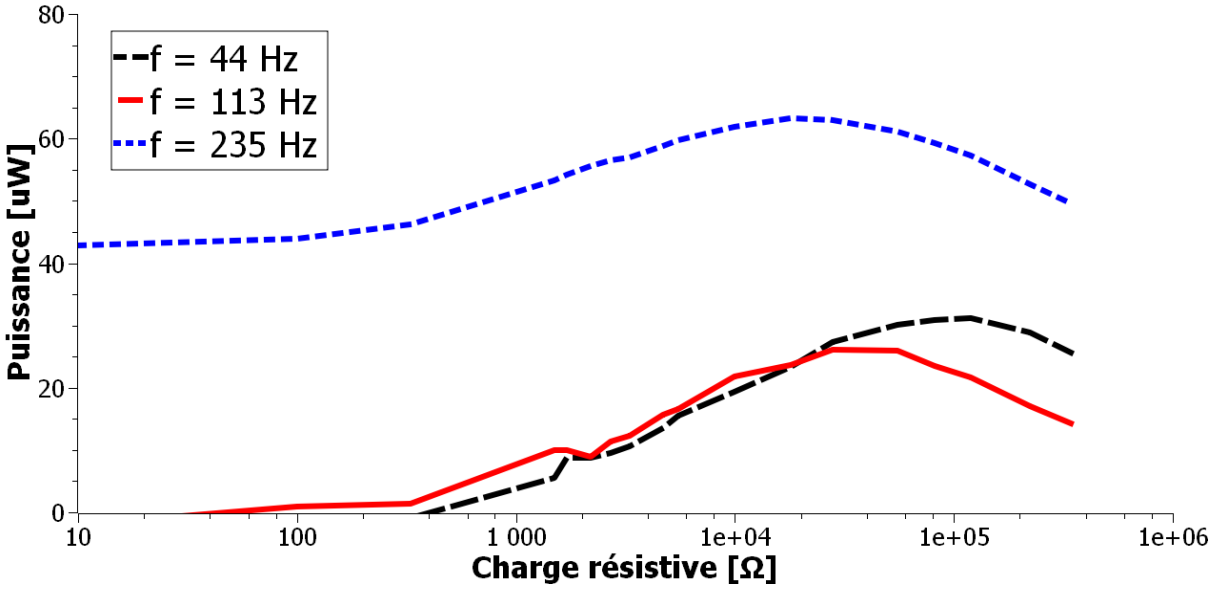


Figure III.11. La puissance électrique en sortie de l'élément piézoélectrique pour les valeurs différentes de la fréquence.

Les mesures montrent que la valeur optimale pour laquelle la valeur d'énergie électrique est maximale dépend de la fréquence de vibrations. Nous notons que la valeur optimale de la charge diminue avec l'augmentation de la fréquence. Cet effet non linéaire est expliqué dans l'article de J. Nosek [111].

En effet, dans cet article, l'auteur explique l'effet non linéaire de l'impédance de l'élément piézoélectrique. L'influence du courant d'excitation sur la fréquence ajoute la nécessité de la mise en place d'une impédance caractéristique non linéaire du résonateur piézoélectrique. Cette influence peut être modélisée par le circuit équivalent non linéaire avec une capacité non linéaire, la résistance et l'inductance.

Nous avons caractérisé la sortie de l'élément piézoélectrique. Les mesures effectuées permettent de passer à la section prochaine qui porte sur la solution de la connexion d'un élément piézoélectrique avec un nœud WSN de réseau de capteurs sans fil.

2.3. Connexion d'un composant piézoélectrique avec le nœud WSN conçu

Le concept du système d'amortissement de vibrations en utilisant le réseau de capteurs sans fil suppose qu'un seul élément piézoélectrique soit utilisé par nœud WSN (La Figure III.12 - rappelle le diagramme d'un nœud proposé).

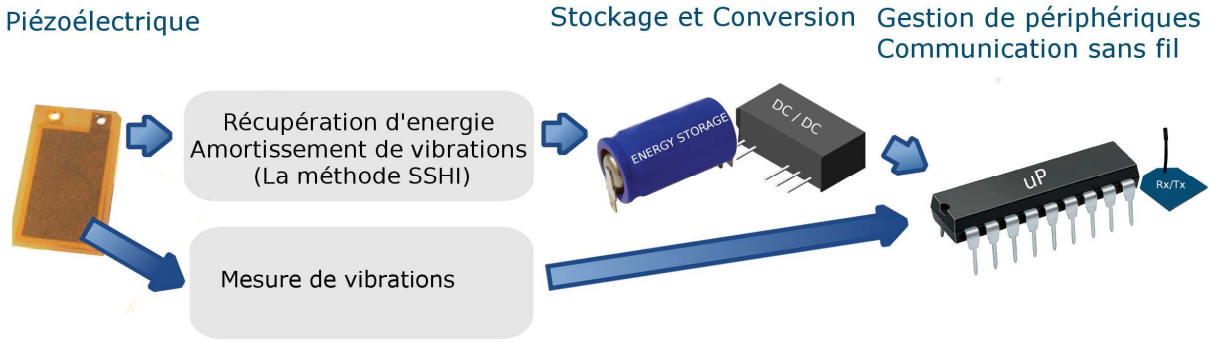


Figure III.12. Le diagramme d'un nœud WSN proposé.

Dans ce cas-ci, un composant piézoélectrique doit être utilisé pour offrir plusieurs fonctions : la mesure de vibration, la récupération d'énergie et l'amortissement de vibrations. Nous cherchons donc la solution de connexion d'un élément piézoélectrique avec les deux modules parallèles. Selon les résultats présentés dans les sections précédentes, nous pouvons montrer notre solution à ce problème (Figure III.13).

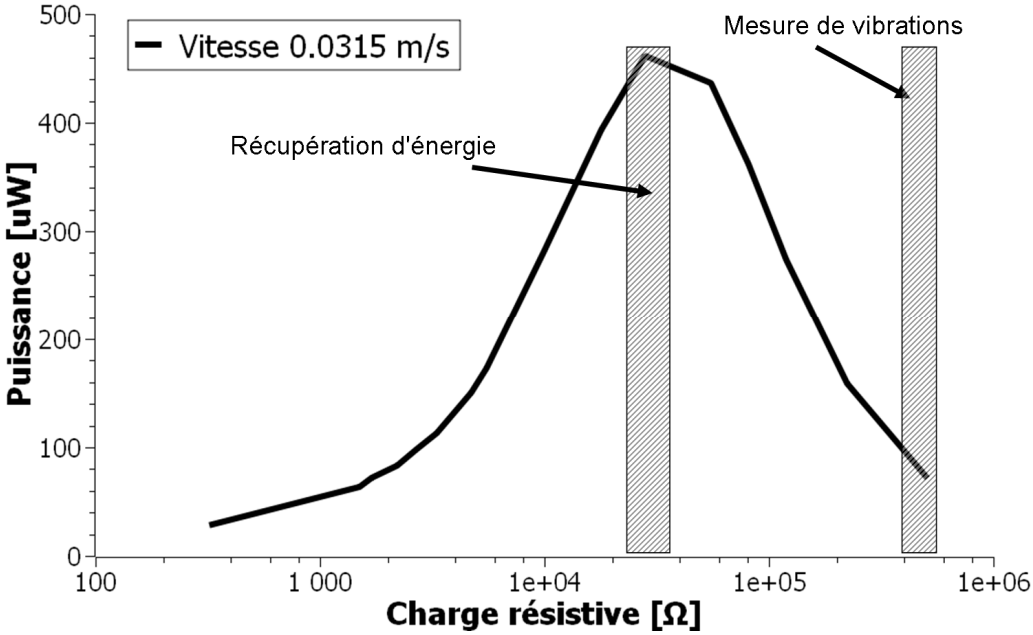


Figure III.13. La connexion d'un composant piézoélectrique en utilisant l'adaptation d'impédance.

Nous rappelons que la méthode SSHI doit recevoir la valeur maximale de l'énergie électrique. Cette remarque implique clairement que la seule solution est d'utiliser la valeur optimale de la résistance de la charge.

L'élément piézoélectrique est une source de courant réel, donc pour les grandes valeurs de la charge résistive, la valeur de courant en sortie est faible et la valeur de la tension est élevée. Ainsi, une résistance élevée permet de mesurer la valeur de la tension électrique correspondant aux déformations (mesure des vibrations) tout en ayant une faible consommation d'énergie par le module de mesure de vibrations.

Cela nous permet de constater que :

- La mesure de vibration en utilisant une valeur élevée de la charge résistive fournit la valeur élevée de la tension et de la sensibilité de mesure des vibrations. De plus, il remplit l'exigence de la basse consommation d'énergie,
- La récupération d'énergie depuis les vibrations en utilisant un élément piézoélectrique est efficace pour une valeur optimale de la charge. Cette valeur de la charge dépend de la fréquence de vibration, donc une charge idéalement dynamique doit être considérée (par exemple un dispositif de poursuite du point de puissance maximale : le MPPT).

Le procédé de connexion des modules en parallèle à un composant piézoélectrique unique a donc été expliqué : chacun des modules fournit bien la fonction prévue. Grâce à cette solution, les modules peuvent être interconnectés simultanément.

3 Introduction aux modules de nœud WSN

Maintenant que l'élément piézoélectrique installé dans le système mécanique réalisé est présenté et mesuré, nous avons étudié la caractéristique de sortie et trouver la solution pour la liaison d'un élément piézoélectrique et deux modules parallèles du nœud WSN. Maintenant, nous allons présenter les étapes de la conception des modules.

3.1. Module de mesure de vibrations

Alors que les exigences pour les interfaces électriques du nœud WSN sont connues, nous allons introduire la conception de la chaîne d'acquisition pour le circuit de mesures de vibrations. Au début, nous expliquons l'utilisation d'un élément piézoélectrique dans le circuit du détecteur. Ensuite, nous présentons la conception de module de la mesure de vibrations.

3.1.1. Interface électrique de détecteur de vibrations

Pour la gamme de fréquences considérées, l'élément piézoélectrique peut être modélisé comme un transducteur connecté en parallèle à l'interface électrique de module de la mesure de vibrations du nœud WSN qui a ses propres résistances d'entrée R_i et la capacité d'entrée C_i. Le circuit équivalent d'interface reliée à l'élément piézoélectrique est montré sur la Figure III.14.

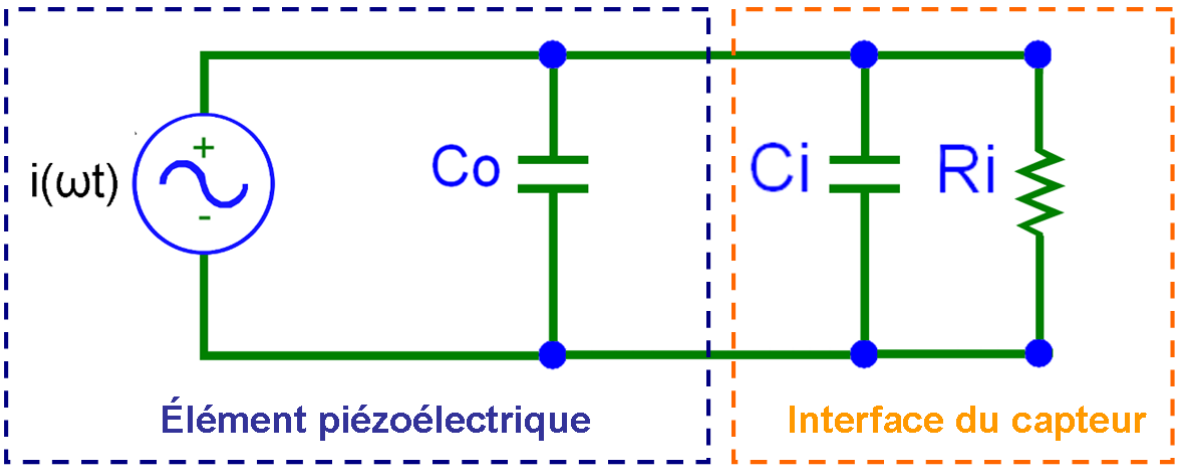


Figure III.14. Le raccordement d'un transducteur avec d'une interface électrique.

Rappelons qu'un matériau piézoélectrique placé entre les électrodes métalliques et relié au circuit électrique doit être considéré comme un condensateur pour les fréquences inférieures à f_s. Ce condensateur a la capacité C_o, et est chargé avec la charge électrique Q. La relation des paramètres du matériau piézoélectrique et de la capacité est donnée dans la formule (III.3).

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot b \cdot c}{a} \qquad \text{(III.3)}$$

ε : la permittivité du piézoélectrique,

ε_o : la permittivité électrique du vide,

a, b, c : les dimensions du matériau piézoélectrique.

La force F appliquée sur le matériau piézoélectrique génère la charge électrique sur les électrodes métalliques. En conséquence, une tension électrique U existe entre les électrodes, et peut être exprimée par la formule (III.4).

$$U = \frac{Q}{C_0} = \frac{k \cdot F}{C_0} \qquad \text{(III.4)}$$

En supposant que l'interface électrique du détecteur de vibrations soit connectée en parallèle à l'élément piézoélectrique, il faut que nous tenions compte de la capacité C_i de cette interface. La capacité C_i représente la capacité des fils, et des éléments électriques du circuit. Par conséquent, nous obtenons la formule (III.5).

$$U = \frac{Q}{C_0 + C_i} = \frac{k \cdot F}{C_0 + C_i} \qquad \text{(III.5)}$$

Cela nous permet de définir la sensibilité du détecteur de vibration S présentée par la formule (III.6).

$$S = \frac{dU}{dF} = \frac{k}{C_0 + C_i} \qquad \text{(III.6)}$$

Selon la formule (III.6), nous voyons que la sensibilité du détecteur peut être réglée par la capacité de l'interface électrique du détecteur C_i. Pour conclure, la sensibilité du détecteur de vibration peut être augmentée en réduisant la capacité C_i.

Lorsque la force F est appliquée sur l'élément piézoélectrique, la charge électrique Q existe sur les bornes des électrodes. Dans le cas idéal, le courant de fuite n'existe pas, donc la charge électrique Q correspond à la force F. Ainsi, la tension

électrique $U_p=Q/C$ aux bornes des électrodes aussi correspond à la force appliquée. En réalité, la charge électrique Q va se décharger sur la résistance d'entrée de l'interface électrique R_i selon l'expression (III.7).

$$U = U_P \cdot e^{\frac{-t}{T}} \qquad \text{(III.7)}$$

U_P : la tension initiale du transducteur = Q/C,

T : la constante de temps du circuit $T=R_iC_i$.

L'expression $e^{-t/T}$ peut être remplacée par les deux premiers termes du développement en série de Taylor correspondant.

$$e^{\frac{-t}{T}} \equiv 1-\frac{t}{T} \equiv 1-\frac{t}{R_i \cdot C_i} \qquad \text{(III.8)}$$

En combinant les formules (III.7) et (III.8), nous obtenons :

$$\frac{U}{U_P} = 1-\frac{t}{R_i \cdot C_i} = 1-\frac{t}{T} \qquad \text{(III.9)}$$

La différence entre la valeur de la tension U_P et la valeur de la tension U montre l'erreur de la mesure introduite par l'interface électrique (la résistance R_i et la capacitance C_i). Pour diminuer l'influence de ce circuit, il faut augmenter la constante de temps T. Cela peut être réalisé en augmentant la résistance d'entrée R_i.

En conclusion, l'interface électrique du détecteur piézoélectrique de vibrations doit avoir :

- une faible capacitance d'entrée *Ci* pour augmenter la sensibilité des mesures,
- une résistance d'entrée élevée *Ri*, pour garantir une petite fuite de la charge électrique.

Les conclusions obtenues sont en accord avec les exigences globales du système. Selon les mesures effectuées nous savons qu'en utilisant une valeur élevée de la résistance *Ri* l'élément piézoélectrique fournit une valeur faible du courant et une tension élevée. Les mesures de la puissance ont montré que cette solution permet de remplir aussi l'exigence de basse consommation d'énergie. Nous devrons donc utiliser un montage d'adaptation d'impédance pour connecter le module de mesure de vibrations et l'élément piézoélectrique.

3.1.2. Conception du circuit de mesure de vibrations

Conformément aux exigences du système proposé et de l'élément piézoélectrique, un circuit électrique pour mesurer les vibrations a été réalisé. La Figure III.15 présente l'interface électrique du module de mesure de vibrations ainsi conçu.

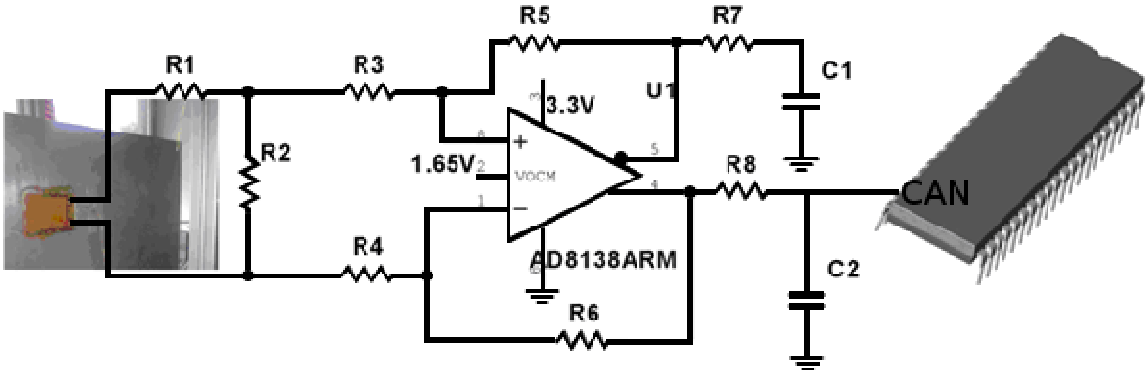


Figure III.15. Le schéma électrique de l'interface du capteur de vibration.

Selon cette figure, nous voyons qu'un composant piézoélectrique est relié avec un diviseur de la tension réalisé en utilisant les résistances *R1*, *R2*. Le diviseur montré permet de régler la valeur de résistance d'entrée et l'amplitude (un montage d'adaptation d'impédance d'entrée).

Les résistances *R3*, *R4*, *R5*, *R6* sont nécessaires pour déterminer le gain de l'amplificateur différentiel. Dans le nœud WSN prototypé, nous utilisons le gain de l'unité. L'amplificateur différentiel, alimenté par une seule tension de 3,3 V, est utilisé pour changer le mode différentiel en un mode commun du signal et pour ajouter la tension de décalage (offset). Nous avons choisi l'amplificateur « AD8138 » fabriqué par « Analog Devices ». L'amplificateur choisi est caractérisé par la vitesse de balayage de 1150 V/µs, la grande largeur de bande du signal jusqu'à 265 MHz, le court temps de stabilisation de 16 ns.

Un filtre passe-bas composé de la résistance *R8* et de la capacité *C2* est utilisé pour couper les fréquences hautes du signal. La partie continue du signal de sortie est égale 1,65 V (la moitié de la tension d'alimentation). Ainsi, le convertisseur analogique numérique du microcontrôleur peut mesurer les parties positives et négatives du signal, tout en étant alimenté par une seule tension de 3,3 V.

Maintenant que le module de mesure des vibrations est expliqué, passons à celui destiné à la récupération d'énergie.

3.2. Module de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations

L'état de l'art a introduit plusieurs méthodes utilisées pour la récupération d'énergie et l'amortissement de vibrations en utilisant l'élément piézoélectrique. Nous avions identifié la méthode non linéaire nommée « serial SSHI» comme optimale pour la conception de système proposé.

3.2.1. Elément piézoélectrique dans le module

Rappelons que l'élément piézoélectrique peut être modélisé avec une source de courant et un condensateur en parallèle. Nous voyons qu'il existe un déphasage entre le courant généré par la source, le courant de condensateur interne et le courant qui sort de l'élément piézoélectrique et qui passe par la charge résistive. La solution idéale serait donc d'utiliser une bobine externe qui pourrait diminuer ce déphasage, ainsi l'énergie disponible aux bornes du piézoélectrique augmenterait. Malheureusement, cette solution n'est pas pratique à cause des grandes valeurs de l'inductance nécessaires [110].

La méthode SSHI choisie permet d'améliorer le flux énergétique en utilisant une valeur d'inductance acceptable, tout en traitant la tension générée de manière non-linéaire. Cette méthode crée un circuit résonant entre l'élément piézoélectrique et une bobine externe pour adapter d'impédance et augmenter l'énergie récupérée. La Figure III.16 présente le schéma électrique de la méthode « SSHI » en série.

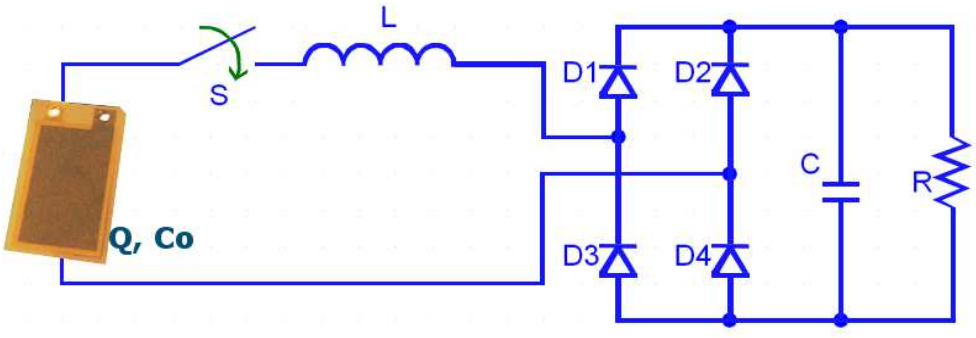


Figure III.16. Le schéma électrique de la méthode « SSHI » [110].

La figure présentée contient l'élément piézoélectrique relié par un interrupteur *S* avec une inductance externe *L*. Le circuit est fermé par un pont de diodes utilisé

pour réaliser un redressement double alternance. Un condensateur *C* pour stocker l'énergie et une résistance *R* qui modélise la charge du nœud WSN.

La Figure III.17 présente les chronogrammes du déplacement *u*, de la tension électrique *V* et du courant *I* dans le circuit théorétique de SSHI en série.

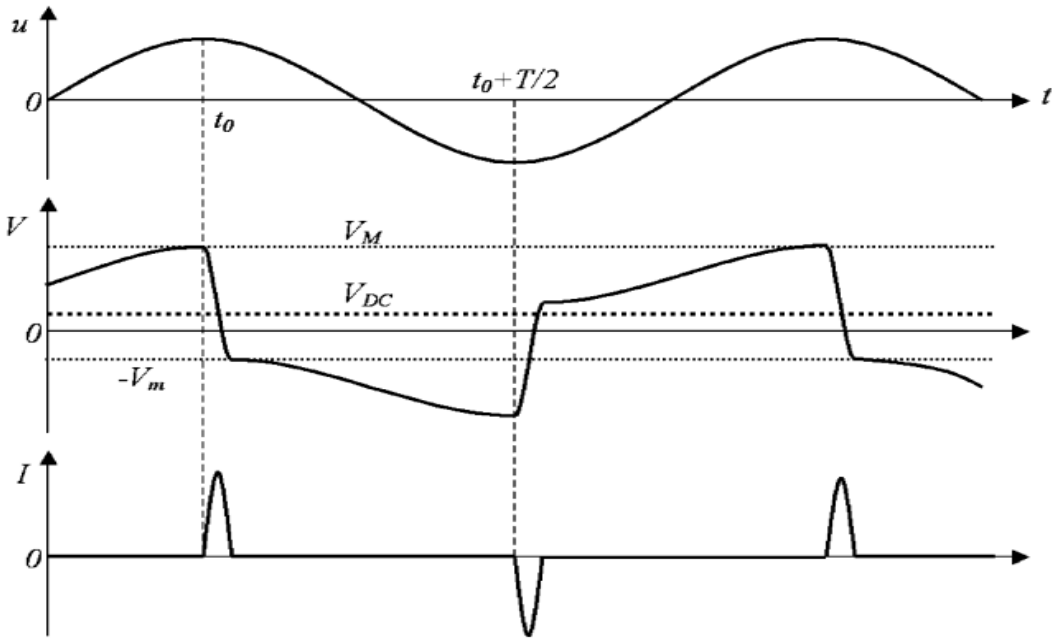


Figure III.17. Les chronogrammes : u - le déplacement, V - la tension électrique, I - le courant électrique dans le circuit idéal de SSHI [110].

La capacitance interne C_o de l'élément piézoélectrique forme un circuit résonant avec la bobine *L*. Quand la valeur de la tension sur les bornes d'élément piézoélectrique est soit maximale soit minimale (car nous cherchons les extrema des déplacements), l'interrupteur *S* est fermé pour la moitié de la période de ce circuit résonant électrique. Le résultat de ce traitement est donc l'inversion de la tension (entre les valeurs V_M et V_m) aux bornes de l'élément piézoélectrique à cause de la résonance électrique. Chaque fois que l'interrupteur est fermé, l'énergie stockée dans le condensateur interne C_o d'élément piézoélectrique, circule vers la capacité *C*.

L'équation (III.10) explique la relation entre la valeur de la tension V_M (avant l'inversion) et V_m (après l'inversion). La valeur de la tension V_{DC} correspond à la tension continue du pont de diodes, *Qi* est un facteur de la qualité électrique du circuit [110].

$$V_m - V_{DC} = -(V_M - V_{DC})e^{\frac{-\pi}{2Q_i}} \qquad \text{(III.10)}$$

3.2.2. Conception du circuit SSHI

La Figure III.18 présente le schéma du circuit « SSHI » ainsi conçu. En utilisant le microcontrôleur pour la mesure de vibrations, nous pouvons l'utiliser aussi pour piloter un interrupteur bidirectionnel. L'interrupteur est composé de deux transistors NMOS (*M1* et *M2*) reliés par leurs bornes aux sources.

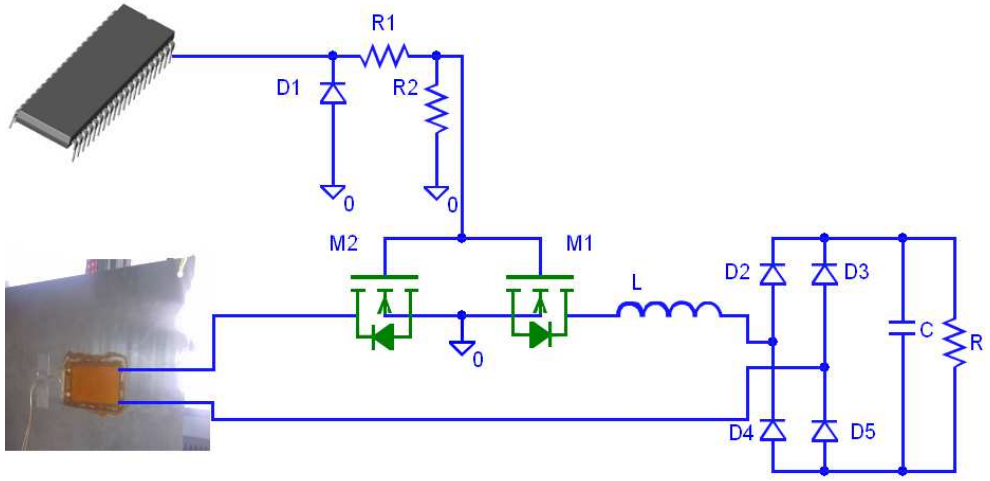


Figure III.18. Le schéma électrique de module de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations du nœud WSN.

Le pont de diodes (*D2*, *D3*, *D4*, *D5*) est formé de quatre diodes de type « Schottky ». Le condensateur *C* et la charge résistive *R* sont utilisés comme un stockage d'énergie et une charge résistive. La broche du microcontrôleur est connectée par une résistance *R1*, elle règle la valeur maximale du courant. La résistance *R2* est utilisée pour relier les grilles des transistors avec la masse quand le signal n'est pas contrôlé par le microcontrôleur. La diode *D1* fournit une protection contre les surtensions. Les deux transistors sont reliés par les sources, donc ils fournissent un interrupteur bidirectionnel grâce aux diodes internes. L'inductance *L* est utilisée pour créer un circuit résonant avec la capacitance de l'élément piézoélectrique.

3.3. Module de gestion de périphériques

Le nœud WSN proposé utilise un microcontrôleur pour la mesure de vibrations. De plus, le microcontrôleur est responsable du contrôle de circuit SSHI. Ainsi, nous pouvons identifier les exigences principales pour le module de gestion de périphériques : la consommation d'énergie minimale.

Nous avons choisi, selon l'état de l'art, la solution la plus utilisée à savoir un microcontrôleur de 8 bits avec un convertisseur analogique-numérique interne. Cette solution est suffisante pour fournir le contrôle actif de vibrations.

Le microcontrôleur fabriqué par la société Microchip, le PIC16LF88 fabriqué en technologie « nano-Watt » de Microchip est choisi [112]. Il est caractérisé par :

- la taille de la mémoire du programme 7 koctets,
- la taille de la RAM de données 368 octets,
- la taille de la EPROM de données 256 octets,
- le convertisseur analogique-numérique 10 bits,
- une basse consommation d'énergie.

3.4. Module de communication sans fil

L'état de l'art a introduit les différentes techniques, protocoles et modules utilisés pour la communication sans fil dans les réseaux de capteurs sans fil. De plus, suite à la conception du système, nous pouvons établir les exigences principales pour le module de communication :

- la taille et le poids du transmetteur radio doivent être les plus petits possibles,
- ainsi que la consommation d'énergie.

A partir de ces exigences, nous choisissons la bande de fréquences de 2,4 GHz : car celle-ci est autorisée sur le monde entier, la petite taille d'antennes et la distance de communication étant suffisante dans notre cas.

Un grand nombre de nœuds WSN, la sécurité, et la consommation basse d'énergie mènent à utilisation d'un protocole standardisé et conçu pour les réseaux de capteurs sans fil à savoir la norme IEEE 802.15.4.

Une étude intéressante est présentée dans un article de Mieyeville *et al.* [18]. Les auteurs montrent que la consommation d'énergie par un nœud WSN, est liée à la coopération entre le software et le hardware. Il a été démontré que le nœud WSN équipé d'un transmetteur radio qui contient l'implémentation du protocole de la communication en hardware, consomme moins d'énergie que ses concurrents n'utilisant pas cette caractéristique. Dès lors, nous avons choisi le transmetteur radio « MRF24J40MA » fabriqué par Microchip [114]. Le circuit choisi est caractérisé entre autres par l'antenne PCB intégrée et le mécanisme « CSMA-CA » en hardware.

4 Prototypage du nœud WSN conçu

Après avoir expliqué et conçu les différentes parties du nœud WSN, nous allons présenter le processus de prototypage du nœud complet. Au début, nous introduisons l'intégration des modules dans un seul nœud WSN complet. Ensuite, des simulations seront présentées afin de valider le système. À la fin, nous allons introduire la réalisation et mesures d'un prototype du nœud WSN complet.

4.1. Intégration des modules dans un nœud complet

Le nœud réalisé doit vérifier la faisabilité d'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le système d'amortissement de vibrations. La nécessité de mesurer et de vérifier les différents modules du nœud WSN, aussi que celle d'optimiser le système conçu, implique certaines exigences :

- l'utilisation de la source externe d'énergie pour l'alimentation du nœud WSN,
- l'isolation du circuit de stockage d'énergie récupérée.

Le module de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations contient les deux transistors qui fournissent un interrupteur bidirectionnel. Ainsi, est-il nécessaire d'isoler ce circuit pour réaliser un interrupteur non référencé à la masse.

Pour assurer la séparation électrique, deux solutions sont envisagées : l'isolation optique [115], [117] et le transformateur d'impulsion [116], [117].

- **Isolation optique**

L'isolation optique est fiable. De plus, elle facilite la mise en œuvre. L'inconvénient de cette méthode est la nécessité d'utiliser un deuxième circuit d'alimentation séparé pour entraîner le circuit du récepteur. Cela ajoute des appareils supplémentaires dans le circuit d'alimentation. Un autre inconvénient de l'isolation optique est aussi la durée des temps de commutation.

- **Transformateur**

Le transformateur peut être utilisé pour entraîner l'interrupteur. Un transformateur d'impulsion est, en principe, une méthode simple, fiable et hautement

résistante contre le bruit. Il peut fournir une isolation de la commande des grilles et peut être conseillé pour les applications avec un rapport cyclique faible [118].

La période de circuit résonant électrique dans la méthode SSHI doit être beaucoup plus courte que la période d'oscillations mécaniques. C'est-à-dire que la méthode SSHI en principe a un rapport cyclique faible. Ainsi, l'utilisation d'un transformateur pour isoler le circuit et pour fournir un interrupteur bidirectionnel non référencé à la masse est une solution plus prometteuse dans notre cas. En outre, cette solution ne nécessite pas des dispositifs d'alimentation supplémentaires, donc elle permet de simplifier le nœud WSN conçu.

Nous allons donc utiliser un transformateur pour fournir une isolation d'interrupteur de la méthode SSHI.

4.2. Résultats de simulations de nœud conçu

Alors que la conception du nœud WSN est présentée, nous pouvons passer aux simulations qui vont confirmer les solutions choisies.

4.2.1. Modélisation du nœud WSN

Le nœud complet est simulé en utilisant un simulateur de circuit électrique «Multisim» fabriqué par «National Instrument»[4]. Les composants électriques sont simulés en utilisant les modèles « SPICE ». La Figure III.19 présente le schéma du nœud complet simulé dans le logiciel « NI Multisim ».

Le microcontrôleur est modélisé par une source de tension d'impulsion *V1*. L'isolation de l'interrupteur *T1* est simulée par un transformateur avec le rapport de transformation 1 : 1.

Le circuit SSHI est modélisé en utilisant deux transistors NMOS (*Q1*, *Q2*) et une bobine *L*. Nous voyons aussi un circuit de stockage d'énergie : un pont de diodes (*D1*, *D2*, *D3*, *D4*), une capacitance *C1* et une résistance *R1*.

Le module de mesures de vibrations contient un diviseur de tension (*R17*, *R18*) et l'amplificateur différentiel choisi *U2* (voir §3.1.2). La sortie du détecteur est réalisée avec un filtre passe-bas (*C2* et *R19*). En mesurant la tension sur la

[4] http://www.ni.com/multisim/f/ URL accédée le 10 novembre 2015

capacitance *C2*, nous pouvons vérifier le signal conditionné et lu par le convertisseur analogique numérique.

L'élément piézoélectrique est modélisé avec une source sinusoïdale de tension *V4* et une capacitance *C4* (correspond à la capacitance C_0 d'un condensateur interne de l'élément piézoélectrique). C'est un schéma équivalent au modèle présenté sur la Figure III.7 obtenu en utilisant la transformation Thévenin-Norton.

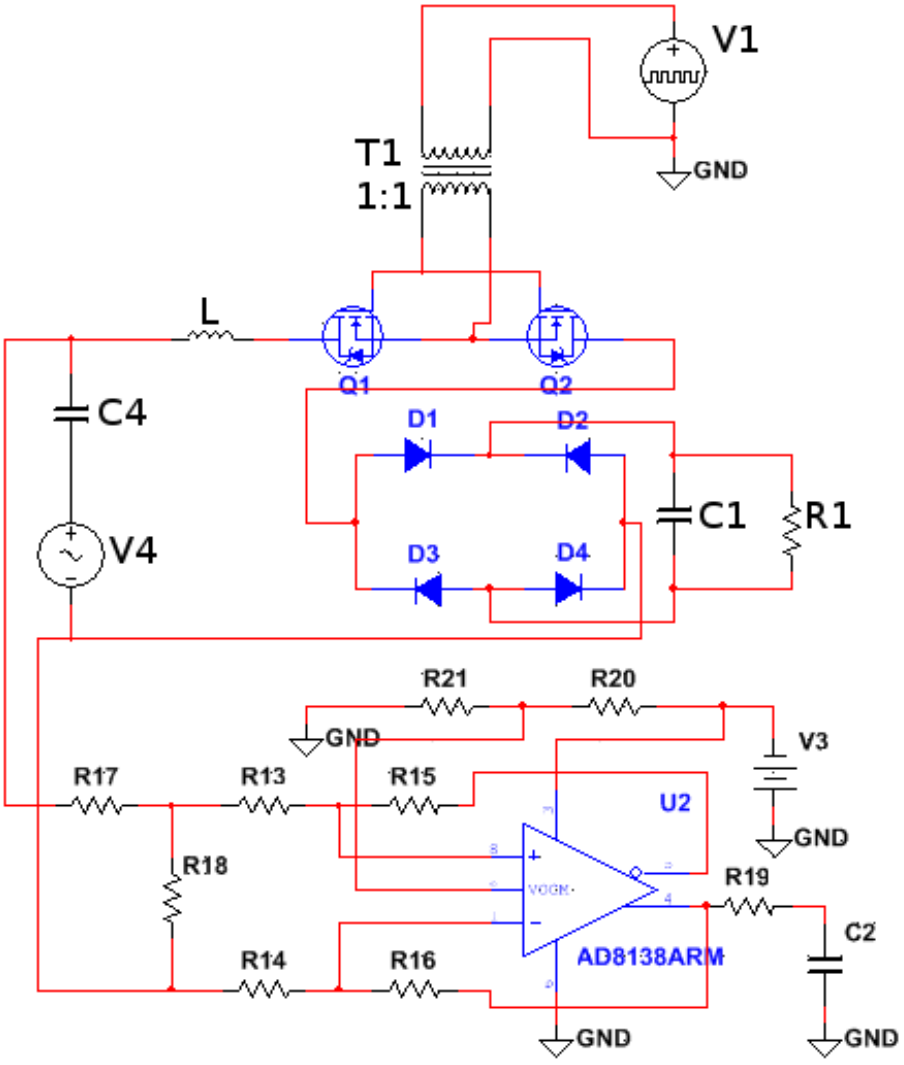


Figure III.19. Le schéma du nœud WSN simulé dans le logiciel NI Multisim.

4.2.2. Résultats de simulations

Nous pouvons donc maintenant présenter les résultats de simulations de nœud complet. La Figure III.20 présente le schéma synoptique du nœud WSN simulé et les points de mesure. La valeur de la tension générée par l'élément piézoélectrique (la valeur de la tension sur *V4* et *C4* dans les simulations) est 17 V (la valeur crête à crête).

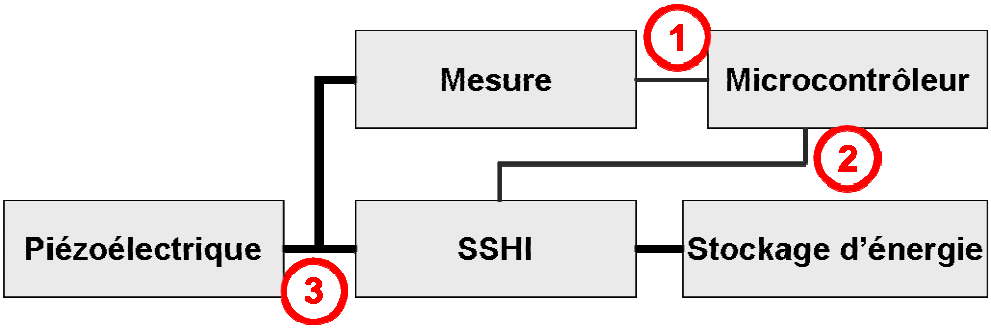


Figure III.20. Le schéma synoptique du nœud WSN simulé et les points de mesure.

Le point 1 correspond au signal conditionné dans le circuit de mesure de vibrations (sur la capacitance *C2*), celui-ci est lu par le convertisseur analogique numérique du microcontrôleur. Ce signal est présenté Figure III.21. Au point 2, nous avons un signal de contrôle de la méthode SSHI généré par le microcontrôleur modélisé par la source *V1*. Ce signal est mesuré aux bornes des transistors utilisés (Figure III.21). L'impulsion du signal de contrôle est de plus présentée en détail (zoom) sur la Figure III.22. Puis, dans le point 3, nous effectuons les mesures de la tension et le courant aux bornes de l'élément piézoélectrique (la source *V4* et la capacitance *C4*). Ces deux signaux sont montrés sur la Figure III.23.

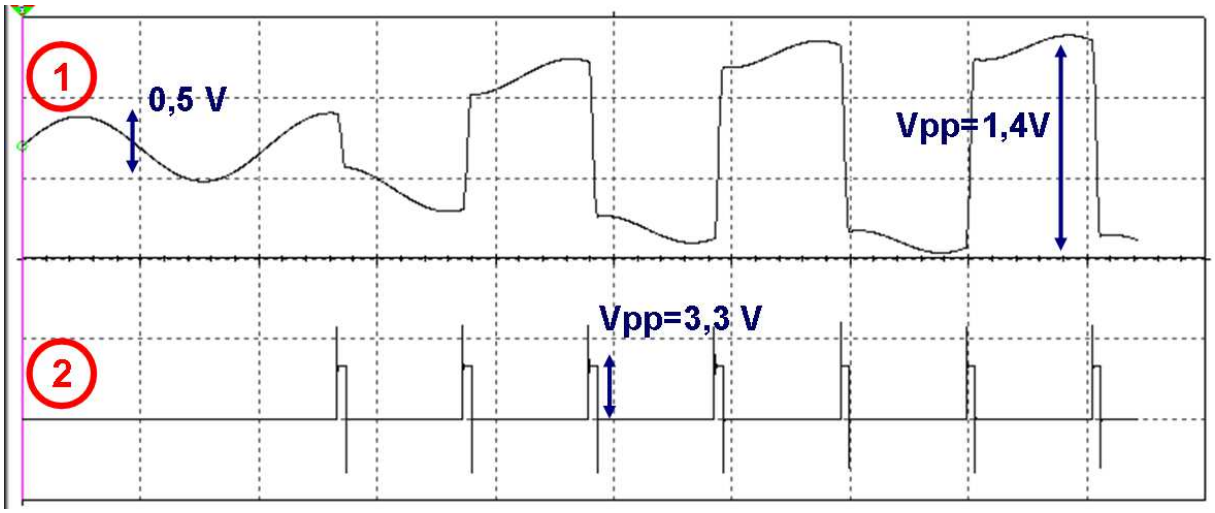


Figure III.21. Le simulation du signal d'entrée du convertisseur analogique numérique (1) et du signal de contrôle de la méthode SSHI génère par le microcontrôleur (2).

Selon la Figure III.21, nous voyons que les simulations valident la conception de module de mesure de vibrations. Le signal mesuré n'est pas déformé et peut être comparé avec la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique. Le signal utilisé pour le contrôle de la méthode SSHI est bien formé en signal créneau, et il a une valeur de la tension appropriée pour contrôler l'interrupteur de la méthode SSHI.

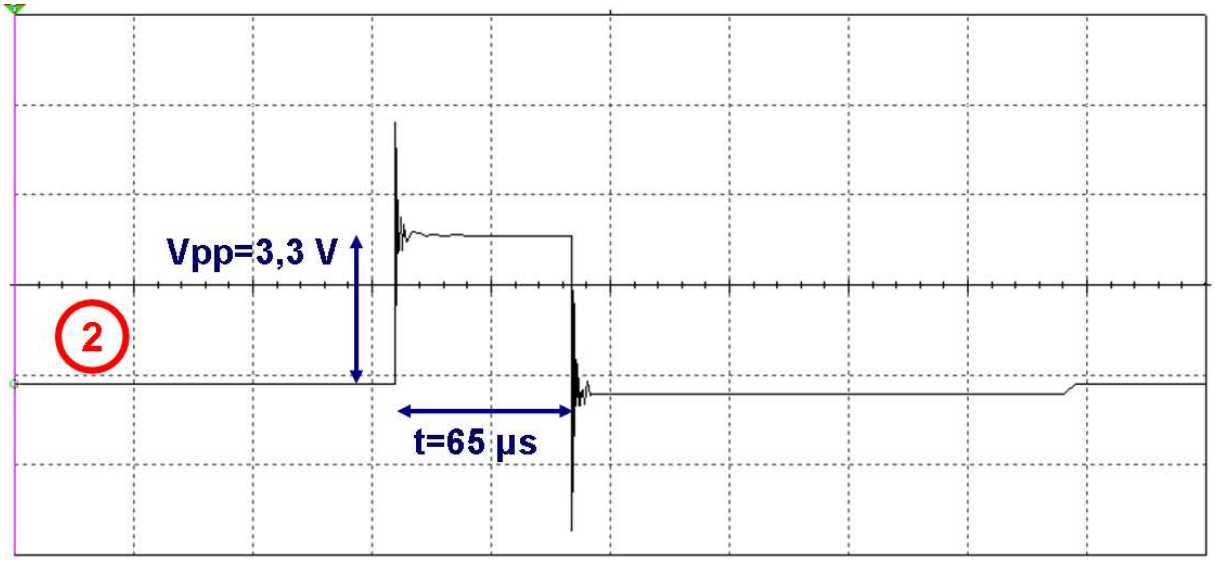


Figure III.22. L'impulsion du signal simulé de contrôle de la méthode SSHI généré par le microcontrôleur.

La Figure III.22 présente une impulsion aux bornes des transistors. Ce signal est utilisé pour contrôler l'interrupteur. Nous notons les oscillations qui se créent à cause de l'existence d'un transformateur utilisé pour l'isolation. En outre, les pentes sont raides et la tension du signal est bien transmise par un isolant ainsi conçu. Cela valide d'utilisation d'un transformateur pour l'isolation d'interrupteur.

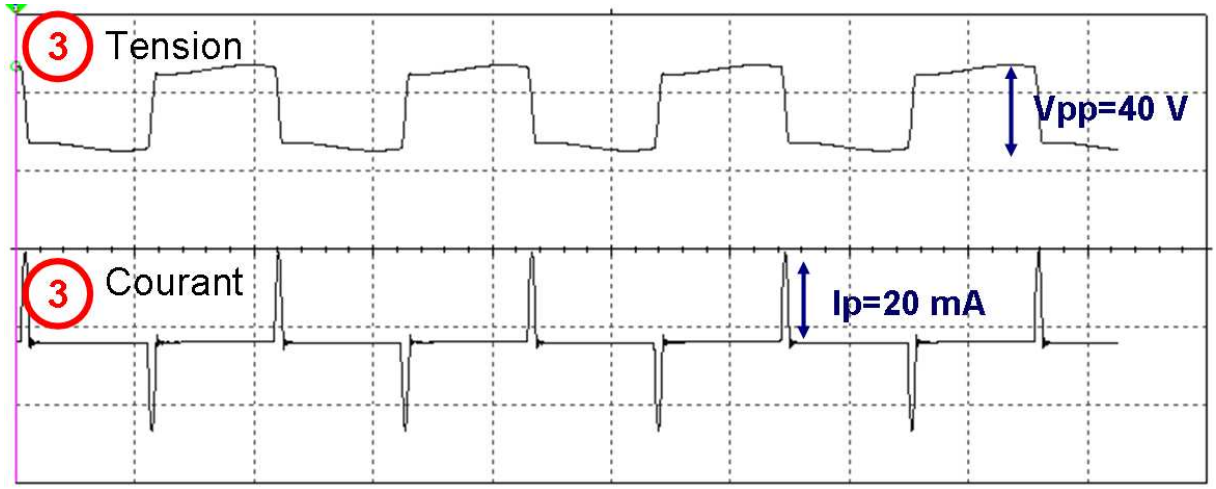


Figure III.23 La tension et le courant simulés aux bornes de l'élément piézoélectrique.

La Figure III.23 présente la caractéristique de la tension et le courant dans le circuit SSHI. Nous pouvons voir que le circuit résonant de SSHI conçu et simulé fournit bien sa fonctionnalité. La tension et le courant dans le circuit avec l'élément piézoélectrique se conforme aux signaux théoriques de la méthode SSHI présenté sur la Figure III.17.

En résumé, les simulations effectuées permettent de confirmer la conception du nœud WSN. Les chronogrammes simulés sont en accord avec les signaux présentés dans les analyses théoriques [110].

4.3. Mise en œuvre du nœud WSN complet

Les simulations effectuées ont confirmé la conception du nœud WSN. Nous pouvons donc maintenant passer au prototypage du nœud WSN. Au début nous allons introduire en détail les types et les valeurs des éléments utilisés pour prototyper le nœud WSN. Ensuite, nous allons présenter la conception des cartes PCB.

La présentation de la photo du nœud WSN construit (voir plus loin) va conclure la partie de prototypage. Puis, nous allons effectuer les mesures pour confirmer la réalisation du nœud WSN prototypé.

4.3.1. Prototypage du nœud WSN

Nous commençons la description de la mise en ouvre par l'introduction des différents composants utilisés et leurs caractéristiques :

- **Isolation des grilles de transistors**

L'isolation est réalisée en utilisant le transformateur de petite puissance caractérisé par l'inductance de 33 mH. Cette valeur est calculée pour le nœud prototypé.

- **Transistors**

Nous utilisons les transistors NMOS « IRL630 » fabriqué par la société « Vishay ». Ils sont compatibles avec la logique de basse tension [119].

- **Amplificateur différentiel**

Le circuit de mesure de vibrations contient l'amplificateur différentiel «AD8138» fabriqué par le « Analog Devices » [120]. Il a une possibilité de régler le gain en utilisant des résistances externes. Cette solution ajoute la possibilité de le régler pendant les tests sur le nœud prototypé.

Cependant, les mesures ont montré la possibilité de l'utiliser avec le gain de l'unité. Cela permet d'utiliser le dispositif équivalent «AD8476» [121]. Ce dispositif

est beaucoup plus optimal au niveau de la consommation de l'énergie (le courant d'alimentation 330 µA à la place de 18 mA).

- **Le stockage d'énergie récupérée**

Le circuit de stockage d'énergie contient le pont de diodes Schottky. Ce type de diode fournit une basse chute de tension et une vitesse de commutation acceptable. Pour le stockage d'énergie nous utilisons une capacitance céramique de 22 µF. Une résistance variable est utilisée pour modéliser la charge électrique.

Le nœud WSN prototypé est divisé en deux cartes PCB. La conception de la première carte PCB est présentée sur la Figure III.24 . Elle est équipée des circuits :

- le transmetteur radio,
- le circuit SSHI,
- le circuit de stockage d'énergie récupérée,
- le circuit de la mesure de vibrations.

La conception de la deuxième carte PCB est présentée sur la Figure III.25. Cette carte contient:

- le microcontrôleur (le gestionnaire),
- l'alimentation.

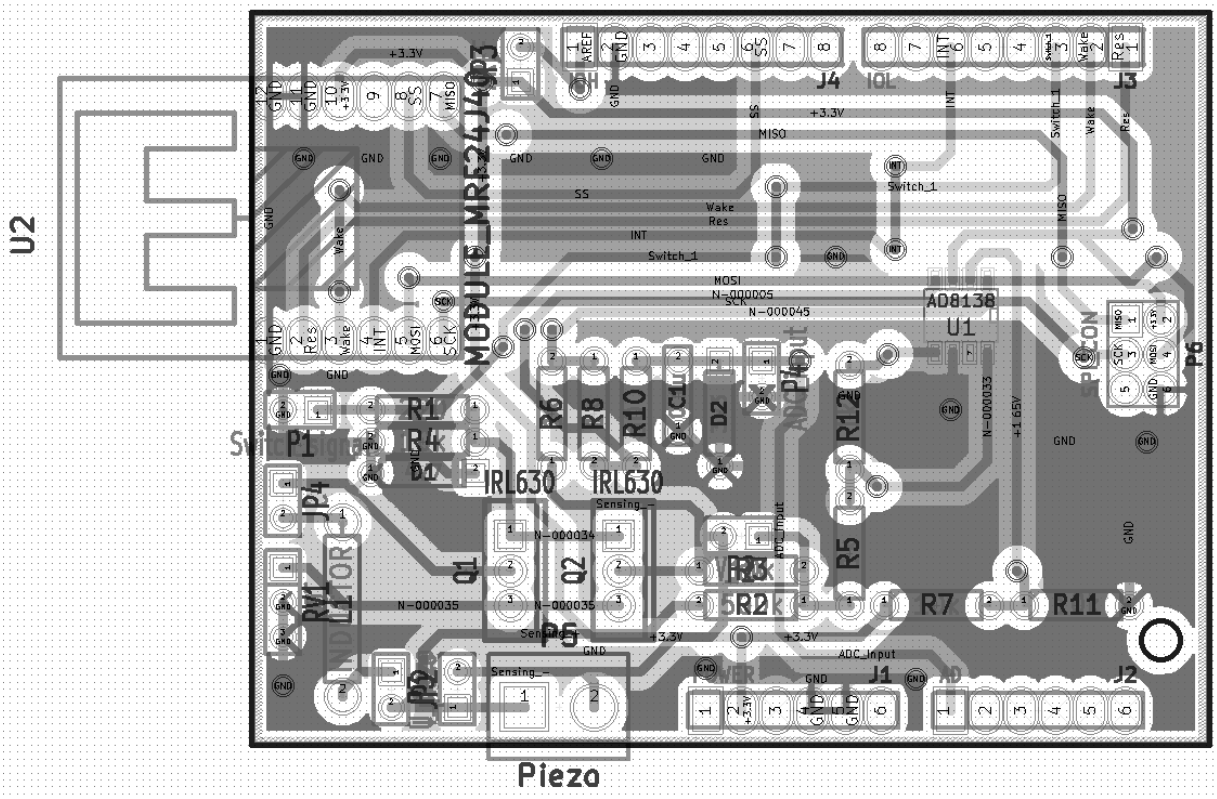


Figure III.24. La conception de la première carte PCB équipée du circuit de la méthode SSHI.

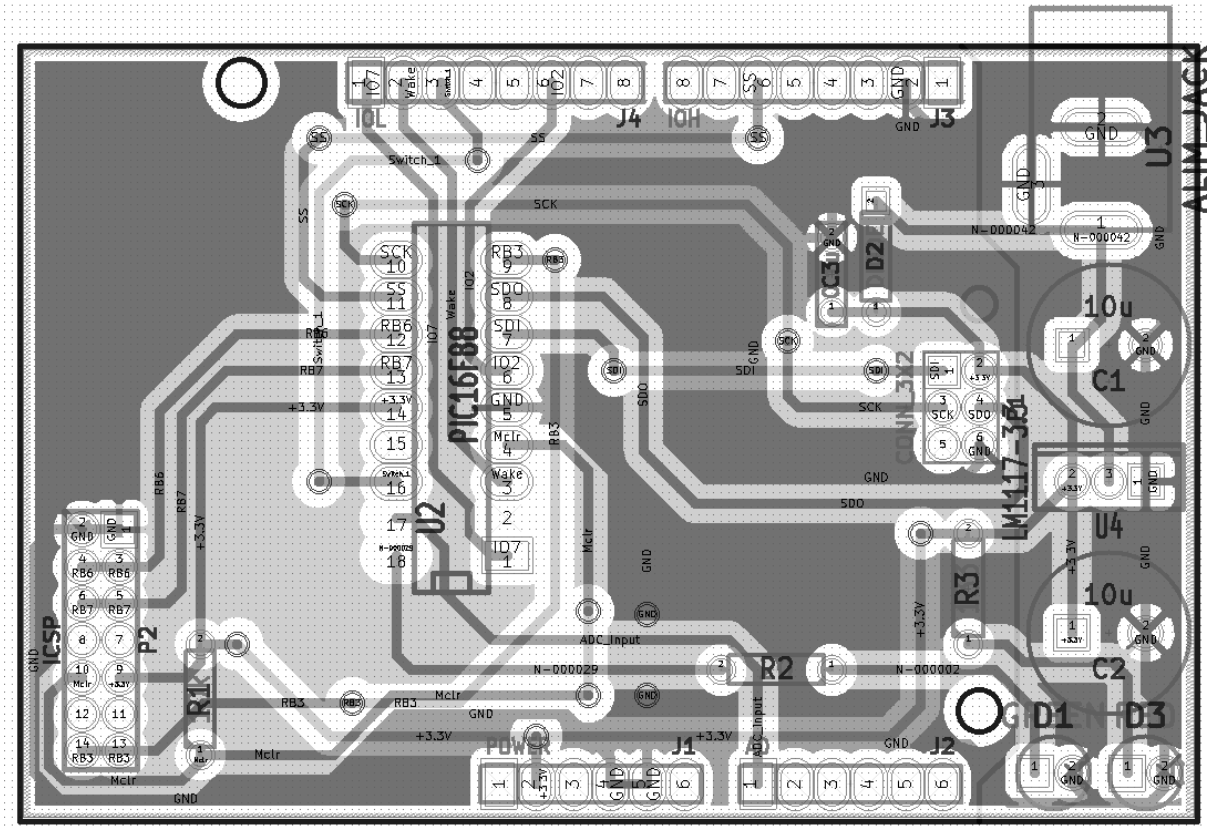


Figure III.25. La conception de la deuxième carte PCB équipée du microcontrôleur.

La fabrication des cartes a été réalisée en utilisant les fichiers Gerber par une société externe. Le montage des composants a été réalisé en utilisant une station de soudure standard.

Les composants traversant ont été choisis pour simplicité de la mise en œuvre de nœud WSN. Les cartes prototypées ont les dimensions globales de 50,8 mm × 68,6 mm. Cependant, nous pouvons estimer que la réduction de taille de 20% est possible en utilisant les composants montés en surface.

La Figure III.26 présente la photo du nœud WSN conçu. Nous avons construit deux dispositifs identiques.

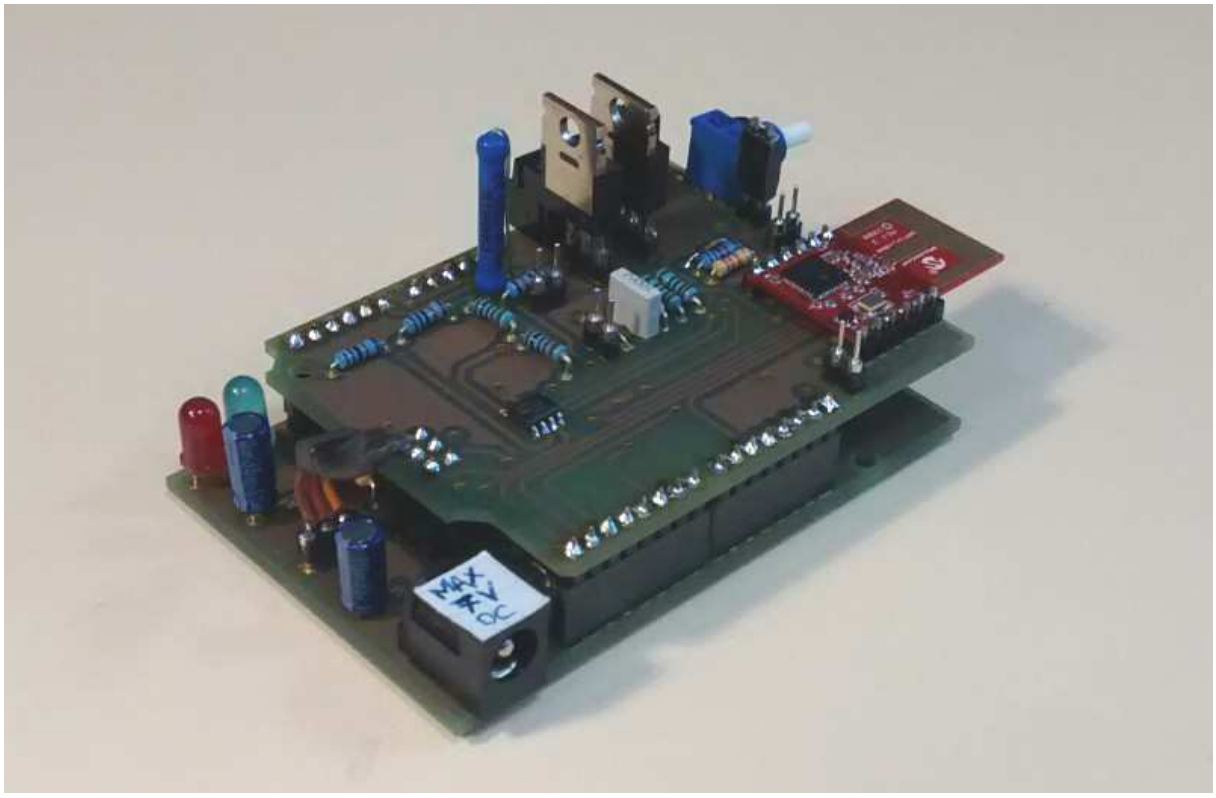


Figure III.26. La photo du prototype de nœud WSN conçu.

4.3.2. Mesures sur le nœud prototypé

Le nœud WSN est conçu, modélisé et confirmé par les simulations. Ensuite nous avons prototypé le nœud WSN conçu. Maintenant nous allons valider la réalisation du nœud par les mesures.

La Figure III.27 présente le schéma synoptique de nœud complet prototypé. Sur cette figure nous présentons aussi les points de mesures. Nous avons choisi les mêmes points de mesures qui ont été présentés pour la validation de la conception par les simulations. Ainsi nous pouvons facilement comparer des résultats obtenus.

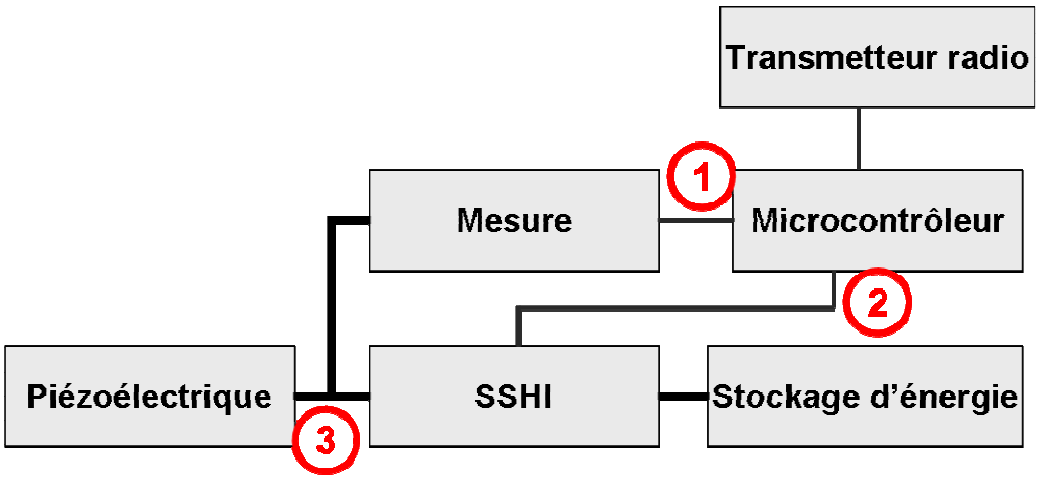


Figure III.27. Le schéma synoptique de nœud WSN complet prototypé et les points de mesures.

Rappelons certains éléments : le point 1 correspond au signal conditionné dans le circuit de mesure de vibrations, celui-ci est lu par le convertisseur analogique numérique du microcontrôleur. Au point 2, nous avons un signal de contrôle de la méthode SSHI généré par le microcontrôleur. Ces deux signaux sont présentés Figure III.28. Le signal de contrôle est de plus présenté en détail (zoom) sur la Figure III.29. Puis, dans le point 3, nous effectuons les mesures de la tension et du courant aux bornes de l'élément piézoélectrique. Ces deux signaux sont montrés sur la Figure III.30 (la tension) et la Figure III.31 (le courant).

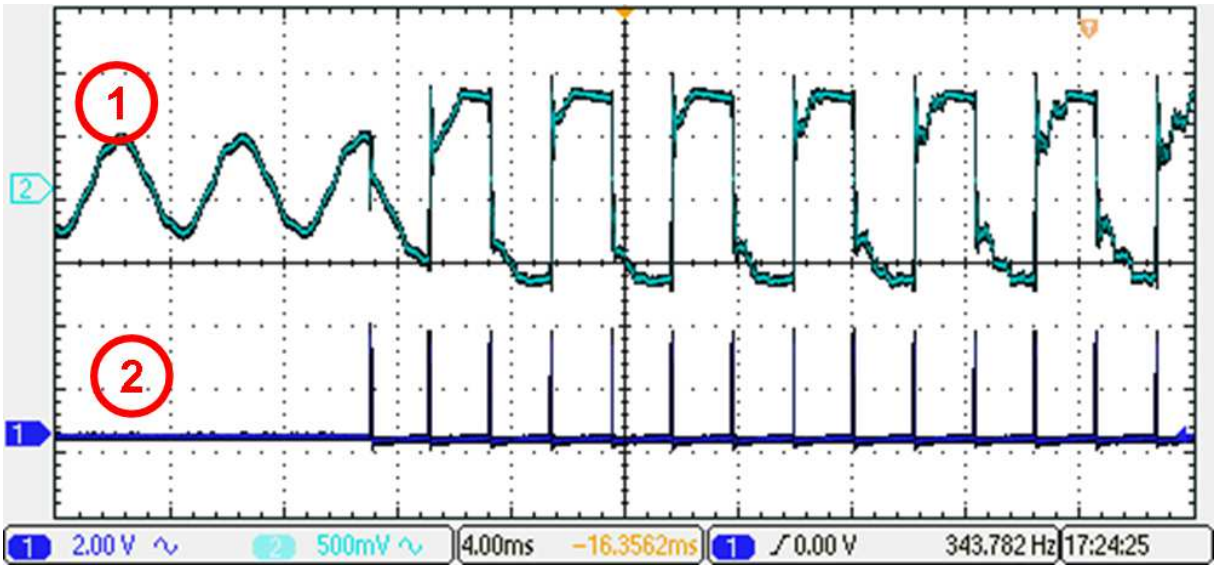


Figure III.28. Le signal d'entrée du convertisseur analogique numérique (1) et le signal de contrôle de la méthode SSHI génère par le microcontrôleur (2).

La Figure III.28 confirme le signal de mesure de vibrations. Le signal n'est pas déformé et il correspond à celui mesuré aux bornes de l'élément piézoélectrique. Le

signal de contrôle généré par le microcontrôleur est capable de contrôler l'interrupteur de la méthode SSHI.

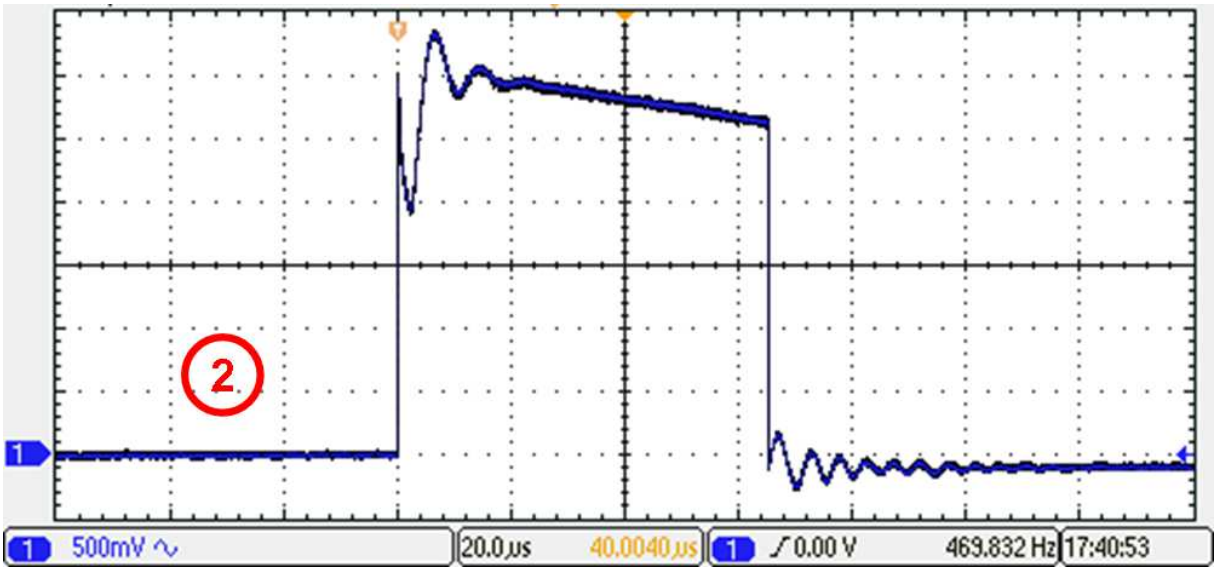


Figure III.29. L'impulsion du signal de contrôle de la méthode SSHI généré par le microcontrôleur (2)

La Figure III.29 montre une impulsion du signal de contrôle. Les pentes sont raides et la tension du signal a l'amplitude de 3 V. Nous pouvons observer les oscillations et déformations de ce signal idéalement en créneaux. Toutes les déformations sont reliées avec l'existence d'un transformateur d'isolation. La mesure confirme la conception d'isolation. Le signal de contrôle a les propriétés suffisantes pour contrôler l'interrupteur de la méthode SSHI.

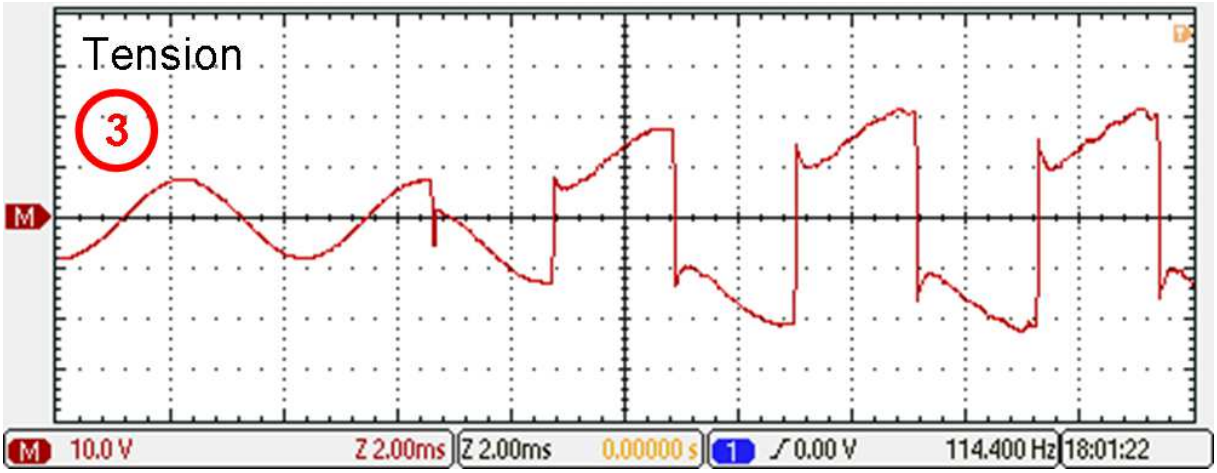


Figure III.30. La tension aux bornes de l'élément piézoélectrique.

La Figure III.30 présente la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique. Sur cette figure, nous pouvons constater l'amplitude de la tension sans et avec les commutations du nœud WSN. Cela nous permet de confirmer la conception et la réalisation du circuit SSHI. Nous notons la résonance d'amplitude de la tension : la

valeur de la tension augmente quand le nœud WSN est actif. Nous observons aussi le procédé d'inversion de la tension.

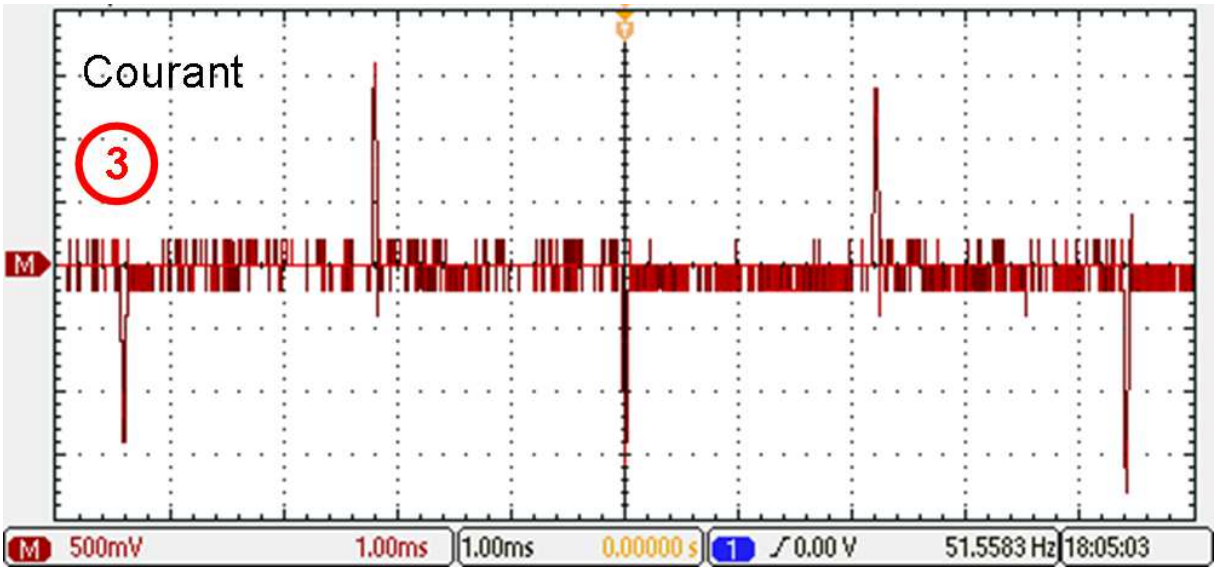


Figure III.31. Le courant dans le circuit de la méthode SSHI mesuré sur la résistance de 100Ω.

La Figure III.31 montre le courant dans le circuit SSHI. Le signal de courant a un caractère impulsionnel. Cette caractéristique confirme le bon fonctionnement d'interrupteur de la méthode SSHI, qui est fermé pour un période très courte pour créer un circuit résonant avec une bobine externe.

La mesure est effectuée sur une résistance de 100Ω. Nous pouvons donc calculer l'amplitude maximale du courant de 17 mA. Il faut noter qu'il existe une différence dans la valeur des pics mesurés. Cela peut être expliqué par le caractère non idéal de l'algorithme implémenté (il n'est pas toujours synchronisé idéalement avec les extrema de la tension).

Les résultats de mesure effectuée ont confirmé la qualité du nœud WSN réalisé. Nous avons validé le nœud WSN prototypé et confirmé le bon fonctionnement du nœud WSN.

Nous pouvons maintenant comparer les résultats de simulations et de mesures effectuées.

4.4. Comparaison des résultats de simulations et de mesures

La Table III.1 rappelle les valeurs simulées et mesurées pendant la validation du nœud WSN.

	Simulations	***Mesures***
L'amplitude de tension piézoélectrique (circuit ouvert)	*Vpp = 17 V*	*Vpp = 17 V*
L'amplitude de signal conditionnée (les mesures de vibrations)	*Vpp = 1,4 V*	*Vpp = 1,5 V*
L'impulsion du contrôle de la méthode SSHI	*Vpp = 3,3 V* *ton = 65 µs*	*Vpp = 3,0 V* *ton = 62 µs*
La tension et le courant dans le circuit de la méthode SSHI	*Vpp = 40 V* *I = 20mA*	*Vpp=40V* *I = 17mA*

Table III.1. La comparaison des résultats de simulations et mesures.

L'écart relatif moyen entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées est 9,3 %. Cela confirme la qualité de la modélisation effectuée et la compatibilité des circuits réalisés avec les exigences visées.

Bien que nous puissions noter les différences mineures entre les simulations et les mesures, nous devons prendre en compte le facteur de la qualité du circuit réalisé. Dans les circuits résonants les résistances de pistes, de connexions etc. affectent de manière significative le comportement du circuit. De plus, dans les simulations nous avons implémenté un modèle simplifié d'élément piézoélectrique et un signal de contrôle idéal. Le logiciel implémenté dans le nœud WSN introduit aussi des différences significatives.

4.5. Description du logiciel implémenté

Le microcontrôleur PIC16LF88 fournit plusieurs fonctionnalités :

- la mesure de vibrations avec l'utilisation du convertisseur analogique numérique interne (la mesure de la fréquence et de l'amplitude de vibrations),
- la détection des crêtes et la génération d'un signal de contrôle de la méthode SSHI (de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations),
- la communication sans fil avec le réseau.

Le logiciel est réalisé en langage de programmation C, en utilisant le logiciel « PCWH » produit par la société «CCS Inc.»[5]. La programmation du microcontrôleur est faite en utilisant le programmeur et le debugger « ICD-U40 » aussi fabriqué par « CCS Inc. ». Le logiciel implémenté utilise le transmetteur radio pour la communication sans fil. Ainsi, pour la vérification de la communication et le logiciel implémenté, nous utilisons l'écouteur via un sniffer IEEE 802.15.4 fabriqué par « FlexiPanel LtD.»[6].

Dans le nœud prototypé, le microcontrôleur travaille avec l'horloge interne de 1 MHz. Le convertisseur interne est mis en place au mode de 10 bits.

La Figure III.26 présente le schéma synoptique du logiciel. Initialement, selon cette figure, le programme configure le hardware. Ensuite, nous passons à la première mesure de vibrations. Les calculs de la fréquence de vibrations sont réalisés en utilisant le compteur de passage par zéro. Ensuite, l'amplitude de vibrations est mesurée par la recherche des valeurs minimales et maximales.

Dans l'état de synchronisation, le nœud WSN attend le premier extremum d'amplitude de vibrations pour basculer dans l'état suivant. Dans l'état suivant de la commutation l'interrupteur est commuté X fois. Puis, il revient à l'état de synchronisation. Le procédé est répété Y fois.

Finalement, le logiciel passe à l'état de la mesure de vibrations. A partir des mesures, il prend une décision. Si l'amplitude de vibrations dépasse une valeur de seuil, c'est-à-dire, les vibrations existantes dépassent la valeur pour laquelle le nœud WSN est capable de fournir un amortissement suffisant, le nœud transmet les données vers le nœud passerelle. Si la valeur n'est pas dépassée, il revient à l'état de synchronisation et la boucle est réalisée de nouveau.

[5] http://www.ccsinfo.com URL accédée le 10 novembre 2015

[6] http://www.flexipanel.com/ URL accédée le 10 novembre 2015

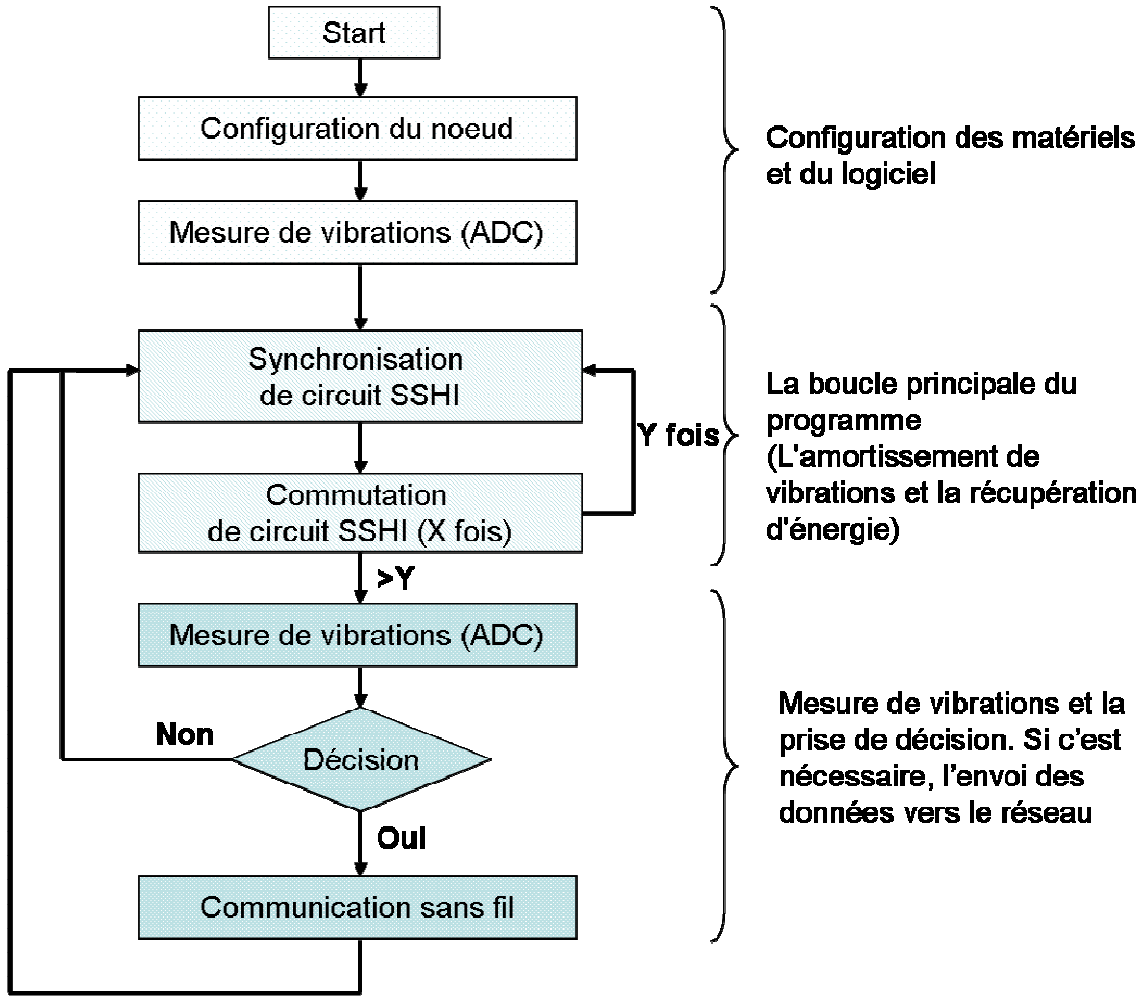


Figure III.32. Le schéma synoptique du logiciel réalisé.

La Figure III.33 contient le chronogramme du signal en entrée du convertisseur analogique numérique en mode AC (le signal sinusoïdal) et le signal de contrôle du circuit SSHI généré par le microcontrôleur (signal d'impulsion).

La mesure présentée est effectuée pour confirmer l'efficacité du logiciel implémenté. Pendant la mesure, le circuit de la méthode SSHI est ouvert donc nous n'observons pas l'inversion de la tension.

La figure confirme une bonne efficacité du logiciel implémenté, mais nous voyons aussi le retard dans la génération du signal de contrôle de la méthode SSHI.

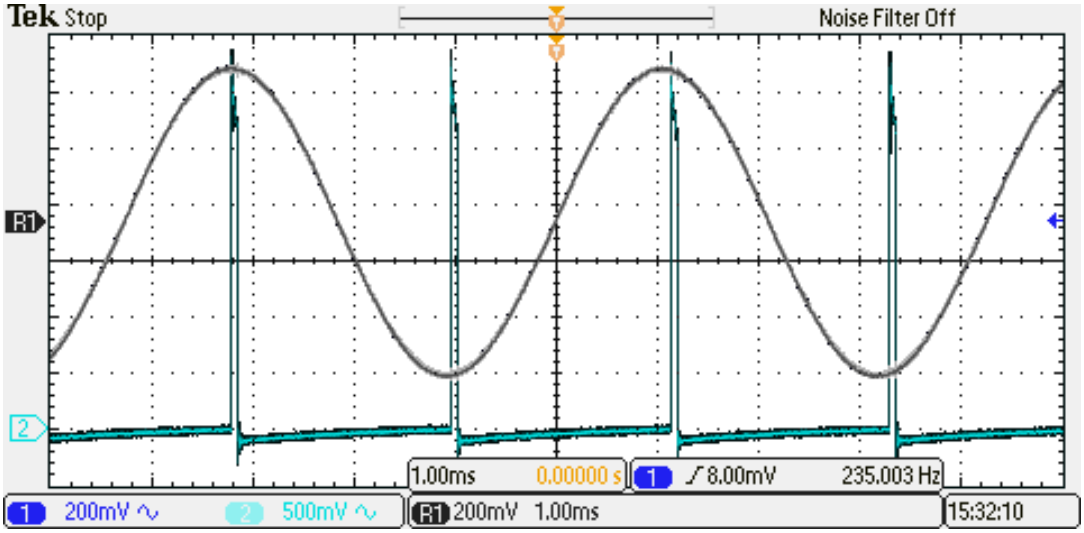


Figure III.33. La mesure du module de circuit SSHI : le signal de contrôle du SSHI.

5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté le chemin complet de la réalisation d'un nœud de réseau de capteurs sans fil pour le système d'amortissement de vibrations. Nous avons commencé par les études de l'élément piézoélectrique. Cela a permis de trouver une solution efficace de connexion d'un seul élément piézoélectrique avec les modules de nœud WSN conçu.

Nous avons présenté en détail le circuit pour le module de mesure de vibrations et le circuit de la méthode SSHI utilisée pour la récupération d'énergie et l'amortissement de vibrations. Ensuite nous avons expliqué l'intégration des modules dans un nœud WSN complet.

Pour valider la conception, nous avons réalisé les simulations du nœud WSN. Les résultats de simulations ont confirmés les solutions choisies. Cela a permis de passer à la réalisation d'un prototype du nœud WSN. Nous avons expliqué le processus de prototypage du nœud WSN. Les mesures effectuées sur le dispositif prototypé ont confirmé la qualité des manipulations.

Le nœud réalisé répond à toutes les exigences établies dans la conception du système distribué d'amortissement de vibrations en utilisant le réseau de capteurs sans fil. Le nœud prototypé réalisé sera donc utilisé pour créer un réseau de capteurs sans fil du système de contrôle de vibrations. Le chapitre IV de cette thèse présentera les résultats de ces manipulations.

Chapitre IV
Validation du système intégré

Ce chapitre présente la validation du réseau de capteurs sans fil pour le contrôle actif de vibrations. Nous allons créer un réseau en utilisant les nœuds WSN conçus. Ce réseau sera validé en utilisant le système mécanique que nous avons ainsi réalisé et qui est équipé de système actif distribué d'amortissement de vibrations conçu. Pour la validation, nous allons utiliser deux nœuds tels qu'ils ont été prototypés. Ce chapitre porte sur la validation des trois principales fonctionnalités du système, la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

1 Configuration expérimentale

La validation du système intégré est réalisée en utilisant le système mécanique montré dans le deuxième chapitre de la thèse. Chacun des deux éléments piézoélectriques est connecté avec le nœud de réseau de capteurs sans fil présenté dans la partie III. La Figure IV.1 présente le schéma synoptique de la configuration expérimentale.

La validation du système intégré est réalisée par les mesures. Nous commençons par la validation de mesure de vibrations. Puis nous vérifions l'amortissement local de vibrations. Enfin nous passons à la validation du système intégré, composé de deux nœuds sans fil pour vérifier l'action globale (l'effet spatial d'amortissement de vibrations).

Enfin, nous allons vérifier la faisabilité du nœud WSN autoalimenté. Nous allons mesurer la quantité d'énergie récupérée par le nœud WSN pour les comparer avec la valeur d'énergie consommée.

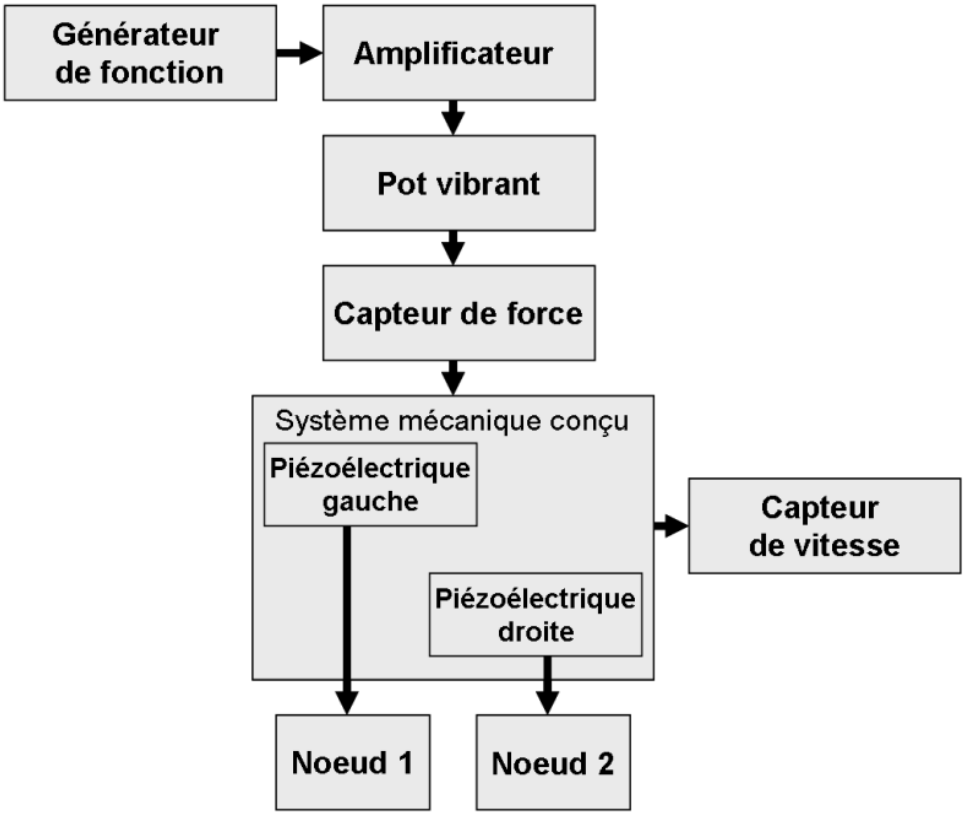


Figure IV.1. Schéma synoptique de la configuration expérimentale.

2 Validation du système de mesures de vibrations

Les exigences du système d'amortissement des vibrations proposé incluent la capacité de mesurer des vibrations en utilisant les éléments piézoélectriques. Les mesures sont effectuées pour confirmer la capacité de mesure des vibrations en utilisant les éléments piézoélectriques installés sur le système mécanique.

Selon l'état de l'art, nous considérons les fréquences de vibrations inférieures à 300 Hz. Ainsi, pour vérifier la capacité de la mesure de vibrations par le système conçu, pour une gamme de fréquences donnée, nous allons exciter le système mécanique avec les différentes fréquences de la force d'excitation.

Rappelons que dans l'effet piézoélectrique, nous constatons que la tension générée est corrélée aux déformations intégrées sur la surface de l'élément piézoélectrique. Ainsi, la valeur crête à crête de la vitesse des vibrations est mesurée pour les neuf points répartis sur la surface du piézoélectrique.

Ensuite, cette valeur de vitesse intégrée sur la surface est comparée à la tension générée par l'élément piézoélectrique. La Figure IV.2 présente les résultats obtenus.

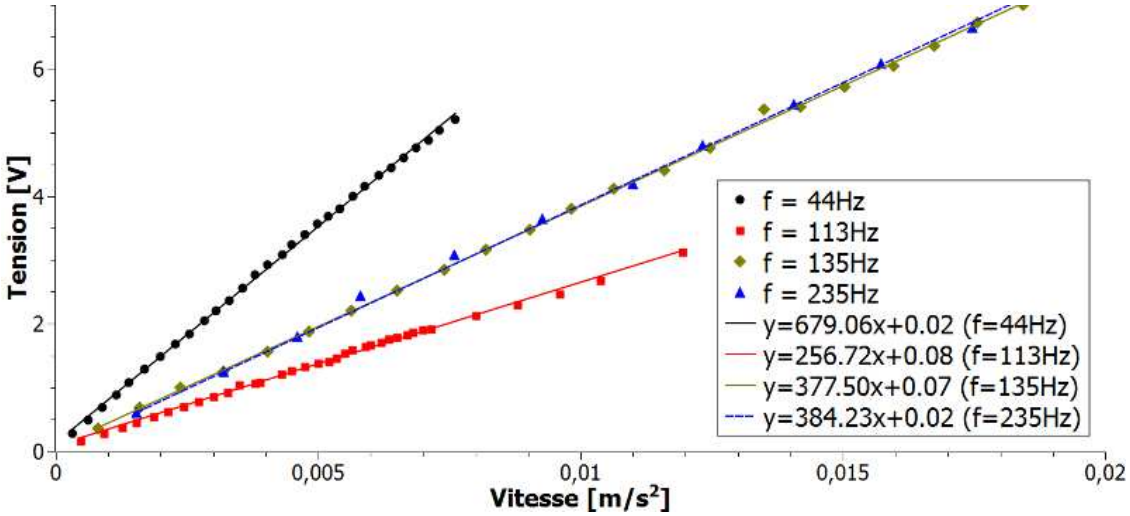


Figure IV.2. La tension générée en fonction de la vitesse des vibrations.

La corrélation entre la tension d'élément piézoélectrique et de la vitesse peut être estimée par une fonction linéaire avec une approximation acceptable (les lignes de tendance sont données sur la Figure IV.2).

La Table IV.1 montre l'erreur relative moyenne entre l'estimation de la vitesse en utilisant les lignes de tendance et les valeurs mesurées.

Fréquence [Hz]	*44 Hz*	*113 Hz*	*135 Hz*	*235 Hz*
L'erreur relative	*2,56 %*	*5,76 %*	*0,90 %*	*1,76 %*

Table IV.1. L'erreur relative des valeurs mesurées.

Selon la caractéristique présentée, il est possible de noter l'existence d'une différence entre les valeurs des pentes pour des fréquences variées. Cet effet est associé étroitement avec la réponse du système mécanique (la forme de mode de vibrations de la plaque).

Les courbes tracées pour les fréquences des vibrations modales ont des pentes différentes. Cependant, la différence entre les pentes de ligne de tendance pour les fréquences 135 Hz (mode multi-fréquentielles) et 235 Hz (mode mono- fréquentielle) peut être négligée. Cela s'explique par la réponse du système mécanique (voir Chapitre II).

Pour la fréquence de la force d'excitation 135 Hz, le système répond avec le mode des vibrations correspondant à la fréquence de 235 Hz (Figure IV.3). Ainsi, la pente correspond aux fréquences et la forme de mode des vibrations.

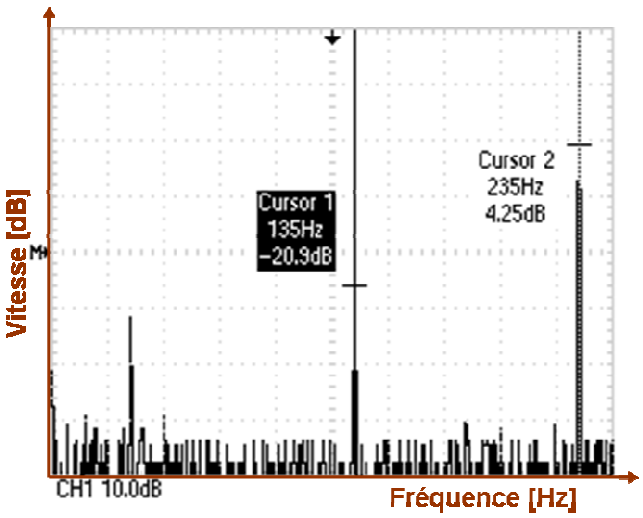


Figure IV.3. La FFT de la vitesse de vibrations (la force d'excitation de 135 Hz).

Les mesures ont confirmé l'utilisation des éléments piézoélectriques pour la mesure des vibrations.

Bien qu'un étalonnage complexe soit nécessaire pour la mesure de vibrations dans une large gamme de fréquences, il peut être facilement implémenté en connaissant la réponse du système mécanique. L'erreur relative obtenue permet d'obtenir le système de mesure de vibrations avec une précision de mesure acceptable.

3 Validation du système d'amortissement de vibrations

Le système actif distribué sans fil basse consommation d'énergie pour l'amortissement de vibrations sera validé dans cette section. Ainsi, un seul élément piézoélectrique gauche avec le nœud du système conçu est considéré. Ensuite nous passons à la validation de l'effet global du système. Pour cela, nous allons considérer un réseau de capteurs composé de deux nœuds.

3.1. Effet local d'amortissement

L'étude du système mécanique présenté dans le Chapitre II a permis d'identifier les deux types de vibrations : mono et multi- fréquentielles. Ainsi, nous allons valider l'amortissement de vibrations séparément pour chaque type de vibration.

Pour valider l'effet local, nous allons utiliser le nœud WSN relié à l'élément piézoélectrique gauche installé sur la plaque en aluminium. Nous allons donc regarder l'effet local, c'est à dire, nous considérons la zone où est implanté le nœud WSN.

Pour présenter les résultats des mesures nous avons choisi d'utiliser une échelle logarithmique. L'équation (IV.1) explique la formule utilisée.

$$dB = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{v_a}{v_i}\right) \qquad \text{(IV.1)}$$

v_a – la vitesse de vibrations mesurée (un seul système d'amortissement est actif),

v_i – la vitesse de vibration initiale (sans le système d'amortissement de vibrations).

Pour valider l'efficacité du système conçu, nous devrons comparer les résultats obtenus avec l'autre système d'amortissement de vibrations. Pour cela, nous allons implémenter la méthode la plus simple et la plus facile pour l'implémentation : méthode d'amortissement de vibrations passive résistive (voir Chapitre I ; §2.6.1). Rappelons, que dans ce système passif l'élément piézoélectrique est relié à une résistance.

3.1.1. Le système mécanique en mode de vibrations mono-fréquentielles

Le système est excité en utilisant la force sinusoïdale d'amplitude fixée. La fréquence de la force choisie est 235 Hz, car il s'agit du mode modal de vibrations identifié comme celui contenant le plus d'énergie (explications au Chapitre II § 3.1.1). La vitesse de vibrations est mesurée en utilisant le vibromètre laser au milieu d'élément piézoélectrique gauche (pour valider l'effet local d'amortissement de vibrations).

La Figure IV.4 présente les résultats des mesures d'amortissement de vibrations pour deux méthodes : nœud WSN (SSHI) et passive.

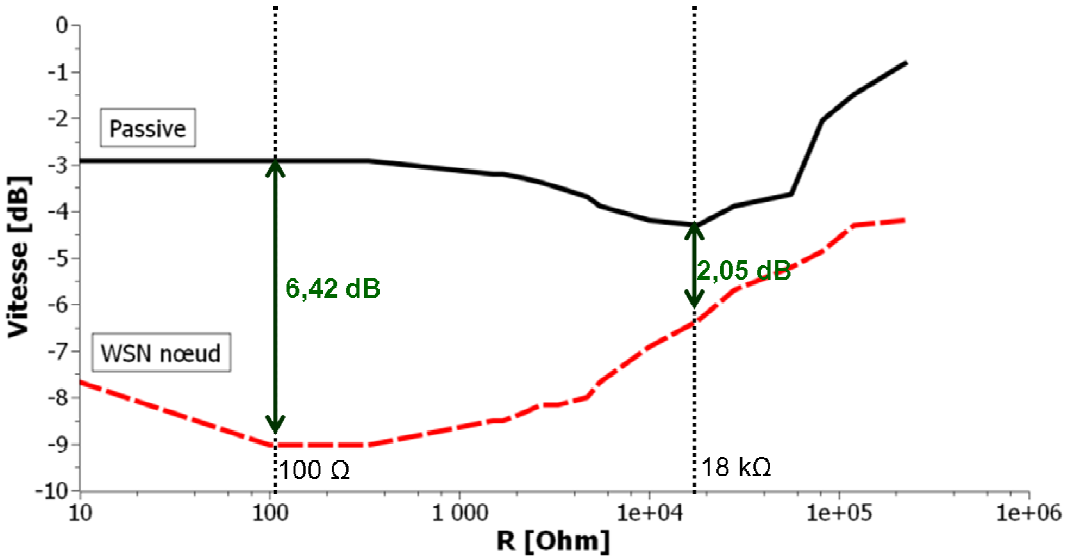


Figure IV.4. L'amortissement de vibrations pour les vibrations mono-fréquentielles.

Selon les résultats, nous voyons que la réduction de vibrations par le noeud WSN a eu l'efficacité maximale pour la charge de 100 Ω. Pour cette valeur de la charge le noeud WSN a obtenu la réduction de 9,34dB, tandis que le système passif 2,92 dB (la différence est de 6,42 dB).

Le système passif a eu l'efficacité maximale de 4,3 dB pour la charge résistive égale 18 kΩ, tandis que le nœud WSN a obtenu la réduction de 6,35dB (la différence est de 2,05 dB).

Les résultats montrent que le nœud WSN conçu est plus efficace que la méthode passive résistive. Nous passons maintenant aux modes de vibrations multi-fréquentielles pour valider l'efficacité d'amortissement de vibrations par le nœud conçu dans le système plus complexe.

3.1.2. Le système mécanique en mode de vibrations multi-fréquentielles

Dans ce cas, la fréquence de la force générée est de 65 Hz, identifiée comme le plus énergétique mode multi-fréquentielles de vibrations (explications dans le Chapitre II § 3.1.2).

Dans le deuxième chapitre, nous avions montré que pour cette fréquence d'excitation le système mécanique vibre avec plusieurs fréquences. Ainsi nous allons mesurer l'amortissement de vibrations séparément pour chaque mode de vibration se produisant.

La Figure IV.5 rappelle la FFT de la vitesse pour la force sinusoïdale d'excitation de 65 Hz (mesuré sur la plaque au milieu de l'élément piézoélectrique gauche).

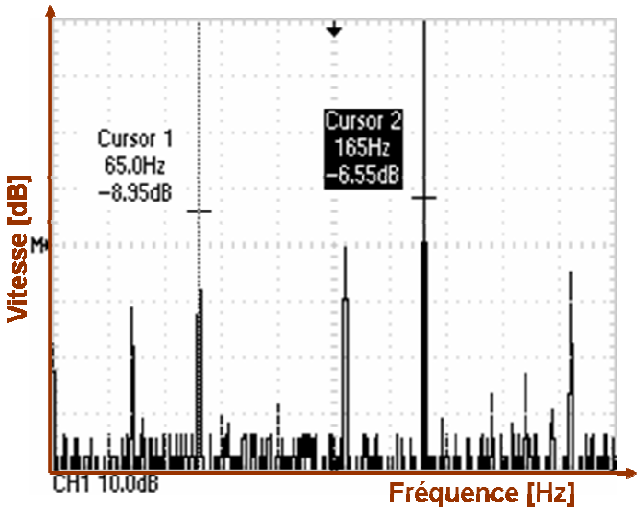


Figure IV.5. La FFT de la vitesse de vibrations mesurée au milieu de l'élément piézoélectrique gauche pour la force d'excitation de 65 Hz.

A partir de cette FFT, nous pouvons identifier plusieurs pics des fréquences : 35 Hz, 65 Hz, 130 Hz, 165 Hz, 235 Hz et 295 Hz.

Le nœud conçu est utilisé pour vérifier l'amortissement de vibrations pour tous les pics identifiés. La valeur maximale d'amortissement pour les différentes composantes de la réponse est présentée à la Table IV.2.

Fréquence [Hz]	*35 Hz*	*65 Hz*	*130 Hz*	*165 Hz*	*235 Hz*	*295 Hz*
L'atténuation maximale	*0*	*0*	*0*	*8 dB*	*9 dB*	*0*

Table IV.2. L'atténuation maximale pour les différentes fréquences (la fréquence de la force d'excitation est 65 Hz).

Pour les pics de 35 Hz, 65 Hz, 130 Hz, 295 Hz, l'amortissement de vibrations n'est pas obtenu ou la valeur est négligeable. Cela peut être expliqué par la forme de mode de vibrations et la position de l'élément piézoélectrique par rapport au ventre d'onde de vibrations.

- **Composante de la réponse à 165 Hz**

La Figure IV.6 présente l'amortissement de vibrations mesuré pour la fréquence composante de 165 Hz.

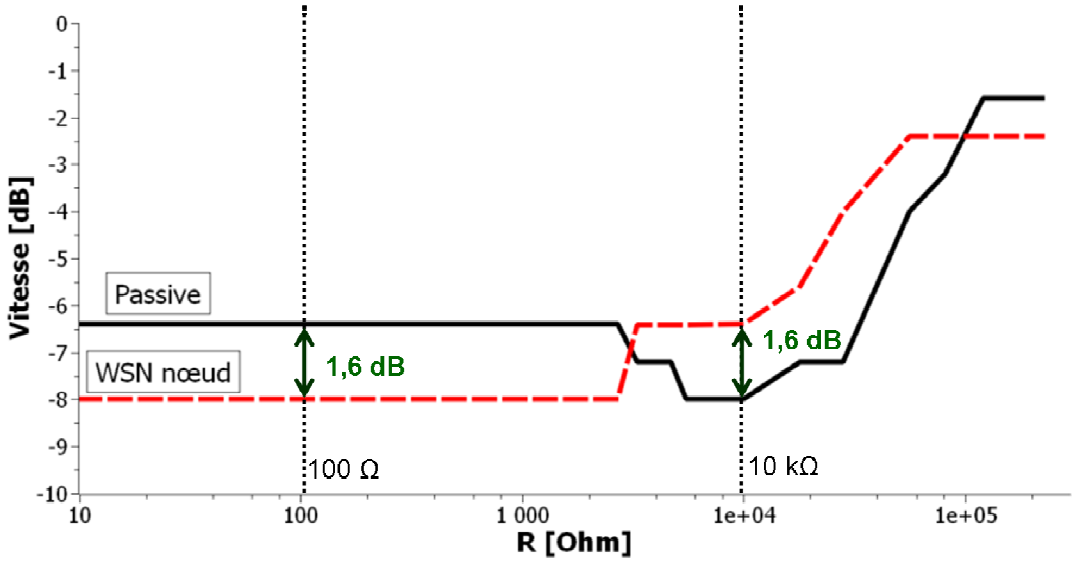


Figure IV.6. L'atténuation de vibrations pour la composante de la réponse à 165 Hz.

Pour les valeurs de résistances entre 10 Ω et 2,7 kΩ l'efficacité du système actif est maximale et égal à -8 dB, tandis que le système passif a obtenue une réduction de 6,4 dB (la différence entre les deux systèmes est de 1,6 dB).

Selon la figure nous voyons que, pour les valeurs de la résistance, supérieure à 2,7 kΩ le système passif est plus efficace que le nœud WSN conçu. Pour la valeur de la résistance égale à 10 kΩ la différence dans l'efficacité des systèmes est 1,6 dB. Le système passif a obtenu la réduction de 8dB, tandis que le nœud WSN a obtenue la réduction de 6,4 dB.

Nous voyons que l'efficacité d'atténuation des vibrations pour les deux systèmes considérés est comparable. Pour compléter l'analyse des résultats obtenus nous présentons sur la Figure IV.7 la forme de vibrations pour la fréquence composante de 165 Hz.

Selon cette forme de vibrations, nous observons que la plaque en aluminium est déformée. De plus, l'élément piézoélectrique gauche est placé à proximité du ventre d'onde donc il est déformé et il est possible d'amortir les vibrations.

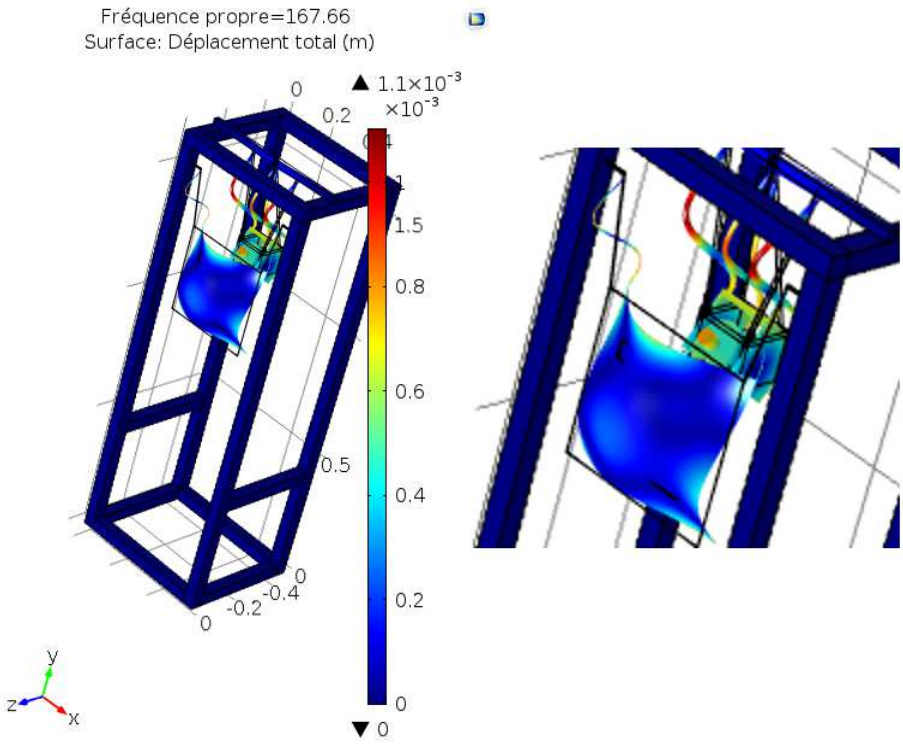


Figure IV.7. La forme de mode identifié pour les vibrations de 165 Hz.

- **Composante de la réponse à 235 Hz**

La Figure IV.8 présente l'amortissement de vibrations pour la fréquence composante de 235 Hz.

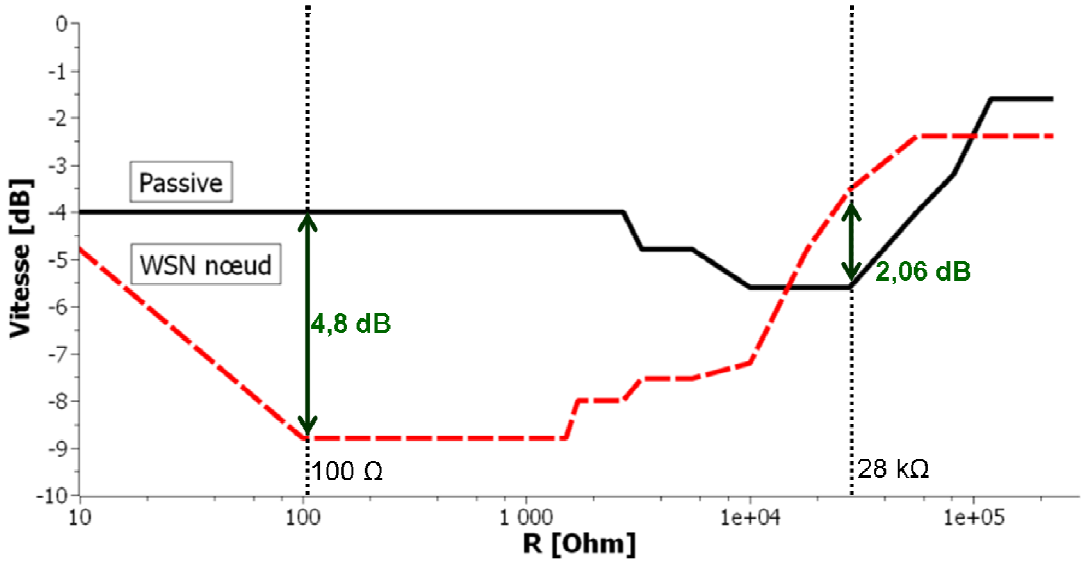


Figure IV.8. L'atténuation de vibrations pour la composante de la réponse à 235 Hz.

Selon les mesures nous voyons que le noeud WSN a obtenu la réduction de 8,8 dB pour les résistances entre 100 Ω et 1,5 kΩ. Tanis que pour mêmes valeurs de la résistance le système passif a obtenu la réduction de 4 dB (la différence est 4,8 dB).

Cependant, le système passif est plus efficace que le nœud WSN pour les valeurs de la charge résistive supérieurs. Il atteint la réduction maximale de 5,6 dB pour la résistance de 28 kΩ. Le nœud WSN est 2,06 dB moins efficace et, il atteint la réduction de 3,54 dB.

La Figure IV.9 rappelle la forme de vibrations pour la fréquence de 235 Hz. Nous voyons que dans ce mode de vibrations : la plaque en aluminium et aussi l'élément piézoélectrique gauche sont bien déformés. L'élément piézoélectrique est positionné à proximité du ventre d'onde de vibrations donc l'efficacité d'amortissement mesuré est maximale pour cette mode de vibrations.

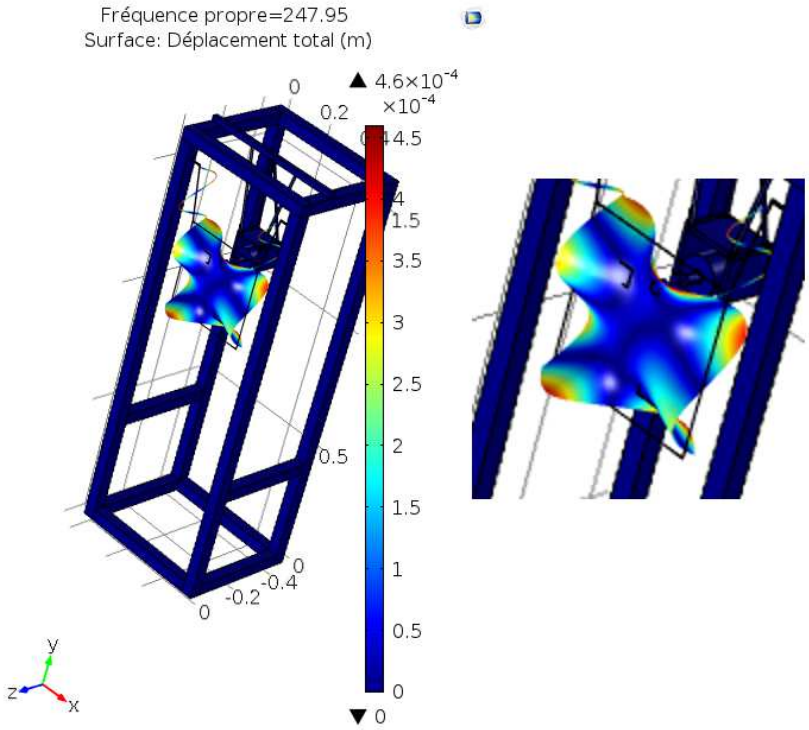


Figure IV.9. La forme de mode identifié pour les vibrations de 235 Hz.

Les mesures d'amortissement de vibrations ont montré que le nœud WSN peut amortir plusieurs composantes de réponse en même temps. L'efficacité d'amortissement est reliée à la position de l'élément piézoélectrique. L'amortissement de vibrations en utilisant le nœud conçu est donc validé et confirmé.

Nous pouvons passer à la prochaine étape, à savoir l'effet global d'amortissement de vibrations.

3.2. Effet global d'amortissement

Pour valider l'effet global d'amortissement de vibrations (nous regardons l'amortissement global au niveau de la plaque en aluminium), nous allons utiliser le réseau de capteurs sans fil. Le réseau est composé de deux nœuds prototypés. Chacun des deux nœuds WSN est relié avec l'élément piézoélectrique. Les deux nœuds fabriqués sont identiques et leur structure a été expliquée dans le chapitre III.

A partir des mesures effectuées, nous pouvons identifier deux conditions qui doivent être remplies pour valider les réseaux composés des deux nœuds WSN :

- une tension significative doit être générée par les deux éléments piézoélectriques (l'exigence du nœud relié à la méthode SSHI),
- les deux éléments piézoélectriques doivent être placés à proximité du ventre d'onde de vibrations.

Nous cherchons donc la fréquence d'excitation pour laquelle la tension signifiante est générée par les deux éléments piézoélectriques installés sur la plaque. La Figure IV.10 rappelle la tension mesurée aux bornes des deux éléments piézoélectriques.

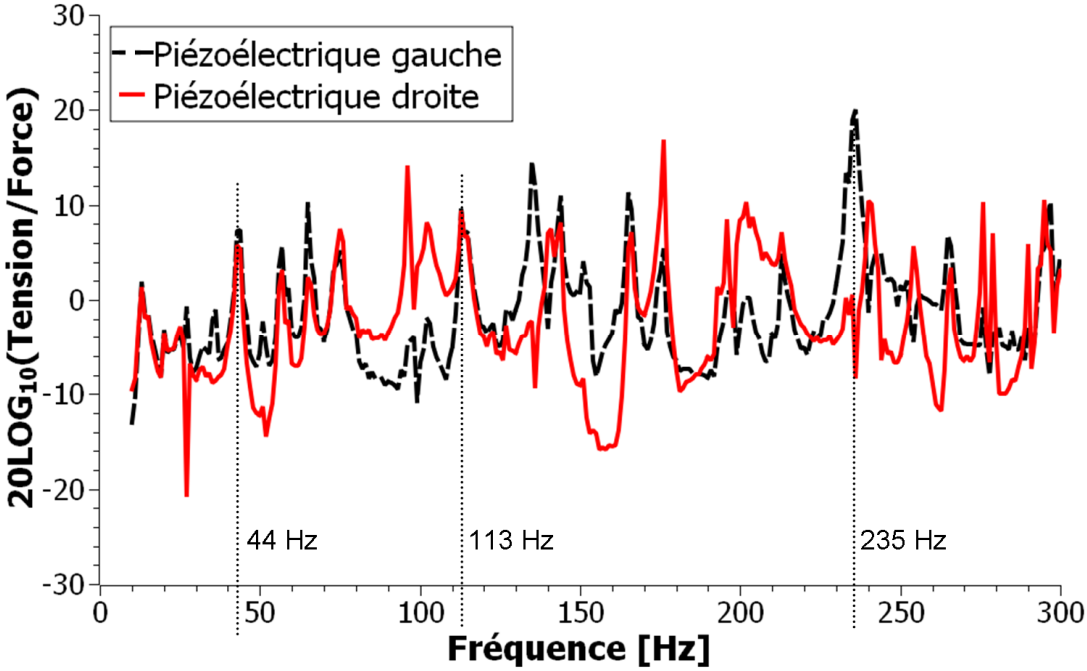


Figure IV.10. Les valeurs de tension mesurées aux bornes des éléments piézoélectriques.

Bien que nous puissions identifier plusieurs fréquences pour lesquelles la valeur de la tension est élevée pour les deux éléments piézoélectriques, selon la

deuxième condition, nous devrons choisir parmi ceux-ci la fréquence pour laquelle les deux éléments piézoélectriques sont bien placés pour valider l'amortissement.

Les mesures effectuées et les simulations montrent que le mode modal de vibrations caractérisé par la fréquence de 113 Hz est une seule fréquence qui remplit les deux conditions spécifiées. La Figure IV.11 présente la forme de ce mode obtenu en simulations.

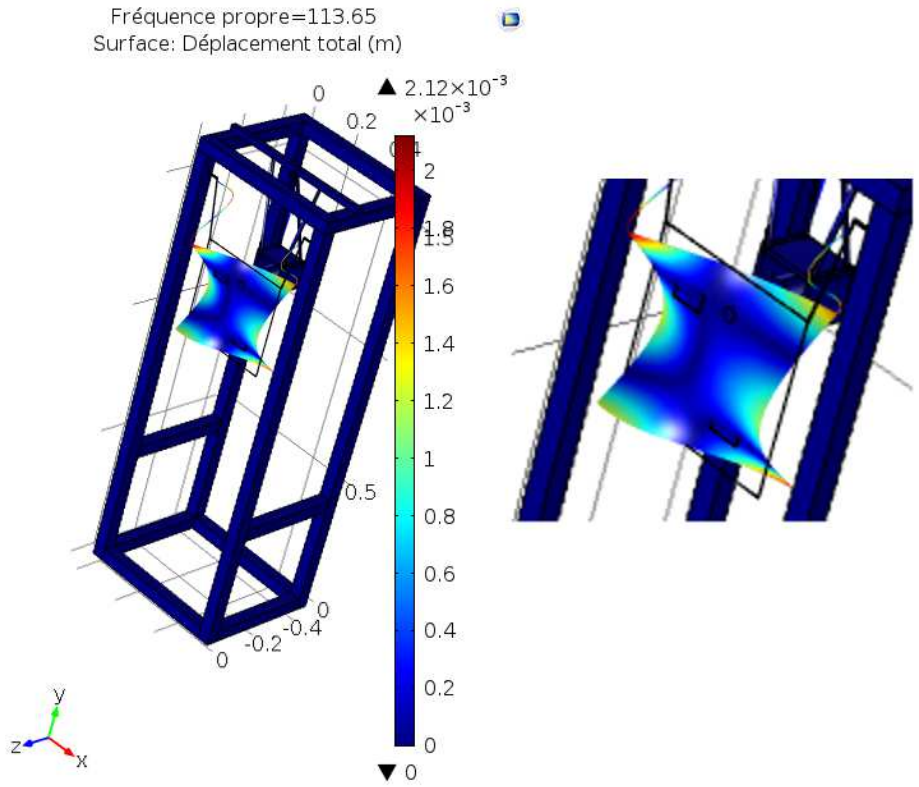


Figure IV.11. La forme de mode identifié pour les vibrations de 113 Hz.

Ainsi, la plaque en aluminium est excitée avec la force sinusoïdale d'amplitude fixée de 113 Hz (mode modal). La mesure d'efficacité du système d'amortissement de vibration est réalisée dans les quatre points symétriquement placés sur la plaque en aluminium (Figure IV.12).

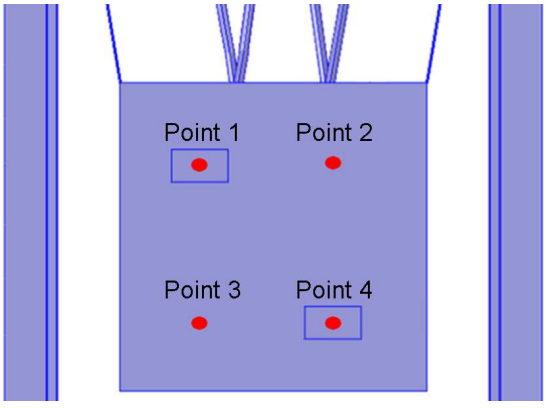


Figure IV.12. Localisation des points de mesure sur la plaque en aluminium.

La Table IV.3 présente les résultats de mesures pour le système conçu de deux nœuds en plusieurs configurations. La valeur de la charge de 330 Ω est utilisée.

	Point 1	*Point 2*	*Point 3*	*Point 4*
Sans le système	*0*	*0*	*0*	*0*
Le nœud gauche actif	*-0,77 dB*	*-0,75 dB*	*-0,89 dB*	*-1,53 dB*
Le nœud droit actif	*-0,77 dB*	*-0,39 dB*	*-0,89 dB*	*-0,99 dB*
Les deux nœuds actifs	*-1,62 dB*	*-1,52 dB*	*-2,41 dB*	*-2,10 dB*

Table IV.3. L'effet de l'atténuation globale.

L'efficacité maximale est obtenue pour la configuration composée de deux nœuds. La réduction de 2,41 dB est mesurée.

Nous notons que l'efficacité du système augmente avec le nombre de nœuds utilisés pour tous les points de mesure. Grâce aux mesures réalisées sur la surface de la plaque, nous pouvons observer aussi l'effet spatial d'amortissement de vibrations.

Les mesures ont présenté l'effet d'amortissement global de vibrations. Nous avons mesuré la diminution de vibrations pour les zones avec et sans les éléments piézoélectriques implantés.

La valeur d'efficacité d'amortissement obtenu est inférieure aux résultats déjà présentés. Cela peut être expliqué par la forme de ce mode de vibrations. Rappelons la Figure IV.11 dans laquelle nous voyons que, dans ce cas, les éléments piézoélectriques ne sont pas placés à proximité du ventre d'onde de vibrations. Dès lors leur efficacité est limitée.

L'autre conclusion est l'augmentation de l'efficacité d'amortissement de vibrations avec le nombre de nœuds utilisés. La mesure valide notre conception du système distribué d'amortissement de vibrations réalisé en utilisant le réseau de capteurs sans fil.

3.3. Chronogramme de la vitesse en amortissement de vibrations

Les sections précédentes ont montré les résultats d'amortissement de vibrations en utilisant les nœuds conçus. Pour compléter l'étude d'amortissement de vibrations nous allons présenter les chronogrammes de la vitesse mesurée avec et sans le système d'amortissement.

La méthode utilisée contient un circuit de commutation, nous voudrons donc vérifier d'influence de ce circuit sur les vibrations dans la plaque.

Le système mécanique est excité avec la force sinusoïdale d'amplitude fixée de la fréquence de 235 Hz. En utilisant le vibromètre au laser nous mesurons la vitesse de vibration au milieu du piézoélectrique gauche.

La vitesse est mesurée pour le système sans amortissement et quand le nœud conçu est actif (l'effet local pour l'élément piézoélectrique gauche). Le résultat de cette mesure est présenté sur la Figure IV.13.

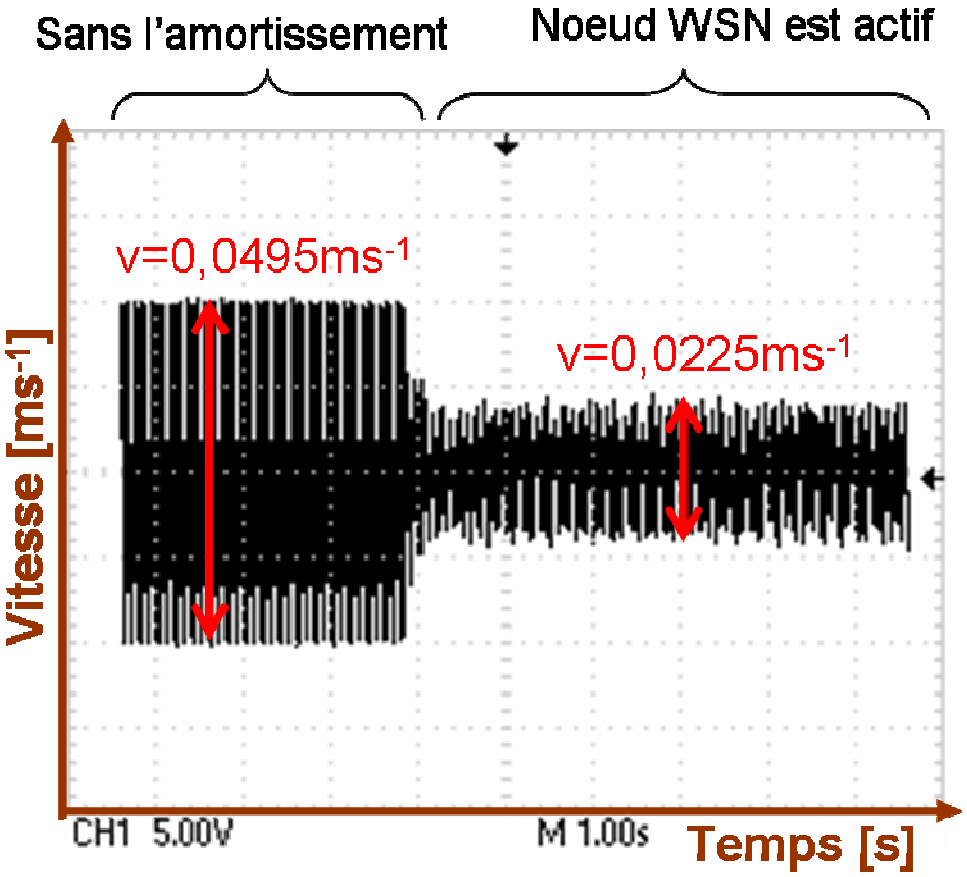


Figure IV.13. Le chronogramme de la vitesse de vibrations mesuré pour le système mécanique excité sans et avec le système d'amortissement conçu.

Le chronogramme présenté valide définitivement le système d'amortissement de vibrations. Nous pouvons calculer le temps qui est nécessaire pour obtenir l'amortissement maximal. La Figure IV.14 présente ce chronogramme plus précis.

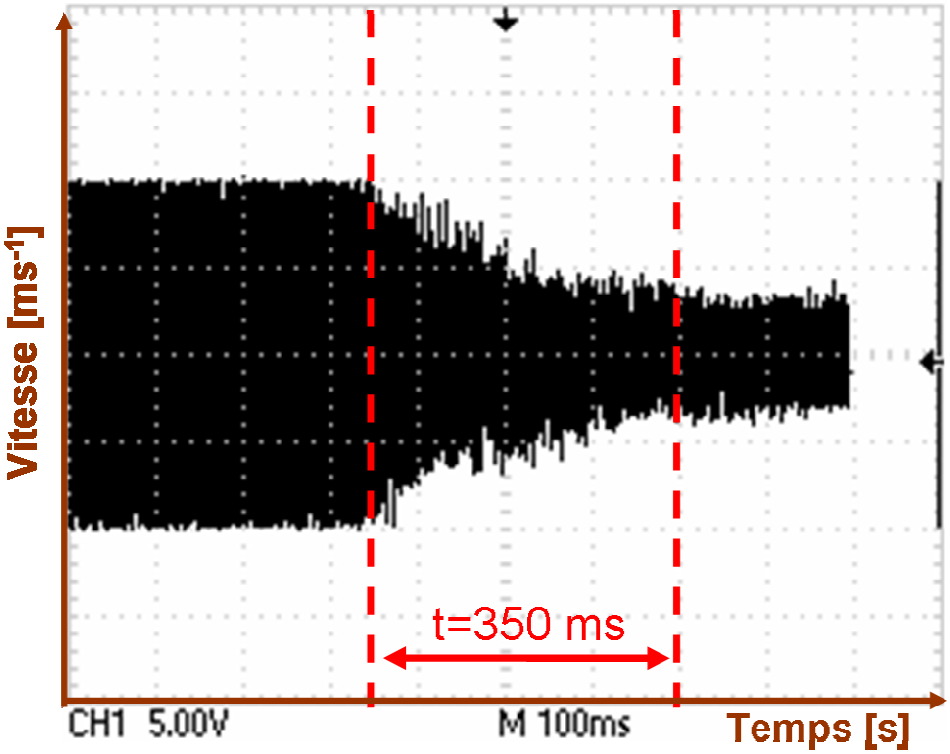


Figure IV.14. Le chronogramme de la vitesse en échelle de temps plus précis.

Selon cet ensemble de mesures, nous pouvons noter que la valeur de la vitesse diminue pendant 350 ms après l'activation du nœud.

La commutation de l'élément piézoélectrique par le circuit SSHI ajoute aussi les distorsions, causée par la commutation de l'élément piézoélectrique.

La Figure IV.15 présente les chronogrammes détaillés de la vitesse sans et avec le système d'amortissement.

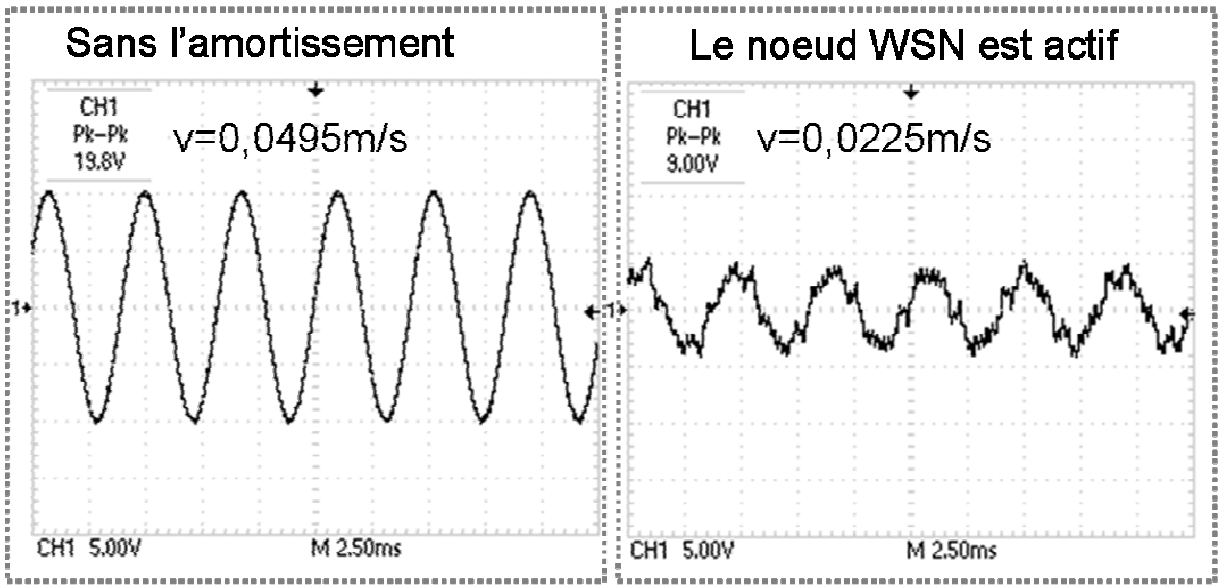


Figure IV.15. Le chronogramme détaillé de la vitesse de vibrations mesuré pour le système mécanique excité sans et avec le système d'amortissement conçu.

Cette figure permet de calculer l'amortissement de vibrations, à savoir un amortissement de 6,85 dB. Selon cette figure, nous pouvons noter aussi les distorsions dans le signal de la vitesse mesuré lorsque le système d'amortissement de vibrations est actif.

La Figure IV.16 présente la FFT de ces signaux de la vitesse dans le système mécanique sans et avec le système d'amortissement de vibrations. Bien qu'il existe plusieurs pics harmoniques, leur l'amplitude reste faible en comparaison du pic le plus élevé. Pour donner un exemple, le pic correspondant à la fréquence d'excitation donne 7,05 dB, tandis que le deuxième plus grand pic identifié sur la figure est de −8,95 dB.

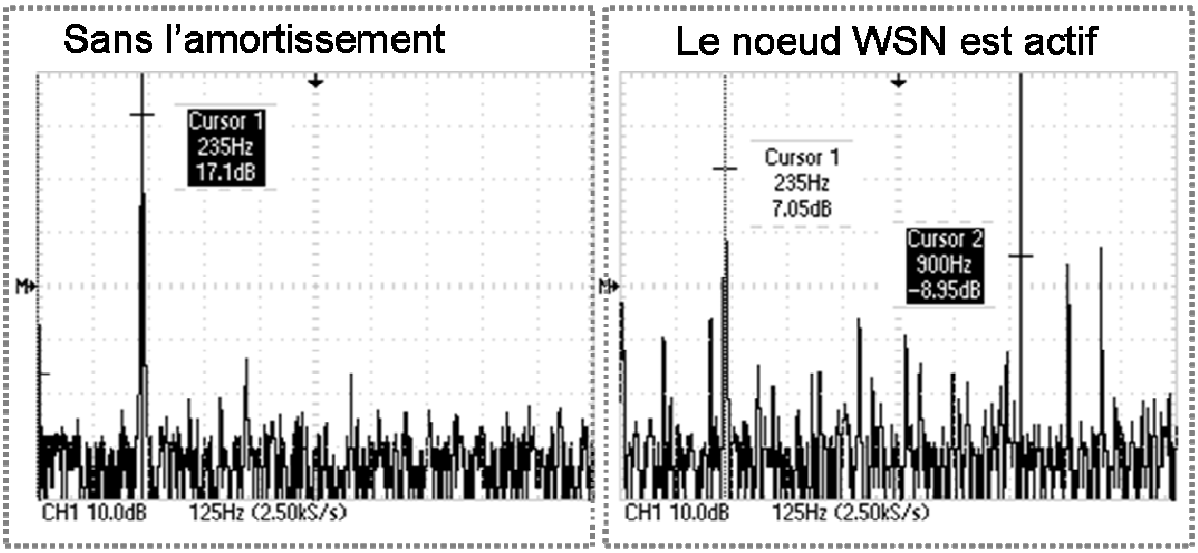


Figure IV.16. Les FFT de la vitesse de vibrations mesurée pour le système mécanique excité sans et avec le système d'amortissement conçu.

La capacité d'amortissement de vibrations en utilisant le réseau de capteur sans fil conçu est validée par les mesures. Nous avons présenté le processus d'amortissement de vibrations en utilisant les analyses temporelles et fréquentielles. L'effet local et l'effet global d'amortissement de vibrations sont présentés. L'analyse d'amortissement est effectuée pour les vibrations mono et multi-fréquentielles. Les résultats sont discutés avec l'aide des simulations de forme de vibrations.

Dès lors, nous pouvons maintenant passer à la validation de la capacité de la récupération d'énergie depuis les vibrations.

4 Validation du système de récupération d'énergie

Dans cette section, nous allons valider la capacité de la récupération d'énergie par le nœud de réseau de capteur sans fil conçu. En premier lieu, nous allons présenter les schémas de mesures utilisés pour la validation de cette fonctionnalité. Puis, nous allons passer à la vérification de la quantité d'énergie récupérée par les deux méthodes : le nœud WSN équipé d'un circuit SSHI et la méthode appelée classique. La méthode classique est la plus simple pour récupérer de l'énergie, elle consiste à inclure dans le circuit un pont redresseur suivi d'une capacité de filtrage. Ensuite, nous détaillerons la consommation d'énergie par le nœud WSN conçu. Les mesures effectuées permettent de vérifier la faisabilité d'un système électronique autonome.

4.1. Mesures de la valeur d'énergie

Nous commençons par l'introduction aux mesures de l'énergie récupérée par le nœud de réseau de capteurs sans fil conçu. Ensuite, nous allons présenter les résultats et leur interprétation.

4.1.1. Introduction aux mesures

La Figure IV.17a rappelle le schéma générique de la méthode SSHI utilisée pour la récupération d'énergie. Rappelons que, grâce à cette méthode nous pouvons créer un circuit résonant pour accorder l'impédance de l'élément piézoélectrique et le circuit de stockage d'énergie. Cependant, le procédé de la récupération d'énergie est plus efficace qu'en utilisant la méthode standard (Figure IV.17b). Pour valider l'efficacité du nœud conçu équipé d'un circuit SSHI, nous allons comparer les résultats de mesures avec la valeur d'énergie récupérée en utilisant la méthode standard.

Rappelons que les mesures sont effectuées sur la configuration expérimentale présentée plus haut. Le système mécanique est excité avec une force sinusoïdale d'amplitude fixée. La fréquence de la force est 235 Hz (vibrations modales), car il

s'agit du mode modal de vibrations identifié comme celui contenant le plus d'énergie (explications au Chapitre II § 3.1.1). Nous utilisons l'élément piézoélectrique gauche relié au nœud WSN prototypé. La valeur d'amplitude de la vitesse mesurée au milieu de l'élément piézoélectrique est 0,044 ms^{-1}. La tension crête à crête générée par l'élément piézoélectrique gauche dans le circuit ouvert est de 17 V.

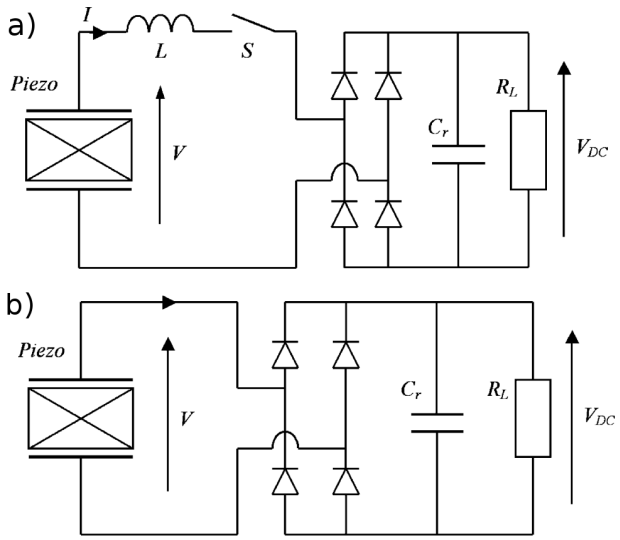


Figure IV.17. a) Le circuit de la méthode SSHI ; b) Le circuit de la méthode classique.

4.1.2. Mesures de l'énergie

Les schémas électriques des circuits utilisés pour mesurer la valeur d'énergie sont présentés sur la Figure IV.18. Les schémas présents les circuits utilisés pour la mesure d'énergie réelle et instantanée.

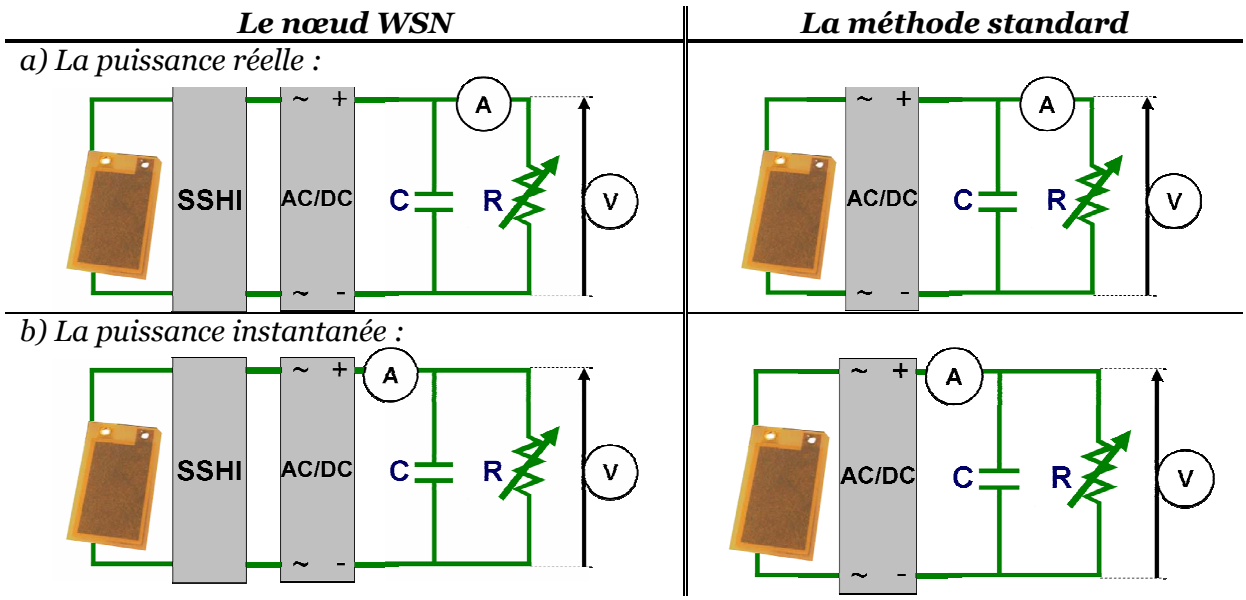


Figure IV.18. Les schémas des circuits de mesure de l'énergie récupérée pour les deux méthodes de la récupération choisis :
a) la puissance réelle, b) la puissance instantanée.

Nous mesurons les valeurs efficaces de signaux (« True RMS ») en utilisant le multimètre fabriqué par société TENMA (Modèle 72-1016). La précision de mesures est la suivante :

- ±0,01 µA pour la valeur de courant,
- ±30 µV pour la valeur de la tension.

4.1.3. Puissance instantanée et réelle

Les circuits de mesure ayant été décrit précédemment, nous pouvons passer à la mesure des quantités d'énergie. Les résultats de mesures de la puissance instantanée d'énergie sont présentés sur la Figure IV.19.

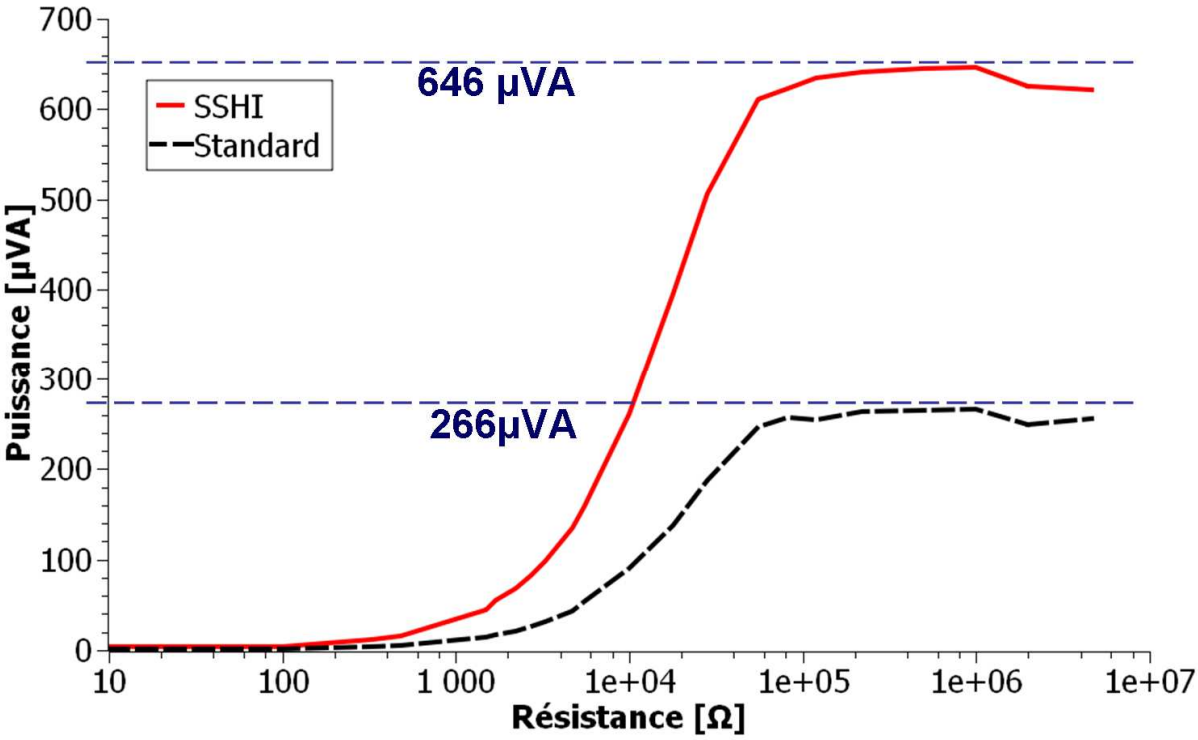


Figure IV.19. La puissance instantanée mesurée dans le circuit de la méthode SSHI et la méthode standard.

La mesure montre que la valeur d'énergie instantanée mesurée dans le circuit SSHI est 2,43 fois plus grande que la valeur mesurée pour le circuit classique. Nous mesurons la valeur de 646 µVA dans le circuit équipé du nœud WSN. Le circuit classique affiche la valeur de 266µVA.

Les mesures confirment le principe du circuit résonant utilisé. Nous constatons que l'utilisation du nœud conçu équipé de la méthode SSHI augmente la valeur d'énergie disponible dans le circuit.

Nous pouvons donc maintenant présenter la mesure de la valeur de l'énergie réelle récupérée. Nous mesurons la puissance réelle sur la charge résistive, les résultats sont présentés sur la Figure IV.20.

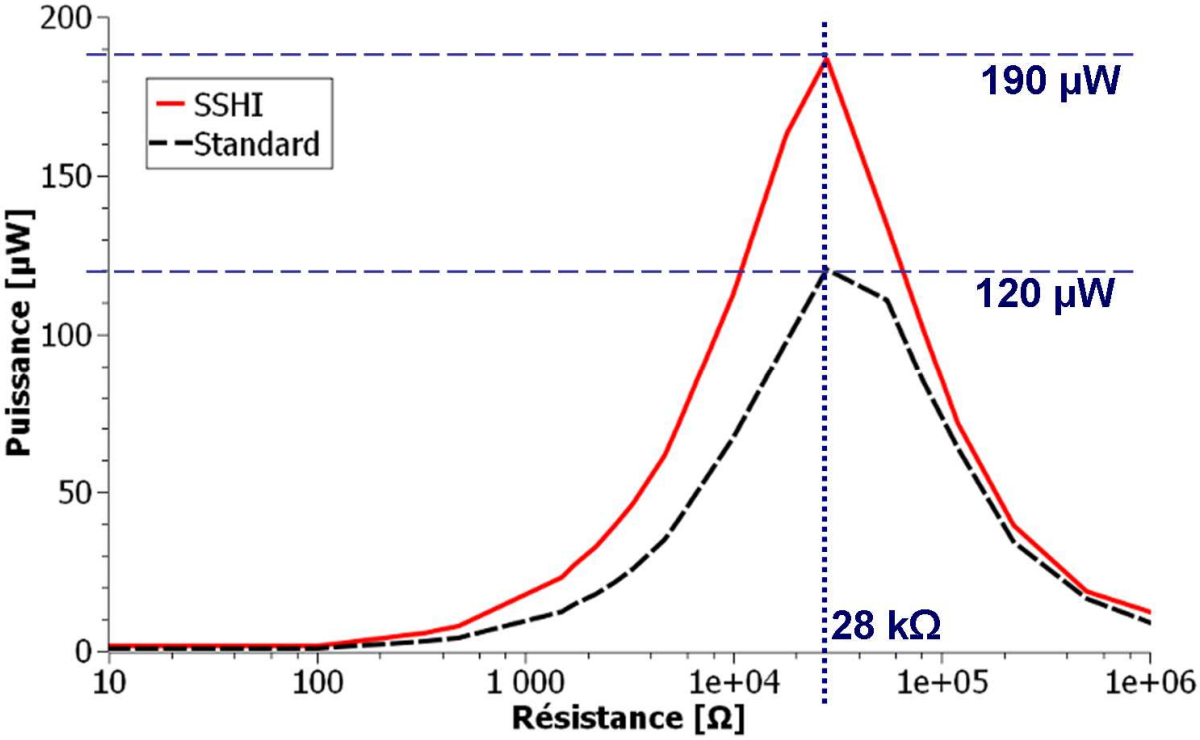


Figure IV.20. La puissance réelle récupérée par le nœud et la méthode standard.

Les mesures confirment que le nœud conçu peut améliorer la quantité d'énergie récupérée. Nous mesurons la valeur 190µW en utilisant le nœud conçu pour la valeur de la résistance optimale de 28 kΩ. La méthode standard a permis de récupérer de 120µW pour la même valeur de la charge résistive optimale.

Le nœud, en utilisant la valeur optimale de la charge résistive, peut récupérer 58,4% plus d'énergie que le circuit standard. Le volume du matériau piézoélectrique utilisé est égal de 0,75 cm^3. Ainsi, la densité de l'énergie récupérée en utilisant le nœud, selon la mesure présentée est le **253,4 μWcm^{-3}** (pour la vitesse de vibration v=0,044 ms^{-1}). Nous avons obtenue un ordre de grandeur attendu; elle est comparable avec les valeurs présentes dans l'état de l'art.

Selon les mesures présentées dans le chapitre II de la thèse, nous savons que la valeur de la résistance optimale dépend de la fréquence de vibrations. Il faut donc utiliser une résistance dynamique qui puisse être réglée en fonction de la fréquence de vibrations. Cette fonctionnalité est fournie par les systèmes « MPPT », largement utilisés dans la récupération d'énergie solaire. Malheureusement, les algorithmes de méthodes MPPT sont souvent lents, tandis que la fréquence des vibrations peut

changer dynamiquement. Il peut être donc intéressant de considérer l'utilisation de la puissance de calcul du nœud pour régler dynamiquement la charge.

Pour compléter ces résultats nous présentons aussi la valeur de la tension continue mesurée sur la charge résistive (Figure IV.21).

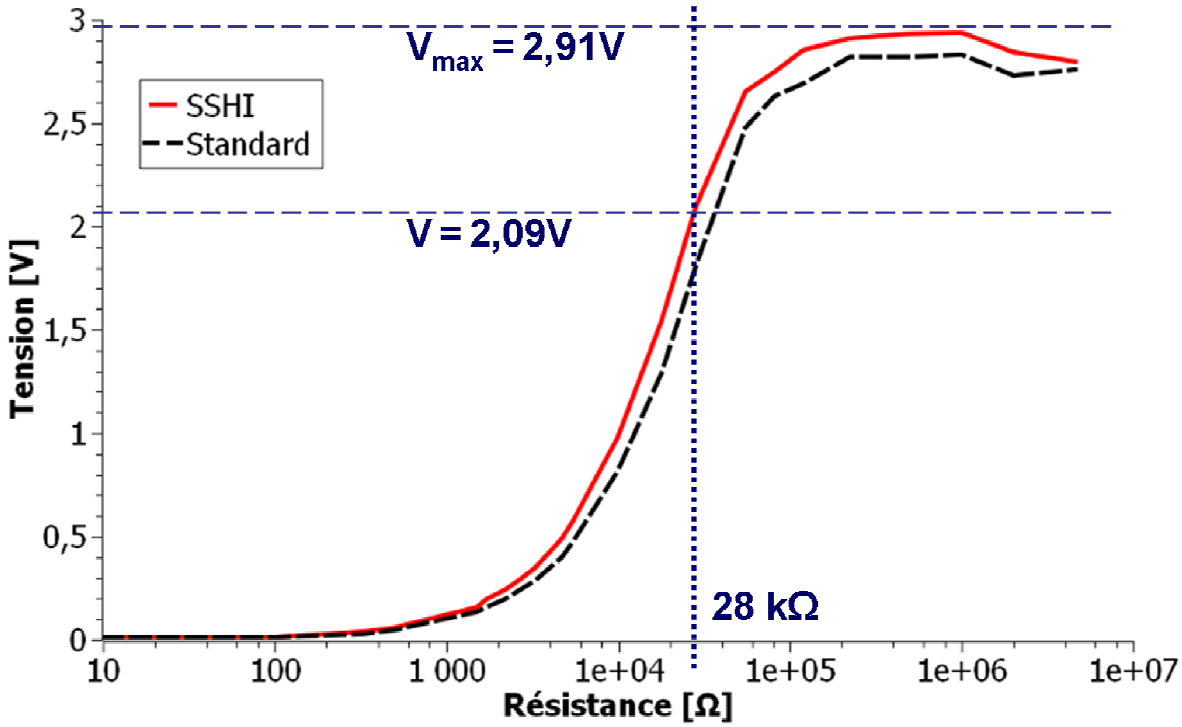


Figure IV.21. La valeur de la tension mesurée sur la charge résistive.

La figure indique que pour la valeur de la charge résistive optimale (28 kΩ) la valeur de la tension continue est 2,09 V.

La tension a donc une valeur de grandeur acceptable mais une stabilisation de la tension doit être considérée pour alimenter le nœud depuis l'énergie récupérée.

4.2. L'influence du module de mesure de vibrations

Nous rappelons que pendant la récupération d'énergie le nœud fournit simultanément la mesure de vibrations. Le module de mesure de vibrations fonctionne en parallèle avec le module d'amortissement de vibrations et de récupération d'énergie.

Nous allons maintenant vérifier l'efficacité de la solution proposée pour la connexion des modules du nœud et l'élément piézoélectrique.

La Figure IV.22 présente la valeur de la puissance réelle disponible dans le circuit. Pour pouvoir mesurer la différence entre les deux valeurs de la puissance avec

une erreur des mesures acceptable, nous augmentons la valeur de la vitesse de vibrations. Maintenant la vitesse de vibrations mesurées au milieu de l'élément piézoélectrique gauche est $0,0675\ ms^{-1}$. Nous mesurons la valeur de l'énergie récupérée pour deux cas, quand le module de mesure de vibrations est actif, et quand il est électriquement déconnecté.

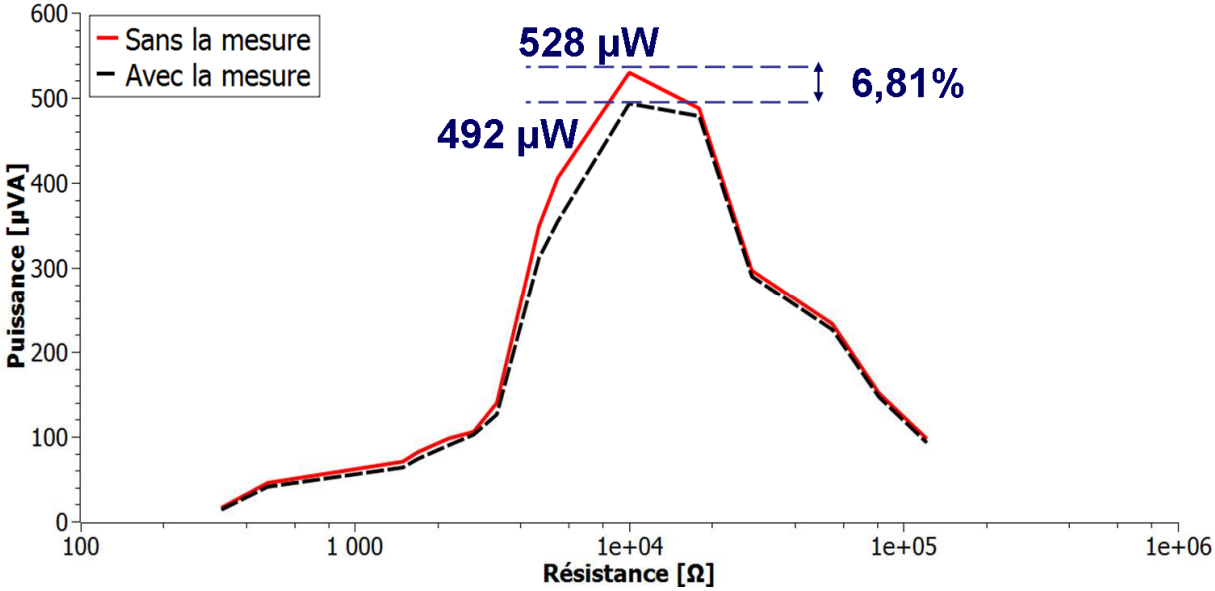


Figure IV.22. La puissance mesurée avec et sans le module de mesure de vibrations.

Les résultats obtenus confirment la qualité de la solution proposée et réalisée. Nous calculons que le 6,81% d'énergie récupérée est une valeur maximale consommée par le module de mesure de vibrations.

4.3. Bilan d'énergétique du nœud

L'un des objectifs de ce travail est de valider la faisabilité de l'auto alimentation du nœud WSN. Dès lors, nous allons maintenant présenter les mesures de l'énergie consommée par le nœud réalisé et les comparer avec la valeur d'énergie récupérée.

4.3.1. Présentation de valeurs

Au début, nous mesurons la valeur de courant et de la tension d'alimentation pour calculer la consommation d'énergie du nœud actif. Les résultats des mesures sont présentés sur la Table IV.4.

	I [mA]	*U [V]*	***P [mW]***
Le microcontrôleur actif (1MHz)	*0,539*	*3,19*	***1,72***
Le circuit de la méthode SSHI (commutation)	*0,011*	*3,19*	***0,035***
Le module de la mesure de vibrations (AD8138)	*16,54*	*3,00*	***49,52***
Le transmetteur radio actif	*18,15*	*2,70*	***49,00***

Table IV.4. Energie consommée par le nœud prototypé.

La Table IV.5 montre les résultats des mesures d'énergie récupérée depuis les vibrations en fonction de la vitesse de vibrations.

Vitesse [ms-1]	*P [mW]*
0,044	*0,190*
0,068	*0,528*

Table IV.5. L'énergie récupérée depuis les vibrations en utilisant le nœud conçu.

Les limites de la structure mécanique ont permis de réaliser cette mesure pour une bande de la vitesse de vibrations étroite (nous pouvons considérer la vitesse de vibrations entre 0,04ms^{-1} et 0,07ms^{-1}.

Les résultats montrent que la valeur d'énergie récupérée est insuffisante pour alimenter en continu le nœud WSN prototypé.

Le nœud pour fournir la récupération consomme 1,755 mW, tandis qu'il récupère 0,528 mW.

Bien qu'il ne soit pas possible d'alimenter le nœud WSN en continu, nous pouvons appliquer certaines solutions présentées dans le chapitre I de cette thèse pour diminuer la consommation d'énergie et pour prolonger la dure de la vie du nœud WSN.

4.3.2. Le rapport cyclique

Ainsi, nous allons expliquer l'optimisation de la consommation d'énergie par le nœud et estimer le rapport cyclique.

Nous constatons que la valeur d'énergie récupérée en continu est 1 mW (la valeur estimée pour la vitesse de vibration de 0, 097 ms^{-1} et fréquence de 235 Hz). Le nœud est alimenté en utilisant la valeur de la tension de 3,3 V. Toutes les mesures présentées ici considèrent cette valeur de la tension d'alimentation.

L'énergie consommée par le microcontrôleur dépend nécessairement de la fréquence d'horloge. Nous mesurons la valeur de la puissance consommée par le microcontrôleur PIC16LF88 pour les différentes valeurs d'horloge (Figure IV.23).

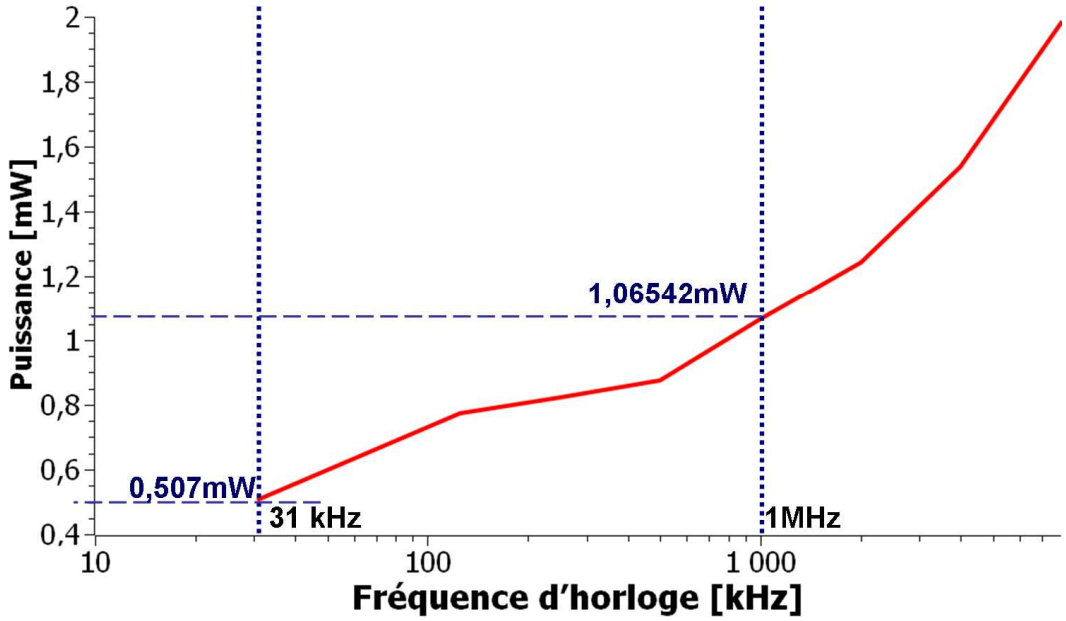


Figure IV.23. Consommation de microcontrôleur PIC16FL88. Les valeurs mesurées.

Selon cette figure nous constatons que la méthode DFS (Dynamic Frequency Selection) peut améliorer considérablement les propriétés du nœud conçu. Cette méthode porte sur la sélection dynamique d'horloge pour diminuer la consommation d'énergie. Nous allons utiliser cette méthode pour estimer la consommation d'énergie du nœud travaillant en rapport cyclique.

Le microcontrôleur peut être cadencé à la fréquence de 31 kHz pendant la récupération d'énergie et l'amortissement de vibrations. Nous devrons l'augmenter la valeur de cette fréquence jusqu'à 1 MHz pour effectuer la mesure correcte de vibration (c'est un exigence de la fréquence d'échantillonnage et de traitement des données). Cette condition impose de remplacer le microcontrôleur utilisé. Nous proposons le microcontrôleur PIC16LF1826 fabriqué par Microchip sur une technologie « nano Watt » qui consomme une quantité d'énergie similaire (selon la documentation). Il possède la capacité de contrôler dynamiquement la fréquence d'horloge.

De plus, les mesures présentées dans le Chapitre III ont indiqué la possibilité de réduction d'énergie consommée par le circuit de mesure de vibrations en remplaçant le composant utilisé. Nous considérons donc ici l'utilisation d'un amplificateur différentiel de type AD8476, qui consomme 1,09 mW. C'est un dispositif similaire qui consomme moins d'énergie, mais ne permet pas de changer le gain.

L'algorithme implémenté fait la mesure de vibrations pendant une période de vibrations, tandis que la mesure de vibrations est effectuée toutes les 120 commutations du circuit SSHI pendant lesquelles nous effectuons la récupération et l'amortissement.

La Figure IV.24 présente le rapport cyclique estimé pour le nœud prototypé optimisé.

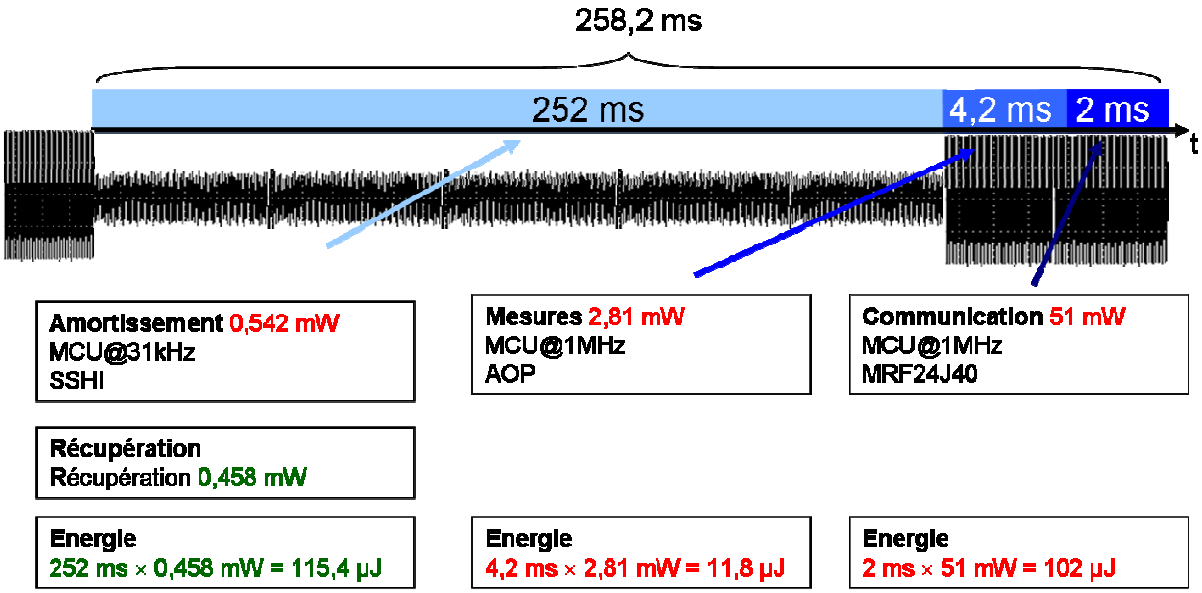


Figure IV.24. Le rapport cyclique estimé pour le nœud conçu.

Nous avons donc proposé certaines techniques pour réduire l'énergie consommée par le nœud. Cela a permis de confirmer la possibilité d'auto alimentation du nœud conçu. Nous avons estimé le rapport cyclique du nœud pour la fréquence de vibrations de 235 Hz et la vitesse de 0,097 ms^{-1}.

Selon la figure précédente, nous voyons que l'énergie récupérée pendant l'étape de la récupération d'énergie et d'amortissement de vibrations est suffisante pour alimenter le nœud en continu, par ailleurs la valeur excédent d'énergie récupérée est stockée dans le circuit de stockage d'énergie. Les 252 ms de la récupération d'énergie sont suffisantes pour stocker d'une valeur d'énergie nécessaire pour effectuer une mesure de vibrations (le temps de mesure dépend de la période de vibrations ; 4,2 ms dans ce cas là), et pour rester en mode de transmission pour les 2 ms.

Il devrait être noté que les noeuds WSN en effectuant l'amortissement de vibrations tuent sa source d'énergie principale. Cependant cela n'est pas un problème car si il n'y a plus de vibration, il n'y a plus rien à amortir donc les noeuds WSN n'ont

pas besoin de fonctionner. De plus, les vibrations dans les voitures sont génèrent a cause des excitations harmonique en continue, ainsi nous supposons que l'énergie est disponible lorsque la voiture est utilisée.

5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre porte sur la validation du système complet intégré. Nous utilisons la structure mécanique expliquée et présentée dans le chapitre II et le réseau de capteurs sans fil pour le système d'amortissement de vibrations présenté dans le chapitre III de cette thèse. Les trois principales capacités du système sont vérifiés : la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

- **Mesure de vibrations**

Les mesures effectuées nous ont permis de vérifier la linéarité de la mesure de vibrations par le système électromécanique conçu. Le nœud WSN réalisé est capable de mesurer la valeur de vibrations. Nous avons identifié aussi la nécessite d'utiliser un étalonnage complexe. Cela vient de différentes formes de vibrations de la plaque.

L'étalonnage peut être implémenté donc, en connaissant la réponse du système mécanique et peut être réalisé en utilisant à la fois le nœud et le nœud passerelle du réseau de capteurs.

La validation a confirmé la conception et la réalisation du module de mesure de vibrations. De plus l'erreur relative obtenue permet d'avoir le système de mesure de vibrations avec la précision de mesure acceptable.

- **Amortissement de vibrations**

Les mesures ont confirmé la capacité d'amortissement de vibrations en utilisant le réseau de capteurs sans fil. La structure mécanique équipée de deux éléments piézoélectrique est utilisée. En utilisant WSN composé de deux nœuds prototypés nous vérifions l'efficacité d'amortissement de vibrations.

Le réseau conçu peut être utilisé pour amortir les vibrations soit mono soit multi-fréquentielles. Nous avons présenté l'efficacité d'amortissement pour les différents modes de vibrations et le comparer avec la forme de vibrations. Nous pouvons donc conclure que la position d'élément piézoélectrique est une contrainte principale qui porte l'influence pour l'efficacité d'amortissement de vibrations en utilisant le système actif distribué conçu.

Nous avons aussi confirmé l'effet global d'amortissement de vibration. Les mesures ont confirmé qu'en augmentant le nombre de nœuds, nous pouvons augmenter aussi l'efficacité d'amortissement.

L'efficacité du système d'amortissement de vibrations réalisé peut être comparé avec l'efficacité des systèmes existants qui sont présentés dans l'état de l'art.

- **Récupération d'énergie**

Ce chapitre contient aussi la présentation de la validation de la récupération d'énergie électrique depuis les vibrations en utilisant les éléments piézoélectriques et le noeud WSN réalisé. Les mesures effectuées ont confirmé qu'en utilisant la méthode SSHI nous pouvons augmenter la quantité d'énergie récupérée. La valeur d'énergie récupérée par le nœud WSN peut être comparé avec les systèmes présentés dans l'état de l'art. A cause de la consommation élevée d'énergie par le nœud, l'auto alimentation ne peut pas être possible.

Cependant, nous avons introduit certaines techniques pour prolonger la durée de vie du nœud prototypé qui ont permis d'avoir la possibilité d'auto alimentation. Ensuite, nous avons calculé le rapport cyclique pour le nœud optimisé.

Les résultats ont finalement confirmé la possibilité d'autoalimenter les nœuds conçus dans le système mécanique réalisé, mais seulement pour certaines conditions présentées.

Chapitre V
Conclusions et perspectives

Ce chapitre conclut la thèse. Nous allons rappeler les objectifs principaux de la thèse et discuter leur réalisation. Les résultats de mesures et les conclusions permettent d'établir les perspectives. Bien que ce mémoire soit achevé, le sujet ouvre plusieurs pistes pour les recherches.

1 Conclusions

La thèse présente la conception et la réalisation d'un système distribué actif basse consommation sans fil pour l'amortissement de vibrations. Nous avons expliqué en détail le cheminement entre la conception et la réalisation d'un système prototypé.

Après avoir rappelé les objectifs de la thèse, nous allons maintenant discuter les résultats de la thèse. En effet, il est important de réduire les vibrations dans les automobiles à la fois pour réduire la fatigue des matériaux, augmenter la durée de vie et augmenter le confort de passager.

Le premier objectif de la thèse a été de valider l'utilisation d'un microcontrôleur basse consommation pour le contrôle de vibrations. Les résultats ont confirmé que cet objectif a été réalisé. Le microcontrôleur PIC16LF88 utilisé dans le nœud réunit toutes les fonctions nécessaires.

Le deuxième objectif de la thèse est de vérifier la possibilité d'utilisation un seul élément piézoélectrique pour les trois fonctionnalités : la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie. Le nœud conçu confirme la réalisation de cet objectif. La solution proposée est validée dans le système prototypé.

Le troisième objectif a été un portage d'un système centralisé en système distribué en utilisant un WSN (notamment pour la distribution de la puissance de calcul). Il est aussi confirmé. Nous avons réalisé un système d'amortissement de vibrations qui est contrôlable, distribué et sans fil.

Le quatrième objectif : la conception d'un système spatial d'amortissement de vibrations a été aussi confirmée. Nous avons identifié l'influence de la position des éléments piézoélectriques à l'efficacité du système d'amortissement. De plus, nous avons confirmé la scalabilité du système.

Le cinquième et dernier objectif a été de vérifier la faisabilité de nœuds d'autoalimentés qui fournissent les trois principales capacités : la mesure de vibrations, l'amortissement de vibrations et la récupération d'énergie.

L'alimentation de nœud prototypé en continu en utilisant l'énergie récupérée depuis les vibrations est impossible. Ainsi, nous avons optimisé le nœud prototypé en

utilisons les techniques présentées dans l'état de l'art. Ce dernier a permis de confirmer la possibilité d'auto alimentation. Le rapport cyclique du nœud autoalimenté dans le système vibratoire réalisé a été estimé et présenté.

2 Perspectives

Le sujet de la thèse, les résultats obtenus et les concluions ont permis d'établir plusieurs perspectives. Nous allons présenter maintenant les objectifs en les divisant en deux catégories : les objectifs à court terme et à long terme.

2.1. Les objectifs à court terme

L'objectif à court terme est la réalisation de la version optimisée du nœud conçu. Le nœud doit être optimisé pour diminuer la consommation d'énergie selon les conclusions données dans le chapitre IV. De plus nous pouvons le réaliser en utilisant les composants montés en surface pour diminuer la taille et le poids du nœud. Comme nous l'avons indiqué, il est aussi requis d'utiliser un système pour adapter dynamiquement la valeur de la charge. Pour cela nous proposons d'utiliser le microcontrôleur du nœud WSN. Cette solution peut être plus performante que les systèmes existants MPPT qui utilisent les algorithmes de suivi, car en faisant la mesure de vibration le microcontrôleur connaît la fréquence de vibrations donc il peut dynamiquement régler la valeur de la charge.

L'autre objectif est aussi de tester un réseau composé de plusieurs nœuds. Cela introduit à la construction d'une nouvelle structure mécanique idéalement d'utiliser un vrai châssis de la voiture.

Un point intéressant est aussi d'amélioration les simulations du système pour avoir la capacité de simuler d'amortissement sur la plaque.

2.2. Les objectifs à long terme

L'objectif à long terme est d'implémenter le réseau de capteurs sans fil pour l'amortissement de vibrations conçu dans une plateforme de simulation IDEA1. Le simulateur doit simuler les valeurs mécaniques : l'effet local et global d'amortissement de vibrations. Mais aussi il doit donner les résultats pour la partie

électronique du système : la valeur d'énergie à récupérer, le rapport cyclique du nœud simulé etc.

Le simulateur permettra alors d'étudier les paramètres à mettre en place pour le partitionnement à réaliser entre compensation locale et compensation globale pour savoir quand c'est le plus performant d'un point de vue systémique de déclencher une compensation globale.

La prochaine étape à long terme est aussi la conception et réalisation du deuxième niveau de système proposé. Selon la conception, nous rappelons que le système complet est équipé de deux niveaux du contrôle : le réseau de capteurs sans fil (considéré dans cette thèse) et le système puissant câblé utilisé pour contrôler les actionneurs piézoélectriques puissants pour basculer sur une compensation globale lorsque le mode local ne suffit plus.

Bibliographie

[1] G. T. Huang « Casting the Wireless Sensor », MIT Technology Review, July 2003.

[2] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal « Wireless sensor network survey » Computer Networks vol. 52 p.2292-2330, August 2008.

[3] HiKoB : http://business.lesechos.fr/directionsgenerales/numerique/hikob-favorise-la-creation-et-laide-a-la-decision-7798.php

[4] Airparif : http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/NUMERO36.pdf

[5] National Instrument : http://www.ni.com/newsroom/release/ni-embedded-monitoring-products-minimize-downtime-prevent-structural-failure-and-analyze-fatigue/fr/

[6] S. Kim et al. « Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks », University of California at Berkeley , 2007.

[7] I.F. Akyildiz et al. « Wireless sensor networks : a survey », Computer Networks, Elsevier, 2002

[8] Sefram : http://www.sefram.com/www/PDF_FR/DNL810BXT.pdf

[9] G. Werner-Allen et al. « Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano », IEEE Computer Society 2006

[10] D. Wang, Y. Ni « Wireless Sensor Networks for Earthquake Early Warning Systems of Railway Lines », Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 148, 2012, pp 417-426

[11] B. M.M. El-Basioni, S.M. Qbd El-kader, M. A. Fakhereldin « Smart Home Design using Wireless Sensor Network and Biometric Technologies » International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management, Volume 2, Issue 3, 2013

[12] Jaime Lloret, I. Bosch, S. Sendra, A. Serrano « A Wireless Sensor Network for Vineyard Monitoring That Uses Image Processing ». Sensors, 2011

[13] S.S.O. Burgess, M.L. Kranz, N.E. Turner, R. Cardell-Olivier, T.E. Dawson « Harnessing wireless sensor technologies to advance forest ecology and agricultural research », Elsevier. 2009. http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.002

[14] P. Zhang, C.M.Sadler, S. A. Lyon, M. Martonosi Hardware Design Experiences in ZebraNet, Department of Electrical Engineering Princeton University, SenSys'04, 2004.

[15] V. Shnayder, B. Chen, K. Lorincz, T.R.F. Fulford-Jones, M. Welsh « Sensor Network for Medical Care » Division of Engineering and Applied Sciences Harvard University, 2005.

[16] P. Fuhr and H. Kagan, 'Can wireless standards work together?', Sensors Magazine, April 2006, pages. 20-22.

[17] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, « Energy conservation in wireless sensor network: A survey », Ad Hoc Networks 7, Elsevier, 2009.

[18] F. Mieyeville, M. Ichchou, G. Scorletti, D. Navarro, W. Du « Wireless Sensor networks for active vibration control in automobile structures ». Smart Mater. Struct 21, 2012.

[19] J. P. Lynch, K. J. Loh, « A summary review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring », The Shock and Vibration Digest, 2006. DOI: 10.1177/0583102406061499

[20] J. Hill, D. Culler « A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization" »

[21] R. Kling, R. Adler, Jonathan Huang, Vincent Hummel, Lama Nachman « Intel Mote2 engineering platform »

[22] SOWNET Technologies Gnode G301 Wireless Sensor Network Node Datasheet

[23] P. Sitka, P. Corke, L. Overs et al. « Fleck-A platform for real-world outdoor sensor networks » Intelligent Sensors, Sensor networks and Information, 2007.DOI : 10.1109/ISSNIP.2007.4496930

[24] Rowe, R. Mangharam, R. Rajkumar « FireFly: A Time Synchronized Real-Time Sensor Networking Platform » Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.

[25] Moteiv « Tmote sky Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module. »

[26] Moteiv « Telos Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module, Revision B. »

[27] Tinynode « Tinynode 584 fact sheet v.1.1 25.01.2011 PCA »

[28] T. Lentsch, Infineon technologies AG. « The eyesIFX platform »

[29] Microchip PIC16F88 datasheet

[30] PIC Microcontroller Low Power Tips 'n Tricks Chapter 2, Microchip Technology Inc. 2009

[31] J. T. Adams « An introduction to IEEE STD 802.15.4 », Freescale Semiconductor Inc, 2006

[32] P. Harrop, H. Zervos « Batteries, Supercapacitors, Alternative Storage for Portable Devices 2009-2019» IDTechEx ,

[33] Bloomberg News 23, April, 2009 « Microchip Technology Debuts nanoWatt XLP™ Microcontrollers with World's Lowest Sleep Current » Chandler, Arizona, USA.

[34] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin « An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks » INFOCOM 2002. Proc. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies., vol. 3, 2002, pp. 1567–1576.

[35] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, « Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks » Proc. 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2004, pp. 95–107.

[36] M. Buettner et al. « X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks » in Proc. 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2006, pp. 307–320.

[37] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie « WiseMAC : An Ultra Low Power MAC Protocol for Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks », CSEM 2007

[38] IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html

[39] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, « Energyefficient Communication Protocol for Wireless MicroSensor Networks » Proc. 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences., Jan. 2000, p. 8020. vol.8.

[40] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, « Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks » Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2000, pp. 56–67.

[41] P. Desnoyers et al. « PRESTO : A Predictive Storage Architecture for Sensor Networks » Proc. 10th Conference on Hot Topics in Operating Systems. USENIX Association, 2005, p. 23

[42] S. Ganeriwal et al. « Estimating Clock Uncertainty for Efficient Duty-cycling in Sensor Networks » Proc. Third ACM Conference on Sensor Networking Systems, Nov. 2005, pp. 130–141

[43] H. Liu, A. Chandra, and J. Srivastava « eSENSE: Energy Efficient Stochastic Sensing Framework for Wireless Sensor Platforms »Proc. Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks, April 2006, pp. 235–242

[44] S. Kumar, T. H. Lai, J. Balogh « On k-coverage in a Mostly Sleeping Sensor Network » Wireless Networks, vol. 14, no. 3, pp. 277–294, 2008.

[45] X. Jiang, J. Polastre, D. « Perpetual environmentally powered sensor networks » Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks., April 2005

[46] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, M. B. Srivastava « Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks » Trans. Embedded Computing Systems, vol. 6, no. 4, p. 32, 2007

[47] S J. Taneja, J. Jeong, D. Culler « Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks » Proc. 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2008

[48] V. Raghunathan et al. « Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems » Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005

[49] C. Park , P. Chou « AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes » 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, vol. 1, pp. 168–177, Sept. 2006.

[50] F. Simjee, P. H. Chou « Everlast: Long-life, Supercapacitor-operated Wireless Sensor Node » Proc. 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design. ACM, 2006

[51] P. Stanley-Marbell, D. Marculescu, « An 0.9 × 1.2, Low Power, Energy-harvesting System with Custom Multi-channel Communication Interface » Proc. Conference on Design, automation and test in Europe. EDA Consortium, 2007, pp. 15–20

[52] M. Weimer, T. Paing, R. Zane, « Remote Area Wind Energy Harvesting for Low-power Autonomous Sensors » 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1–5, June 2006.

[53] S. Sudevalayam, P. Kulkarni « Energy Harvesting Sensor Nodes : Survey and Implications » IEEE Communication Surveys and Tutorials, Vol 13, No. 3, 2011

[54] D. Carli, D. Brunelli, D. Bertozzi, L. Benini « A high-effiency wind-floz energy harvester using micro turbine » International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2010

[55] R. Want « An Introduction to RFID Technology » IEEE Pervasive Comput., vol. 5, no. 1, p. 25, 2006

[56] S. S. B. Hong, R. Ibrahim, M. H. Md. Khir, M. A. Zakariya, H. Daud « Wi-Fi Energy Harvesting for low power rfid application » Progress in Electromagnetics Research C, Vol. 40, p. 69-81, 2013

[57] A. Rajasekaran, A. Hande, D. Bhatia « Buck-Boost Converter Based Power Conditioning Circuit for Low Excitation Vibration Energy Harvesting » Third Annual Austin Conference on Integrated Circuits and Systems, Austin, TX, May 2008

[58] S. Roundy, P.K Wright « A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics » Smart. Mater. Struct. 13, p. 1131-1142, 2004

[59] L. Tang et al. « Applicability of Synchronized Charge Extraction Technique for Piezoelectric Energy Harvesting » Proc of SPIE Vol. 7977 , 2011

[60] A. D. T. Elliott, P. D. Mitcheson, « Implementation of Single Supply Pre-Biasing with Sub-35µW Control Overhead for Piezoelectric Energy Harvesting », Power MEMS 2012

[61] K. Makihara, J. Onoda, T. Miyakawa « Low energy disspation electric circuit for energy harvesting » Smart Mater. Struct. 15, p. 1493-1498, 2006

[62] J. Dicken, P.D. Mitcheson, I. Stoianov, E.M. Yeatman « Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications » IEEE Transactions on Power Electronics, 2012

[63] D.D.L. Chung « Review :Materials for vibration damping »,Journal of Materials Science 36 p.5733-5737, 2001

[64] C. Jean-Mistral, S. Basrour, J-J. Chaillout « Comparison of electro active polymers for energy scavenging applications » Smart Master. Struct. 2010, doi:10.1088/0964-1726/19/8/085012

[65] S.J. Elliott « A review of Active Noise and Vibration Control in road vehicles », ISVR Technical Memorandum No 981, December 2008

[66] A. Tonoli, N. Amati, M. Silvagni « Electromechanical dampers for vibration control of structures and rotors » Vibration Control Book, SCIYO 2010

[67] H.M.Isa et al. « A review on electromagnetic suspension systems for passenger vehicle » International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, 2011

[68] M. Montazeri, and M. Soleymani, « Investigation of The Energy Regeneration of Active Suspension System in Hybrid Electric Vehicle, » IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 57, no. 3, pp. 198-925

[69] L. Zuo, X. Chen « Design and Analysis of a New Type of Electromagnetic Damper With Increased Energy Density » Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133, 2011

[70] S.J. Kim, R. Dean, G. Flowers, C. Chen « Active Vibration Control and Isolation for Micromachined Devices » ASME Journal of Mechanical Design Vol. 131 Issue 9, 2009

[71] E. Lefeuvre, M. Lallart, C. Richard, D. Guyomar « Piezoelectric material-based energy harvesting devices : advances of SSH optimization techniques (1999-2009) Book, Piezoelectric Ceramics, 2010

[72] Z.Chi, Q. Xu, « Recent Advances in the Control of Piezoelectric Actuators » International Journal of Advanced Robotic Systems 2014

[73] F.A.C. Viana, V. Steffen, « Multimodal Vibration Damping through Piezoelectric Patches and Optimal Resonant Shunt Circuits » Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng., ABCM, 2006

[74] Jin-Young Jeon « Passive vibration damping enhancement of piezoelectric shunt damping system using optimization approach » Springer, Journal of Mechanical Science and Technology Vol.23, p. 1435-1445, 2009. DOI 10.1007/s12206-009-0402-8

[75] C.H. Park, D.J. Inmann « Enhanced piezoelectric shunt design », Shock and Vibration 10, p. 127-133, 2003.

[76] S.O. Reza Moheimani « A survey of Recent Innovations in Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Transducers » IEEE, Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, 2003

[77] Y. Yaman , T. Cashsan, V. Nalbantoglu « Active Vibration Control of a smart plate », ICAS Congress , 2002

[78] K.B. Waghulde, B. Kumar, T.D. Garse, M.M. Patil « Vibration analysis and control of cantilever plate by using finite element analysis » Journal of Engineering Research and Studies, 2011

[79] K. Narwal, D. Chhabra « Analysis of simple supported plate for active vibration control with piezoelectrique sensors and actuators » IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2012

[80] C.R. Fuller, A.H. von Flotow « Active Control of Sound and Vibration » IEEE Control Systems, 1995

[81] B de Marneffe, A. Preumont « Vibration damping with negative capacitance shunts: theory and experiments » Smart Materials and Structures Vol. 17, 2008.

[82] C. L. Davis , G. A. Lesieutre « An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitive shunting of piezoelectrique stiffness » Journal of Sound and Vibration, 2000.

[83] D. Niederberger, A. Fleming, S.O. R. Moheimani « Adaptive multi-mode resonant piezoelectric shunt damping »Smart Materials and Structures Vol. 13, 2004

[84] W.W. Clark « Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials » Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, 2000

[85] A. Badel « Récuperation d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire » la thèse, Ecole Doctorale de l'Université de Savoie.

[86] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, D. Guyomar « A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems » Sensors and Actuators, 2006

[87] H. Shen, J. Qiu, H. Ji, K. Zhu, M. Balsi, I. Giorgio, F. Dell'Isola « A low-power circuit for piezoelectric vibration control by synchronized swithing on voltage sources » Elsevier 2010

[88] S-H. Oh, H. Kim, Y Park, « Active control of road booming noise in automotive interiors » Journal of Acoustical Society of America, Vol 111, 2002

[89] F. Svaricek, T. Fueger, H-J. Karkosh, P. Marienfeld, C. Bohn, « Automotive Applications of Active Vibration Control » Intechopen, Vibration Control, pp. 380, 2010

[90] N. Alt, H-P. Lahey, J. Nehl, C. Nussmann, J. Weiser. 2006 'Reduction of Power Train Induced Vehicle Exterior Noise by Piezo-Foil Technology « InMar - Intelligent Materials for Active Noise Reduction », EU Project, http://www.inmar.info

[91] M. Misol, S. Algermissen, H.P. Monner. 2013. « Experimental Study of an Active Window for Silent and Comfortable Vehicle Cabins » Chapter 36, Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures, Research Topics in Aerospace 2013, pp 439-447

[92] T. Weyer, H.P. Monner. 2003. « PKW Innenlrmreduzierung durch aktive Beruhigung der durch die Motorhar-monischen erregten Dachblech-Schwingungen », Institut fr Faserverbundleichtbau und Adaptronik

[93] S. Roundy et al. « Power Sources for Wireless Sensor Networks », Springer, Wireless Sensor Networks, Lecture Notes in Computer Science, Volume 2920, 2004, pp. 1 – 17

[94] W.S. Wang et al. « Bulk Material Based Thermoelectric Energy Harvesting for Wireless Sensor Applications », Sensors & their Applications XVI, IOP Publishing, Journal of Physics : Conference Series 307, 2001

[95] R. Wallace « Antenna Selection Guide », Texas Instruments Application Note AN058, 2010

[96] J. Liflander « Ceramic Chip Antennas vs. PCB Trace Antennas : A Comparison » Pulse Finland Oy, www.mpdigest.com, 2010

[97] http://fr.wikipedia.org/wiki/Équation_des_télécommunications

[98] http://neo.dmcs.pl/tkb/slajdy/TKB1_www.pdf

[99] Microchip « PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual », DS33023A, 1997

[100] D. Guyomar et al. « Synchronized switch harvesting applied to selfpowered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless transmitters » Elsevier, Sensors and Actuators A 138 (2007), 151-160

[101] P. Chomel « Sélection des matériaux métalliques – Familles de matériaux » Techniques de l'ingénieur, 2001

[102] PI Ceramic, www.piceramic.de « Material Data », 2006

[103] Dynatec, www.dynatec.ch « Thermoplastes Polyamides PA 6.6 », 2012

[104] Data Physics Corporation, www.dataphysics.com « Modal and Internal Shakers »

[105] PCB Piezotronics, « ICP Force Sensor, model : 208C02 », Revision H

[106] Polytec, www.polytec.com, « CLV-3D Compact 3-D Laser Vibrometer »

[107] D. Popovici et al. « Modeling and Simulation of Piezoelectric Devices », Intechopen, Recent Advances in Modelling and Simulation, ISBN: 978-3-902613-25-7, 2008

[108] Jean-Philippe Muller, « Cours de physiaue appliquée : Les oscillateurs » http://www.ta-formation.com/

[109] Julien Bobroff « Propriétés structurales et électroniques des solides » Cours, Laboratoire de Physiaque des Solides UMR8502, Université Paris-Sud.

[110] E. Lefeuvre, M. Lallart, C. Richard, D. Guyomar « Piezoelectric material-based energy harvesting devices : advances of SSH optimization techniques » (1999-2009) Book, Piezoelectric Ceramics, 2010

[111] J. Nosek, « Drive Level Dependence of Resonant Frequency in BAW Quartz Resonators and His Modeling », IEEE Transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol. 46, No. 4, July 1999

[112] http://www.microchip.com/, Microchip Technology Inc. « PIC16FL88 Data Sheet, 18/20/28-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology » DS30487C, 2005.

[113] F. Mieyeville, M. Ichchou, G. Scorletti, D. Navarro, W. Du « Wireless Sensor networks for active vibration control in automobile structures ». Smart Mater. Struct 21, 2012.

[114] http://www.microchip.com/, Microchip Technology Inc. « MRF24J40MA Data Sheet, 2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4 », RF Transceiver Module, DS70329B, 2008.

[115] E.L. Worthington, M. Zhu, P. Kirby « Piezoelectric Energy Harvesting: Enhancing Power Output by Device Optimisation and Circuit Techniques » https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/, PhD Thesis, Cranfield University, 2010.

[116] L.Balogh. « Design And Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits », Texas Instruments, http://www.ti.com/lit/ml/slup169/slup169.pdf

[117] Fairchild Semicunductor « Application Note AN-6069; Application review and comparative evaluation of low-side gate drivers », http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-6069.pdf, 2007.

[118] Vishay Siliconix « Application Note AN-937;Gate Drive Characteristics and Requirements for HEXFET Power MOSFETs ». Document Number : 91421, http://www.vishay.com/docs/91421/appnote9.pdf, 2010.

[119] Vishay Siliconix « Power MOSFET IRL630, SiHL630 » Document Number : 91303 , http://www.vishay.com/docs/91303/sihl630.pdf, 2011

[120] Analog Devices « Low Distortion Differential ADC Driver : AD8138 », http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8138.pdf, 2006

[121] Analog Devices « Low Power, Unity Gain, Fully Differential Amplifier and ADC Driver : AD8476 », http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8476.pdf, 2012

Annexe I.

Caractéristiques physiques des matériaux utilisés.

- Les caractéristiques physiques des matériaux d'aluminium utilisés dans la structure mécanique [101].

	EN AW-6060	**EN AW-7075**
Masse volumique de l'aluminium (g/cm³)	2,70	2,8
Intervalle de fusion	615-655	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10–6/K)	23,4	23,5
Module d'élasticité (MPa)	69500	72000
Coefficient de Poisson	0,33	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W/M°C)	200	130
Résistivité à 20 °C (μΩcm)	3,3	5,2
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J/kg°C)	945	915
Limité d'élasticité *RP0.2 (MPa)*	110	470
Limité à la rupture Rm (MPa)	150	535
Allongement (%)	14	8

- Les caractéristiques du matériau piézoélectrique appliqué dans la structure mécanique [102].

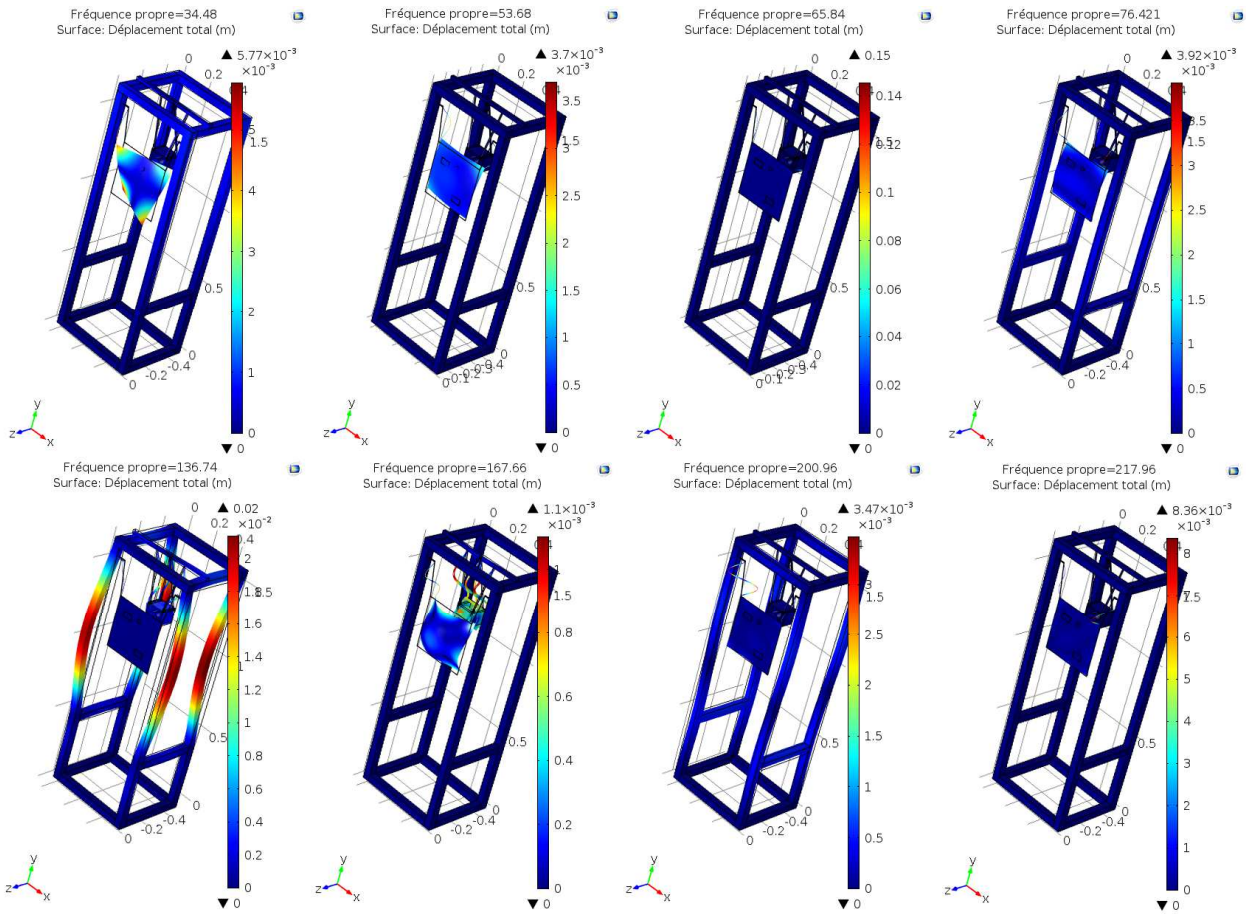
	PZT (PIC255)
Les propriétés physiques et diélectriques :	
Masse volumique (g/cm³)	7,80
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10–6/K)	4000
Permittivité relative :	
dans la direction de polarisation ε33T/ ε0	1750
perpendiculaire à la polarisation ε11T/ ε0	1650
Facteur de perte diélectrique (tg δ)	20
Les propriétés électromécaniques :	
Facteur de couplage :	
Kp	0,62
Kt	0,47
K31	0,35
K33	0,69
K15	0,66
Coefficient de charge piézoélectrique : (10^{-12} C/N)	
D31	-180
D33	400
d15	550
Coefficient de tension piézoélectrique : (10^{-3} Vm/N)	
G31	-11,5
G33	22

- Les caractéristiques physiques des matériaux du Nylon utilisés dans la structure mécanique [103].

	Nylon (Polyamide PA 6.6)
Masse volumique (g/cm³)	1,14
Intervalle de fusion	220
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10−6/K)	280
Module d'élasticité (MPa)	2000
Coefficient de Poisson	0,4
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W/M°C)	0,25
Résistivité à 20 °C (µΩcm)	5E18
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J/kg°C)	1 045
Limité d'élasticité *RPo.2 (MPa)*	49-87
Limité à la rupture Rm (MPa)	250-550
Allongement (%)	25

Annexe II.

Modes des vibrations de la structure et de la suspension.



Liste de figures

FIGURE I.1. LA STRUCTURE GLOBALE DU RESEAU DE CAPTEUR SANS FIL [18]. 14
FIGURE I.2. LA DESCRIPTION DU MODELE OSI COMPLET ET CELUI SIMPLIFIE POUR LES WSN. 15
FIGURE I.3. LA CARTE DES STANDARDS EN FONCTION DE CRITERES, DEBIT DE DONNEES, CONSOMMATION D'ENERGIE, COUT ET COMPLEXITE [16]. 17
FIGURE I.4. LES DIFFERENTS MODES SUPPORTES PAR LA NORME IEEE 802.15.4. 18
FIGURE I.5. LA STRUCTURE DE LA SUPERFRAME IEEE 802.15.4. 19
FIGURE I.6. LA STRUCTURE GENERALE D'UN NŒUD WSN. 20
FIGURE I.7. LA COMPARAISON DE LA TAILLE DE BUS DE DONNEES DES MICROCONTROLEURS. REFERENCES DE [18] A [28]. 23
FIGURE I.8. LA REPARTITION DES RESOLUTIONS DES CONVERTISSEURS A/N. REFERENCES DE [18] A [28]. 24
FIGURE I.9. LA COMPARAISON DES FREQUENCES DE COMMUNICATION SANS FIL. REFERENCES DE [18] A [28]. 25
FIGURE I.10. LA DIVISION MONDIALE DES FREQUENCES SANS LICENCE UTILISEE DANS LES WSN [98]. 25
FIGURE I.11. LA DENSITE D'ENERGIE VS DENSITE DE PUISSANCE POUR LES DIFFERENTS DISPOSITIFS DE STOCKAGE D'ENERGIE [32]. 28
FIGURE I.12. LE SYSTEME DE LA RECUPERATION D'ENERGIE : A) SANS, B) AVEC LES TAMPONS [45]. 30
FIGURE I.13. CLASSEMENT DES SYSTEMES D'AMORTISSEMENT DES VIBRATIONS. 35
FIGURE I.14. LE JOINT DE TRANSMISSION EQUIPE DU MATERIAU VISCOELASTIQUE. 36
FIGURE I.15. LE SYSTEME DE LA CONVERSION ELECTROMAGNETIQUE. 37
FIGURE I.16. LE SYSTEME DE LA CONVERSION ELECTROSTATIQUE 38
FIGURE I.17. EXEMPLE DU CRISTAL SOUS L'ACTION DE LA FORCE MECANIQUE. (A) NON PIEZOELECTRIQUE. (B) PIEZOELECTRIQUE. 39
FIGURE I.18. CLASSIFICATION DES SYSTEMES D'AMORTISSEMENT DES VIBRATIONS EN UTILISANT L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE 41
FIGURE I.19. COMPARAISON DU PRINCIPE DE TROIS TECHNIQUES D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS EN UTILISANT L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE. 42
FIGURE I.20. CLASSEMENT DE DIFFERENTES TECHNIQUES D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS EN UTILISANT L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE [73]. 42
FIGURE I.21. LES SCHEMAS DES (A) SERIAL (B) PARALLELE (C) MULTIMODAL PASSIVE RESONANT « SHUNTING » SYSTEMES. 43
FIGURE I.22. LES SYSTEMES DE CONTROLE ACTIF DE CANAL UNIQUE : A) FEEDFORWARD, B) FEEDBACK [80]. 44
FIGURE I.23. LES EXEMPLES DES SYSTEMES SEMI PASSIFS ADAPTATIFS. 45
FIGURE I.24. SYSTEME D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS SEMI PASSIVE SSDS. 46
FIGURE I.25. LE SYSTEME D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS SEMI PASSIF SSDI 46
FIGURE I.26. APPROCHE GLOBALE DU SYSTEME D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS. 49
FIGURE II.1. LE SYSTEME MECANIQUE : LA STRUCTURE MODELISEE ET LA PHOTO DU SYSTEME REALISE. 55
FIGURE II.2. LES DIMENSIONS DETAILLEES DE LA PLAQUE EN ALUMINIUM : LA POSITION DES ELEMENTS PIEZOELECTRIQUES ET DE POINT D'EXCITATION. 56

FIGURE II.3. SCHEMA DE PRINCIPE POUR L'EXPERIMENTATION. 57
FIGURE II.4. PHOTO DU CAPTEUR DE FORCE INSTALLE. 58
FIGURE II.5. LA PHOTO DU VIBROMETRE LASER UTILISE. 58
FIGURE II.6. LE MODELE DU SYSTEME MECANIQUE. 59
FIGURE II.7. LES RESULTATS DE SIMULATIONS DES FREQUENCES PROPRES. LA FREQUENCE DE 47,937 HZ. 61
FIGURE II.8. LES RESULTATS DE SIMULATIONS DES FREQUENCES PROPRES. LA FREQUENCE DE 113,65 HZ. 61
FIGURE II.9. LES RESULTATS DE SIMULATIONS DES FREQUENCES PROPRES. LA FREQUENCE DE 247,95 HZ. 62
FIGURE II.10. LES RESULTATS DE SIMULATIONS DES FREQUENCES PROPRES. LA FREQUENCE DE 167,66 HZ. 63
FIGURE II.11. LE POTENTIEL ELECTRIQUE D'ELEMENTS PIEZOELECTRIQUES SIMULES. 64
FIGURE II.12. LE POINT DE MESURE DE LA VITESSE DE VIBRATIONS. 66
FIGURE II.13. LA FONCTION DE REPONSE EN FREQUENCE DU SYSTEME MECANIQUE. 67
FIGURE II.14. LES VIBRATIONS MONO-FREQUENTIELLES IDENTIFIEES. 68
FIGURE II.15. LES VIBRATIONS MULTI-FREQUENTIELLES. PARTIE 1. 68
FIGURE II.16. LES VIBRATIONS MULTI-FREQUENTIELLES. PARTIE 2. 69
FIGURE II.17. LA TENSION ELECTRIQUE DU PIEZOELECTRIQUE GAUCHE ET LA FONCTION DE TRANSFERT DU SYSTEME MECANIQUE. 71
FIGURE II.18. LES TENSIONS ELECTRIQUES MESUREES AUX BORNES DES ELEMENTS PIEZOELECTRIQUES. 71
FIGURE III.1. LE DIAGRAMME D'UN NŒUD WSN PROPOSE. 75
FIGURE III.2. LE CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE. 76
FIGURE III.3. L'IMPEDANCE THEORETIQUE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE MODELISE [108]. 77
FIGURE III.4. LE SCHEMA ELECTRIQUE UTILISE POUR ETUDIER UN ELEMENT PIEZOELECTRIQUE [109]. 78
FIGURE III.5. LA CARACTERISTIQUE DE PHASE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE FIXE SUR LA PLAQUE EN ALUMINIUM. 78
FIGURE III.6. LA CARACTERISTIQUE D'AMPLITUDE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE FIXE SUR LA PLAQUE EN ALUMINIUM. 79
FIGURE III.7. LE CIRCUIT EQUIVALENT SIMPLIFIE A L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE [110]. 80
FIGURE III.8. LE MONTAGE DE LA MESURE. L'AMPEREMETRE A ET LE VOLTMETRE V SONT UTILISES POUR CARACTERISER LA SORTIE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE. 81
FIGURE III.9. LE CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE CHARGE PAR UNE RESISTANCE. LA FORCE D'EXCITATION : V = 0,0315 M /S ; F = 235 HZ. 81
FIGURE III.10. LA PUISSANCE ELECTRIQUE EN SORTIE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE POUR LES VALEURS DIFFERENTES DE LA VITESSE (LA FREQUENCE F = 235 HZ). 82
FIGURE III.11. LA PUISSANCE ELECTRIQUE EN SORTIE DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE POUR LES VALEURS DIFFERENTES DE LA FREQUENCE. 83
FIGURE III.12. LE DIAGRAMME D'UN NŒUD WSN PROPOSE. 84
FIGURE III.13. LA CONNEXION D'UN COMPOSANT PIEZOELECTRIQUE EN UTILISANT L'ADAPTATION D'IMPEDANCE. 84
FIGURE III.14. LE RACCORDEMENT D'UN TRANSDUCTEUR AVEC D'UNE INTERFACE ELECTRIQUE. 86
FIGURE III.15. LE SCHEMA ELECTRIQUE DE L'INTERFACE DU CAPTEUR DE VIBRATION. 89
FIGURE III.16. LE SCHEMA ELECTRIQUE DE LA METHODE « SSHI » [110]. 90

FIGURE III.17. LES CHRONOGRAMMES : U - LE DEPLACEMENT, V - LA TENSION ELECTRIQUE, I - LE COURANT ELECTRIQUE DANS LE CIRCUIT IDEAL DE SSHI [110]..... 91
FIGURE III.18. LE SCHEMA ELECTRIQUE DE MODULE DE LA RECUPERATION D'ENERGIE ET D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS DU NŒUD WSN. 92
FIGURE III.19. LE SCHEMA DU NŒUD WSN SIMULE DANS LE LOGICIEL NI MULTISIM. 96
FIGURE III.20. LE SCHEMA SYNOPTIQUE DU NŒUD WSN SIMULE ET LES POINTS DE MESURE. 97
FIGURE III.21. LE SIMULATION DU SIGNAL D'ENTREE DU CONVERTISSEUR ANALOGIQUE NUMERIQUE (1) ET DU SIGNAL DE CONTROLE DE LA METHODE SSHI GENERE PAR LE MICROCONTROLEUR (2). 97
FIGURE III.22. L'IMPULSION DU SIGNAL SIMULE DE CONTROLE DE LA METHODE SSHI GENERE PAR LE MICROCONTROLEUR. 98
FIGURE III.23 LA TENSION ET LE COURANT SIMULES AUX BORNES DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE. 98
FIGURE III.24. LA CONCEPTION DE LA PREMIERE CARTE PCB EQUIPEE DU CIRCUIT DE LA METHODE SSHI. 101
FIGURE III.25. LA CONCEPTION DE LA DEUXIEME CARTE PCB EQUIPEE DU MICROCONTROLEUR. 101
FIGURE III.26. LA PHOTO DU PROTOTYPE DE NŒUD WSN CONÇU. 102
FIGURE III.27. LE SCHEMA SYNOPTIQUE DE NŒUD WSN COMPLET PROTOTYPE ET LES POINTS DE MESURES. 103
FIGURE III.28. LE SIGNAL D'ENTREE DU CONVERTISSEUR ANALOGIQUE NUMERIQUE (1) ET LE SIGNAL DE CONTROLE DE LA METHODE SSHI GENERE PAR LE MICROCONTROLEUR (2). 103
FIGURE III.29. L'IMPULSION DU SIGNAL DE CONTROLE DE LA METHODE SSHI GENERE PAR LE MICROCONTROLEUR (2) 104
FIGURE III.30. LA TENSION AUX BORNES DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE. 104
FIGURE III.31. LE COURANT DANS LE CIRCUIT DE LA METHODE SSHI MESURE SUR LA RESISTANCE DE 100Ω. 105
FIGURE III.32. LE SCHEMA SYNOPTIQUE DU LOGICIEL REALISE. 108
FIGURE III.33. LA MESURE DU MODULE DE CIRCUIT SSHI : LE SIGNAL DE CONTROLE DU SSHI. 109
FIGURE IV.1. SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA CONFIGURATION EXPERIMENTALE. 111
FIGURE IV.2. LA TENSION GENEREE EN FONCTION DE LA VITESSE DES VIBRATIONS. 112
FIGURE IV.3. LA FFT DE LA VITESSE DE VIBRATIONS (LA FORCE D'EXCITATION DE 135 HZ). 113
FIGURE IV.4. L'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS POUR LES VIBRATIONS MONO-FREQUENTIELLES. 115
FIGURE IV.5. LA FFT DE LA VITESSE DE VIBRATIONS MESUREE AU MILIEU DE L'ELEMENT PIEZOELECTRIQUE GAUCHE POUR LA FORCE D'EXCITATION DE 65 HZ. 116
FIGURE IV.6. L'ATTENUATION DE VIBRATIONS POUR LA COMPOSANTE DE LA REPONSE A 165 HZ. 117
FIGURE IV.7. LA FORME DE MODE IDENTIFIE POUR LES VIBRATIONS DE 165 HZ. 118
FIGURE IV.8. L'ATTENUATION DE VIBRATIONS POUR LA COMPOSANTE DE LA REPONSE A 235 HZ. 118
FIGURE IV.9. LA FORME DE MODE IDENTIFIE POUR LES VIBRATIONS DE 235 HZ. 119
FIGURE IV.10. LES VALEURS DE TENSION MESUREES AUX BORNES DES ELEMENTS PIEZOELECTRIQUES. 120
FIGURE IV.11. LA FORME DE MODE IDENTIFIE POUR LES VIBRATIONS DE 113 HZ. 121
FIGURE IV.12. LOCALISATION DES POINTS DE MESURE SUR LA PLAQUE EN ALUMINIUM. 121
FIGURE IV.13. LE CHRONOGRAMME DE LA VITESSE DE VIBRATIONS MESURE POUR LE SYSTEME MECANIQUE EXCITE SANS ET AVEC LE SYSTEME D'AMORTISSEMENT CONÇU. 123
FIGURE IV.14. LE CHRONOGRAMME DE LA VITESSE EN ECHELLE DE TEMPS PLUS PRECIS. 124

FIGURE IV.15. LE CHRONOGRAMME DETAILLE DE LA VITESSE DE VIBRATIONS MESURE POUR LE SYSTEME MECANIQUE EXCITE SANS ET AVEC LE SYSTEME D'AMORTISSEMENT CONÇU. 124
FIGURE IV.16. LES FFT DE LA VITESSE DE VIBRATIONS MESUREE POUR LE SYSTEME MECANIQUE EXCITE SANS ET AVEC LE SYSTEME D'AMORTISSEMENT CONÇU. 125
FIGURE IV.17. A) LE CIRCUIT DE LA METHODE SSHI ; B) LE CIRCUIT DE LA METHODE CLASSIQUE. 128
FIGURE IV.18. LES SCHEMAS DES CIRCUITS DE MESURE DE L'ENERGIE RECUPEREE POUR LES DEUX METHODES DE LA RECUPERATION CHOISIS : A) LA PUISSANCE REELLE, B) LA PUISSANCE INSTANTANEE. 128
FIGURE IV.19. LA PUISSANCE INSTANTANEE MESUREE DANS LE CIRCUIT DE LA METHODE SSHI ET LA METHODE STANDARD. 129
FIGURE IV.20. LA PUISSANCE REELLE RECUPEREE PAR LE NŒUD ET LA METHODE STANDARD. 130
FIGURE IV.21. LA VALEUR DE LA TENSION MESUREE SUR LA CHARGE RESISTIVE. 131
FIGURE IV.22. LA PUISSANCE MESUREE AVEC ET SANS LE MODULE DE MESURE DE VIBRATIONS. 132
FIGURE IV.23. CONSOMMATION DE MICROCONTROLEUR PIC16FL88. LES VALEURS MESUREES. 134
FIGURE IV.24. LE RAPPORT CYCLIQUE ESTIME POUR LE NŒUD CONÇU. 135

Liste de tables

TABLE I.1. LA COMPARAISON DETAILLEE DE DIFFERENTS PROTOCOLES DE LA COMMUNICATION SANS FIL [19]. .. 17
TABLE I.2. LES EXEMPLES DES CAPTEURS UTILISES DANS LES WSN. 22
TABLE I.3. COMPARAISON DES MICROCONTROLEURS UTILISES DANS LES WSN. 23
TABLE I.4. COMPARAISON DES MODULES DE BASSE CONSOMMATION D'ENERGIE DE TYPE DE COMMUNICATION RF DE 2,4 GHZ. 27
TABLE I.5. LISTE ET COMPARAISON DE SOURCES D'ENERGIE RECUPERABLE [93]. 31
TABLE II.1. L'ECART RELATIF ENTRE LES FREQUENCES MESUREES ET SIMULEES. 72
TABLE II.2. L'ECART RELATIF ENTRE LES FREQUENCES MESUREES ET SIMULEES. 72
TABLE III.1. LA COMPARAISON DES RESULTATS DE SIMULATIONS ET MESURES. 106
TABLE IV.1. L'ERREUR RELATIVE DES VALEURS MESUREES. 113
TABLE IV.2. L'ATTENUATION MAXIMALE POUR LES DIFFERENTES FREQUENCES (LA FREQUENCE DE LA FORCE D'EXCITATION EST 65 HZ). 116
TABLE IV.3. L'EFFET DE L'ATTENUATION GLOBALE. 122
TABLE IV.4. ENERGIE CONSOMMEE PAR LE NŒUD PROTOTYPE. 133
TABLE IV.5. L'ENERGIE RECUPEREE DEPUIS LES VIBRATIONS EN UTILISANT LE NŒUD CONÇU. 133

Résumé de la thèse :

mots clés : SSHI, Control actif, récupération d'énergie, WSN

Depuis des siècles nous utilisons des véhicules équipés des systèmes de suspension de vibrations. Ils permettent d'avoir un confort acceptable et ajoutent de la sécurité à la conduite. Les nouveaux systèmes installés dans les véhicules sont des systèmes actifs. Ils peuvent être adaptés selon les exigences en temps réel. Ces types de systèmes sont utilisés pour l'amortissement de vibrations et pour l'isolation vibro-acoustique. Dans la thèse nous présentons une nouvelle approche d'un système adaptatif pour les applications automobiles. Nous faisons l'hypothèse qu'un portage d'un système centralisé en système distribué peut améliorer son efficacité. Nous proposons un réseau de capteurs sans fil pour l'amortissement de vibrations dans les applications automobiles. Un capteur du réseau est capable de mesurer des vibrations, d'amortir des vibrations et de récupérer l'énergie depuis les vibrations en utilisant un seul élément piézoélectrique (la méthode Serial-SSHI). Ensuite nous validons le réseau de capteurs sur une structure mécanique de type plaque. Les mesures sont comparées avec des simulations d'éléments finis. Les résultats des mesures et des simulations confirment le choix des solutions. Le nœud du réseau fournit ses fonctionnalités destinées avec une efficacité acceptable. Nous validons la récupération d'énergie depuis les vibrations et la mesure des vibrations. Ensuite nous validons un effet local d'amortissement de vibrations et un effet global (le réseau de capteurs permet d'avoir une action d'amortissement complémentaire).

Abstract:

Keywords: SSHI, Active control, energy harvesting, WSN

For centuries we have used vehicles equipped with the vibration suspension systems. These systems are used to provide comfort and safety. Nowadays we are implementing the active systems which can be adapted according to the real-time requirements. These types of systems are used to damp vibrations and to provide noise and vibration insulation.
In the thesis we present a new approach of an adaptive system for automotive applications. We assume that a porting of a centralized system in a distributed system can improve its effectiveness.
We offer a wireless sensor network for damping vibration in automotive applications. A network sensor is able to measure the vibrations, damp the vibrations and energy harvesting from vibrations by using a single piezoelectric element (Serial-SSHI method).
We validate the network of nodes on a mechanical structure. The measurements are compared with finite element simulations. The results of measurements and simulations confirm the choice of solutions. The network node provides designed functionality with acceptable efficiency. We also validate the energy harvesting and the vibration measurements. The outcome of the work confirm a local effect of vibrations damping and a global effect (the designed Wireless Sensor Network provides a supplementary damping action).

dernière page de la thèse

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur F. MIEYEVILLE

et les rapports de

Monsieur L. LATORRE
Professeur - LIRMM - Université Montpellier II - 161 rue Ada - 34095 Montpellier cedex 5

Et de

Monsieur I. TAWFIQ
Professeur - LISMMA - Ecole Supméca de Saint-Ouen - LISMMA EA-2336 - 3 rue Fernand Hainaut
93400 SAINT-OUEN

Monsieur ZIELINSKI Mateusz

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE

Fait à Ecully, le 8 octobre 2015

P/Le directeur de l'E.C.L.
La directrice des Etudes

ECOLE CENTRALE DE LYON
Service Scolarité
ECULLY

M-A. GALLAND