



HAL
open science

Capteur acoustique sphérique autonome : étude du dispositif de récupération d'énergie vibratoire

Daher Diab

► **To cite this version:**

Daher Diab. Capteur acoustique sphérique autonome : étude du dispositif de récupération d'énergie vibratoire. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; Université Libanaise, 2017. Français. NNT : 2017VALE0037 . tel-01730208

HAL Id: tel-01730208

<https://theses.hal.science/tel-01730208v1>

Submitted on 13 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat
**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**
et l'Université LIBANAISE

Spécialité : Electronique

Présentée et soutenue par

Daher DIAB

Le 07 décembre 2017, à Valenciennes

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie/Département d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE)

**Capteur Acoustique Sphérique Autonome : Etude du Dispositif
de Récupération d'Energie Vibratoire**

JURY

Président du jury :

- Mme. AUPETIT-BERTHELEMOT Christelle. Professeur. Université de Limoges, France.

Rapporteurs :

- M. JOUBERT Pierre-Yves. Professeur. Université Paris-Sud, France.

- M. FARAH Wehbeh. Professeur. Université Saint-Joseph, Liban.

Examineurs :

- Mme. AUPETIT-BERTHELEMOT Christelle. Professeur. Université de Limoges, France.

- M. MOUBAYED Nazih. Professeur. Université Libanaise, Liban.

Co-directeurs de thèse :

- M. NASSAR Georges. Maître de conférences-HDR. Université de Valenciennes, France.

- M. EL OMAR Fawaz. Professeur. Université Libanaise, Liban.

Co-encadrants de thèse :

- M. LEFEBVRE Fabrice. Maître de Conférences. Université de Valenciennes, France.

- M. NAJA Adnan. Professeur. Université Libanaise, Liban.

*“If you want to find the secrets of the universe,
think in terms of
Energy, Frequency and Vibration”*

Nikola Tesla

Remerciements

Ce mémoire de doctorat conclue trois années de thèse à l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC). Cette thèse a été effectuée dans le cadre d'une cotutelle avec l'Université Libanaise (UL) attachée au Laboratoire de Physique et Modélisation (LPM).

J'exprime tout d'abord ma plus profonde gratitude envers mes directeurs de thèse, M. Georges NASSAR (UVHC) et M. Fawaz EL OMAR (UL) pour leur soutien sans faille au cours de ces trois années. Merci sincèrement de m'avoir guidé sur cette thématique et de m'avoir permis de développer ces travaux.

J'adresse plus particulièrement mes sincères remerciements à monsieur Fabrice LEFEBVRE pour son implication dans ce travail de la partie française, ses qualités d'encadrement, son enthousiasme inébranlable, et sa disponibilité au sein ou en dehors du labo. Les nombreuses discussions que l'on a pu avoir, son écoute, et ses conseils avisés ont été moteurs de la bonne réussite de cette thèse, et m'ont permis de progresser énormément sur différents aspects de la recherche scientifique, expérimentale et théorique, sur la rigueur ou encore l'autonomie dans mon travail.

Je tiens à remercier vivement monsieur Adnan NAJA qui a participé à l'encadrement et au suivi de cette thèse de la partie Libanaise. Je lui remercie pour sa disponibilité, ses explications, ses conseils qui m'ont beaucoup aidé pour l'avancée de mon travail.

Merci également à Nikolay SMAGIN l'ingénieur de recherche de l'IEMN, qui a aussi m'accompagné durant la partie expérimentale. Nous avons passé des agréables moments ensemble, c'était avec grand plaisir de travailler avec vous.

Ma gratitude et mes remerciements vont ensuite aux membres du jury qui ont bien voulu de juger ce travail de recherche.

- M. JOUBERT Pierre-Yves : Professeur à l'Université Paris-Sud, France.
- M. FARAH Wehbeh : Professeur à l'Université Saint-Joseph, Liban.
- Mme. AUPETIT-BERTHELEMOT Christelle : Professeur à l'Université de Limoges, France.
- M. MOUBAYED Nazih : Professeur à l'Université Libanaise, Liban.

Je tiens à remercier vivement l'ensemble du personnel de l'IEMN Département Opto-Acousto-Electronique où s'est déroulé mon travail pour leur accueil, leur sympathie et pour les bons moments passés ensemble.

J'aimerais remercier également mes collègues docteurs et doctorants de l'IEMN, tous ceux qui ont participé à rendre ces 3 ans plus agréables, Hilal, Laid, Bada, Dany, Alaa, Basma, Ibra, Aymen, Sélima, Sara, Lamia, Layla, Hassan, Tarek, Martin, Justine, Ulrich, Rahmad.

Je remercie évidemment mes collègues doctorants au centre AZM Tripoli-Liban, Ranime, Nancy, Sara, Khoder, Bouchra, Joseph, Halima qui m'ont beaucoup encouragé et m'ont permis de passer cette période de ma vie dans une ambiance chaleureuse et conviviale.

Enfin, je remercie mes très chers parents, mes sœurs, mes frères qui ont été présents à chaque instant, à chaque moment-clé, pour apporter soutien, conseils, sagesse et aide précieuse.

Merci vraiment pour tous.

Table des matières

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	9
Introduction générale	10
Chapitre I : Etat de l’art et positionnement de la thèse	14
I. Introduction	15
II. Etat de l’art sur la récupération d’énergie vibratoire.....	15
II.1 Introduction	15
II.2 Les réseaux de capteurs autonomes.....	16
II.3 Etude des méthodes de récupération d’énergie vibratoire.....	17
II.3.1 Les ressources ambiantes possibles.....	18
II.3.2 Les différentes méthodes de récupération d’énergie mécanique.....	19
II.3.2.1 Transduction électromagnétique	19
II.3.2.2 Transduction électrostatique.....	20
II.3.2.3 Transduction piézoélectrique.....	20
II.3.2.4 Comparaison qualitative.....	21
II.3.2.5 Optimisation électrique par circuit d’extraction.....	21
III. Problème du suivi des mélanges	22
III.1 Introduction.....	22
III.2 Méthodes de mesures de l’homogénéité	23
IV. Solution acoustique : Capteur sphérique	24
IV.1 Résonateurs sphériques.....	24
IV.2 Capteur sphérique réalisé.....	25
IV.2.1 Réseau de capteurs et signaux codés	27
IV.2.2 Consommation énergétique	28
IV.2.3 Stabilité du capteur	30
IV.2.4 Sensibilité du capteur.....	30
V. Conclusion	31
Chapitre II : Modélisation de la récupération d’énergie vibratoire à l’aide d’un capteur sphérique.....	33
I. Introduction	34
II. Comportement vibratoire d’une coquille sphérique.....	34
II.1 Vibrations axisymétriques.....	35
II.2 Vibrations non-axisymétriques.....	37

II.3 Approche numérique du capteur	38
II.4 Approche expérimental	40
III. Modélisation de l'anneau piézoélectrique.....	41
III.1 Mode longitudinal	41
III.1.1 Réponse analytique en tension.....	44
III.1.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration longitudinale.....	45
III.2 Mode radial	47
III.2.1 Réponse analytique en tension	50
III.2.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration radiale.....	51
III.3 Charge due au circuit d'extraction d'énergie	53
IV. Modèle analytique de la récupération d'énergie.....	55
IV.1 Champ de forces appliqué sur l'anneau	55
IV.2 Modèle analytique proposé.....	57
V. Modélisation éléments finis	59
VI. Conclusion	60

Chapitre III : Caractérisation expérimentale de la récupération d'énergie vibratoire à l'aide d'un capteur sphérique 62

I. Introduction	63
II. Champs de rayonnement et directivité du capteur sphérique.....	63
III. Champ d'émission du transducteur et de la sonotrode.....	67
IV. Etude expérimentale de la récupération d'énergie vibratoire	69
IV.1 Résonances de la sphère dans un fluide.....	69
IV.2 Dispositif expérimental.....	70
IV.2.1 Atténuation de l'onde acoustique dans l'eau	71
IV.2.2 Problème des bulles d'air.....	72
IV.2.3 Balayage en coordonnée transversale à distance constante	74
IV.2.4 Balayage en profondeur à distance constante	75
IV.2.5 Influence de l'angle de rotation à distance constante	76
IV.2.5.1 Directivité	78
IV.2.6 Mesures de la pression acoustique.....	79
IV.2.6.1 Mesures par hydrophone.....	79
IV.2.6.2 Coefficients de conversion d'énergie.....	82
V. Conclusion	83

Chapitre IV : Etude et réalisation du système d'extraction d'énergie en vue de l'autonomie du capteur sphérique..... 85

I. Introduction	86
-----------------------	----

II. Besoins énergétiques des systèmes autonomes	87
III. Circuit d'extraction d'énergie BQ25504.....	89
III.1 Description.....	89
III.2 Principe de fonctionnement	91
III.2.1 Suivi du point maximal de la puissance (MPPT).....	91
III.2.2 Protection de la batterie contre les sous-tensions.....	92
III.2.3 Protection de la batterie contre les surtensions	92
III.2.4 Tension de la batterie dans la plage de fonctionnement (VBAT_OK)	93
III.3 Modes de fonctionnement du circuit.....	93
IV. Modélisation du circuit d'extraction d'énergie.....	95
V. Validation expérimentale du circuit d'extraction d'énergie.....	96
VI. Etude expérimentale en cuve et validation du principe de fonctionnement	98
VI.1 Installation expérimentale.....	98
VI.2 Résultats et discussion	100
VI.3 Bilan énergétique et puissance récupérée	101
VII. Conclusion.....	103
Conclusion générale.....	106
Annexe.....	108
Références.....	117

Liste des figures

Figure I. 1 : Structure d'un récupérateur d'énergie vibratoire	18
Figure I. 2 : Nature des sources d'énergie pour microsystèmes autonomes [5].....	18
Figure I. 3 : Structure d'un circuit d'extraction d'énergie	22
Figure I. 4 : Les éléments mécaniques de base constituant le transducteur sphérique	25
Figure I. 5 : La partie creuse de la sphère contenant l'électronique.....	26
Figure I. 6 : Schéma fonctionnel du dispositif embarqué dans la capsule ultrasonore	27
Figure I. 7 : Réseaux de capteurs identifiables par codage	28
Figure I. 8 : Signaux reçus à l'émission du code 5 (a) et du code 7 (b).....	28
Figure I. 9 : Courant consommé et puissance absorbée pendant une trame suite à l'émission du code 5	29
Figure I. 10 : Courant consommé et puissance absorbée pendant une trame suite à l'émission du code 7	29
Figure I. 11 : Variation de la vitesse de l'onde acoustique en fonction du temps [18]	30
Figure I. 12 : Sensibilité des récepteurs à l'évolution des propriétés mécaniques des milieux [18].....	31
Figure II. 1 : Coordonnées du système sphérique	36
Figure II. 2 : Formes de modes axisymétriques et non axisymétriques pour $n=5$, $m=0$ (mode axisymétrique) et $m=1, 2, 3, 4, 5$ (modes non axisymétriques) dans la branche inférieure [30]	38
Figure II. 3 : Fréquences de résonance de notre coquille sphérique	39
Figure II. 4 : Quelques formes modales du résonateur sphérique.....	40
Figure II. 5 : Représentation fréquentielle de la résistance électrique du capteur.....	40
Figure II. 6 : Tranche élémentaire de l'anneau en oscillation longitudinale	41
Figure II. 7 : Schéma électromécanique de l'anneau piézoélectrique en mode longitudinal	43
Figure II. 8 : Admittance de l'anneau piézoélectrique en mode d'épaisseur	46
Figure II. 9 : L'anneau piézoélectrique en mode radial.....	47
Figure II. 10 : Schéma électromécanique de l'anneau piézoélectrique en mode radial.....	50
Figure II. 11 : Admittance de l'anneau en vibration radiale.....	53
Figure II. 12 : Puissances modélisées en fonction de l'impédance interne.....	54
Figure II. 13 : Puissance totale récupérée en fonction de Z_{int} et de la fréquence.....	55
Figure II. 14 : Maillage du modèle MEF	55
Figure II. 15 : Force appliquée dans le plan de l'anneau	56
Figure II. 16 : Réponses en tension longitudinale et radiale	57
Figure II. 17 : Modèle théorique de simulation two-mode	57
Figure II. 18 : Réponse analytique en tension de notre modèle théorique	58
Figure II. 19 : Maillage du capteur montrant la zone de l'anneau.....	59
Figure II. 20 : Déformation de la sphère sous l'action de la pression acoustique	60
Figure II. 21 : Réponses en tension simulation-MEF/analytique.....	60
Figure III. 1 : Schéma expérimental du VLD	64
Figure III. 2 : Signal temporel pour une fréquence quelconque	65
Figure III. 3 : Directivité de la sphère pour quelques fréquences	65
Figure III. 4 : Déplacements de la surface du capteur.....	66

Figure III. 5 : Déplacements de la sphère en fonction de la fréquence et l'angle	67
Figure III. 6 : Fréquences de résonance pour sonotrode (a) et transducteur (b)	68
Figure III. 7 : Champs de déplacement pour sonotrode (a) et transducteur (b)	68
Figure III. 8 : Résonance du capteur sphérique dans l'air et dans l'eau	69
Figure III. 9 : Dispositif expérimental de la récupération d'énergie	70
Figure III. 10 : Tensions récupérées à plusieurs distances avec le transducteur	71
Figure III. 11 : Niveau de la puissance récupérée	72
Figure III. 12 : Accumulation des bulles d'air sur la surface de la sphère durant l'étude expérimentale	73
Figure III. 13 : Influence des bulles d'air sur le niveau de la tension récupérée.....	73
Figure III. 14 : Déplacement horizontal du capteur suivant l'axe y à position fixe du transducteur	74
Figure III. 15 : Influence du balayage suivant l'axe y sur la tension récupérée.....	75
Figure III. 16 : Déplacement vertical du capteur suivant l'axe z à position fixe du transducteur.....	75
Figure III. 17 : Influence de la profondeur sur la tension récupérée	76
Figure III. 18 : Rotation de la sphère à distance constante avec le transducteur	76
Figure III. 19 : Influence de l'angle de rotation sur l'amplitude de la tension pour d = 15 cm	77
Figure III. 20 : Influence de l'angle de rotation sur l'amplitude de la tension pour d = 50 cm	77
Figure III. 21 : Directivité du capteur en tension récupérée pour les fréquences de résonance	78
Figure III. 22 : Schématique d'Hydrophone B&K 8103.....	80
Figure III. 23 : Tension récupérée et pression acoustique à d = 15 cm pour sonotrode (a) et transducteur (b).....	81
Figure III. 24 : Tension récupérée et pression acoustique à d = 30 cm pour sonotrode (a) et transducteur (b).....	81
Figure III. 25 : Tension récupérée et pression acoustique à d = 50 cm pour sonotrode (a) et transducteur (b).....	81
Figure III. 26 : Coefficients de conversion d'énergie pour les fréquences de résonance du capteur et des fréquences intermédiaires	82
Figure III. 27 : Intervalle de confiance pour les coefficients de conversion d'énergie	83
Figure IV. 1 : Architecture du circuit d'extraction BQ25504.....	90
Figure IV. 2 : Les différentes phases de fonctionnement du circuit de récupération.....	94
Figure IV. 3 : Schéma complet du circuit de gestion de l'énergie	95
Figure IV. 4 : Evolutions des différentes tensions dans le circuit de gestion d'énergie	96
Figure IV. 5 : Schéma du système de récupération d'énergie avec le circuit d'extraction	97
Figure IV. 6 : Alimentation autonome du microcontrôleur équipant le capteur.	98
Figure IV. 7 : Installation expérimentale complète de la récupération d'énergie vibratoire.....	99
Figure IV. 8 : Autonomie énergétique du capteur sphérique et émission du code	100
Figure IV. 9 : Vue du dispositif expérimental	101
Figure IV. 10 : Traces des puissances récupérées en fonction de la distance	103
Figure B. 1 : Champ d'émission d'un transducteur acoustique	113

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Densité de puissance de diverses technologies pour la récupération d'énergie [6]	19
Tableau I. 2 : Comparaison des caractéristiques de trois types de transducteurs.....	21
Tableau I. 3 : Vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau à différentes températures [18]	31
Tableau II. 1 : Fréquences théorique et expérimental de résonance de l'anneau en épaisseur	46
Tableau II. 2 : Fréquences théorique et expérimentale de la résonance radiale de l'anneau	53
Tableau II. 3 : Impédances internes pour les deux modes de vibration et la puissance correspondante	53
Tableau II. 4 : Paramètres du plexiglas utilisés dans la simulation de la coque sphérique	56
Tableau II. 5 : Paramètres du PZ26 utilisés dans la simulation de l'anneau piézoélectrique	56
Tableau III. 1 : Fréquences de résonance du capteur obtenues dans l'air et dans l'eau.....	70
Tableau III. 2 : Atténuation relative de la tension pour plusieurs distances	72
Tableau IV. 1 : Puissances électriques consommées par des systèmes électroniques [46].....	87
Tableau IV. 2 : Caractéristiques et performances de la récupération d'énergie multi-axes.....	88
Tableau IV. 3 : Conditions de fonctionnement recommandées.	91
Tableau IV. 4 : Puissance électrique récupérée à différentes distances	102
Tableau A. 1 : Paramètres piézoélectriques pour différents matériaux PZT	111
Tableau A. 2 : Grandeurs caractéristiques de la piézoélectricité	112

Introduction générale

Le progrès technologique a permis à ce jour la multiplication des systèmes électroniques intégrés. Cette architecture a conduit à une baisse permanente de consommation énergétique rendant les appareils électroniques absolument autonomes.

En fait, notre environnement contient plusieurs formes d'énergie, les plus fréquentes sont l'énergie électromagnétique (rayonnements solaires, lumière), énergie thermique (gradient de température, moteurs) et l'énergie mécanique (vibration, mouvement, déformation). L'hypothèse de l'autonomie énergétique a été toujours accompagnée par la naissance d'un nouveau champ d'activité, la récupération d'énergie vibratoire ambiante qui existe dans l'alentour du système à alimenter. Beaucoup des travaux ont été engagé dans le domaine avec un objectif de converger toujours vers un dispositif miniature permettant de convertir toutes les formes d'énergie primaires en énergie électrique utilisable. Ces types des systèmes miniaturés sont formés en principe de deux parties essentielles : la première nommée « Transduction », permettant de traduire en énergie électrique l'énergie ambiante présente, et une deuxième partie; Electronique de gestion dédiée à l'aménagement et l'ordonnancement. Un dispositif de récupération d'énergie cohérent avec son environnement selon la forme d'énergie existant, il mène à envisager un convertisseur qui sera adapté à un besoin bien défini.

Récemment, les UWSN (Underwater Wireless Sensor Networks) [1-3] font une partie du concept général des réseaux de capteurs sans fil (WSN : Wireless Sensor Networks) [4, 5]. Ils ont attiré une attention considérable en raison de leurs applications prometteuses dans la surveillance, suivi et détection dans l'eau peu profonde ainsi que dans les océans profonds [6-9]. Les ondes électromagnétiques et optiques à radiofréquence démontrent une faible efficacité dans les applications sous-marines en raison de l'atténuation et de la diffusion élevées dans les milieux. D'autre part, les ondes acoustiques fournissent des performances suffisantes en termes de distance de propagation et d'antennes émettrices/réceptrices [10, 11].

Afin de fournir une opération UWSN durable, le problème de l'alimentation énergétique autonome et permanente de l'électronique de faible puissance pour les nœuds de détection devrait être résolu [12]. Dans les applications sous-marines, les batteries électriques ne sont pas préférables en raison de la faible accessibilité des nœuds de détection pour le remplacement des batteries et du danger que les batteries présentent pour les écosystèmes aqueux. Dans ce contexte, les récupérateurs d'énergie convertissant l'énergie ambiante en

énergie électrique sont considérés comme une solution prometteuse pour un approvisionnement énergétique à long terme [13].

L'océan contient de grandes quantités d'énergie acoustique exploitable pour l'alimentation d'électronique. En particulier, les ondes ultrasonores sont générées dans l'océan soit naturellement par les animaux, soit par l'activité géologique ou artificiellement par des antennes pour la détection sous-marine, la navigation et la communication [14, 15]. L'un des points les plus fascinants est que le bruit acoustique ambiant sous-marin peut être utilisé pour la surveillance et le positionnement des paramètres d'un milieu [16] en même temps que la fonction d'alimentation en énergie. Néanmoins, la récupération d'énergie par ultrasons sous-marine est difficile en raison de problèmes d'efficacité dans le couplage des ondes acoustiques avec le dispositif de récupération d'énergie, ainsi que des exigences élevées de durabilité et d'emballage [17, 18].

Les mécanismes de conversion d'énergie vibratoire généralement utilisés pour la récupération d'énergie sont l'électromagnétiques [19], l'électrostatiques [20] et la piézoélectricité [21, 22]. Parmi celles-ci, la récupération d'énergie piézoélectrique présente l'avantage d'une densité de puissance élevée, d'une large gamme de propriétés et d'une facilité d'application [23, 24]. Les configurations de récupérateurs courantes sont basées sur des poutres résonantes ainsi que sur des plaques ou des membranes soumis à une pression extérieure [25]. Une approche prometteuse consiste à utiliser des coques de forme personnalisée (généralement, cylindrique ou sphérique) entièrement réalisées en un matériau piézoélectrique ou en une structure sandwich contenant un tel matériau [26]. Pour le moment, la plupart des résultats sur les transducteurs piézoélectriques de type coque sont obtenus par des modélisations analytique et numérique avec un peu d'implémentations expérimentales [27]. Cette approche est prometteuse, mais il pourrait être difficile à mettre en œuvre en raison de problèmes de fabrication de la coque.

La plupart des études ont considéré des dispositifs de récupération conçus pour fonctionner en conjonction avec l'excitation ambiante à une fréquence donnée [28]. En général, de tels dispositifs sont conçus en utilisant des poutres cantilevers qui fournissent une récupération d'énergie basée sur la résonance [29]. Les capteurs de résonance doivent être pré-réglés sur l'excitation externe ou il est possible de concevoir un dispositif d'auto-optimisation [30]. Mais dans de nombreuses applications, l'énergie ambiante est aléatoire et à large bande, et le récupérateur d'énergie doit être adapté à ces conditions.

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur la récupération d'énergie mécanique vibratoire par conversion piézoélectrique. La récupération de cette forme d'énergie a attiré l'attention de la plupart des scientifiques académiques et industriels dans le monde grâce à son large champ d'application. Généralement, un récupérateur d'énergie vibratoire se base sur son équivalent modèle mécanique (ressort-masse-amortisseur), ayant une résonance autour de la fondamentale à la fréquence propre de vibration. Cette résonance assure une amplification de l'amplitude de déplacement.

Le but de ce travail de thèse était de développer un récupérateur d'énergie piézoélectrique efficace à large bande, à faible coût et c'est un conteneur de nœud de détection des capteurs pour les UWSN. Le capteur décrit ci-dessous utilise une coquille sphérique externe comme un résonateur et une bague piézoélectrique serrée comme un convertisseur d'énergie. Cette configuration permet de fonctionner dans une large gamme fréquentielle avec plusieurs modes de vibration (radial, longitudinal, flexion, ...). Ce transducteur sphérique fournit également une faible directivité qui est importante pour un fonctionnement dans des conditions ambiantes aléatoires. En plus, c'est la première réalisation d'un résonateur de forme sphérique multifréquences pour les applications UWSN. Il sera dédié aussi au suivi des propriétés physiques et mécaniques dans un mélange dynamique. Pour assurer l'autonomie énergétique de ce capteur, une chaîne de conversion de la puissance mécanique en puissance électrique sera optimisée afin de fournir un niveau maximal de puissance à la charge. Un circuit d'extraction d'énergie permettra de redresser la tension générée et de l'ajuster à un niveau exploitable pour alimenter l'électronique de ce capteur.

Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres, nous présentons dans ce qui suit les grandes lignes de chaque chapitre.

Le premier chapitre se focalise sur l'état de l'art des principaux travaux effectués dans la récupération d'énergie vibratoire et ses applications. Quant au second chapitre, il comporte trois parties : la première partie aborde l'étude du comportement vibratoire d'une coquille sphérique et ces fréquences de résonance. Dans la deuxième partie, un modèle analytique pour la récupération d'énergie vibratoire de ce capteur sphérique sera détaillé. Ce modèle tiendra en compte plusieurs modes de vibration afin de déterminer la réponse totale en tension. La dernière partie portera sur le développement d'un modèle éléments finis afin de valider le modèle analytique précédent.

Le troisième chapitre sera consacré à la réalisation et la validation expérimentale de la technique de récupération d'énergie. Une étude de vibration et de rayonnement de directivité du champ vibratoire de la sphère sera validée par une vibrométrie laser. Afin d'optimiser la méthode de récupération d'énergie par un biais expérimentale, et de quantifier par conséquence la grandeur de l'énergie récupérée par le capteur sphérique.

Enfin, le quatrième chapitre portera sur la réalisation expérimentale d'un circuit d'extraction et de stockage de l'énergie vibratoire par le biais du circuit « BQ25504 ». Pour consolider cette démarche, des simulations du circuit électrique seront effectuées sous SPICE en utilisant le logiciel TINA-TI 9.0 de Texas Instruments, et elles seront validées expérimentalement avec un dispositif complet de récupération d'énergie des bruits blanc de synthèse. Le niveau électrique récupéré servira à alimenter le microcontrôleur et l'électronique embarquée du capteur. Un cas réel de la technique de récupération d'énergie vibratoire complète avec le circuit d'extraction d'énergie en utilisant la capsule sphérique. Nous avons pu alimenter le capteur sphérique à partir des vibrations ambiantes, ce qui le rend autonome. Ce dernier rendu autonome sera porté avec succès une fois placé dans un environnement réel, assurant son fonctionnement par conversion d'un niveau suffisant des bruits environnant.

Chapitre I : Etat de l'art et positionnement de la thèse

I. Introduction	15
II. Etat de l'art sur la récupération d'énergie vibratoire	15
II.1 Introduction	15
II.2 Les réseaux de capteurs autonomes	16
II.3 Etude des méthodes de récupération d'énergie vibratoire	17
II.3.1 Les ressources ambiantes possibles	18
II.3.2 Les différentes méthodes de récupération d'énergie mécanique	19
II.3.2.1 Transduction électromagnétique	19
II.3.2.2 Transduction électrostatique	20
II.3.2.3 Transduction piézoélectrique	20
II.3.2.4 Comparaison qualitative	21
II.3.2.5 Optimisation électrique par circuit d'extraction	21
III. Problème du suivi des mélanges	22
III.1 Introduction	22
III.2 Méthodes de mesures de l'homogénéité	23
IV. Solution acoustique: Capteur sphérique	24
IV.1 Résonateurs sphériques	24
IV.2 Capteur sphérique réalisé	25
IV.2.1 Réseau de capteurs et signaux codés	27
IV.2.2 Consommation énergétique	28
IV.2.3 Stabilité du capteur	30
IV.2.4 Sensibilité du capteur	30
V. Conclusion	31

I. Introduction

Ce premier chapitre est divisé en trois grandes parties, La première met l'accent sur l'autonomie énergétique des capteurs par une description de l'état de l'art sur les méthodes de récupération d'énergie vibratoire et les circuits d'optimisation électrique.

La deuxième porte sur les problèmes du suivi des mélanges et une brève étude sur l'homogénéisation et ses méthodes de mesure. Le manque de méthodes autonomes pour les caractérisations mécaniques et physiques d'un produit nous a poussés à proposer une technique de contrôle et de caractérisation ultrasonore. Cette technique sera détaillée dans la troisième partie de ce chapitre. Elle consiste en un capteur acoustique sphérique miniaturisé introduit dans le milieu à caractériser et interagissent avec celui-ci afin de suivre les propriétés du mélange et de récupérer des informations pertinentes sur le niveau d'homogénéisation de ce dernier. Le capteur doit être autonome énergétiquement et capable de communiquer avec l'extérieur.

II. Etat de l'art sur la récupération d'énergie vibratoire

II.1 Introduction

Le but de la récupération d'énergie vibratoire est de réaliser des micro-générateurs électriques de taille très réduite capables d'alimenter des systèmes électroniques en transformant l'énergie mécanique des bruit du fond en énergie électrique suffisante pour alimenter ces systèmes électroniques. Dans ce contexte, apparait une application très importante qui consiste à alimenter des capteurs « autonomes » communicants. Le développement de ces réseaux de capteurs autonomes répond à un besoin sans cesse croissant, soit de mesurer, d'analyser et de contrôler l'évolution de notre environnement naturel, de vérifier l'état de santé du corps humain ou de vérifier le comportement de constructions. Des applications militaires sont également envisagées.

Les sources d'énergie récupérable sont nombreuses. Parmi ces sources d'énergie, les vibrations mécaniques ambiantes sont très étudiées et utilisées dans des nombreuses applications. D'une manière générale, les récupérateurs d'énergie vibratoire sont basées sur des systèmes mécaniques résonants (ressort-masse-amortisseur) accordés à la fréquence de la source [31]. Pour récupérer alors le maximum d'énergie cela implique une analyse de la

source de vibration après un réglage de la fréquence de la source à la fréquence de résonance du récupérateur. Plusieurs phénomènes physiques sont utilisés pour l'extraction de l'énergie mécanique, tels que la piézoélectricité, l'électromagnétisme ou l'électrostatique. Dans le cadre de notre travail nous nous sommes intéressés à la piézoélectricité.

Depuis quelques années, plusieurs études et recherches sont effectués afin d'étudier le problème de l'autonomie énergétique pour l'alimentation de capteurs. A l'heure actuelle, ces capteurs sont alimentés par des piles qui imposent une durée de vie limitée, et diminuent le champ d'utilisation de ces capteurs. Le but de la récupération d'énergie est de remplacer ces piles par des micro-générateurs afin d'assurer l'autonomie énergétique de ces capteurs.

II.2 Les réseaux de capteurs autonomes

Les nouvelles évolutions des techniques de communication sans fil, l'amélioration des techniques de mesures et la miniaturisation des microsystèmes ont conduit à l'apparition de réseaux de capteurs autonomes communicants sans fil. Ces réseaux sont formés par plusieurs nœuds miniaturisés qui sont distribués dans un environnement afin de déterminer certaines propriétés caractéristiques. Le processus de communication sans fil assure les traitements et les communications de ces propriétés à un nœud central.

Ces réseaux autonomes répondent à des nécessités de mesures, d'analyse et d'examen de notre environnement, le comportement de constructions civiles ou militaires et l'état de santé du corps humain. Parmi plusieurs domaines d'application, citons le domaine militaire qui est beaucoup intéressé aux réseaux de capteurs sans fil dont l'objectif d'étudier les changements des positions des soldats ennemis, ou d'analyser un terrain de bataille avant de s'y participer. Par exemple, un réseau de capteurs acoustique appelé PinPtr, a été développé par l'université de Vanderbilt, ce réseau qui est dispersé dans un milieu urbain est capable de situer des snipers à partir de l'onde liée au tir de l'arme [32].

Un deuxième but environnemental est le déploiement des capteurs autonomes dans la nature : détecter et empêcher les catastrophes naturelles par exemple les incendies, comprendre l'évolution des habitats naturels et les déplacements des animaux dont l'objectif est la connaissance et la protection des espèces [33], ou encore pour optimiser la gestion des sols dans les milieux agricoles.

Un réseau de 64 capteurs autonomes a été développé par Kim et al. [34] sur le Golden Gate Bridge de San Fransisco, qui permet de mesurer les vibrations et les

mouvements importants du pont. Ensuite, le traitement des données est capable de détecter une modification dans le comportement du système dû à un dysfonctionnement.

Dans le domaine biomédical, des capteurs autonomes sont implantés sous la peau du corps humain permettrait de détecter et stocker d'une forme continue des propriétés physiologiques, et de les transporter à un centre médical spécialisé.

II.3 Etude des méthodes de récupération d'énergie vibratoire

Un dispositif de récupération d'énergie des vibrations ambiantes est essentiellement formé de quatre unités de bases: la première unité est un dispositif purement mécanique. Son rôle est de capter et d'optimiser les vibrations mécaniques, la deuxième unité est un dispositif électromécanique dont le but de convertir l'énergie mécanique récupérée en énergie électrique. La troisième unité est un dispositif électrique ou plus précisément un circuit électrique capable de rendre l'énergie électrique non exploitable en énergie électrique exploitable. La dernière unité sera un dispositif de stockage de l'énergie juste avant d'être appliquée au capteur "électriquement autonome" (Figure I.1). Pour améliorer la densité de puissance des générateurs et de leur bande passante, il est nécessaire d'optimiser les quatre unités de conversion.

Le choix du capteur sphérique se manifeste par sa surface active (surface extérieure de la sphère) qui est capable de capter une large bande des modes vibratoires dans l'espace considérée. Dans la suite, deux modes de vibration attirent notre attention: longitudinal et radial. Ils sont capables de générer les plus hautes tensions par comparaison avec les autres modes de vibrations, ces deux modes seront détaillées dans le chapitre suivant.

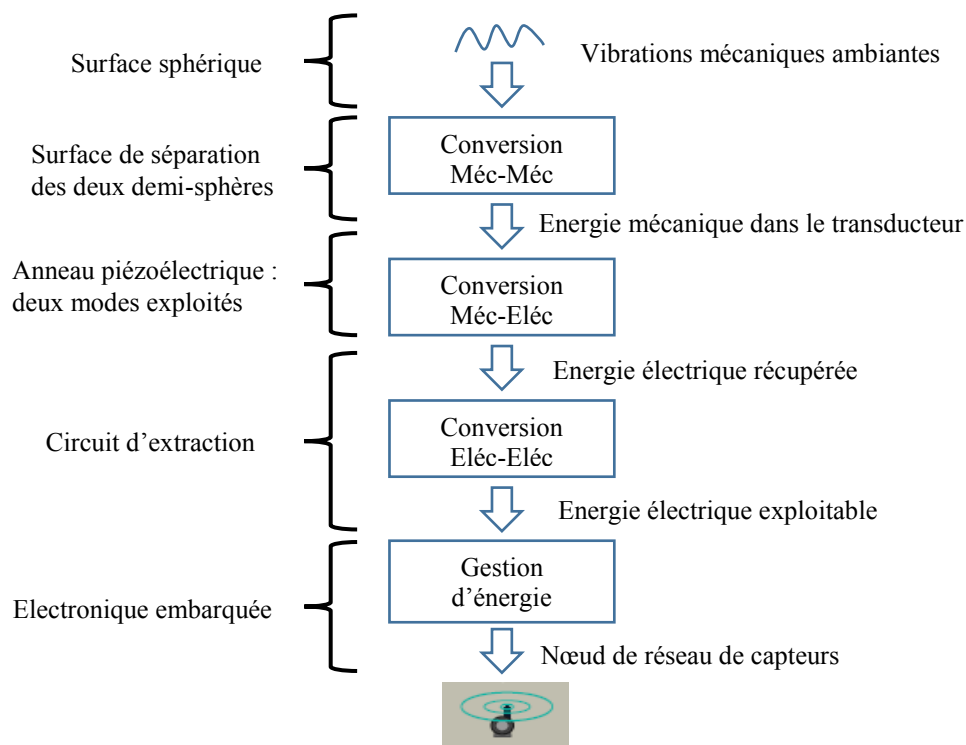


Figure I. 1 : Structure d'un récupérateur d'énergie vibratoire

II.3.1 Les ressources ambiantes possibles

Les sources ambiantes d'énergie sont diverses, elles sont capables de fournir des niveaux de tension suffisants pour alimenter des systèmes autonomes communicants. Nous citons à titre d'exemples, l'énergie mécanique résultant de vibrations, forces ou contraintes, l'énergie solaire photovoltaïque venant du soleil et des faisceaux artificiels, la chaleur, l'énergie électromagnétique et l'énergie chimique résultant de processus biologiques.

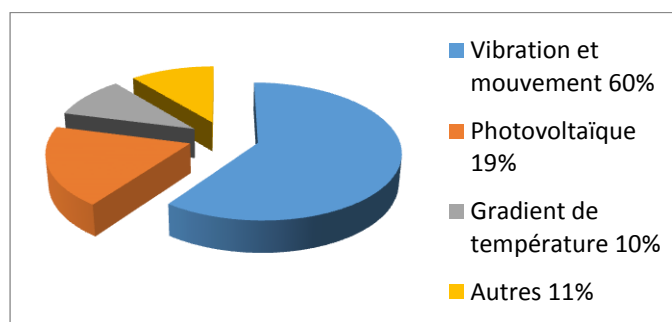


Figure I. 2 : Nature des sources d'énergie pour microsystemes autonomes [35]

La Figure I.2 présente les pourcentages des sources d'énergies utilisées pour la récupération d'énergie durant les 10 dernières années, et comme indiqué les vibrations occupent l'utilisation la plus importante.

Le tableau I.1 montre une comparaison entre les densités de puissance pour plusieurs sources classiques d'énergie.

Technologie	Densité de puissance
Photovoltaïque extérieur (cellule de rendement 15 %, irradiance incidente de 100 mW/cm ²)	15000 μW/cm ²
Photovoltaïque extérieur (cellule de rendement 6 %, irradiance incidente de 100 mW/cm ²)	100 μW/cm ²
Piézoélectrique (inserts dans chaussure)	330 μW/cm ³
Thermoélectrique (pour un gradient de 10 °C)	40 μW/cm ³
Bruit acoustique (100 dB)	0,96 μW/cm ³

Tableau I. 1 : Densité de puissance de diverses technologies pour la récupération d'énergie [36]

Ce tableau montre que l'énergie vibratoire ambiante occupe la deuxième plus forte densité de puissance après l'énergie solaire, cette source ayant alors l'avantage d'être utilisée dans plusieurs domaines d'application, comme les milieux industriels ou de transport.

II.3.2 Les différentes méthodes de récupération d'énergie mécanique

Un transducteur électromécanique transforme l'énergie mécanique en une énergie électrique. Plusieurs technologies ont été mises au point ayant des avantages et des inconvénients, dépendant de l'application considérée. Les méthodes les plus utilisées sont les transductions électromagnétiques, transductions électrostatiques, et les transductions piézoélectriques. Dans notre travail, nous nous sommes focalisés seulement sur la récupération d'énergie vibratoire par transduction piézoélectrique. L'étape la plus importante de la récupération d'énergie, est la partie électrique d'extraction et de stockage de l'énergie finale récupérée.

II.3.2.1 Transduction électromagnétique

Un transducteur de type électromagnétique se compose d'un ou de plusieurs aimants créant un champ magnétique constant, ainsi que d'une bobine plongée dans ce champ. Un système mécanique résonnant formé d'une poutre encastrée génère un déplacement relatif entre l'aimant et la bobine lorsque le système est excité par une vibration extérieure. La variation au cours du temps du flux magnétique dans la bobine crée une tension V

proportionnelle à la vitesse de changement du flux magnétique ϕ et au nombre de tours N de la bobine, selon la loi de Faraday donnée par l'équation:

$$V = - N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{I.1}$$

II.3.2.2 Transduction électrostatique

Un générateur électrostatique est fondé sur la variation de la force électrique entre les deux armatures d'un condensateur en déplacement relatif l'une par rapport à l'autre sous l'action d'une excitation extérieure. Deux principaux cycles de fonctionnement sont mis en jeu : mode à charge constante ou mode à tension constante. L'énergie électrique récupérée est donnée par l'équation suivante :

$$E = \frac{1}{2} V^2 (C_{\max} - C_{\min}) \quad \text{II.2}$$

Avec V la tension aux bornes de la structure, C_{\max} et C_{\min} les capacités maximales et minimales de la structure.

Les convertisseurs électrostatiques nécessitent une source extérieure pour polariser la structure en début de cycle. Cette source a souvent une valeur très importante (>100 V), Cette polarisation est nécessaire à chaque début de cycle.

II.3.2.3 Transduction piézoélectrique

Ce type de ces transducteurs repose sur des matériaux non conducteurs appelés matériaux piézoélectriques, ayant une propriété de se polariser électriquement sous l'action des forces mécaniques (effet direct), et inversement se déforme mécaniquement lors de l'application d'un champ électrique (effet inverse). Un dispositif piézoélectrique de récupération d'énergie est généralement exploité en reliant une céramique piézoélectrique à une structure oscillante qui impose des déformations de la céramique. La structure mécanique résonante est dans la plupart des cas une poutre encastree, sur laquelle sont montées une ou plusieurs céramiques piézoélectriques. Contrairement aux transducteurs électromagnétiques, de hautes tensions sont produites par les transducteurs piézoélectriques à faibles courants. Les systèmes piézoélectriques présentent l'avantage d'être plus adaptés aux techniques de fabrications MEMS et plus facilement miniaturisables.

II.3.2.4 Comparaison qualitative

Plusieurs études ont été effectuées pour résumer les avantages et les inconvénients de différentes méthodes de la récupération d'énergie, tenant compte des faibles tensions produites par les générateurs électromagnétique, de l'intégration facile des systèmes électrostatiques, et encore des hautes tensions et des fortes impédances de sorties pour les transducteurs piézoélectriques. Le tableau I.2 montre une brève comparaison d'ordre général entre les propriétés des différentes modes de transduction.

Type	Avantages	Inconvénients
Piézoélectrique	<ul style="list-style-type: none">- Fortes tensions générées- Compatible avec intégration MEMS- Fort couplage pour les monocristaux- Compact	<ul style="list-style-type: none">- Haute impédance- Dépolarisation- Fragilité des couches piézo- Faible couplage pour les polymères frittés
Electromagnétique	<ul style="list-style-type: none">- Forts couplages- Pas de matériaux intelligents	<ul style="list-style-type: none">- Faibles tensions générées- Intégration MEMS difficile
Electrostatique	<ul style="list-style-type: none">- Fortes tensions générées- Compatible avec fabrication MEMS	<ul style="list-style-type: none">- Contraintes mécaniques requises- Source de tension ou charge externe requise

Tableau I. 2 : Comparaison des caractéristiques de trois types de transducteurs

Beaucoup des modèles ont été développés pour comparer les performances des générateurs électromagnétiques et piézoélectriques. Par exemple Poulin et al du laboratoire SATIE, de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, montrent deux modèles comparables entre les transducteurs électromagnétiques et piézoélectriques. Ils ont développé une étude numérique capable de mettre en œuvre les fortes dualités entre ces deux systèmes de récupération d'énergie vibratoire, par exemple les niveaux des tensions produites et les valeurs de leurs fréquences de résonance [37].

II.3.2.5 Optimisation électrique par circuit d'extraction

La puissance électrique générée par un transducteur piézoélectrique n'est pas exploitable directement pour alimenter des dispositifs électroniques. Il faut mettre en œuvre un circuit d'extraction de l'énergie afin de convertir de façon optimale l'énergie récupérée (Figure I.3). En fait, les tensions générées par un élément piézoélectrique sont des tensions alternatives qu'il faut le redresser (AC/DC), filtrer et adapter le niveau. De plus ce circuit doit

permettre de réguler (DC/DC) ces tensions de manière à produire des tensions indépendantes de la source initiale ou des variations de charges exercés sur l'élément piézoélectrique (c.à.d. imposer une tension constante sur la charge). La structure du circuit d'extraction doit prendre en compte les caractéristiques électriques du transducteur comme l'impédance et les tensions produites.

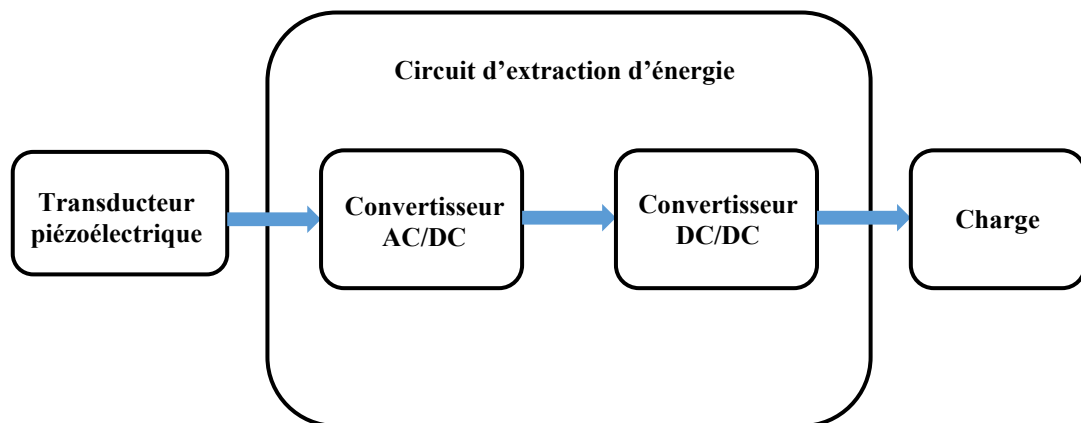


Figure I. 3 : Structure d'un circuit d'extraction d'énergie

Le niveau de l'énergie récupérée par ces systèmes piézoélectrique n'est pas suffisant pour l'alimentation directe des systèmes électroniques, il suffit donc d'une étape de stockage et d'accumulation de l'énergie récupérée afin d'atteindre un niveau suffisant. La solution la plus simple est de charger un condensateur ou une batterie rechargeable.

III. Problème du suivi des mélanges

III.1 Introduction

Plusieurs facteurs jouent un rôle essentiel dans le processus de mélanges, la nature des produits à mélanger, les mécanismes de mélange utilisés et les caractéristiques mécaniques. L'industrie pharmaceutique et agro-industrielle, utilise des phénomènes physico-chimiques complexes qui permettent la transformation des produits comportant plusieurs phases caractérisées par des propriétés physiques dépendantes du temps, ce qui rend très délicate l'approche du problème de caractérisation. Pour assurer la qualité du produit final, il faut maîtriser toutes les étapes intermédiaires de fabrication. Le problème majeur est qu'il n'existe pas à nos jours des méthodes efficaces et fiables capables de suivre en ligne les différentes étapes de fabrication d'un produit.

Pour tenter de répondre à cet objectif, nous proposerons un capteur acoustique sphérique miniaturisé et autonome pouvant être incorporé au produit pour caractériser les propriétés mécaniques et l'homogénéité d'un mélange.

III.2 Méthodes de mesures de l'homogénéité

Actuellement beaucoup d'études montrent que la qualité de l'homogénéisation d'un mélange dépend de plusieurs facteurs, par exemple la durée de mélange, le mouvement et la forme géométrique du système d'agitation. Ces facteurs influent grandement sur les propriétés mécaniques et physiques de la matière première qui jouent un rôle important dans les propriétés du produit final. De nos jours, les méthodes fiables capables de suivre ces modifications sont rares.

A titre d'exemple, dans le but de réguler et contrôler les propriétés d'un mélange, **Ehrardt et al** [38] ont développé une méthode qui se base sur la mesure de la permittivité diélectrique d'un milieu situé entre deux électrodes. Par contre, un problème qui limite cette technique est comment différencier les états de milieux ayant des propriétés physiques très proches.

La technique proche infrarouge permet d'étudier la composition chimique d'un produit par analyse spectrale qui permet d'un accès à une analyse multi-composante, la bande spectrale nommée bande proche infrarouge se prolonge de 1100 nm à 2500 nm. Un spectromètre comprend une source lumineuse qui couvre la bande spectrale, un système optique pour assurer la focalisation, un capteur et un monochromateur.

D'autres méthodes de suivi et de contrôle des réactions basée sur la mesure de l'humidité dans un produit ont été abordées par **Frake et al** [39] et **Bakeev** [40]. Pareillement dans le même contexte, **Berntsson** [41] a développé une méthode permettant de suivre un mélange de poudre pour analyser l'effet de quelques facteurs sur le temps final d'un mélange. L'inconvénient de cette méthode est la nécessité d'une calibration pointue et d'un taux d'échantillonnage assez élevé. **Rielly** [42] a réussi de bien identifier l'instant de la fin d'un mélange par estimation de la présence de nouvelles particules par l'apparition des couleurs.

D'un autre côté, **Delaplace et al** [43] ont proposé un système qui se base sur le rapport de la vitesse de rotation de l'agitateur autour de l'axe vertical par rapport à sa vitesse de rotation autour de l'axe horizontal. En plus, ils ont étudié l'effet de ce rapport sur la nature de l'homogénéité d'un mélange de produits granulaires à écoulement libre. Afin de valider leur

hypothèse, une analyse a été effectuée sur le temps de mélange et l'énergie consommée pendant la durée du mélange.

Pour contrôler l'homogénéité d'un mélange, des méthodes acoustiques ont été aussi développées, **G. Nassar et al** [44] ont mis en point un capteur acoustique passif à très basse fréquence (<100 Hz) qui est capable de suivre l'évolution mécanique d'une pâte pendant le processus de pétrissage.

Après la description de plusieurs techniques, il paraît clair qu'il y a un manque de dispositifs d'étude quantitative des caractéristiques mécaniques et physiques du contenu d'un produit. Actuellement la plupart des méthodes se basent sur l'analyse qualitative et statique des propriétés surfaciques. Pour ces raisons nous nous sommes intéressés à une solution acoustique pour résoudre ce problème.

IV. Solution acoustique : Capteur sphérique

Comme mentionné dans la partie III, il n'existe pas une méthode autonome de contrôle d'homogénéité capable à la fois de suivre les évolutions des propriétés physiques et mécaniques d'un mélange en temps réel. Ce manque nous a poussés à développer une technique de caractérisation ultrasonore offrant en même temps une souplesse de fonctionnement et un accès aux propriétés physiques et mécaniques d'un milieu ayant une forte dépendance temporelle.

Pour cette raison nous avons défini une nouvelle technologie de contrôle dynamique pour suivre en ligne les caractéristiques mécaniques d'un mélange. Cette technique consiste à placer dans le mélange un ensemble de capteurs acoustiques sphériques, miniaturisés et autonomes. Un module d'électronique embarqué dans les capteurs assure le codage de l'émission et le protocole de mesures et communication. L'excitation vibratoire d'un émetteur génère une onde acoustique sphérique dans le milieu à analyser.

IV.1 Résonateurs sphériques

Les résonateurs sphériques sont beaucoup utilisés dans différents domaines. Par exemple en pétrochimie, ils sont utilisés pour mesurer la vitesse du son dans différents gaz. Le but était d'obtenir des informations thermodynamiques comme la viscosité, la conductivité thermique et la constante des gaz parfaits **R. J. B. MEHL et al** [45] ont utilisé un résonateur sphérique en mode radial, et ont montré une bonne corrélation entre les

propriétés thermodynamiques et la vitesse du son mesurée. Ils ont utilisé encore un résonateur sphérique dans une bande fréquentielle de 4 à 13 KHz afin de déterminer la vitesse et l'atténuation du son dans le gaz C_2H_4 . Ils ont utilisé un résonateur sphérique en aluminium, de diamètre intérieur de 127 mm et une épaisseur de 12,1 mm calibré par le gaz d'Argon (Ar) sous une plage de température de 0 à 100 °C et une gamme de pression allant de 0.15 à 1.0 MPa.

Dans le même but, **He et al** [46] ont développé un résonateur sphérique en acier inoxydable, pour mesurer la vitesse du son dans le propane gazeux pour une gamme de température comprise entre 293 K et 313 K, à une pression allant jusqu'à 200 KPa et de fréquence de travail comprise entre 1 et 15 KHz.

Dans les gaz parfait et sur la base de la relation qui lit la constante de Boltzmann à la vitesse du son, **Arnaud GUILLOU** [47] a proposé une méthode pour mesurer la vitesse du son, il a utilisé un résonateur quasi sphérique en cuivre rempli d'argon de volume intérieur 0,5 L.

IV.2 Capteur sphérique réalisé

Le capteur est réalisé au sein de notre équipe du laboratoire IEMN/DOAE de l'université de Valenciennes, a une forme sphérique et est composé de deux demi-sphères en plexiglas. Son rayon intérieur est d'environ 10 mm et son épaisseur est d'environ 1 mm. La capsule sphérique ainsi réalisée est mise en résonance par un anneau piézo-électrique (PZT-Pz26-ferroperm) de 1 mm d'épaisseur, pris en sandwich entre les deux demi-sphères [48] (Figure I.4).

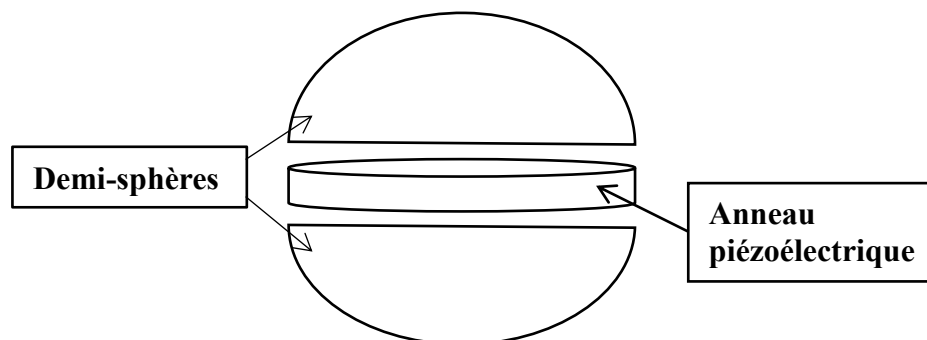


Figure I. 4 : Les éléments mécaniques de base constituant le transducteur sphérique

La forme sphérique creuse de la structure nous offre la possibilité d'embarquer une électronique de contrôle commande au sein du résonateur qui permet de rendre le capteur

autonome. En fait, cette électronique assure, en même temps, l'excitation de l'anneau piézo-électrique, le contrôle de l'émission-réception, les algorithmes de codage, le traitement du signal et en perspective un protocole de stockage des données.

La partie creuse de la capteur sphérique contient une puce programmable (SoC) qui assure le control et la commande du résonateur. Elle comprend, une unité centrale de traitement (CPU), un oscillateur numérique (DCO), un ordonnanceur de taches (IT), un générateur d'ultrasons codé (PWMG), une unité de gestion d'énergie (PMU), un amplificateur de sortie (OB) et une batterie (BAT) (Figure I.5).

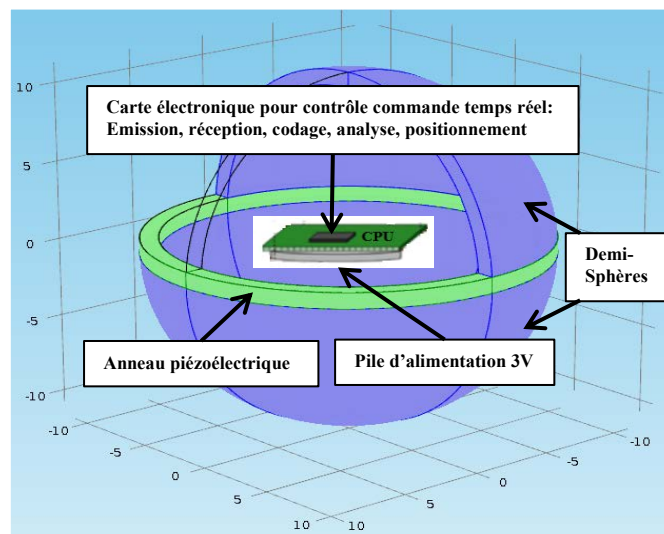


Figure I. 5 : La partie creuse de la sphère contenant l'électronique

Grace à l'oscillateur numérique on peut produire trois sources d'horloge bien séparées : une source basse fréquence (TB) à 6 kHz, son rôle est d'assurer une base de temps stable pour l'ordonnanceur de taches (IT). Une deuxième horloge de fréquence moyenne (USCLK) à 60 kHz qui correspond à la fréquence porteuse des vibrations produites par la capsule sphérique. Finalement, une troisième horloge haute fréquence (MCLK) de 16 MHz qui est capable de permet le cadencement de l'unité centrale (CPU).

L'ordonnanceur de taches envoie un signal d'interruption (INT) vers l'unité centrale à des intervalles périodiques avec une période de 1,5 s, dans ce cas-là l'unité centrale génère une trame de 4 bits (CP). Cette dernière constitue en même temps l'identifiant du dispositif et le signal d'interrogation du milieu, elle est modulée par le générateur de modulation de largeur de signaux codés sur la base de la fréquence porteuse. A titre d'exemple, la largeur d'une 0 logique est de 1 ms tandis que celle d'une 1 logique est de 2 ms et le silence qui sépare les bits d'une trame est environ 7 ms.

Ces signaux codés sont amplifiés par un circuit de sortie (OB), ensuite sont t'appliqués à l'élément piézoélectrique. L'ensemble de tous ces éléments est alimenté par une batterie (BAT) de capacité 3 V (figure I.6). Une unité de stockage et de gestion d'énergie (PMU), son rôle est d'assurer une alimentation organisée de chaque éléments de la chaine pour diminuer les consommations du dispositif afin d'augmenter la durée de vie de la batterie.

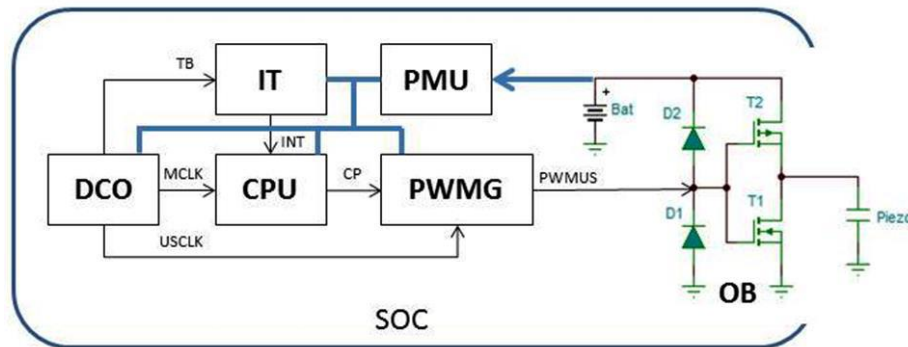


Figure I. 6 : Schéma fonctionnel du dispositif embarqué dans la capsule ultrasonore

Un des objectifs de ce travail de thèse est d'utiliser notre capteur comme un capteur autonome. Pour assurer cette autonomie nous nous intéresserons à la récupération d'énergie vibratoire par l'intermédiaire de l'anneau piézoélectrique convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique afin d'alimenter le capteur.

IV.2.1 Réseau de capteurs et signaux codés

Dans le but de tester le bon fonctionnement de carte électronique **Amina et al** [48] ont réalisé un réseau de capteurs à partir de deux capteurs émetteurs et plusieurs récepteurs (Figure I.7). Les deux émetteurs émettent deux codes, le premier un code 5 ($5 = 1\ 0\ 1\ 0$: en binaire) et le deuxième un code 7 ($7 = 1\ 1\ 1\ 0$ en binaire). L'émission des codes seront pendant des trames ayant une durée environ 15 ms, et toutes les 1.5 s il aura les répétitions des trames.

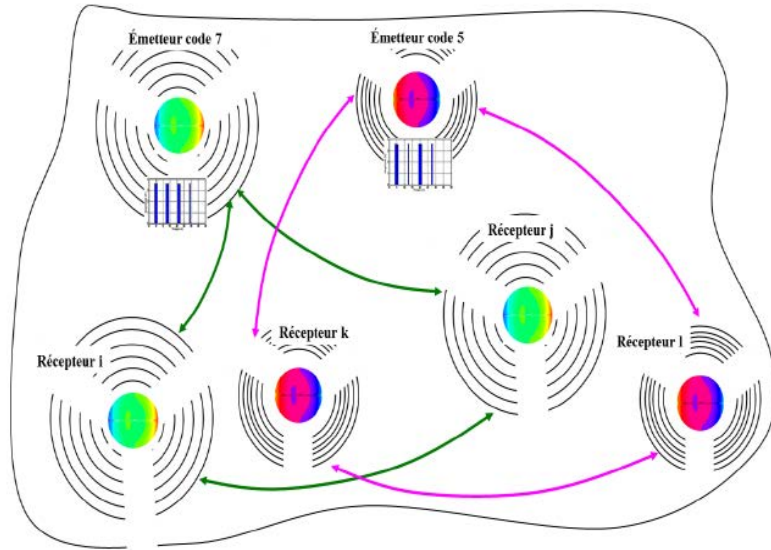


Figure I. 7 : Réseaux de capteurs identifiables par codage

Les signaux temporels reçus par les récepteurs après l'émission des deux codes sont présentés par la figure I.8, comme illustré les grands paquets correspondent à 1 dans le code binaire tandis que les petits paquets représente le 0.

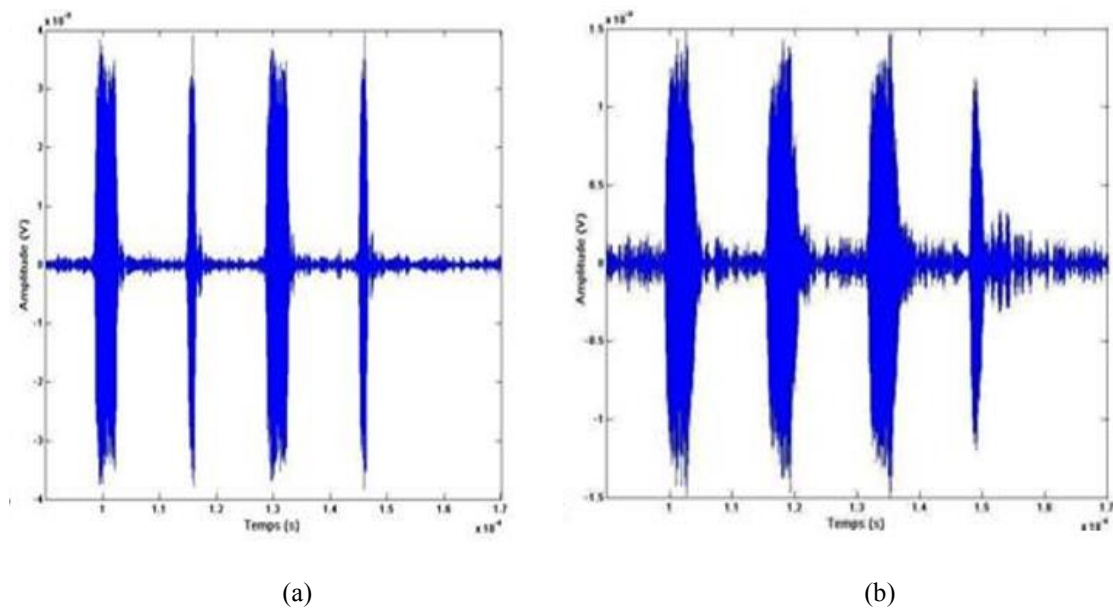


Figure I. 8 : Signaux reçus à l'émission du code 5 (a) et du code 7 (b)

IV.2.2 Consommation énergétique

Pour étudier la phase énergétique de ce capteur sphérique, nous avons procédé de mesurer les consommations électriques de la partie électronique pendant une phase active lors de l'émission d'un code quelconque. Les courants électriques consommés ainsi que les

puissances absorbées par le capteur durant une trame de transmission sont mesurés pour les deux codes émis. Les mesures ont été effectuées aux bornes d'une résistance de 10 Ohm placée en série dans la batterie, les résultats obtenus après l'émission des deux codes sont présentés par les figures I.9 et I.10.

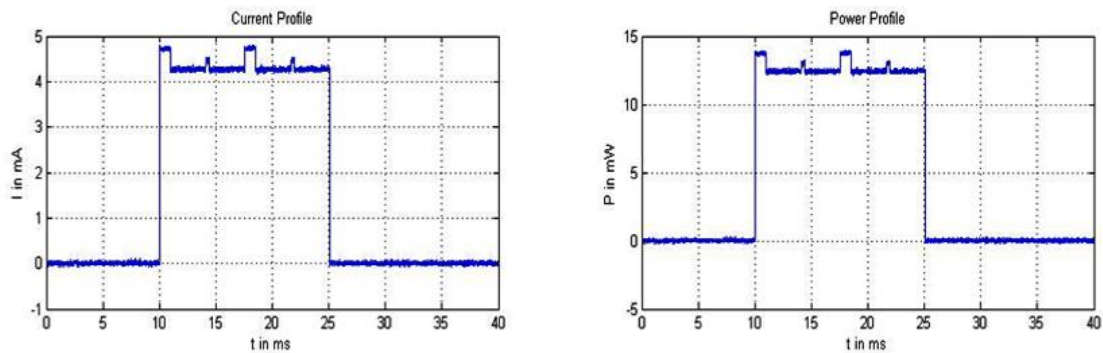


Figure I. 9 : Courant consommé et puissance absorbée pendant une trame suite à l'émission du code 5 [48]

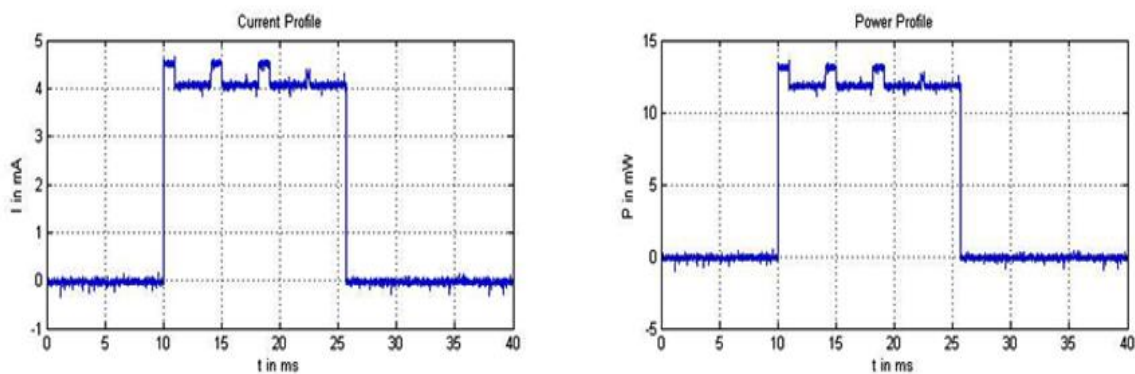


Figure I. 10 : Courant consommé et puissance absorbée pendant une trame suite à l'émission du code 7 [48]

Comme montré en dehors de la trame de bits, la consommation est négligeable parce que dans ce cas seulement l'horloge basse fréquence TB et l'ordonnanceur de tâche IT qui marche tandis que le générateur, l'unité centrale, l'amplificateur de sortie et tous les autres horloges sont à l'état d'arrêt. Par contre, durant l'émission de la trame de bits, l'ensemble de tous les éléments fonctionne et la consommation sera maximale. Les espaces entre les bits sont gérés d'une manière logicielle, ce qui impose un fonctionnement de l'unité centrale même pendant ces espaces. Une légère consommation est obtenue dans le cas où le générateur fonctionne lors de l'émission d'un 0 ou d'un 1 dans le code binaire.

Le courant consommé pendant une trame de 15 ms vaut 4,5 mA, ce courant ne dépend pas du code émis. Cette consommation se répète périodiquement toutes les $T = 1,5$ s, du coup le courant moyen consommé est déterminé par la formule suivante [48] :

$$I_{\text{moyen}} = \frac{I_{\text{Trame}} \cdot T_{\text{Trame}}}{T} = 0.045 \text{ mA}$$

Les batteries possèdent une capacité environ $C = 20$ mA.h, donc l'autonomie A du dispositif est calculé d'une façon à diviser la capacité par le courant moyen consommé et qui sera de :

$$A = \frac{C}{I_{\text{moyen}}} = 444,4 \text{ h} = 18,5 \text{ jours}$$

IV.2.3 Stabilité du capteur

Dans le but de caractériser l'interaction de ce capteur sphérique avec l'environnement, une étude de la stabilité du capteur a été effectuée en mesurant la vitesse de l'onde acoustique dans l'eau à 25 °C [48] et ceci pour plusieurs positions du capteur récepteur dans le milieu de mesure. Les mesures sont effectuées à la fois selon un déplacement circulaire avec un rayon de 40 cm et un déplacement linéaire entre 15 cm et 60 cm. La figure I.11 montre la variation de la vitesse de l'onde acoustique en fonction du temps, la stabilité de la réponse du capteur est démontrée par l'évolution de la courbe.

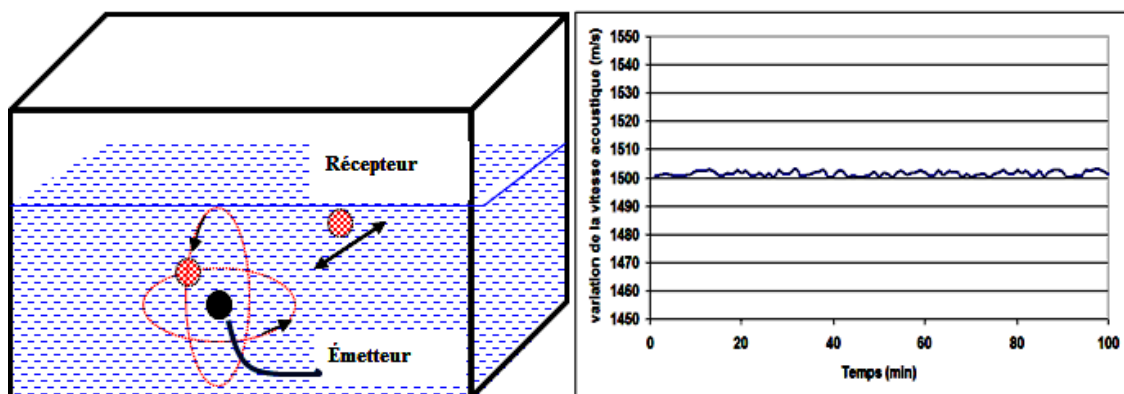


Figure I. 11 : Variation de la vitesse de l'onde acoustique en fonction du temps [48]

IV.2.4 Sensibilité du capteur

La sensibilité du capteur à la nature du milieu est encore étudiée, dans ce cas-là l'influence de la variation de la température de l'eau a été testée. Des mesures de la vitesse de propagation de l'onde à différentes températures de l'eau sont effectuées (Tableau I.3), les

résultats obtenus montrent une bonne concordance avec des valeurs issues d'une méthode standard de mesure basée sur les travaux de **Grenspar** [49].

T (°C)		20	22	24	26	28	30
Vitesse	Méthode standard	1482,66	1488,63	1494,29	1499,64	1504,68	1509,44
	Capteur sphérique	1481	1488	1495	1499	1505	1511

Tableau I. 3 : Vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'eau à différentes températures [48]

Un autre exemple, est la sensibilité du capteur à l'hétérogénéité du milieu, cette étude montre encore une bonne sensibilité des capteurs récepteurs aux variations instantanées de l'état physique des milieux. La Figure I.12 montre l'évolution de l'atténuation et du temps de vol de l'onde sous l'action d'une rupture mécanique appliquée après une durée d'environ 150 minutes du début du processus de transformation d'un milieu fragile (gel laitier). Comme cette figure le montre, nous pouvons observer que le capteur récepteur a enregistré la perturbation de l'onde, ce qui reflète que ce dernier est hautement sensible.

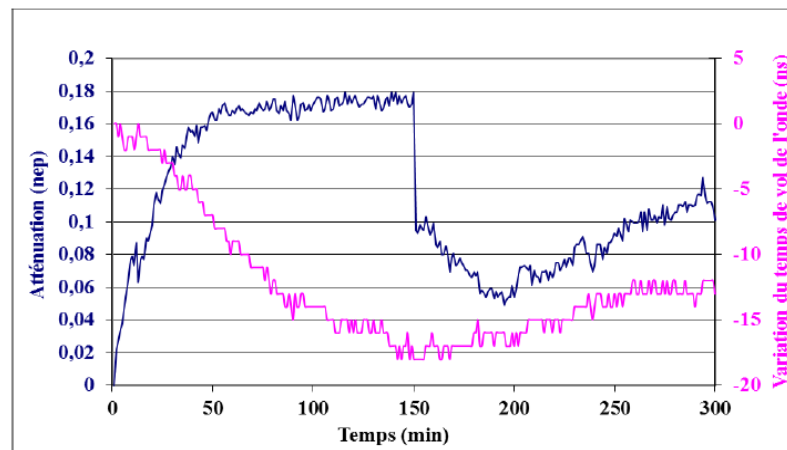


Figure I. 12 : Sensibilité des récepteurs à l'évolution des propriétés mécaniques des milieux [48]

V. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude de l'état de l'art sur la récupération d'énergie vibratoire a été abordée, ainsi que nous avons donné une brève description sur l'homogénéité et le suivi des mélanges, ensuite sur la technique ultrasonore proposée qui utilise capteur acoustique à électronique embarqué ayant une forme sphérique. Cette technique ultrasonore de basse

fréquence a montré à la fois une bonne sensibilité et stabilité en répondant aux changements d'état physique d'un milieu test.

Pour un fonctionnement optimal de cette technique, il faut assurer l'autonomie énergétique du capteur sphérique d'une part, et démontrer la faisabilité de cette technologie d'autre part. C'est pour cette raison nous proposons dans le chapitre suivant une modélisation analytique et numérique du processus de la récupération d'énergie vibratoire.

Chapitre II : Modélisation de la récupération d'énergie vibratoire à l'aide d'un capteur sphérique

I. Introduction	34
II. Comportement vibratoire d'une coquille sphérique	34
II.1 Vibrations axisymétriques	35
II.2 Vibrations non-axisymétriques	37
II.3 Approche numérique du capteur	38
II.4 Approche expérimental	40
III. Modélisation de l'anneau piézoélectrique	41
III.1 Mode longitudinal.....	41
III.1.1 Réponse analytique en tension.....	44
III.1.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration longitudinale	45
III.2 Mode radial.....	47
III.2.1 Réponse analytique en tension.....	50
III.2.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration radiale	51
III.3 Charge due au circuit d'extraction d'énergie	53
IV. Modèle analytique de la récupération d'énergie	55
IV.1 Champ de forces appliqué sur l'anneau	55
IV.2 Modèle analytique proposé	57
V. Modélisation éléments finis.....	59
VI. Conclusion.....	60

I. Introduction

Nous avons décrit dans le chapitre I la réalisation d'un capteur acoustique sphérique miniaturisé à électronique embarquée stable. L'objectif de cette partie du travail porte sur la récupération d'énergie vibratoire par conversion électromécanique afin d'assurer l'alimentation de notre capteur sphérique et le rendre autonome. Les systèmes de type piézoélectrique pour la récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes ont été largement étudiés, et ils font le but de nombreuses réalisations microscopiques et macroscopiques.

Afin d'évaluer la faisabilité de la technique de récupération d'énergie vibratoire, il a été nécessaire de développer un modèle représentant la chaîne complète de conversion électromécanique. Le modèle doit prendre en compte trois étapes : les vibrations mécaniques ambiantes, la conversion piézoélectrique et le transfert de la puissance vers une charge ce qui correspond à la partie électrique.

Ce chapitre est divisé en trois parties : en premier temps, nous présenterons un bref rappel sur le comportement vibratoire d'une coquille sphérique et déterminerons ces fréquences de résonance analytiquement et par éléments finis. Dans la deuxième partie, nous développerons un modèle analytique pour la récupération d'énergie prend en compte deux modes vibratoires de l'anneau piézoélectrique inséré à la jonction des deux demi-sphères : mode longitudinal et mode radial. Ce modèle analytique permet de calculer la réponse totale en tension. Finalement, la troisième partie servant à la validation du modèle analytique avec un modèle éléments finis bâti avec le logiciel Comsol Multiphysics.

II. Comportement vibratoire d'une coquille sphérique

La solution linéaire pour un mouvement axisymétrique d'une coquille sphérique se divise en deux ensembles de modes. Le premier ensemble, les modes de membrane, sont essentiellement les modes d'extension. Le deuxième ensemble, les modes composites, ne sont ni purement d'extension ni purement de contraction.

Lamb [50] puis **Baker** [51] ont montré que les modes axisymétriques vibratoires d'une coquille sphérique sont exprimés en fonction du polynôme de Legendre d'indice « n » et d'ordre deux. Pour chaque valeur de $n \geq 2$, il existe deux fréquences de vibrations qui

montrent la présence de deux modes de vibrations, nommés branche supérieure et branche inférieure. Pour les valeurs élevées de « n », la branche inférieure se converge vers une valeur asymptotique, ce qui est interprétable physiquement car la différence entre les fréquences naturelles deviennent très petites. De plus, pour $n = 0$ il existe une seule solution réelle qui représente le mode respiratoire ou encore le mode fondamental.

Dans le même but, **Kalnins** [52] a testé les modes de vibrations d'une sphère complète en introduisant les effets de flexion. Il a obtenu deux familles de fréquences bien séparées nommées par branche de flexion et branche de membrane. Pour différencier ces deux ensembles de modes, il a comparé pour chaque mode les énergies de déformation de flexion et d'extension (les modes de flexion ayant des énergies de flexion hautes tandis que les modes de basses énergies sont les modes de membrane). Il a démontré dans ses travaux, que sa branche supérieure est la même que celle de **Baker** mais qu'il y a une différence par rapport à la branche inférieure. Ces résultats sont en accord avec les résultats des travaux de **Duffey et al.** [53] [54] déterminés par éléments finis, et qui confirment l'existence des deux branches fréquentielles.

Par ailleurs **Wilkinson** [55] a abordé les modes vibratoires d'une coquille sphérique complète, il a utilisé un modèle tenant compte des effets de cisaillement et de l'inertie de rotation. Il a signalé l'existence d'une troisième branche à des fréquences plus élevées, ce qui est interprété par l'inclusion de déformations de cisaillement.

II.1 Vibrations axisymétriques

Les vibrations axisymétriques sont par définition les vibrations où les déplacements correspondant ne dépendent que de la coordonnée radiale r [56]. Donc, dans une coquille sphérique complète, les modes axisymétriques sont indépendants de l'angle périphérique θ [57] (Figure II.1).

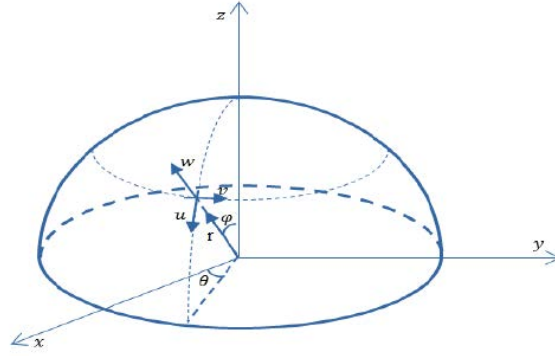


Figure II. 1 : Coordonnées du système sphérique

Dans les cas où les cisaillements et les torsions sont négligés, les vibrations axisymétriques d'une coquille sphérique complète ont les fréquences adimensionnelles λ_n [57] donnée par l'équation suivante:

$$\lambda_0 = \sqrt{2(1 + \nu)} \quad \text{II.1}$$

$$2\lambda_n^2 = 1 + 3\nu - \alpha^2(1 - \nu) + n(n+1)(1 + \nu\alpha^2) + \alpha^2 n^2(n+1)^2 \pm [9 + 6\nu + \nu^2 + 2\alpha^2(3 + \nu)(1 - \nu) + 2n(n+1)(2\nu^2 + 3\nu - 1) + n^2(n+1)^2 + 2\alpha^2 n(n+1)(5\nu^2 + 2\nu - 11) + 2\alpha^2 n^2(n+1)^2(9 + 4\nu) - 2\alpha^2 n^3(n+1)^3 - 2\alpha^4 n(n+1)\nu(1 - \nu) + \alpha^4 n^2(n+1)^2(\nu^2 + 2\nu - 2) + 2\nu\alpha^4 n^3(n+1)^3 + \alpha^4 n^4(n+1)^4]^{1/2} \quad \text{II.2}$$

Avec ν le coefficient de poisson, $\alpha^2 = \frac{h^2}{12a^2}$, où a est le rayon moyen de la sphère, h représente l'épaisseur de la coque et n le numéro de mode de vibration de la sphère.

Dans l'équation (II.2), nous remarquons l'existence de deux branches pour l'expression de λ_n^2 , soient $(\lambda_n^m)^2$ pour le signe positif (branche supérieure) et $(\lambda_n^c)^2$ pour le signe négatif (branche inférieure). Lorsque $n = 0$, le mode de vibration est un mouvement radial à symétrie centrale c.à.d. le mode de respiration radiale. Pour chaque valeur de $n \geq 1$, il existe deux modes de vibration qui correspondent aux fréquences naturelles λ_n^m et λ_n^c , respectivement. **McIvor** et **Sonstegard** [58] ont constaté que les modes de membrane sont des modes associés à λ_n^m , tandis que les modes associés à λ_n^c , sont des modes de transformation de modes de membrane à des modes de flexion lorsque n augmente. Par conséquent, les modes associées aux fréquences λ_n^m et λ_n^c sont classés comme des modes de membrane et modes composites respectivement.

La relation entre la fréquence naturelle f et la fréquence adimensionnelle λ est donnée par:

$$f = \frac{\lambda}{2\pi a} \left[\frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad \text{II.3}$$

E représente le module d'Young, ρ la densité volumique, ν le coefficient de poisson et a le rayon moyen de la sphère.

La fréquence naturelle du mode de respiration radial est:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a} \left[\frac{2E}{\rho(1-\nu)} \right]^{1/2} \quad \text{II.4}$$

Et la fréquence naturelle du nième mode de vibration est:

$$f_n = \frac{\lambda_n}{2\pi a} \left[\frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad \text{II.5}$$

II.2 Vibrations non-axisymétriques

Dans une coquille sphérique complète, les modes non-axisymétriques sont les vibrations dont les déplacements dépendent à la fois des coordonnées circonférentielles θ et radiale r [56]. **Silbiger** [59] a étudié les modes non-axisymétriques de coquilles sphériques et a proposé que les modes non-axisymétriques sont dégénérées, c.à.d. leurs fréquences sont identiques aux fréquences correspondantes des modes axisymétriques. Il a démontré analytiquement que les fonctions propres correspondant aux modes non-axisymétriques d'une coquille sphérique sont dégénérées par les modes axisymétriques. Il a attribué cette dégénérescence à la symétrie sphérique de la coquille.

En fait, pour tout entier $n > 1$, il existe un mode axisymétrique indépendant et $2n$ modes non axisymétriques indépendants, donnés par $m = 0$ et $m = 1, 2 \dots n$, respectivement, correspondant aux nombres d'ondes m le long de l'équateur circonférentiel. Plus précisément, $2n + 1$ modes linéairement indépendants peuvent être construits à partir du nième mode axisymétrique dans chaque branche. Tous les autres modes de vibration, qui ont la même fréquence du nième mode axisymétrique, sont des combinaisons linéaires de ces $2n + 1$ modes indépendants [60].

Shah et al. [61] et **Niordson** [62] ont également proposé que les modes non axisymétriques de degré n donnée peuvent être obtenus par superposition d'un certain nombre de modes axisymétriques de degré n autour des différents axes.

Duffey et al. [53] [54] ont effectué des calculs par éléments finis pour examiner les vibrations non axisymétriques de coquilles sphériques, y compris l'effet de flexion et de cisaillement. Ils ont observé que, pour chaque valeur de n dans chaque branche, il existe $2n + 1$ modes dans la vibration non axisymétriques, ce qui est précisément le nombre prédit par

Silbiger [63]. En plus, les mêmes auteurs ont montré que parmi les $2n + 1$ modes pour chaque n dans chaque branche, un représente le mode axisymétrique correspondant, et les autres $2n$ modes sont des modes non axisymétriques dégénérés (Figure II.2).

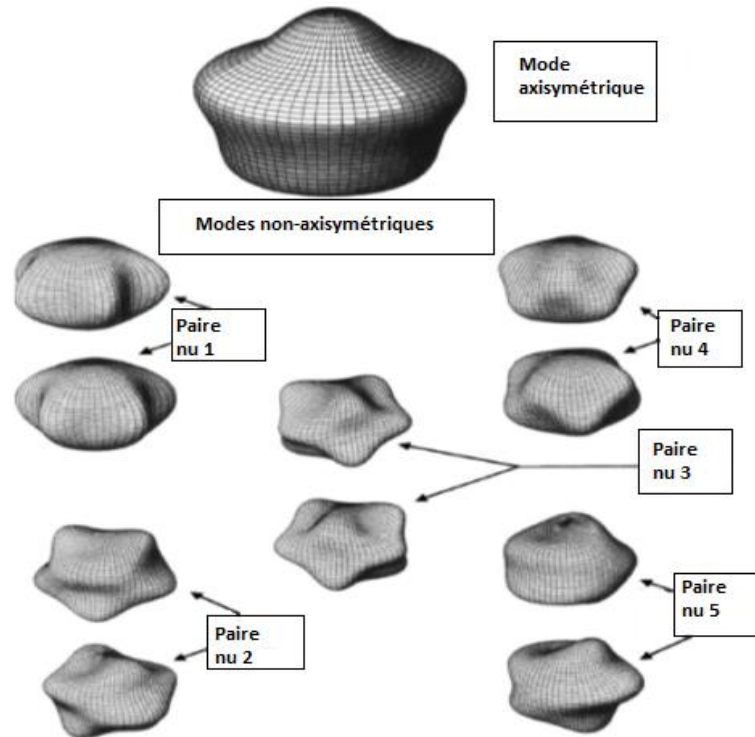


Figure II. 2 : Formes de modes axisymétriques et non axisymétriques pour $n=5$, $m=0$ (mode axisymétrique) et $m=1, 2, 3, 4, 5$ (modes non axisymétriques) dans la branche inférieure [60]

II.3 Approche numérique du capteur

Donc afin de déterminer les valeurs propres des fréquences de résonance de notre capteur sphérique, un calcul numérique a été effectué sous MATLAB à partir de l'équation 2 appliquée à notre capteur ayant les dimensions suivantes : rayon moyen (10.5 mm), épaisseur (1 mm), coefficient de poisson (0.39), module d'Young (3300 MPa) et la densité volumique (1190 Kg/m^3).

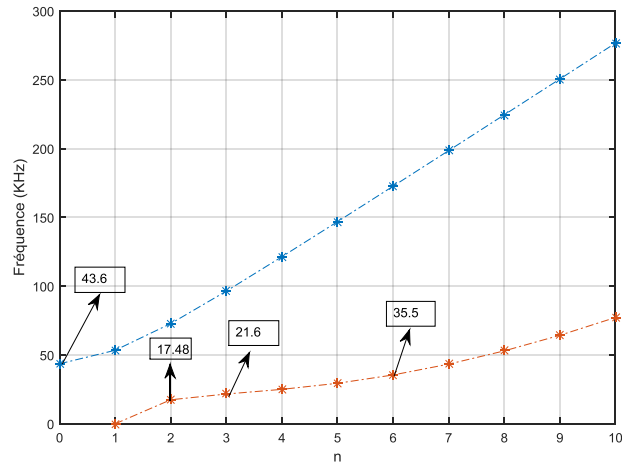
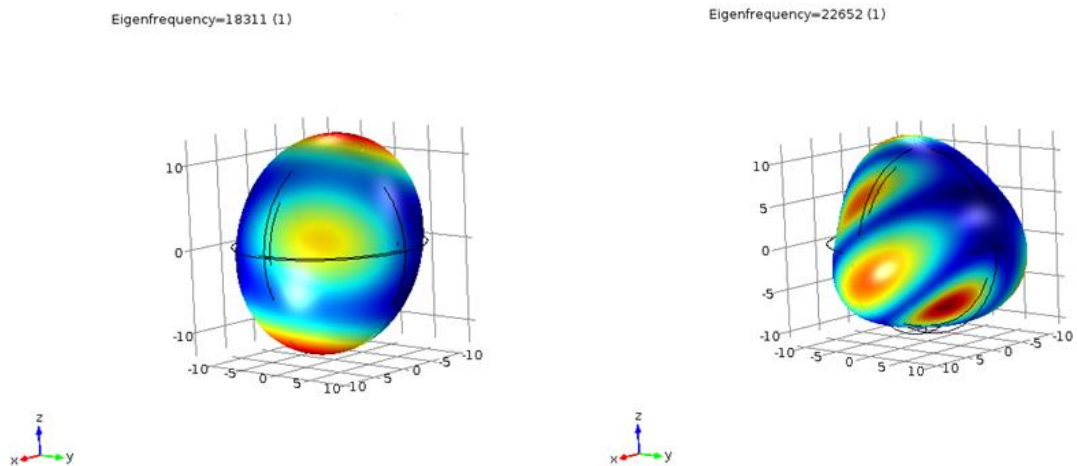


Figure II. 3 : Fréquences de résonance de notre coquille sphérique

La figure II. 3 montre les deux branches fréquentielles λ_n^m et λ_n^c pour les dix premiers modes de vibration. Comme le montre cette figure, la fréquence nulle associée à la branche inférieure est le mode de corps rigide, tandis que la première fréquence sur la branche supérieure ($n = 0$) correspond au mode fondamental (43.6 kHz).

Nous avons modélisé notre capteur sphérique par éléments finis, sous COMSOL Multiphysics. La figure II.4 présente quelques formes modales avec les fréquences associées obtenues numériquement par éléments finis.



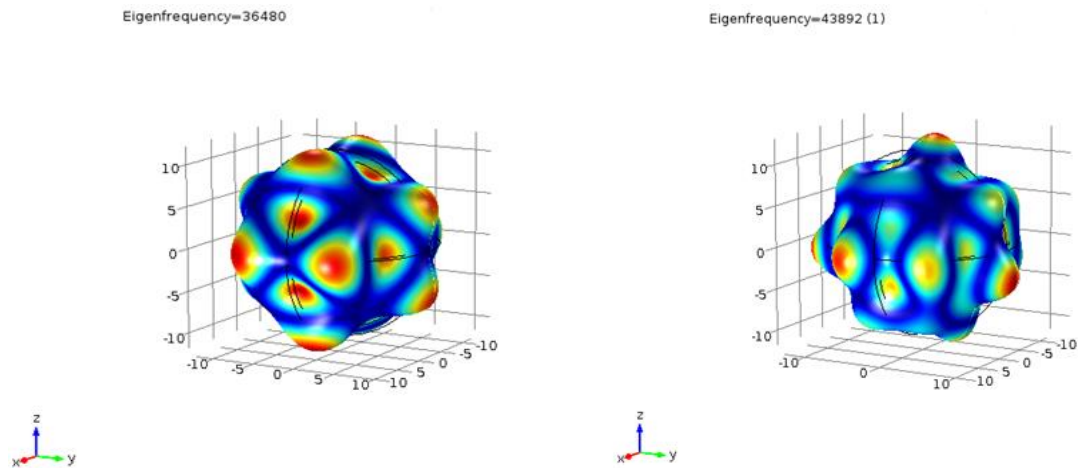


Figure II. 4 : Quelques formes modales du résonateur sphérique

On remarque que les fréquences de résonances obtenues par modélisation éléments finis sont très proches des fréquences obtenues analytiquement (figure II.3).

II.4 Approche expérimental

Les études analytique et par éléments finis ont été effectuées sur une coquille sphérique complète sans la présence de l'anneau piézoélectrique. Donc l'objectif de l'étude expérimentale est de valider l'approche numérique et de déterminer les fréquences de résonance de notre capteur, et de démontrer que l'introduction de l'anneau dans le capteur n'agit pas de manière significative sur les fréquences de résonance. Dans ce cadre, la résonance du capteur a été étudiée en observant la variation de la partie réelle de l'impédance électrique en fonction de la fréquence en utilisant un analyseur d'impédance (Wayne Kerr 6520).

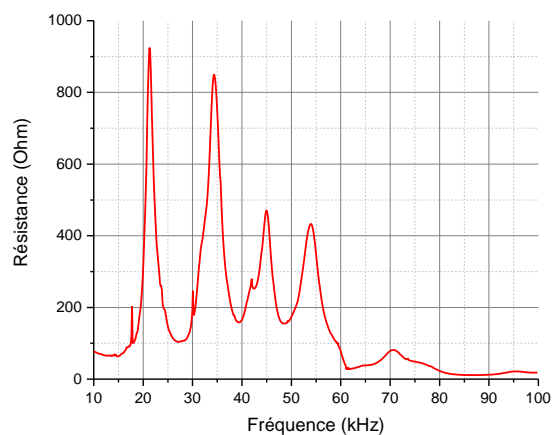


Figure II. 5 : Représentation fréquentielle de la résistance électrique du capteur

La figure II.5 nous montre la variation de la résistance dans la bande fréquentielle choisie (10 kHz - 100 kHz), l'allure de la courbe montre les modes de résonance bien séparés et qui sont en bonne concordance avec les résultats numériques issus de l'étude analytique et par éléments finis (21 kHz, 33 kHz, 44 kHz et 55 kHz).

III. Modélisation de l'anneau piézoélectrique

La récupération d'énergie vibratoire par transduction piézoélectrique présente un grand intérêt. Récemment, beaucoup de chercheurs [64, 65] ont travaillé sur le développement des systèmes basés sur différents techniques de conversion. Dans notre cas, la conversion d'énergie vibratoire en énergie électrique sera réalisée par l'intermédiaire d'un anneau piézoélectrique subissant des contraintes et des déformations exercées par la coquille sphérique excité par des vibrations extérieures. L'objectif de cette partie est de modéliser l'anneau piézoélectrique selon ses deux principaux modes de vibration imposés : longitudinal et radial.

III.1 Mode longitudinal

Considérons une tranche élémentaire de l'anneau d'épaisseur dz et de section A . Les déplacements u et les forces F sont dans l'axe longitudinal (axe z) comme indiqué sur la figure suivante [66] :

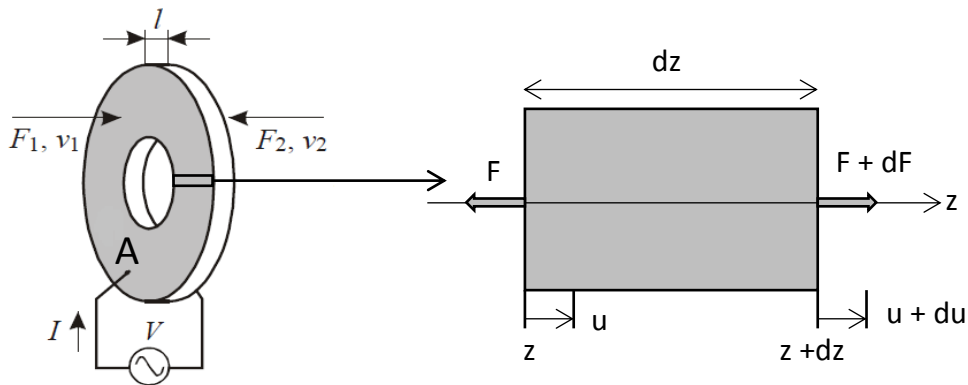


Figure II. 6 : Tranche élémentaire de l'anneau en oscillation longitudinale

Le principe fondamental de la dynamique (PFD) appliqué à ce volume élémentaire nous donne:

$$\rho \cdot A \cdot dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial z} dz \tag{II.6}$$

Les équations de la mécanique du solide d'un matériau passif sont:

$$T = c_{33} \cdot S \quad T = \frac{F}{A} \quad S = \partial u / \partial z \quad \text{II.7}$$

La combinaison de ces équations donne:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_{33} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{II.8}$$

Avec ρ la masse volumique du PZ26 non passif et c_{33} le module de Young.

En utilisant la notation complexe de façon à séparer les variables $u(z, t) = U(z)e^{j\omega t}$, l'équation II.8 en mode harmonique devient:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \omega^2 \cdot \frac{\rho}{c_{33}} \cdot U = 0 \quad \text{II.9}$$

Les solutions de cette équation sont données par:

$$U(z) = \alpha \cdot e^{-jkz} + \beta \cdot e^{jkz} \quad \text{II.10}$$

Avec $k = \omega \cdot \sqrt{\frac{\rho}{c_{33}}}$ le vecteur d'onde en m^{-1} , α et β sont deux constantes à déterminer en appliquant les conditions aux limites.

L'anneau est d'épaisseur L , les valeurs des coefficients α et β dépendent des conditions aux limites sur les faces de l'anneau et supposant que $t = 0$:

$$\dot{u}(0, 0) = v_1 = j\omega (\alpha + \beta) \quad \text{II.11}$$

$$\dot{u}(L, 0) = v_2 = j\omega (\alpha \cdot e^{-jkL} + \beta \cdot e^{jkL}) \quad \text{II.12}$$

Ce qui donne:

$$\alpha = \frac{v_2 - v_1 e^{jkL}}{2\omega \sin(kL)} \text{ et } \beta = \frac{v_2 + v_1 e^{-jkL}}{2\omega \sin(kL)}$$

Les forces aux extrémités de l'anneau sont calculées par:

$$F(0) = F_1 = Z \left[\frac{(v_1 + v_2)}{j \sin(kL)} + j \tan\left(\frac{kL}{2}\right) v_1 \right] \quad \text{II.13}$$

$$F(L) = F_2 = Z \left[\frac{(v_1 + v_2)}{j \sin(kL)} + j \tan\left(\frac{kL}{2}\right) v_2 \right] \quad \text{II.14}$$

Où Z est l'impédance acoustique de l'anneau, elle est exprimée en fonction de c_{33} et la densité ρ comme suit :

$$Z = F/\dot{u} = A \cdot \sqrt{c_{33} \cdot \rho} \quad \text{II.15}$$

De la même manière, si on prend en compte la piézoélectricité de l'anneau et en utilisant l'expression de la contrainte en tenant compte des équations constitutives du matériau piézoélectrique :

$$T = C^D \cdot S - h_{33} \cdot D \quad \text{II.16}$$

Avec $C^D = c_{33} + \frac{e^2}{\epsilon^s}$ et $h_{33} = \frac{e}{\epsilon^s}$.

Alors les deux forces se calculent en remplaçant T par T + h. D, ce qui donne le système suivant :

$$F_1 - h_{33}DA = Z \left[\frac{(v_1 + v_2)}{j \sin(kL)} + j \tan\left(\frac{kL}{2}\right) v_1 \right] \quad \text{II.17}$$

$$F_2 - h_{33}DA = Z \left[\frac{(v_1 + v_2)}{j \sin(kL)} + j \tan\left(\frac{kL}{2}\right) v_2 \right] \quad \text{II.18}$$

Notons que le terme supplémentaire $h_{33}DA$ représente une force notée F dû à la contribution piézoélectrique. Nous pouvons alors transposer ce système d'équation selon un modèle électromécanique qui se traduit par un schéma électromécanique donnée par la figure suivante :

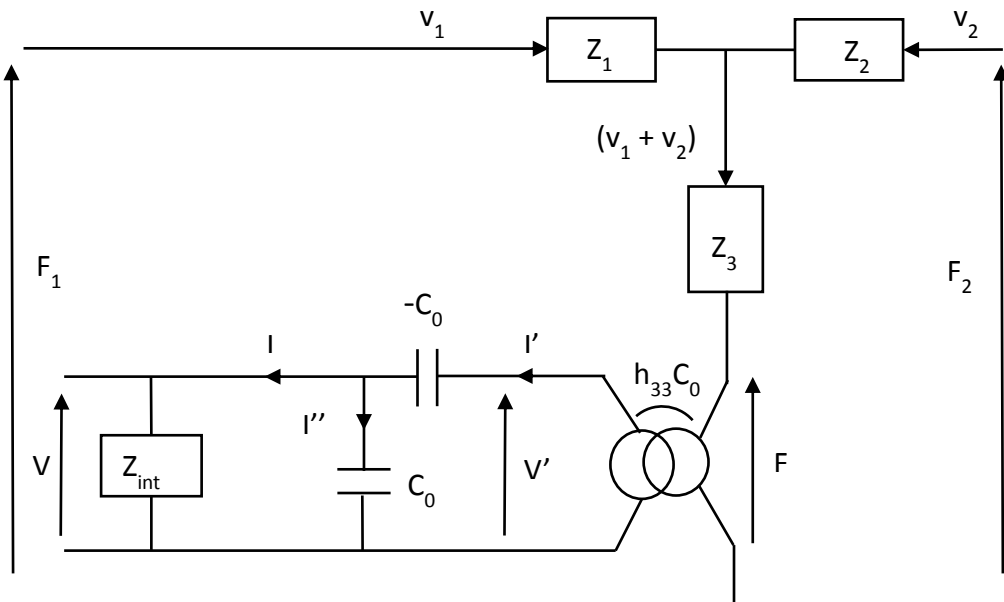


Figure II. 7 : Schéma électromécanique de l'anneau piézoélectrique en mode longitudinal

Avec $Z_1 = Z_2 = jZ \cdot \tan\left(\frac{kL}{2}\right)$, $Z_3 = -j \frac{Z}{\sin(kL)}$ et $C_0 = \frac{\epsilon^s A}{L}$ la capacité bloquée de l'anneau.

La capacité C_0 traduit la nature diélectrique de la structure. La capacité négative $-C_0$ retranscrit, quant à elle, le champ de dépolérisation dû aux déformations apparaissant suivant l'axe de polarisation.

III.1.1 Réponse analytique en tension

Le schéma électromécanique équivalent est formé de deux parties reliées par un transformateur de rapport $h_{33}C_0$, une partie mécanique pure désignée par les forces mécaniques F_1 et F_2 et les vitesses de déplacement v_1 et v_2 , une partie électrique à la sortie du transformateur désignée par les tensions et les courants électriques générés V et I .

Ce schéma nous permet d'écrire :

$$\bar{F} + Z_3 (v_1 + v_2) = \bar{F}_1 - Z_1 v_1 = \bar{F}_2 - Z_2 v_2 \quad \text{II.19}$$

Pour un champ de force symétrique par rapport au plan de l'anneau piézoélectrique, on peut supposer que $F_1 = F_2$ c.à.d. $v_1 = v_2$

Ce qui donne :

$$\bar{F}_1 = \bar{F} + (2Z_3 + Z_1) v_1 \quad \text{II.20}$$

La tension et l'intensité à la sortie du transformateur seront données par :

$$\bar{V}' = \bar{F}/h_{33} \cdot C_0 \text{ et } I' = h_{33} \cdot C_0 (v_1 + v_2) = 2h_{33} C_0 v_1 \quad \text{II.21}$$

$$I'' = I' - I = jC_0 \omega \bar{V} \text{ et } I = \bar{V}/Z_{int} \quad \text{II.22}$$

D'où :

$$\bar{V} \left(1 + \frac{1}{jC_0 \omega \cdot Z_{int}}\right) = \frac{I'}{jC_0 \omega} = \frac{2h_{33}}{j\omega} v_1 \quad \text{II.23}$$

L'impédance équivalente de la partie électrique est donné par :

$$Z_{elec} = \frac{-1}{jC_0 \omega} + \frac{Z_{int}}{1 + jC_0 \omega \cdot Z_{int}} \quad \text{II.24}$$

On a $\bar{V}' = Z_{elec} \cdot I'$ ce qui donne la relation entre la force F et la vitesse v_1 qui est de la forme suivante :

$$\bar{F} = 2h_{33}^2 C_0^2 Z_{elec} \cdot v_1 \quad \text{II.25}$$

L'équation II.20 donne :

$$\bar{F}_1 = (2h_{33}^2 C_0^2 \cdot Z_{\text{elec}} + 2Z_3 + Z_1) v_1 \quad \text{II.26}$$

Donc l'équation (II.23) devient de la forme :

$$\bar{V} \left(1 + \frac{1}{jC_0 \omega \cdot Z_{\text{int}}}\right) = \frac{2h_{33}}{j\omega} \frac{1}{(2h_{33}^2 C_0^2 \cdot Z_{\text{elec}} + 2Z_3 + Z_1)} \bar{F}_1 \quad \text{II.27}$$

D'où la tension générée \bar{V} en fonction de la force \bar{F}_1 .

$$\bar{V} = \frac{2h_{33} C_0 \cdot Z_{\text{int}}}{(1 + jC_0 \omega \cdot Z_{\text{int}})(2h_{33}^2 C_0^2 \cdot Z_{\text{elec}} + 2Z_3 + Z_1)} \bar{F}_1 \quad \text{II.28}$$

III.1.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration longitudinale

Pour déterminer la fréquence de résonance du mode longitudinal, il faut mettre en court-circuit les extrémités du modèle présenté par le schéma électromécanique. Donc ce qui revient à annuler les charges mécaniques appliquées sur les deux faces de l'anneau piézoélectrique, donc $F_1 = F_2 = 0$. Dans ce cas-là l'impédance électrique de l'anneau est donnée par [67] :

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - (K_t)^2 \cdot \frac{\tan\left(\frac{kL}{2}\right)}{\left(\frac{kL}{2}\right)}\right] \quad \text{II.29}$$

Avec $K_t = h_{33} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon^S}{c_{33}}}$ le facteur de couplage pour les vibrations en épaisseur.

L'équation de la fréquence de la résonance longitudinale pour l'anneau est obtenu lorsque $Z = 0$, ce qui donne :

$$1 - (K_t)^2 \cdot \frac{\tan\left(\frac{kL}{2}\right)}{\left(\frac{kL}{2}\right)} = 0 \quad \text{II.30}$$

L'équation de la fréquence d'antirésonance est déterminée dans le cas où $Z = \infty$, donc l'équation sera :

$$\tan\left(\frac{kL}{2}\right) = \infty \quad \text{II.31}$$

Murimi Evan et **Kihui John** [68] ont développé des formules analytiques afin de déterminer les fréquences de résonance d'un anneau pour plusieurs modes de vibration. Pour le mode longitudinal la fréquence de résonance est donnée par la formule suivante :

$$f_{\text{longitudinal}} = \frac{1}{2L\sqrt{\rho \cdot s_{33}}}$$

II.32

Pour valider le modèle théorique en équivalent électromécanique, nous avons mesuré expérimentalement l'impédance électrique de l'anneau piézoélectrique par un analyseur d'impédance électrique. Cet anneau ayant un rayon intérieur de 10 mm et son rayon extérieur est de 11 mm avec une épaisseur de 1 mm. La figure II.8 montre les résultats obtenus théoriquement et expérimentalement suivant la bande fréquentielle allant de 1 MHz jusqu'à 2 MHz, les deux allures montrent une bonne concordance entre les deux cas étudiés.

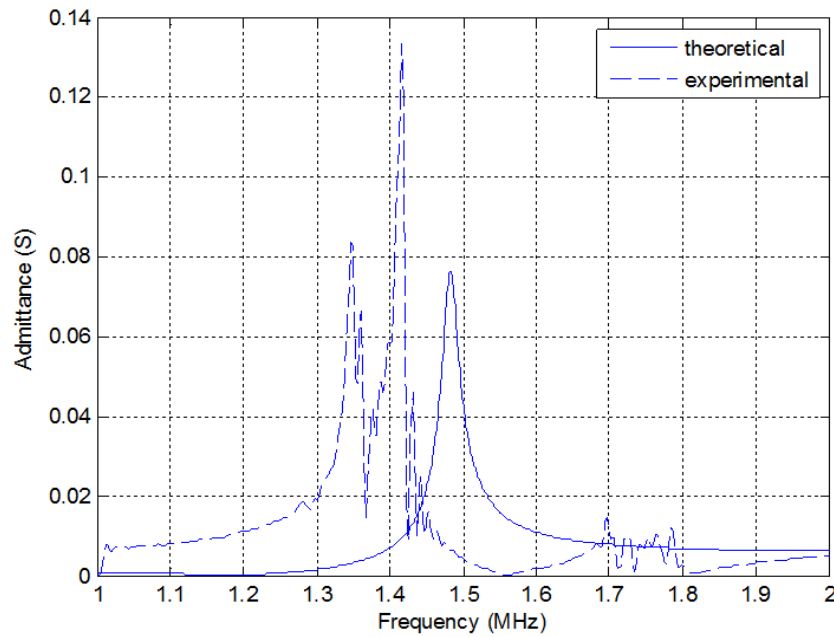


Figure II. 8 : Admittance de l'anneau piézoélectrique en mode d'épaisseur

Le tableau II.1 montre trois valeurs calculées par trois méthodes différentes : valeur théorique à partir de notre circuit électromécanique équivalent et une valeur expérimentale, comparées avec la fréquence obtenue par le travail de **Murimi** et **Kihiu**. Nous pouvons remarquer une bonne concordance entre les trois méthodes utilisées.

	[68]	Théorique	Expérimental
Fréquence (MHz)	1,7	1,48	1,42
$\Delta(\%)$	19,7	4,2	

Tableau II. 1 : Fréquences théorique et expérimental de résonance de l'anneau en épaisseur

Où $\Delta = |f_t - f_e|/f_e$ avec f_t et f_e sont respectivement les fréquences théorique et expérimental de résonances de l'anneau en mode longitudinal.

III.2 Mode radial

Afin d'obtenir les équations de mouvement, les équations constitutives de la piézoélectricité sont écrites en coordonnées cylindriques [69]. Dans ce cas les variables sont le rayon r , l'angle θ et la dimension axiale notée z (Figure II.9).

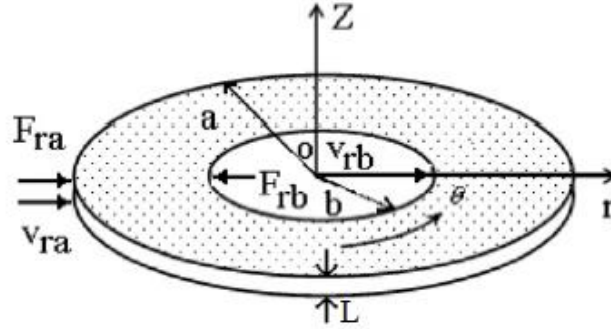


Figure II. 9 : L'anneau piézoélectrique en mode radial

En considérant un mouvement radial pur sans cisaillement, nous avons : $u_\theta = 0$

Les composantes du tenseur de déformation sont données par :

$$S_{rr} = S_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad \text{II.33}$$

$$S_{\theta\theta} = S_\theta = \frac{u_r}{r} \quad \text{II.34}$$

$$S_{zz} = S_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad \text{II.35}$$

Avec $S_{\alpha\beta} = 0$ si $\alpha \neq \beta$

Les contraintes et le champ électrique en coordonnées cylindriques s'écrivent :

$$T_r = c_{11}^E \frac{\partial u_r}{\partial r} + c_{12}^E \frac{u_r}{r} + c_{13}^E \frac{\partial u_z}{\partial z} - d_{31} E_z \quad \text{II.36}$$

$$T_\theta = c_{12}^E \frac{\partial u_r}{\partial r} + c_{11}^E \frac{u_r}{r} + c_{13}^E \frac{\partial u_z}{\partial z} - d_{31} E_z \quad \text{II.37}$$

$$T_z = c_{13}^E \frac{\partial u_r}{\partial r} + c_{13}^E \frac{u_r}{r} + c_{33}^E \frac{\partial u_z}{\partial z} - d_{33} E_z \quad \text{II.38}$$

$$D_z = -d_{31} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) - d_{33} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \epsilon_{33}^T E_z \quad \text{II.39}$$

En régime harmoniques, les deux déplacements s'écrivent :

$$u_r = U_r(r) e^{j\omega t} \quad \text{II.40}$$

$$u_z = U_z(z)e^{j\omega t} \quad \text{II.41}$$

Et la loi de Newton conduit à l'équation du mouvement :

$$-\rho\omega^2 u_r = c_{11}^E \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) \quad \text{II.42}$$

Dans cette équation on a :

$$c_{11}^E = \frac{S_{11}^E}{S_{11}^{E^2} - S_{11}^{E^2}} = \frac{1}{S_{11}^E(1 - \nu_{12}^2)}, \text{ avec } \nu_{12} = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$$

La solution générale est de la forme :

$$u_r = \left[A J_1\left(\frac{\omega r}{V_r}\right) + B Y_1\left(\frac{\omega r}{V_r}\right) \right] e^{j\omega t} \quad \text{II.43}$$

Avec J_1 et Y_1 sont les fonctions de Bessel d'ordre un du premier et deuxième type respectivement.

L'anneau piézoélectrique d'épaisseur L , ayant respectivement a et b comme rayons extérieur et intérieur, les conditions aux limites sont appliquées à l'anneau en $r = a$ et $r = b$, alors que le déplacement u_r est donné par :

$$u_r = [A J_1(\alpha r) + B Y_1(\alpha r)] e^{j\omega t} \quad \text{II.44}$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{\omega}{V_r}, V_r = \sqrt{\frac{c_{11}^E}{\rho}}$$

$$A = \frac{1}{j\omega} \frac{J_1(\alpha b) \nu_{ra} + J_1(\alpha a) \nu_{rb}}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} \text{ et } B = -\frac{1}{j\omega} \frac{Y_1(\alpha b) \nu_{ra} + Y_1(\alpha a) \nu_{rb}}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)}$$

La contrainte radiale peut être obtenue par :

$$\begin{aligned} T_r(r) = & \\ & \nu_{ra} \frac{J_1(\alpha b) \left[\alpha Y_0(\alpha r) - \frac{Y_1(\alpha r)(1 - \nu_{12})}{r} \right] - Y_1(\alpha b) \left[\alpha J_0(\alpha r) - \frac{J_1(\alpha r)(1 - \nu_{12})}{r} \right]}{j\omega [J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)] S_{11}^E (1 - \nu_{12}^2)} + \\ & \nu_{rb} \frac{J_1(\alpha a) \left[\alpha Y_0(\alpha r) - \frac{Y_1(\alpha r)(1 - \nu_{12})}{r} \right] - Y_1(\alpha a) \left[\alpha J_0(\alpha r) - \frac{J_1(\alpha r)(1 - \nu_{12})}{r} \right]}{j\omega [J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)] S_{11}^E (1 - \nu_{12}^2)} - \frac{d_{31} E_z}{S_{11}^E + S_{12}^E} \end{aligned} \quad \text{II.45}$$

D'après la figure II.9 on a, $F_{ra} = -T_r(a)S_a$ et $F_{rb} = -T_r(b)S_b$

Avec $S_a = 2\pi aL$ et $S_b = 2\pi bL$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}
-F_{ra} = & \\
& \frac{\rho v_r S_a}{j} \frac{J_1(\alpha b) Y_0(\alpha a) - Y_1(\alpha b) J_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v_{ra} + \frac{\rho v_r S_a (1 - \nu_{12})}{j \alpha a} v_{ra} + \\
& \frac{\rho v_r S_a}{j} \frac{J_1(\alpha a) Y_0(\alpha a) - Y_1(\alpha a) J_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v_{rb} - \frac{2\pi a d_{31} E_z L}{S_{11}^E + S_{12}^E}
\end{aligned} \tag{II.46}$$

$$\begin{aligned}
-F_{rb} = & \\
& \frac{\rho v_r S_b}{j} \frac{J_1(\alpha a) Y_0(\alpha b) + Y_1(\alpha a) J_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v_{rb} - \frac{\rho v_r S_b (1 - \nu_{12})}{j \alpha b} v_{rb} + \\
& \frac{\rho v_r S_b}{j} \frac{J_1(\alpha b) Y_0(\alpha b) + Y_1(\alpha b) J_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v_{ra} - \frac{2\pi b d_{31} E_z L}{S_{11}^E + S_{12}^E}
\end{aligned} \tag{II.47}$$

Posant, $V = E_z L$, $Z_{ra} = \rho v_r S_a$, $Z_{rb} = \rho v_r S_b$, $F'_{ra} = F_{ra}/2\pi a$ et $F'_{rb} = F_{rb}/2\pi b$

Donc

$$\begin{aligned}
F'_{ra} = & \frac{Z_{ra}}{j} \frac{v_{ra}}{2\pi a} \left[\frac{Y_1(\alpha b) J_0(\alpha a) - J_1(\alpha b) Y_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} - \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha a} \right] + \frac{Z_{ra}}{j} \frac{v_{rb}}{2\pi a} \frac{Y_1(\alpha a) J_0(\alpha a) - J_1(\alpha a) Y_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} + \\
& \frac{d_{31}}{S_{11}^E + S_{12}^E} V
\end{aligned} \tag{II.48}$$

$$\begin{aligned}
F'_{rb} = & \frac{Z_{rb}}{j} \frac{v_{rb}}{2\pi b} \left[\frac{Y_1(\alpha a) J_0(\alpha b) - J_1(\alpha a) Y_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} + \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha b} \right] + \frac{Z_{rb}}{j} \frac{v_{ra}}{2\pi b} \frac{Y_1(\alpha b) J_0(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} + \\
& \frac{d_{31}}{S_{11}^E + S_{12}^E} V
\end{aligned} \tag{II.49}$$

De plus, $v'_{ra} = \frac{2}{\pi \alpha b} v_{ra}$, $v'_{rb} = \frac{2}{\pi \alpha a} v_{rb}$

$$\begin{aligned}
F''_{ra} = & \frac{\pi^2 (\alpha b)^2 Z_{ra}}{4j} \left[\frac{Y_1(\alpha b) J_0(\alpha a) - J_1(\alpha b) Y_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} - \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha a} \right] v'_{ra} + j \frac{\pi \alpha b Z_{ra}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v'_{rb} + \\
& N_{31} V
\end{aligned} \tag{II.50}$$

$$\begin{aligned}
F''_{rb} = & \frac{\pi^2 (\alpha a)^2 Z_{rb}}{4j} \left[\frac{Y_1(\alpha a) J_0(\alpha b) - J_1(\alpha a) Y_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} + \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha b} \right] v'_{rb} + j \frac{\pi \alpha a Z_{rb}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a) Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b) Y_1(\alpha a)} v'_{ra} + \\
& N_{31} V
\end{aligned} \tag{II.51}$$

Dans ces deux équations, $F''_{ra} = (\pi^2 \alpha a b) F'_{ra}$, $F''_{rb} = (\pi^2 \alpha a b) F'_{rb}$ et $N_{31} = \pi^2 \alpha a b \frac{d_{31}}{S_{11}^E + S_{12}^E}$.

N_{31} : Le facteur de couplage électromécanique de l'anneau piézoélectrique en vibration radiale.

On peut réécrire de nouveau :

$$F''_{ra} = (Z_2 + Z_3) v'_{ra} + Z_3 v'_{rb} + N_{31} V \tag{II.52}$$

$$F''_{rb} = (Z_1 + Z_3) v'_{rb} + Z_3 v'_{ra} + N_{31} V \tag{II.53}$$

Les expressions des trois impédances sont données par :

$$Z_1 = \frac{\pi^2(\alpha a)^2 Z_{rb}}{4j} \left[\frac{Y_1(\alpha a)J_0(\alpha b) - J_1(\alpha a)Y_0(\alpha b)}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} + \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha b} \right] - j \frac{\pi \alpha a Z_{rb}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} \quad \text{II.54}$$

$$Z_2 = \frac{\pi^2(\alpha b)^2 Z_{ra}}{4j} \left[\frac{Y_1(\alpha b)J_0(\alpha a) - J_1(\alpha b)Y_0(\alpha a)}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} - \frac{(1 - \nu_{12})}{\alpha a} \right] - j \frac{\pi \alpha b Z_{ra}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} \quad \text{II.55}$$

$$Z_3 = j \frac{\pi \alpha a Z_{rb}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} = j \frac{\pi \alpha b Z_{ra}}{2} \frac{1}{J_1(\alpha a)Y_1(\alpha b) - J_1(\alpha b)Y_1(\alpha a)} \quad \text{II.56}$$

Le schéma électrique équivalent de l'anneau piézoélectrique en mode radial sera de la forme suivante :

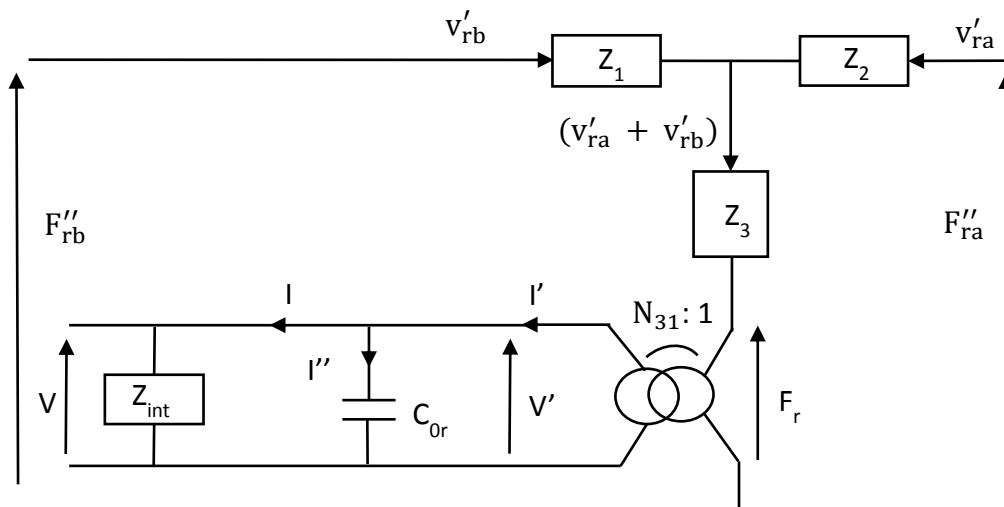


Figure II. 10 : Schéma électromécanique de l'anneau piézoélectrique en mode radial

Avec $C_{0r} = \frac{\varepsilon_{33}^T A}{L} \left[1 - \frac{2d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)} \right]$ la capacité bloquée de l'anneau en mode radial.

III.2.1 Réponse analytique en tension

De même que pour le mode longitudinal, le schéma électromécanique pour le mode radial est formé de deux parties reliées par un transformateur de rapport N_{31} , une partie mécanique pure désignée par les forces mécaniques F''_{ra} et F''_{rb} et les vitesses de déplacement v'_{ra} et v'_{rb} , et une partie électrique à la sortie du transformateur désignée par les tensions et les courants électriques générés.

A partir du schéma électromécanique on peut écrire :

$$\bar{F}_r + Z_3 (v'_{ra} + v'_{rb}) = \bar{F}''_{rb} - Z_1 v'_{rb} = \bar{F}''_{ra} - Z_2 v'_{ra} \quad \text{II.57}$$

Toujours pour un champ de vitesse symétrique par rapport à l'anneau on a $v'_{ra} = v'_{rb}$.

On aura donc :

$$\overline{F''}_{ra} = \overline{F}_r + (2Z_3 + Z_2) v'_{ra} \quad \text{II.58}$$

La tension et l'intensité à la sortie du transformateur de rapport N_{31} sont données par :

$$\overline{V}' = \overline{F}_r / N_{31} \text{ et } I' = N_{31}(v'_{ra} + v'_{rb}) = 2N_{31}v'_{ra} \quad \text{II.59}$$

$$I'' = I' - I = \overline{V} / Z(C_{0r}) = jC_{0r}\omega\overline{V} \text{ et } I = \overline{V} / Z_{int} \quad \text{II.60}$$

Alors on trouve :

$$\overline{V} \left(1 + \frac{1}{jC_{0r}\omega.Z_{int}}\right) = \frac{I'}{jC_{0r}\omega} = \frac{2N_{31}}{jC_{0r}\omega} v'_{ra} \quad \text{II.61}$$

L'impédance équivalente de la partie électrique est donnée par :

$$Z_{elec} = \frac{Z_{int}}{1 + jC_{0r}\omega.Z_{int}} \quad \text{II.62}$$

On a $\overline{V}' = Z_{elec}.I'$ ce qui donne la relation entre la force radiale \overline{F}_r et la vitesse v'_{ra} qui est de la forme :

$$\overline{F}_r = 2N_{31}^2.Z_{elec}.v'_{ra} \quad \text{II.63}$$

Alors $\overline{F''}_{ra} = (2N_{31}^2.Z_{elec} + 2Z_3 + Z_2) v'_{ra}$

L'équation II.61 donne :

$$\overline{V} \left(1 + \frac{1}{jC_{0r}\omega.Z_{int}}\right) = \frac{2N_{31}}{jC_{0r}\omega} \frac{1}{(2N_{31}^2.Z_{elec} + 2Z_3 + Z_2)} \overline{F''}_{ra} \quad \text{II.64}$$

D'où la tension radiale générée en fonction de la force extérieure.

$$\overline{V} = \frac{2N_{31}.Z_{int}}{(1 + jC_{0r}\omega.Z_{int})(2N_{31}^2.Z_{elec} + 2Z_3 + Z_2)} \overline{F''}_{ra} \quad \text{II.65}$$

III.2.2 Fréquence de résonance de l'anneau en vibration radiale

De la même manière que pour le mode longitudinal, lorsque les deux faces intérieure et extérieure de l'anneau piézoélectrique sont exemptes de forces extérieures, l'admittance électrique de l'anneau en mode radial est donnée par l'expression suivante [69] :

$$Y = \frac{j\omega\epsilon_{33}^T S}{L} \times [1 - K_p^2 + K_p^2 \frac{2}{a^2 - b^2}] \times \frac{[aJ_1(\alpha a) - bJ_1(\alpha b)][Y(b) - Y(a)] + [aY_1(\alpha a) - bY_1(\alpha b)][J(a) - J(b)]}{J(a)Y(b) - J(b)Y(a)} \quad \text{II.66}$$

Avec $K_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T(S_{11}^E + S_{12}^E)}$ le facteur de couplage électromécanique pour le mode radial, $J(x)$ et $Y(x)$ sont deux fonctions données par :

$$J(x) = \frac{-\alpha J_2(\alpha x)(1 - \nu_{12})}{1 + \nu_{12}} + \alpha J_0(\alpha x) \quad \text{II.67}$$

$$Y(x) = \frac{-\alpha Y_2(\alpha x)(1 - \nu_{12})}{1 + \nu_{12}} + \alpha Y_0(\alpha x) \quad \text{II.68}$$

La fréquence de résonance est obtenue dans le cas où l'admittance électrique est infinie, donc l'équation donnant la fréquence de la résonance radiale sera donnée par :

$$J(a)Y(b) - J(b)Y(a) = 0 \quad \text{II.69}$$

Dans le cas où l'admittance est nulle, on obtient l'équation de la fréquence d'antirésonance radiale donné par :

$$\left[1 - K_p^2 + K_p^2 \frac{2}{a^2 - b^2}\right] \times \frac{[aJ_1(\alpha a) - bJ_1(\alpha b)][Y(b) - Y(a)] + [aY_1(\alpha a) - bY_1(\alpha b)][J(a) - J(b)]}{J(a)Y(b) - J(b)Y(a)} = 0 \quad \text{II.70}$$

Egalement, selon **Murimi Evan** et **Kihui John** [68] la fréquence de résonance radiale d'un anneau piézoélectrique est donnée par :

$$f_{\text{radiale}} = \frac{1}{2(a+b)\sqrt{\rho \cdot s_{11}}} \quad \text{II.71}$$

L'impédance de l'anneau piézoélectrique a été mesurée avec l'analyseur d'impédance électrique dans la même bande fréquentielle que celle utilisée théoriquement. La figure II.11 montre une comparaison entre les deux allures expérimental et analytique, la fréquence de résonance de l'anneau en vibration radiale est de l'ordre de 48 kHz.

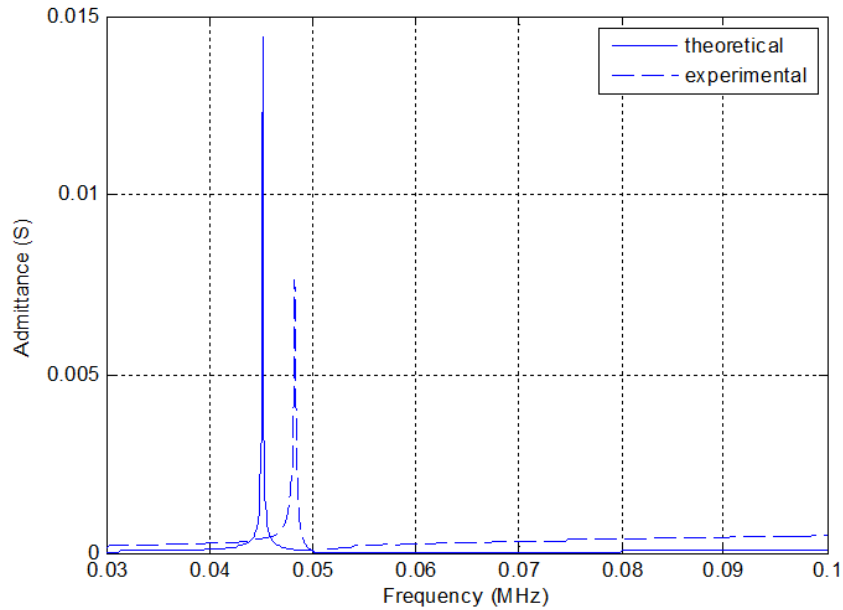


Figure II. 11 : Admittance de l'anneau en vibration radiale

Le tableau II.2 dresse une comparaison des résultats fréquentielle, analytiques, expérimentales et qui sont en bonne concordance avec ceux trouvés par **Murimi** et **Kihiu**.

	[68]	Théorique	Expérimental
Fréquence (MHz)	0,048	0,045	0,048
$\Delta(\%)$	0	6,2	

Tableau II. 2 : Fréquences théorique et expérimentale de la résonance radiale de l'anneau

III.3 Charge due au circuit d'extraction d'énergie

Les deux circuits électromécaniques équivalents pour les deux modes de vibration sont complétés par une impédance de charge (Z_{int}) du circuit de traitement de l'énergie récupérée. Pour tenir compte de cet effet de charge, la puissance a été calculée en fonction de l'impédance de charge du circuit d'extraction d'énergie pour les deux modes de vibration radial et longitudinal. La figure II.12 montre les résultats obtenus dans les deux cas, les impédances de charges optimales obtenues sont présentées dans le tableau suivant :

Mode	Radial	Longitudinal
$Z_{int}(k\Omega)$	24	28
Puissance (μW)	44	14

Tableau II. 3 : Impédances internes pour les deux modes de vibration et la puissance correspondante

La puissance pour le mode radial (Figure II.12.a) atteint une valeur maximale pour $Z_{int} = 24 \text{ k}\Omega$, tandis que la puissance pour le mode longitudinal a obtenu son maximum à $Z_{int} = 28 \text{ k}\Omega$ (Figure II.12.b). Ces valeurs optimales de charge permettront une récupération de puissance maximale pour les deux modes de vibration.

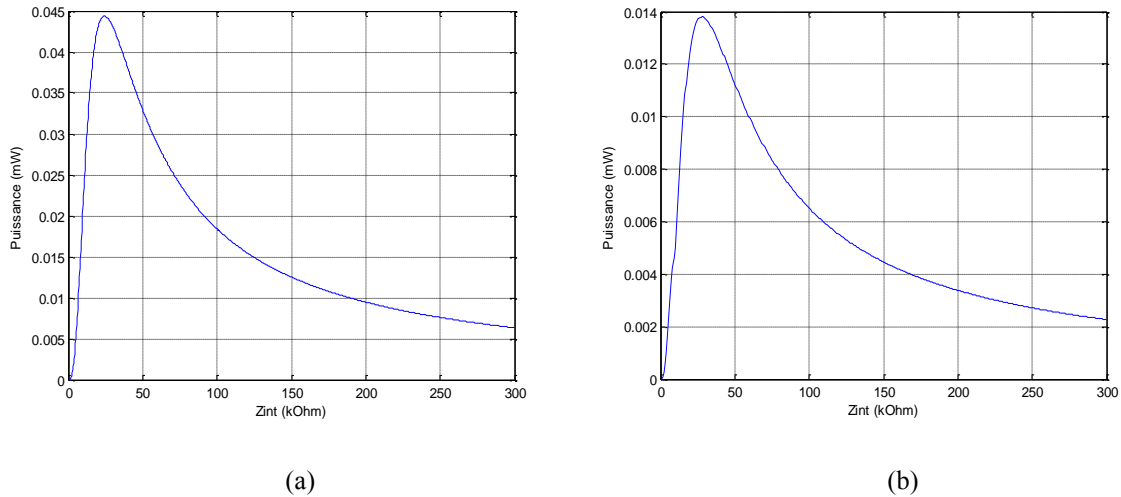


Figure II. 12 : Puissances modélisées en fonction de l'impédance interne

Vu que la puissance radiale est plus élevée que la puissance longitudinale et que le mode radial donne la tension la plus élevée par comparaison avec le mode longitudinal, nous utiliserons l'impédance de charge optimale de $24 \text{ k}\Omega$ pour déterminer la tension totale récupérée par la réunion des deux modes de vibration. L'allure de la puissance totale récupérée après l'assemblage des deux modes de vibration est donné par la figure II.13, cette puissance atteint une valeur maximale de $58 \mu\text{W}$ pour une impédance de charge optimale $Z_{int} \approx 25 \text{ k}\Omega$. La puissance totale est divisée entre le mode d'épaisseur ($14 \mu\text{W}$) et le mode radial ($44 \mu\text{W}$). Le niveau de la puissance récupérée est suffisant pour alimenter des électroniques et des processeurs à faible consommation.

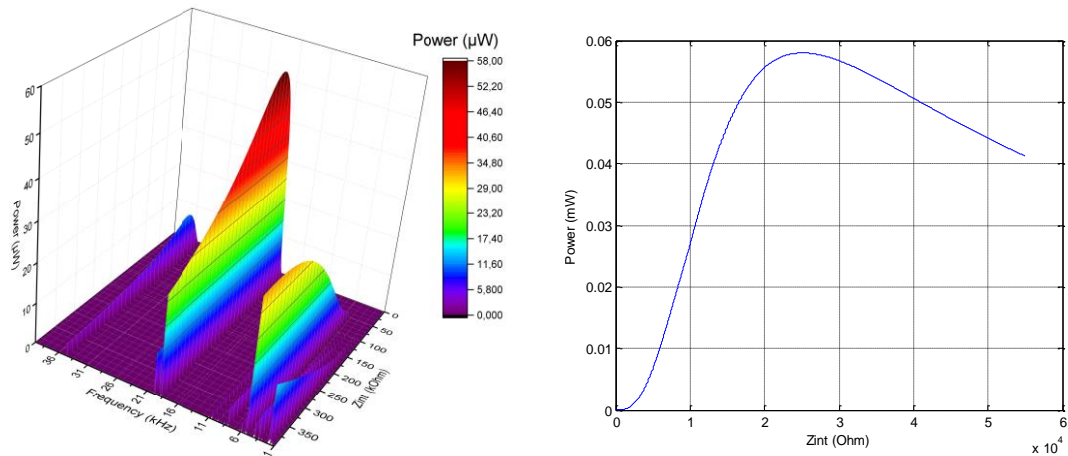


Figure II. 13 : Puissance totale récupérée en fonction de Z_{int} et de la fréquence

IV. Modèle analytique de la récupération d'énergie

IV.1 Champ de forces appliqué sur l'anneau

Lors de l'utilisation de notre capteur dans un produit en écoulement ou dans un mélangeur, la sphère se déforme sous l'action des contraintes produites par le produit. Cette contrainte est transmise par le biais de la structure à l'anneau piézoélectrique. Pour calculer le champ de forces appliqué sur l'anneau, un modèle éléments finis a été construit sous COMSOL Multiphysics (Figure II.14).

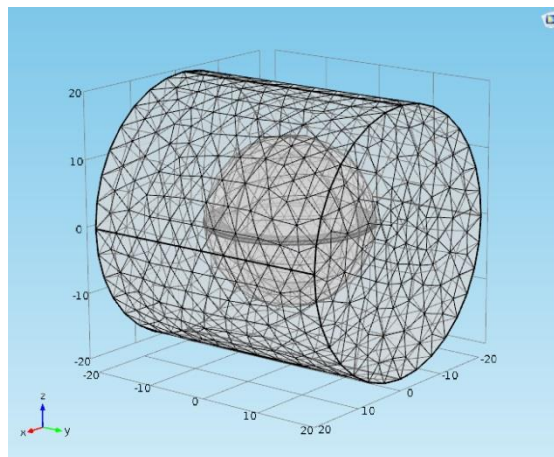


Figure II. 14 : Maillage du modèle MEF

A l'aide du COMSOL, ce modèle permet de coupler facilement trois approches: acoustique, mécanique et la conversion piézoélectrique par l'intermédiaire de trois modules "Pressure Acoustics", "Solid Mechanics" et "Electrostatics".

Les deux tableaux II.4 et II.5 montrent les paramètres du plexiglas et du PZ26 utilisées durant les simulations.

Module d'élasticité E (MPa)	Coefficient du Poisson ν	Densité ρ (kg/m ³)
3300	0.39	1190

Tableau II. 4 : Paramètres du plexiglas utilisés dans la simulation de la coque sphérique

ϵ_0 (F/m)	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	ρ (kg/m ³)	h_{33} (V/m)	e_{33} (C/m ²)
$8.85 \cdot 10^{-12}$	700	1300	7700	$23.7 \cdot 10^8$	14.7
d_{31} (C/N)	c_{33}^D (N/m ²)	c_{11}^E (N/m ²)	s_{33}^D (m ² /N)	s_{11}^E (m ² /N)	s_{12}^E (m ² /N)
$-130 \cdot 10^{-12}$	$9.56 \cdot 10^{10}$	$7.7 \cdot 10^{10}$	$11 \cdot 10^{-12}$	$13 \cdot 10^{-12}$	$-4.35 \cdot 10^{-12}$

Tableau II. 5 : Paramètres du PZ26 utilisés dans la simulation de l'anneau piézoélectrique

A partir de ce modèle nous avons déterminé la pression acoustique par unité de surface appliquée dans le plan de l'anneau piézoélectrique en fonction de la fréquence. L'intégration de cette pression sur toute la surface de l'anneau donne la force appliquée sur les faces de l'anneau piézoélectrique placé à la jonction des deux demi sphères (Figure II.15).

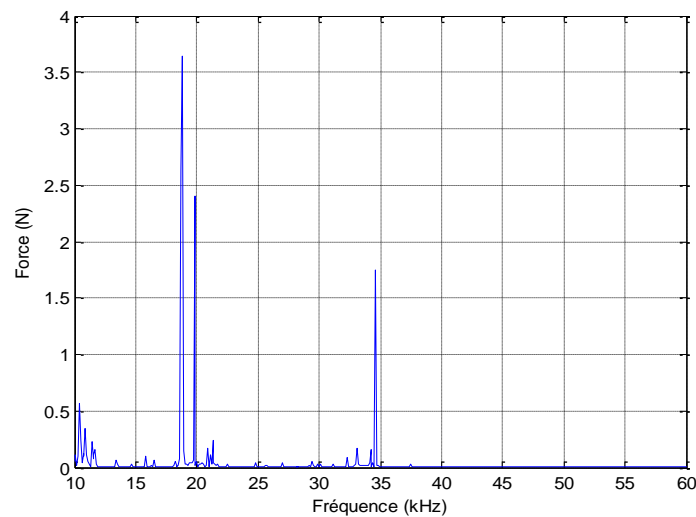


Figure II. 15 : Force appliquée dans le plan de l'anneau

La figure II.15 montre l'allure du champ de force exercée sur l'anneau dans la bande fréquentielle comprise entre 10 et 60 kHz. Nous pouvons remarquer que les propriétés électromécaniques de l'anneau dépendent largement des fréquences de résonance de la sphère. Cette force est ensuite utilisée comme une donnée d'entrée pour les deux modèles

électromécaniques de l'anneau piézoélectrique. La figure II.16 présente les deux réponses en tension pour les deux modes de vibration, la tension radiale est plus importante que celle du mode d'épaisseur.

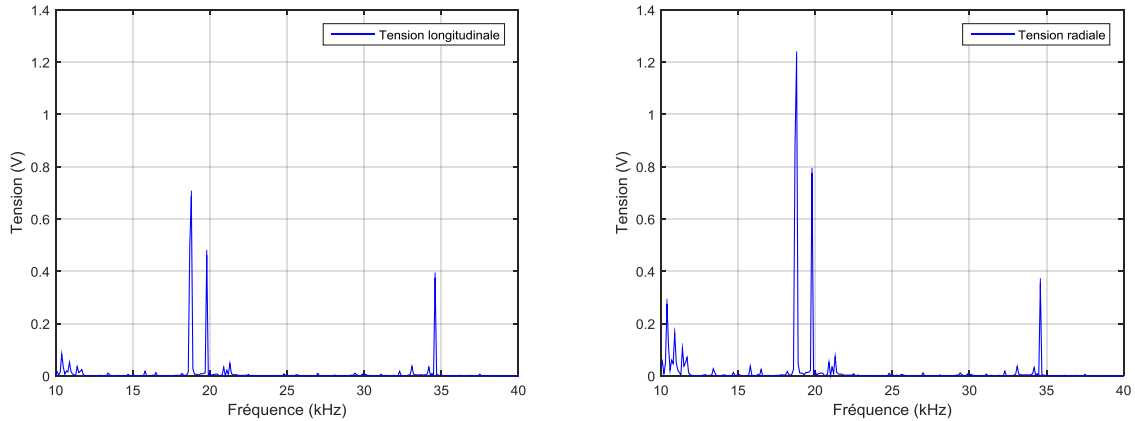


Figure II. 16 : Réponses en tension longitudinale et radiale

IV.2 Modèle analytique proposé

L'objectif de la modélisation théorique est l'assemblage des deux schémas électromécaniques correspondant aux deux modes de vibration de façon à simuler l'énergie totale récupérée traitée par une électronique spécifique et stockée dans un condensateur ou une batterie (Figure II.17).

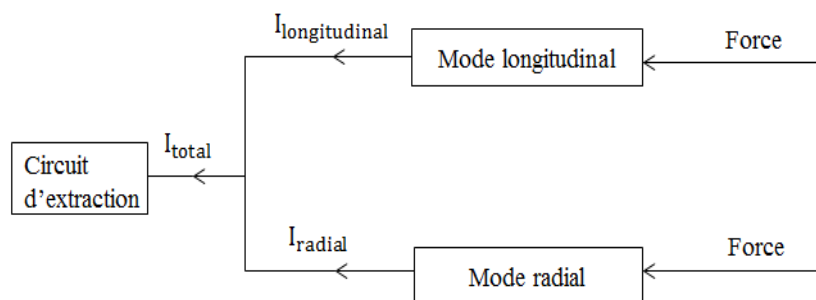


Figure II. 17 : Modèle théorique de simulation two-mode

Ce modèle ayant une entrée mécanique pure désignée par les forces mécaniques exercées sur l'anneau piézoélectrique du transducteur sphérique, ces forces sont décrites dans IV.1. Ce modèle analytique donne en sortie les grandeurs électriques tension et courant totales générées par les deux schémas électromécaniques. Donc pour déterminer la tension totale récupérée, il faut modéliser les deux modes de vibration en utilisant la même impédance de charge interne. Nous avons proposé d'utiliser l'impédance optimale pour le

mode radial (25 kΩ) car ce dernier génère la plus haute tension. Alors la tension totale produite par notre modèle théorique est la somme de deux tensions données par les deux modes de vibration.

D'après la figure II.17 on a :

$$I_{\text{totale}} = I_{\text{longitudinale}} + I_{\text{radiale}} \quad \text{II.72}$$

$$\frac{V_{\text{totale}}}{Z_{\text{int}}} = \frac{V_{\text{longitudinale}}}{Z_{\text{int}}} + \frac{V_{\text{radiale}}}{Z_{\text{int}}} \quad \text{II.73}$$

Ce qui donne :

$$V_{\text{totale}} = V_{\text{longitudinale}} + V_{\text{radiale}} \quad \text{II.74}$$

Un script Matlab a été mis en point afin d'implémenter cette procédure, et de calculer la réponse totale en tension de notre modèle proposé dans une bande de fréquence allant de 10 kHz jusqu'à 60 kHz (voir annexe C). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure II.18 :

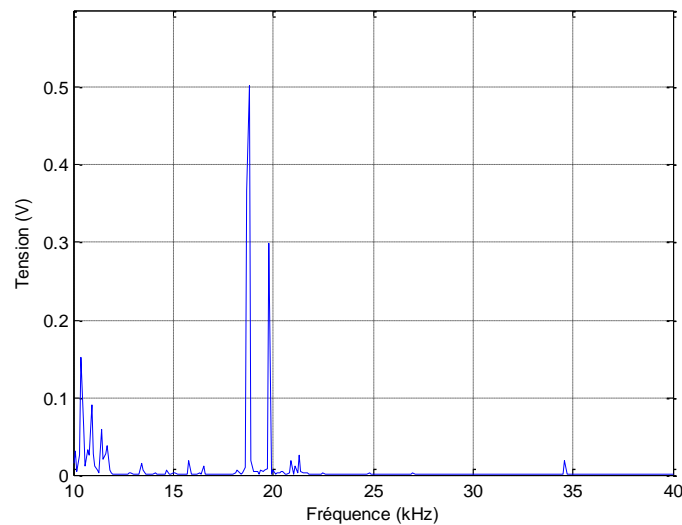


Figure II. 18 : Réponse analytique en tension de notre modèle théorique

Comme le montre l'allure de cette figure, le niveau de la tension totale récupérée est inférieur par rapport au niveau de la tension générée par chaque mode de vibration séparément. En effet, les deux tensions radiale et longitudinale sont des tensions complexes (des parties positives et des parties négatives), du coup lors de la sommation de ces deux tensions l'amplitude va changer. Par conséquent, l'ordre de grandeur de la réponse totale en tension a été diminué sur les fréquences de résonance de la capsule sphérique. En réalité, la

vraie réponse en tension du modèle analytique correspond à la tension générée par les deux modes de vibration assemblés et non pas à un seul mode de vibration.

V. Modélisation éléments finis

Le concept analytique a été consolidé par un modèle de récupération d'énergie vibratoire basé sur une méthode des éléments finis (MEF). En effet, ce modèle MEF permet de vérifier le modèle analytique de conversion piézoélectrique en fournissant la réponse en tension de notre transducteur sphérique.

Le modèle MEF facilite le couplage de l'approche électrique avec l'approche mécanique à l'aide du module "Piezoelectric Devices" qui prend en compte les propriétés des matériaux piézoélectriques et donne en sortie les grandeurs mécaniques et électriques associées. Il est divisé en trois modules couplés: "Pressure Acoustics" désigné par un cylindre rempli d'eau, "Solid Mechanics" correspondant aux deux demi-sphères en plexiglas et le troisième module "Electrostatics" correspond à l'anneau piézoélectrique pour déterminer les grandeurs électriques en sortie (Figure II.14).

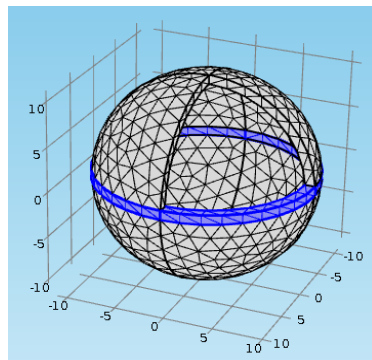


Figure II. 19 : Maillage du capteur montrant la zone de l'anneau

Un maillage a été choisi avec des éléments tétraédriques en fonction de la zone traitée et celui-ci a été raffiné dans la zone de l'anneau piézoélectrique comme montré sur la figure II.19.

Le niveau de la pression acoustique de l'eau a été estimé à une amplitude de 20 kPa selon les trois directions de l'espace. Ensuite, la pression acoustique est appliquée sur les faces extérieures de la sphère, la figure II.20 montre les déformations de la sphère sous l'action de la pression acoustique pour deux fréquences différentes.

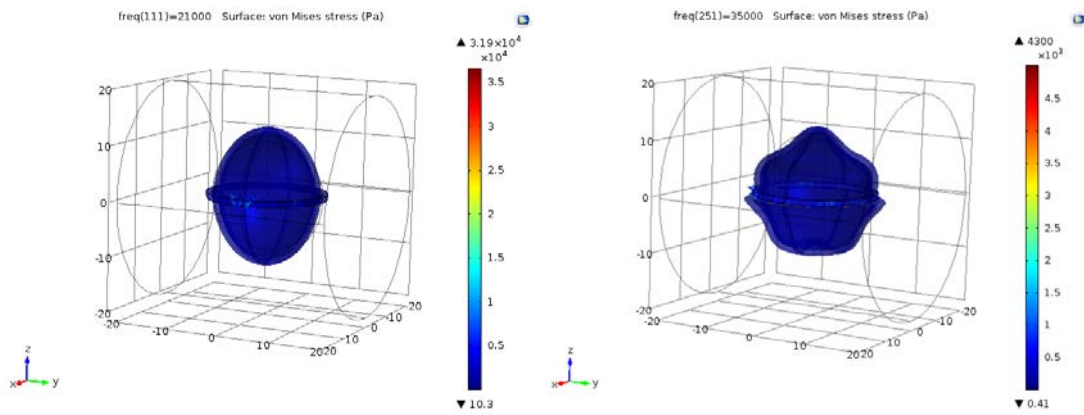


Figure II. 20 : Déformation de la sphère sous l'action de la pression acoustique

Les résultats de simulation obtenus par la méthode aux éléments finis sont comparés avec les résultats analytiques. Il s'agit donc ici de vérifier que ces deux modèles produisent des réponses identiques en tension dans la gamme fréquentielle choisie. La figure II.21 montre que le comportement et l'ordre de grandeur des deux réponses en tension sont en bonne concordance. En conclusion, les résultats des deux modèles : analytique et éléments finis montrent que la valeur de la quantité énergétique récupérée est au maximum autour de la résonance, soit autour de fréquences modales 21 et 35 kHz.

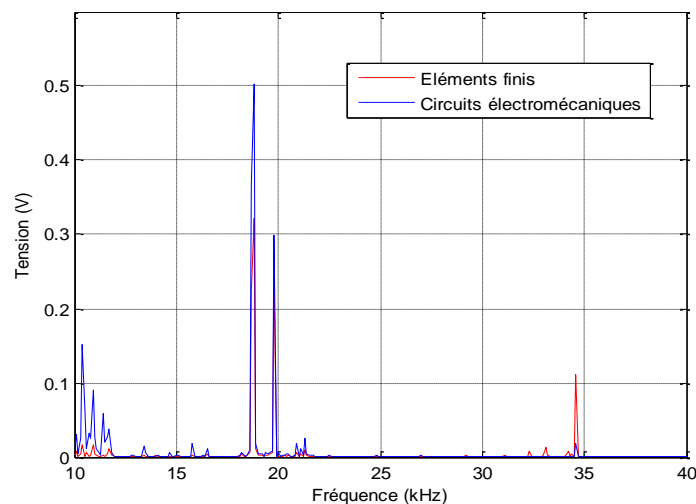


Figure II. 21 : Réponses en tension simulation-MEF/analytique

VI. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de déterminer les fréquences de résonance de notre capteur sphérique et le développement des modèles pour la récupération d'énergie vibratoire afin d'assurer l'autonomie énergétique de ce capteur. Quatre parties ont été abordées :

En premier temps, nous avons déterminé les fréquences de résonance de notre capsule sphérique analytiquement et ensuite une validation de ces fréquences par modélisation des éléments finis en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics. La deuxième partie a porté sur la modélisation dynamique de l'anneau piézoélectrique, selon ces deux principaux modes de vibration: longitudinal et radial. Après une description des équations mathématiques pour chaque mode, un circuit électromécanique équivalent a été établi associant à la fois les composantes électriques et mécaniques. La réponse en tension est déterminée analytiquement en fonction de la force mécanique d'entrée appliquée sur l'anneau et en fonction de différents paramètres du circuit équivalent.

Pour la troisième partie, nous avons développé un modèle analytique de la récupération d'énergie vibratoire servant à l'assemblage des deux circuits électromécaniques équivalents pour les deux modes de vibration et ensuite nous avons déterminé la réponse totale en tension. Finalement, dans la dernière étape nous avons développé de nouveau un modèle éléments finis pour vérifier et valider notre modèle théorique proposé. Le modèle MEF a fourni une réponse en tension semblable et dans le même ordre de grandeur par comparaison avec les résultats analytiques.

Chapitre III : Caractérisation expérimentale de la récupération d'énergie vibratoire à l'aide d'un capteur sphérique

I. Introduction	63
II. Champs de rayonnement et directivité du capteur sphérique.....	63
III. Champ d'émission du transducteur et de la sonotrode	67
IV. Etude expérimentale de la récupération d'énergie vibratoire	69
IV.1. Résonances de la sphère dans un fluide	69
IV.2 Dispositif expérimental	70
IV.2.1 Atténuation de l'onde acoustique dans l'eau	71
IV.2.2 Problème des bulles d'air.....	72
IV.2.3 Balayage en coordonnée transversale à distance constante.....	74
IV.2.4 Balayage en profondeur à distance constante.....	75
IV.2.5 Influence de l'angle de rotation à distance constante	76
IV.2.5.1 Directivité.....	78
IV.2.6 Mesures de la pression acoustique.....	79
IV.2.6.1 Mesures par hydrophone.....	79
IV.2.6.2 Coefficients de conversion d'énergie.....	82
V. Conclusion	83

I. Introduction

Dans le deuxième chapitre nous avons développé un modèle analytique pour la récupération d'énergie vibratoire, ce modèle qui sert à modéliser le capteur selon deux principaux modes de vibrations : longitudinal et radial. Ensuite ce modèle analytique a été validé par un autre modèle de simulation éléments finis effectué avec COMSOL Multiphysics, les deux modèles ont donné des réponses en tension très similaires.

Dans ce chapitre nous étudions la caractérisation expérimentale d'une réalisation particulière de capteur. L'objectif de cette étude est l'identification des différents paramètres qui affectent la capacité et l'efficacité de ce récupérateur d'énergie. Le but de ce chapitre est donc la réalisation et la validation expérimentale de la technique de récupération d'énergie vibratoire.

Il est composé de trois parties :

- 1) Une étude expérimentale pour déterminer les déplacements et les diagrammes de directivité de la sphère. Cette étude a été effectuée en mettant en place une installation expérimentale de vibrométrie Laser.
- 2) Une étude expérimentale pour déterminer les champs d'émission des deux sources acoustiques qu'on a utilisé dans notre travail expérimental: une sonotrode et un transducteur de type tonpilz qui assurent un maximum de puissance à basse fréquence.
- 3) Une étude détaillée de la faisabilité de la méthode de récupération d'énergie vibratoire. Dans cette partie une description de la manipulation expérimentale mise en place sera détaillée en tenant compte de plusieurs facteurs entre autres l'atténuation, l'influence de la profondeur et de l'angle de rotation sur l'ordre de grandeur de la tension récupérée. Finalement une mesure de la pression acoustique par hydrophone, compte tenu de cette démarche afin de déterminer les coefficients de conversion de la récupération d'énergie quel que soit sa position de l'espace considérée.

II. Champs de rayonnement et directivité du capteur sphérique

Dans un premier temps, la réponse fréquentielle et les diagrammes de directivité ont été mesurés pour un transducteur sphérique réel avec une technique de Vibrométrie Laser

Doppler (VLD). Comme la coque externe du transducteur est en plexiglass, il a été nécessaire de recouvrir la zone de mesure avec le ruban adhésif rétro-réfléchissant. Compte tenu de la configuration de la mesure (vibrations radiales) et de la plage fréquentielle d'excitation relativement faible (dizaines de kilohertz, longueur d'onde acoustique $\lambda > 10$ mm, pour la vitesse des ondes acoustiques dans le plexiglass $c = 2700$ m/s [70]), une telle préparation de surface n'a pas affecté les résultats de mesure.

Afin d'obtenir les diagrammes de directivité, le balayage a été effectué sur un demi-cercle sur la sphère, ayant le même centre et situé dans le plan Z perpendiculaire à l'anneau piézoélectrique (plan Oxy). La répartition du champ acoustique sur l'autre demi-cercle de la section est supposée la même pour des raisons de symétrie.

Le schéma III.1 illustre l'installation expérimentale, le transducteur sphérique a été monté sur une plaque tournante fournissant un positionnement angulaire dans un plan horizontal. Le VLD a été réalisé avec le vibromètre Polytec OFV-552 connecté au contrôleur OFV-5000. Deux décodeurs étaient disponibles : un de vitesse (VD-09) et l'autre de déplacement (DD-300), le décodeur de vitesse VD-09 a été utilisé parce qu'il est plus sensible que celui de déplacement.

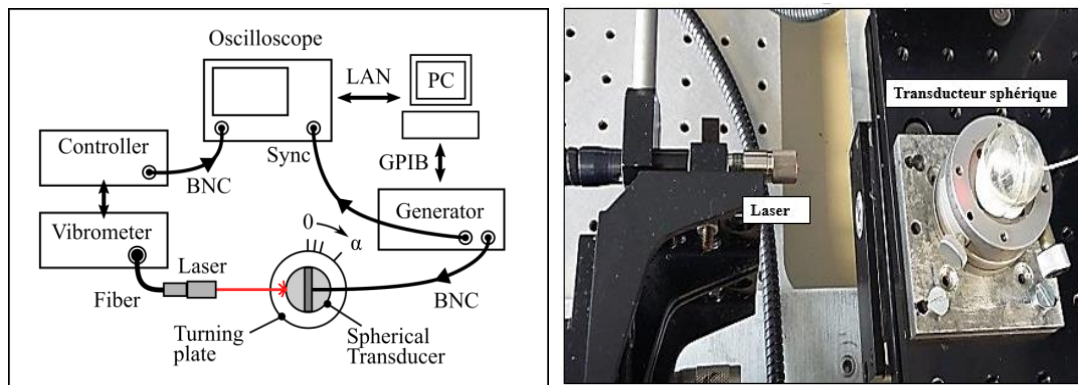


Figure III. 1 : Schéma expérimental du VLD

Le signal décodé est dirigé vers un oscilloscope (LeCroy 44Xi) et transmis à l'ordinateur (PC) pour une analyse ultérieure. L'excitation est fournie par un générateur Agilent 33220A. L'amplitude maximale de l'émission a été réglée à 20 Vpp. Le générateur est contrôlé, via GPIB, par l'ordinateur et émet un signal sinusoïdal d'une dizaine de cycles pour chaque fréquence d'analyse. La figure III.2 montre un exemple d'un signal temporel affiché sur l'oscilloscope pour une fréquence quelconque pendant les mesures. Ce signal est découpé en quatre parties: un délai de $5,15 \cdot 10^{-5}$ s, deux bordures de $1,14 \cdot 10^{-4}$ s et le signal

utile extrait de $1,7 \cdot 10^{-4}$ s. Notons que le délai est proportionnel à la distance de mesure, c.à.d. la distance séparant la position du laser et la surface de la sphère. Une fenêtre temporelle a été appliquée sur le signal pour isoler la partie utile à analyser.

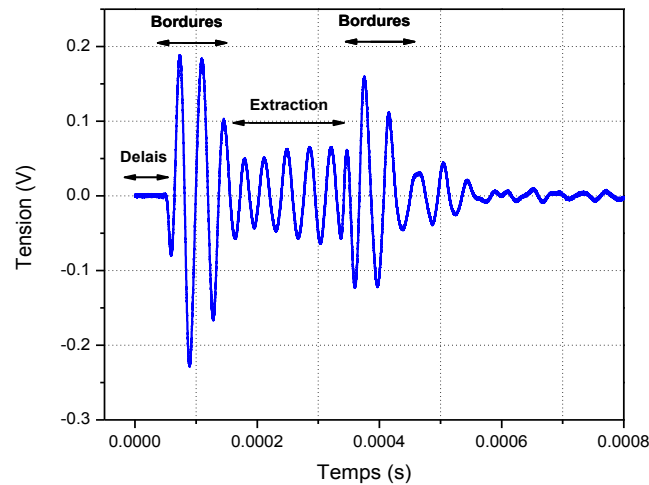


Figure III. 2 : Signal temporel pour une fréquence quelconque

Le signal provenant du vibromètre a été représenté au domaine fréquentiel et l'amplitude correspondant à la fréquence d'analyse a été mesurée en unités de tension électrique. A partir des décodeurs on peut remonter aux déplacements de la surface, les résultats rapportés ci-dessous correspondent à des mesures effectuées avec 4° de résolution angulaire et balayage de fréquence de 17 à 70 kHz avec un pas fréquentiel de 1 kHz.

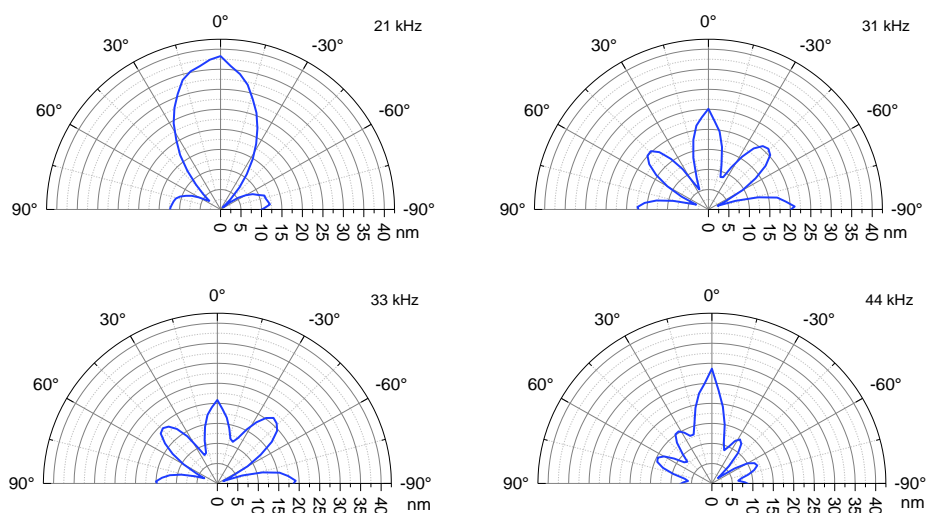


Figure III. 3 : Directivité de la sphère pour quelques fréquences

Cette figure montre le diagramme de directivité du capteur sphérique pour les modes de résonances. Le facteur de directivité est une fonction de l'angle polaire d'orientation θ . La figure III.3 montre un lobe principal à $\theta = 0^\circ$ dont la largeur diminue lorsque la fréquence augmente. Des lobes secondaires apparaissent aux fréquences les plus hautes, ce qui mène à l'idée que les rayonnements maximaux du transducteur seront dans la direction perpendiculaire à l'anneau piézoélectrique.

La figure III.4 montre les allures de déplacements de la relevée de trois positions différentes sur le sommet de la sphère. Les maximums de déplacements sont obtenus aux fréquences de résonance de la capsule sphérique déjà obtenues avec l'analyseur d'impédance (chapitre 2).

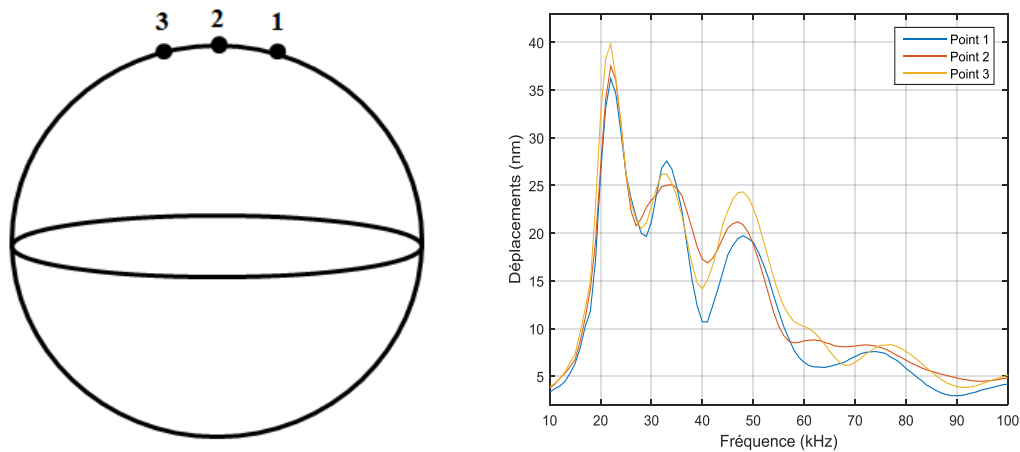


Figure III. 4 : Déplacements de la surface du capteur

Les résultats présentés sur la figure III.5 correspondent aux déplacements totaux de la surface de la sphère en fonction de la fréquence et de l'angle de rotation de la sphère. Cette figure montre que les déplacements sont maximaux à 0° , c'est à dire sur le sommet de la sphère (mode élongation) dans la direction perpendiculaire à l'anneau piézoélectrique pour les trois fréquences de résonance.

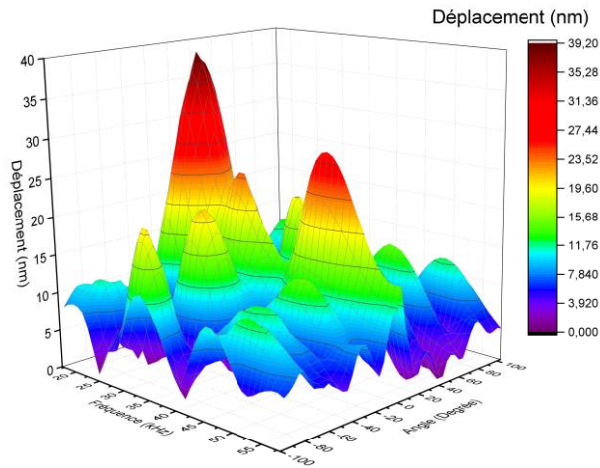


Figure III. 5 : Déplacements de la sphère en fonction de la fréquence et l'angle

III. Champ d'émission du transducteur et de la sonotrode

La production des ondes ultrasonores se fait par l'intermédiaire des transducteurs piézoélectriques qui sont capables de transformer l'énergie électrique reçue en énergie mécanique en créant des vibrations mécaniques dans un milieu liquide. Les ultrasons sont créés par les vibrations des éléments piézoélectriques constituant le transducteur, en réponse à une excitation électrique fournie par un générateur.

Dans la partie expérimentale, deux types des émetteurs ultrasoniques ont été utilisé: un transducteur et une sonotrode ayant le même diamètre de 4 cm et dont la zone de champ proche est de l'ordre de 16 mm pour une fréquence de 60 kHz. Lors de l'utilisation de ces deux sources acoustiques, il est nécessaire de connaître leurs champs d'émission avant l'utilisation pour exciter le capteur sphérique. L'objectif de cette étude est de séparer les fréquences de résonance de ces deux sources par rapport à la sphère, dont le but de voir la réaction de la sphère et les tensions récupérées sur ses propres fréquences de résonance et non pas sur les fréquences imposées par les émetteurs.

Pour déterminer les champs d'émission et les fréquences de résonance de ces deux types de transducteurs, nous avons utilisés deux méthodes: la première avec un analyseur d'impédance en traçant la résistance de l'impédance électrique pour les deux sources acoustiques en fonction de la fréquence, la deuxième avec la technique de la vibrométrie laser à l'effet Doppler en caractérisant les déplacements des surfaces émettrices pour les deux émetteurs.

1) Analyseur d'impédance

Les fréquences de résonances de la sonotrode et du transducteur sont déterminées premièrement avec un analyseur d'impédance (Wayne Kerr 6520). La figure III.6 montre la variation de la résistance de l'impédance électrique pour les deux sources acoustiques étudiées dans la gamme fréquentielle 10-60 kHz qui correspond à leurs bandes passantes. Comme montré, le spectre de la sonotrode atteint des maxima autour des fréquences 20 kHz, 33 kHz et 57 kHz, tandis que pour le transducteur son allure a une forte amplitude sur 33 kHz et une petite résonance non négligeable sur 55 kHz.

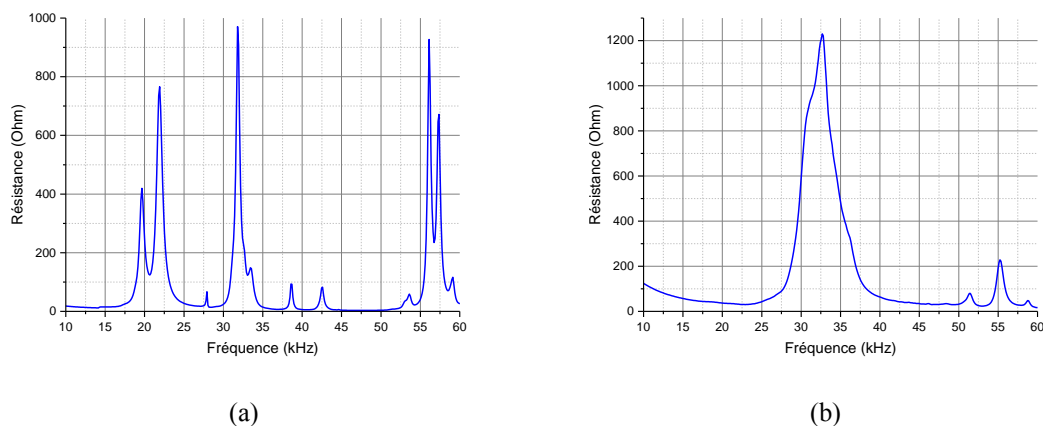


Figure III. 6 : Fréquences de résonance pour sonotrode (a) et transducteur (b)

2) Technique de vibromètre laser

En utilisant la même installation expérimentale de la technique de vibrométrie (VLD) pour le même mode opératoire détaillé dans la partie II de ce chapitre, nous avons déterminé les champs d'émission pour les deux sources acoustiques.

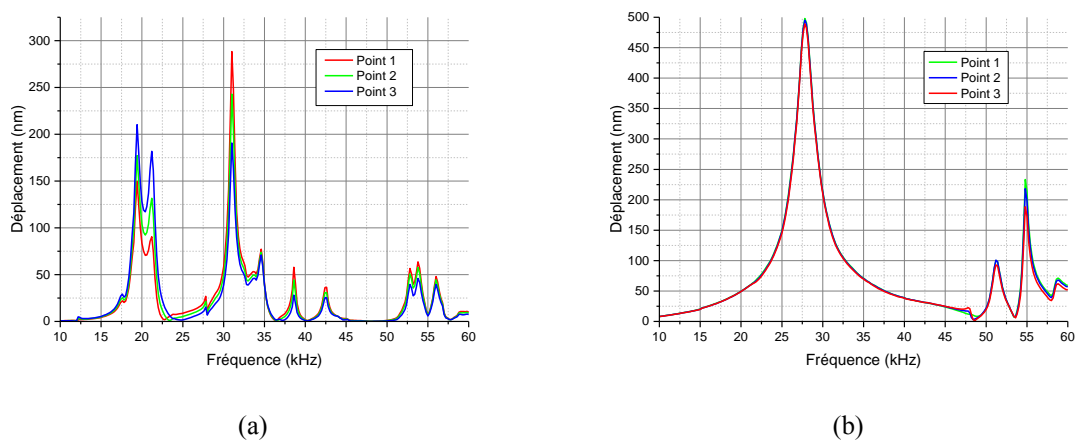


Figure III. 7 : Champs de déplacement pour sonotrode (a) et transducteur (b)

La figure III.7 montre les résultats obtenus par les deux transducteurs sur une moyenne de mesures pour trois points différents pris sur les deux surfaces émettrices. Le spectre du sonotrode atteint un maximum autour des fréquences de résonance (20 et 33 kHz). D'autre part, le champ d'émission du transducteur atteint son maximum sur 28 kHz et une faible résonance à 55 kHz. Nous avons remarqué que le transducteur est plus puissant que la sonotrode ce qui aura un impact sur l'ordre de grandeur de la tension récupérée.

IV. Etude expérimentale de la récupération d'énergie vibratoire

IV.1 Résonances de la sphère dans un fluide

Pour étudier la récupération d'énergie vibratoire, il est nécessaire de visualiser l'effet de la pression hydrostatique de l'eau sur les fréquences de résonance. Le capteur est placé dans un grand aquarium (de dimensions 1.2×1.2×0.6 m) rempli d'eau, nous avons relevé la variation de la résistance de l'impédance électrique du capteur en fonction de la fréquence par l'analyseur d'impédance Wayne Kerr 6520. La figure III.8 montre les résultats obtenus comparés avec les résultats issus d'une mesure où la sphère est placée à l'air libre. Pour la plage fréquentielle choisie entre 10 kHz et 60 kHz, les deux courbes affichent quatre modes de résonance bien séparés.

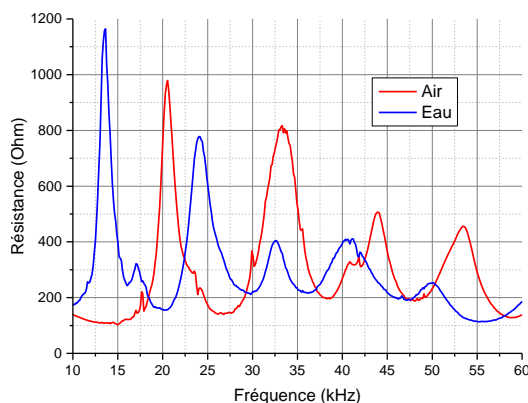


Figure III. 8 : Résonance du capteur sphérique dans l'air et dans l'eau

A partir de ces résultats nous remarquons que la mise sous contraintes de la sphère dans l'eau fait apparaître des modifications sur les amplitudes des modes de résonance. De plus, un décalage des résonances vers les basses fréquences a été observé. Les fréquences de résonance obtenues dans les deux cas considérés sont présentées dans le tableau suivant :

Fréquence (kHz)	f_1	f_2	f_3	f_4
Air	21	33	44	54
Eau	13,5	24	32,6	41
Décalage (Δf)	7,5	9	11,4	13

Tableau III. 1 : Fréquences de résonance du capteur obtenues dans l'air et dans l'eau

IV.2 Dispositif expérimental

Afin de tester la capacité de récupération d'énergie de notre transducteur sphérique, un dispositif expérimental a été mis en place comme indiqué sur la figure III.9. La sphère est fixée dans un aquarium rempli d'eau en face d'un émetteur ultrasonore. Le volume d'eau est suffisamment large pour éviter les multiples échos réfléchis par les parois. La température d'eau est contrôlée par un circuit de circulation, à la température de 21 °C.

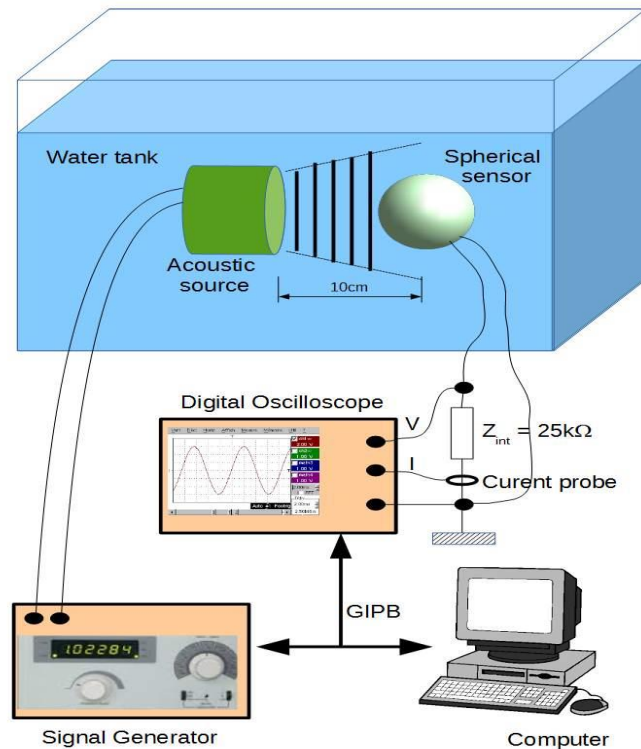


Figure III. 9 : Dispositif expérimental de la récupération d'énergie

La source acoustique est excitée en utilisant un générateur Agilent 33220A, l'amplitude maximale d'émission de 20 Vpp a été définie. Le générateur est contrôlé, via une

interface GPIB, par un ordinateur pour produire un signal sinusoïdal de 7 cycles à chaque fréquence de mesure. Le signal reçu par le capteur sphérique est acheminé vers un oscilloscope numérique pour l'acquisition, et transmis ensuite par LAN à l'ordinateur pour le traitement ultérieur. Une résistance de charge de 25 kOhms est appliquée au capteur conformément à la résistance de charge calculée théoriquement dans le chapitre 2. La tension récupérée ainsi que la puissance dissipée aux bornes de l'impédance de charge sont enregistrées en fonction de la fréquence dans une plage fréquentielle allant de 10 kHz à 60 kHz avec un pas de 1 kHz. Cette gamme fréquentielle correspond à la bande passante de la source acoustique utilisée.

IV.2.1 Atténuation de l'onde acoustique dans l'eau

Lors de la propagation d'une onde acoustique dans un fluide, l'énergie mécanique de cette onde diminue. Cette diminution est due à l'absorption d'une partie de l'énergie mécanique, l'onde ultrasonore s'atténue progressivement avec la distance en s'éloignant de la source acoustique [71]. Plusieurs phénomènes peuvent intervenir, comme l'absorption, la diffusion et les réflexions.

Pour rendre compte de cet effet, la sphère a été fixée à une distance de 10 cm par rapport au transducteur émetteur. La tension récupérée aux bornes de l'anneau piézoélectrique est représentée dans le domaine fréquentiel et l'amplitude correspondante a été mesurée en volts.

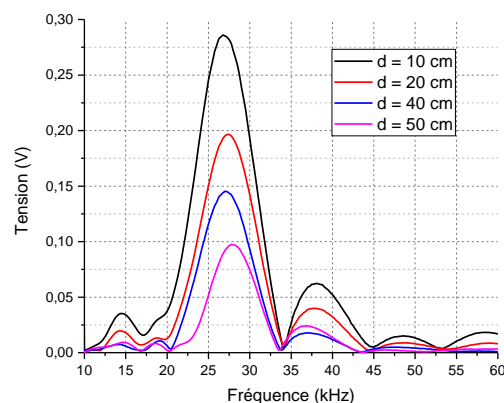


Figure III. 10 : Tensions récupérées à plusieurs distances avec le transducteur

La figure III.10 montre l'allure de la tension récupérée pour les différentes distances : 10 cm, 20 cm, 40 cm et 50 cm. Cette figure met en évidence l'influence de la distance sur la tension mesurée en tenant compte de l'atténuation intrinsèque de l'onde incidente dans l'eau.

Le tableau III.2 présente l'atténuation relative calculée par rapport à la distance 10 cm prise comme une référence. Cette atténuation est égale à $\frac{|V_{\max(d)} - V_{\max(10)}|}{V_{\max(10)}} \cdot 100$, où $V_{\max(d)}$ est l'amplitude maximale de la tension à une distance quelconque et $V_{\max(10)}$ celle à la distance de 10 cm.

Distance (cm)	Amplitude maximale (V)	Atténuation relative (%)
10	0,28	0
20	0,20	28,5
40	0,14	50
50	0,1	64,3

Tableau III. 2 : Atténuation relative de la tension pour plusieurs distances

La figure III.11 dresse un bilan de la puissance récupérée pour les différentes distances. Cette puissance a été calculée aux bornes d'une charge de 25 kOhms. Le niveau de la puissance varie entre un maximum de 0,4 μ W pour la distance de 50 cm à un maximum de 3,26 μ W pour une distance de 10 cm.

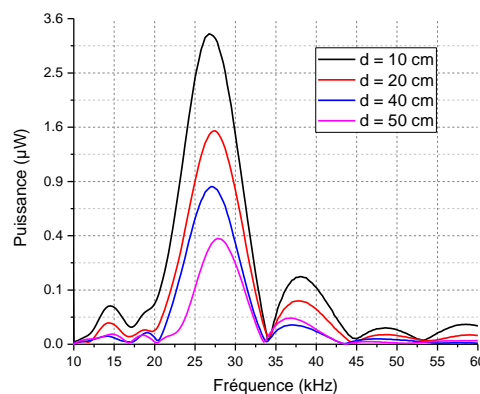


Figure III. 11 : Niveau de la puissance récupérée

IV.2.2 Problème des bulles d'air

Durant les mesures expérimentales si on laisse le capteur trop longtemps dans l'eau, on voit apparaître de très petites bulles d'air qui viennent se coller sur la surface de la sphère (figure III. 12).

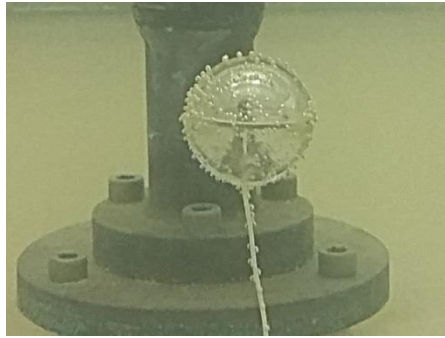


Figure III. 12 : Accumulation des bulles d'air sur la surface de la sphère durant l'étude expérimentale

Pour analyser ce phénomène, nous avons effectué la même mesure plusieurs fois et remarqué que l'amplitude de la tension récupérée diminue avec le temps c.à.d. avec l'augmentation du nombre des bulles sur la surface du capteur (figure III.13). On a laissé ensuite le capteur dans l'eau toute une nuit et refait la mesure le lendemain. Nous avons remarqué que les petites bulles se sont agglomérées entre elles pour former des grandes bulles. On a obtenu un niveau de tension supérieur par rapport au cas sans la présence des bulles, cette élévation de la tension est due à une résonance simultanée entre la sphère et ces dernières. On peut voir à partir des courbes de la figure III.13, l'influence des bulles d'air sur les fréquences de résonance de la sphère. Ces bulles ont modifié la réponse de la sphère en changeant les amplitudes et les positions des pics de résonance. Pour résoudre ce problème, nous avons ajouté une petite quantité d'un liquide lave-vaisselle dans l'aquarium pour réduire la tension superficielle.

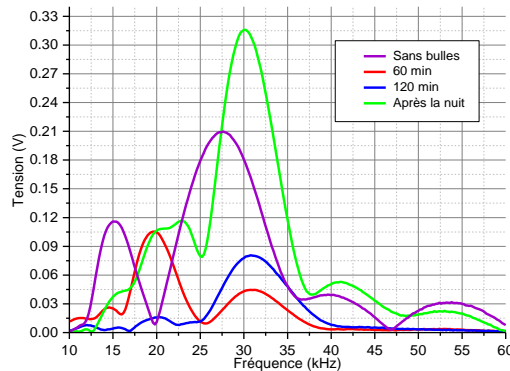


Figure III. 13 : Influence des bulles d'air sur le niveau de la tension récupérée

IV.2.3 Balayage en coordonnée transversale à distance constante

Afin d'optimiser le principe de la récupération d'énergie vibratoire nous avons placé un transducteur émetteur dans une position de référence (origine du repère Oxyz comme montré sur la figure III.14) à une distance de $x = 50$ cm de la sphère. Ensuite, nous avons imposé à la sphère un déplacement dans un système de positionnement à moteurs pas-à-pas contrôlée par l'unité Newport ESP 301, dans une direction parallèle à l'axe y pour une plage allant de -15 cm à 15 cm.

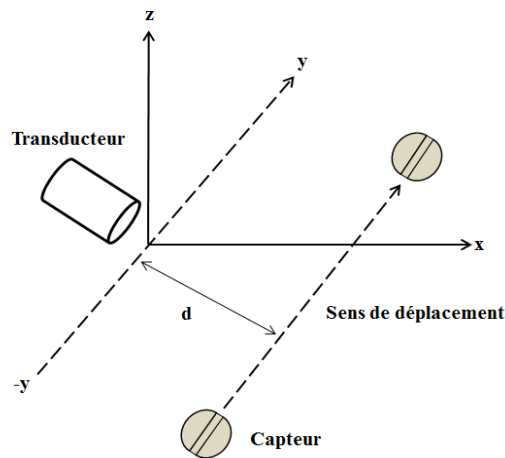


Figure III. 14 : Déplacement horizontal du capteur suivant l'axe y à position fixe du transducteur

La divergence du faisceau acoustique pour une distance de 50 cm est d'environ 18 cm. Plusieurs mesures ont été effectuées pour plusieurs positions sur l'axe entre -15 cm et 15 cm, nous avons choisi une plage de 30 cm afin de dépasser les bornes de la divergence du faisceau. Les réponses en tension obtenues pour chaque position sont données par la figure III.15. Toutes les tensions récupérées durant ce balayage sont pratiquement identiques, ce qui montre la capacité de notre capteur à transformer les ondes ultrasonores en tension même en éloignant de la direction centrale d'émission de transducteur (à l'extérieur de la divergence).

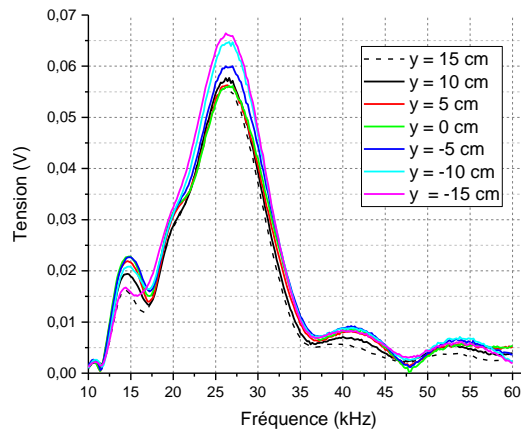


Figure III. 15 : Influence du balayage suivant l'axe y sur la tension récupérée

IV.2.4 Balayage en profondeur à distance constante

Dans le but de voir l'influence de la profondeur du capteur dans l'eau sur la résonance de la sphère et sur l'ordre de grandeur de la tension récupérée, nous avons adopté le même mode opératoire que dans la section IV.2.3 mais dans cette fois on a imposé à la sphère un mouvement vertical pour une plage entre -6 cm et 5 cm.

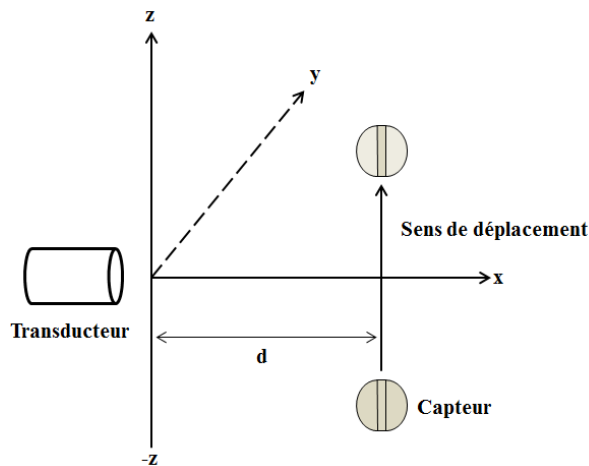


Figure III. 16 : Déplacement vertical du capteur suivant l'axe z à position fixe du transducteur

Les mesures sont effectuées pour plusieurs positions avec un balayage de la profondeur entre -6 cm et 5 cm à l'aide du contrôleur avec trois axes, la réponse en tension a été mesurée pour chaque position. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.17, nous pouvons constater qu'il existe une différence entre les allures de chaque position concernant les amplitudes des pics sur les fréquences de résonance de la sphère. La tension récupérée diminue avec l'augmentation de la profondeur, ce qui reflète l'influence de la profondeur sur la récupération d'énergie liée éventuellement à la pression statique d'eau. En

profondeur la pression augmente, par convergence la contrainte sur la sphère augmente et limite les vibrations de sa structure.

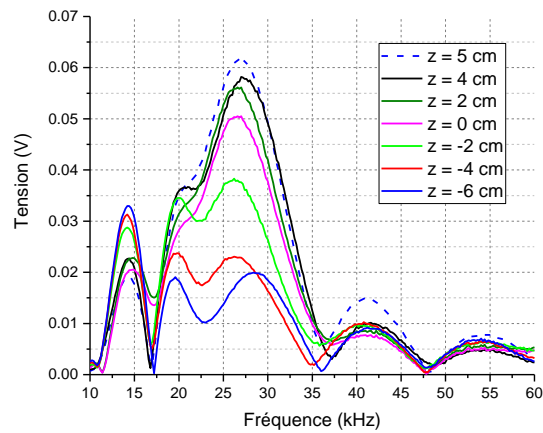


Figure III. 17 : Influence de la profondeur sur la tension récupérée

IV.2.5 Influence de l'angle de rotation à distance constante

Pour compléter la caractérisation de la récupération d'énergie par le capteur sphérique, il est nécessaire de mesurer sa directivité, c.à.d. l'influence de l'angle d'orientation sur la réponse en tension. Premièrement, le transducteur ultrasonore de référence faisant l'origine des trois axes. Le capteur sphérique a été fixé sur l'axe de rotation du contrôleur fournissant un positionnement angulaire dans un plan horizontal perpendiculaire à l'anneau piézoélectrique (figure III.18).

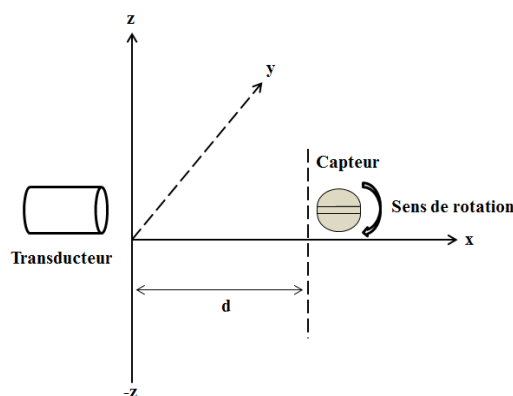


Figure III. 18 : Rotation de la sphère à distance constante avec le transducteur

Notre contrôleur rend une rotation de 360° du résonateur effectivement possible. Ensuite, des mesures ont été effectuées en calculant la réponse en tension en fonction de l'angle de rotation. Deux distances ont été considérées séparément : 15 et 50 cm. Le balayage angulaire

est effectué entre -100° et 100° avec un pas angulaire de 2° . Un équivalent géométrique de la sphère en symétrie axiale a été pris en compte.

Les résultats rapportés si dessous (figures III.19 et III.20) montrent les allures des tensions récupérées en fonction de la fréquence et l'angle de rotation de la sphère dans les deux cas étudiés.

1) Distance $x = 15$ cm

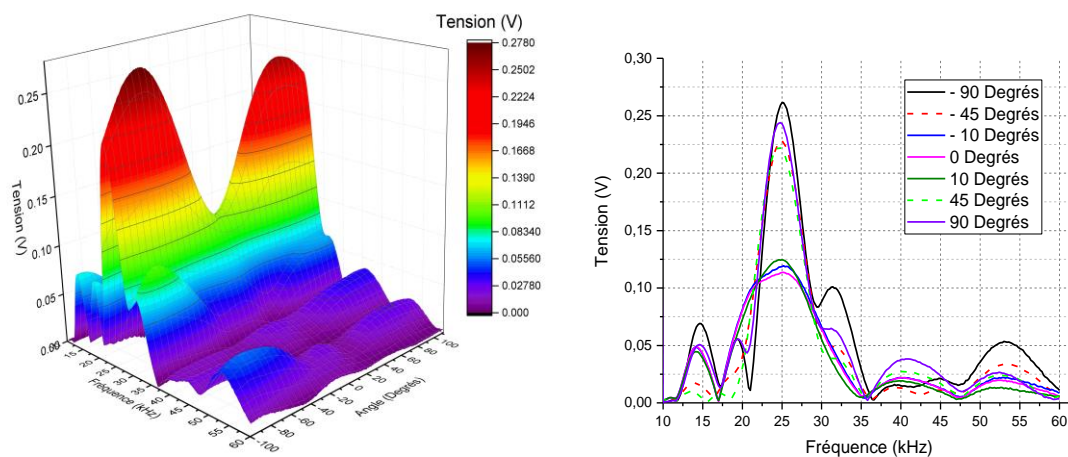


Figure III. 19 : Influence de l'angle de rotation sur l'amplitude de la tension pour $d = 15$ cm

2) Distance $x = 50$ cm

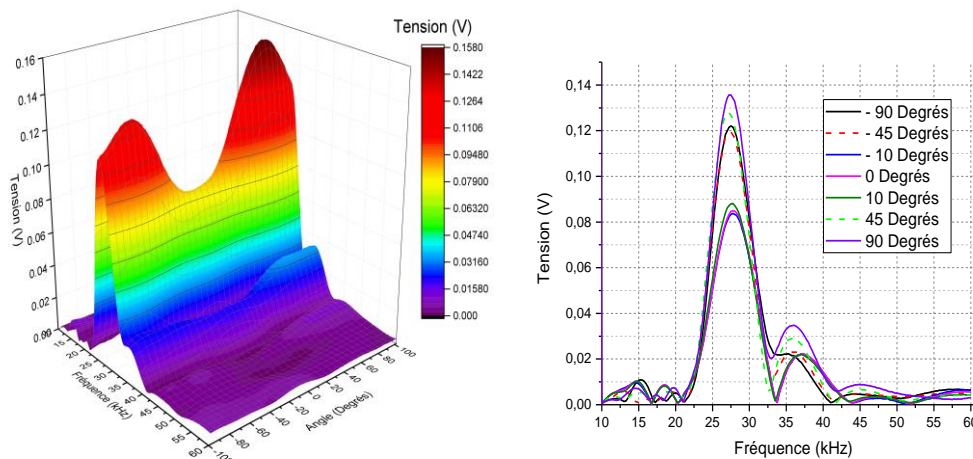


Figure III. 20 : Influence de l'angle de rotation sur l'amplitude de la tension pour $d = 50$ cm

Le maximum de la tension est obtenu sur les fréquences de résonance de la sphère, tandis que pour les angles nous avons remarqué qu'entre 80° et 100° la tension atteint un maximum et un minimum autour de 0° . Cette bande angulaire ($80^\circ - 100^\circ$) est autour de l'anneau piézoélectrique, c.à.d. ce dernier est excité en mode radial, par contre autour de 0°

l'anneau est excité en épaisseur (mode longitudinal). On peut conclure que l'anneau piézoélectrique récupère plus de tension en radial qu'en longitudinal, ce qui est en accord avec les résultats présentés dans le chapitre 2 issus du modèle analytique. Finalement à partir de ces résultats, nous pouvons constater que la courbe est divisé en deux parties bien symétriques par rapport à 0° ($-100^\circ - 0^\circ$ et $0^\circ - 100^\circ$). Il est nécessaire également de noter la symétrie relative des réponses obtenues par rapport à la direction frontale du capteur sphérique (angle = 0°).

IV.2.5.1 Directivité

Les diagrammes de directivité du capteur pour une distance émetteur-résonateur égale à 15 cm sont illustrés sur la figure III.21. Dans ce cas, les diagrammes représentent la tension récupérée pour chaque fréquence suivant l'effet piézoélectrique direct tandis que les diagrammes de directivité déjà présentés dans la figure III.3 sont déterminés en réponse de déplacement suivant l'effet piézoélectrique inverse.

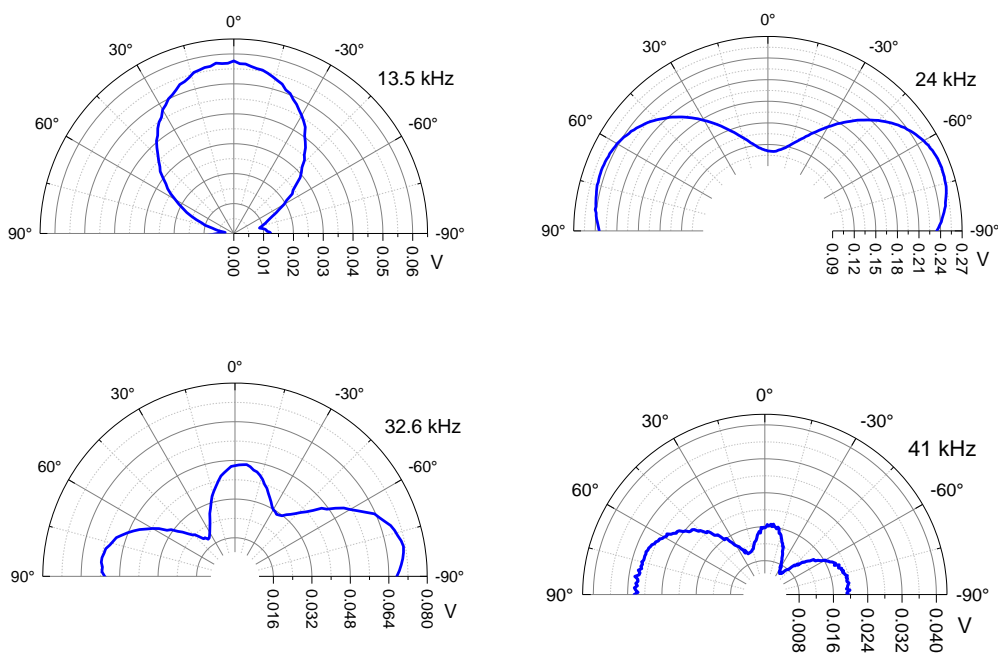


Figure III. 21 : Directivité du capteur en tension récupérée pour les fréquences de résonance

Comme montre la figure III.21 pour la résonance fondamentale, nous avons un seul lobe principal dirigé vers 0° et qui coïncide bien avec les résultats de déplacements. Par contre pour les autres fréquences, il existe plusieurs lobes dans des directions variées. Premièrement on peut constater que ce capteur sphérique est capable de récupérer l'énergie de toutes les directions. Deuxièmement la différence entre les résultats des mesures

hydroacoustiques et celles par vibrométrie laser est due au fait que dans le dernier cas on effectue les mesures en un point spécifié par la position du faisceau laser tandis que dans le premier cas les valeurs mesurées sont intégrées sur toute la surface de la sphère restant en contact avec le milieu liquide.

Malgré le fait que le transducteur sphérique n'est pas omnidirectionnel pour une fréquence quelconque, et à chaque angle d'orientation correspond un maximum d'un certain lobe de diagramme de directivité. Mais on peut supposer qu'il est omnidirectionnel sur l'intégralité de la bande fréquentielle utilisée. Prenant en compte le contexte d'utilisation du transducteur dans les environnements des écoulements liquides fortement turbulents et qui produit des bruits d'énergie mécanique dans une large bande fréquentielle, cela représente un avantage de la sensibilité des réseaux de capteurs sphériques à leur orientation dans l'espace.

IV.2.6 Mesures de la pression acoustique

IV.2.6.1 Mesures par hydrophone

Un hydrophone est un appareil de caractérisation des champs acoustiques en unités physiques absolues dans les applications immergées sous l'eau. Il est caractérisé par deux propriétés très importantes: sa sensibilité à la réception des signaux acoustiques incidents et sa bande fréquentielle d'utilisation dans laquelle il est calibré. En effet, ce genre d'hydrophones piézoélectriques est le plus souvent utilisé et sont caractérisés par une impédance acoustique très proche de celle du milieu de référence: l'eau [72]. Vue la sensibilité constante de ce type d'hydrophones sur la bande fréquentielle d'utilisation, les mesures des champs acoustiques sont assurées avec une grande précision [73].

Afin de tester l'efficacité du capteur sphérique en conversion d'énergie, nous avons utilisé un hydrophone B&K 8103 (figure III.22). C'est un transducteur à haute sensibilité effectuant des mesures acoustiques absolues sur la plage de fréquence de 0,1 Hz à 180 kHz avec une sensibilité de réception de -211 dB à 1V/ μ Pa. Ces caractéristiques globales lui offrent une grande sensibilité par rapport à sa taille, ce qui le rend par conséquent utilisable en laboratoire et en industrie. La réponse haute fréquence de ce type d'hydrophone est particulièrement utile lors des applications acoustiques avancées (cavitation, sous-marins, bains de nettoyage à ultrasons).

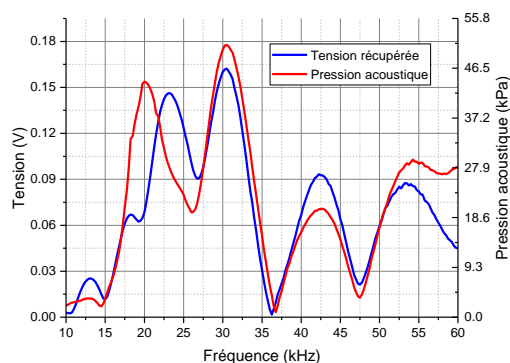


Figure III. 22 : Schématisation d'Hydrophone B&K 8103

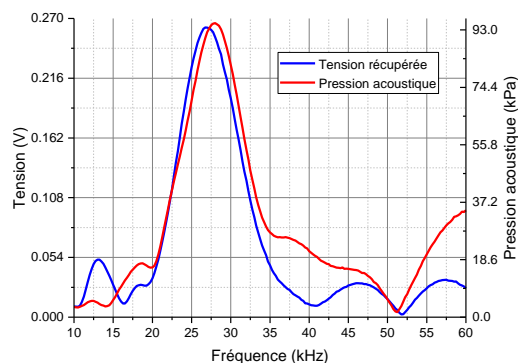
Deux points de vue pratiques, l'hydrophone a été fixé sur l'axe z du contrôleur fournissant un positionnement vertical dans l'espace du travail et sur le même axe du transducteur émetteur. Les mesures ont eu lieu sur trois distances différentes séparant l'hydrophone et le transducteur (15 cm, 30 cm et 50 cm). Les mêmes mesures sont répétées avec la sonotrode. Les projecteurs sont excités par le générateur entre 10 kHz et 60 kHz avec les mêmes conditions opératoires expliquées précédemment. Les signaux reçus par l'hydrophone sont représentés en amplitude fréquentiel et converti en pression par l'intermédiaire du coefficient de conversion de l'hydrophone qui vaut 1,24 V/MPa.

Les figures III.23, III.24 et III.25 présentent les résultats obtenus pour les trois distances. La pression acoustique est tracée sur le même graphe que la tension récupérée par la sphère pour chaque cas. Comme montre la figure III.23, les pressions déterminées par l'hydrophone suivent la même allure que le champ d'émission du transducteur et de la sonotrode (voir figure III.6 et III.7). Tandis que les tensions atteignent des maximums sur les fréquences de résonance de la sphère dans l'eau (figure III.8), ainsi que sur les fréquences de résonance des émetteurs. On peut remarquer encore que le transducteur est plus sensible que la sonotrode, il donne une amplitude supérieure en tension et en pression acoustique, ce qui est en accord avec les résultats de déplacement obtenus avec le vibromètre (figure III.7).

1) Distance $x = 15$ cm



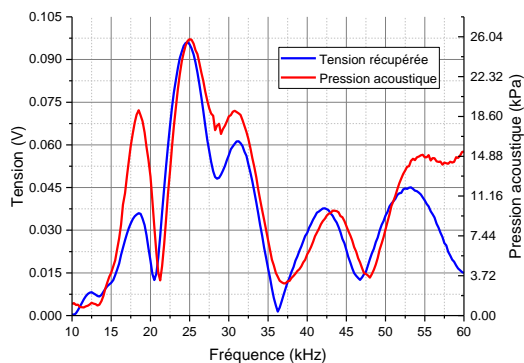
(a)



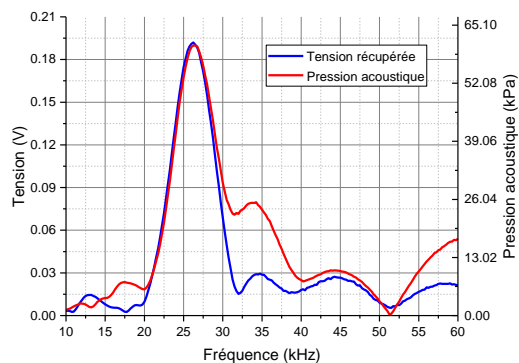
(b)

Figure III. 23 : Tension récupérée et pression acoustique à $d = 15$ cm pour sonotrode (a) et transducteur (b)

2) Distance $x = 30$ cm



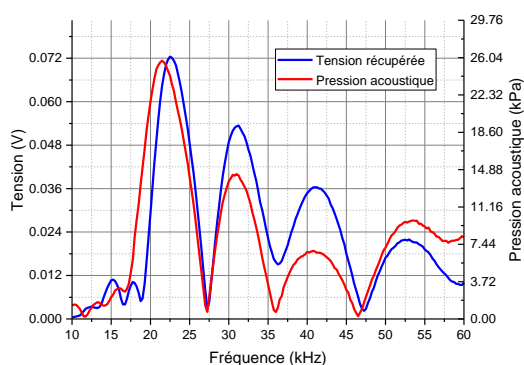
(a)



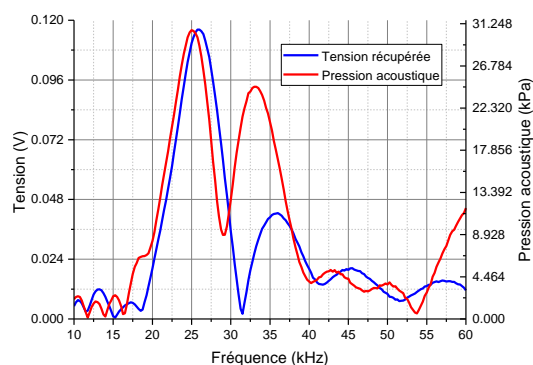
(b)

Figure III. 24 : Tension récupérée et pression acoustique à $d = 30$ cm pour sonotrode (a) et transducteur (b)

3) Distance $x = 50$ cm



(a)



(b)

Figure III. 25 : Tension récupérée et pression acoustique à $d = 50$ cm pour sonotrode (a) et transducteur (b)

IV.2.6.2 Coefficients de conversion d'énergie

Une dernière étape de cette partie est consacrée à la détermination de l'ordre de grandeur des coefficients de conversion de la pression acoustique en tension électrique. Dans ce but, la tension récupérée par le transducteur et la sonotrode est calculée pour trois angles de rotation (0° , 45° et 90°) et pour les trois distances prises (15 cm, 30 cm et 50 cm). Ensuite, une moyenne en tension a été appliquée. Par ailleurs, la pression acoustique mesurée par l'hydrophone est tracée sur les trois distances pour les deux sources acoustiques. Les coefficients de conversion sont ramenés à un coefficient du rapport du maximum de la tension sur le maximum de la pression acoustique pour une fréquence quelconque. Nous nous sommes intéressés seulement par les fréquences de résonance de la capsule sphérique (13,5 kHz, 24 kHz, 32,5 kHz et 41 kHz).

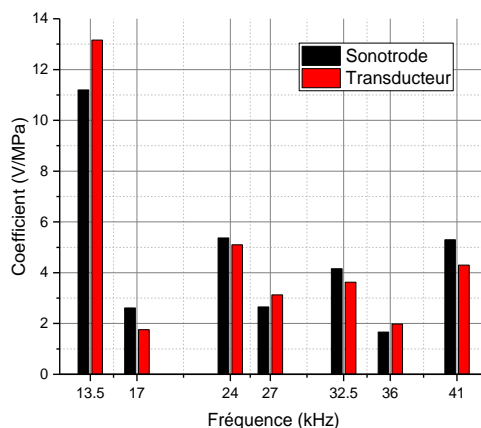


Figure III. 26 : Coefficients de conversion d'énergie pour les fréquences de résonance du capteur et des fréquences intermédiaires

La figure III.26 présente les résultats obtenus par les deux sources acoustiques pour les quatre fréquences de résonance ainsi que pour trois fréquences intermédiaires (17 kHz et 27 kHz et 36 kHz). Les coefficients obtenus sur les fréquences de résonances sont plus grands que ceux obtenus sur les fréquences intermédiaires. Par contre l'efficacité du capteur sphérique sur les fréquences intermédiaires reste encore acceptable. De plus, l'ordre de grandeur de coefficients obtenus par le transducteur est très proche de celles obtenus par la sonotrode sur toutes les fréquences prises. On a remarqué encore que le coefficient le plus grand est obtenu sur la première fréquence de résonance (13,5 kHz), ce qui est en accord avec les résultats de déplacements.

La figure III.27 montre les erreurs calculées sur la totalité des fréquences étudiées. Le coefficient moyen entre le transducteur et la sonotrode a été calculé pour chaque fréquence. Ensuite, l'intervalle de confiance a été déterminée sur chaque coefficient selon une loi de probabilité (loi de Student) avec une probabilité de 95% [74]. Normalement pour un grand nombre de mesures, ils utilisent la loi de distribution Normale. Tandis que pour un nombre moyen de mesure la loi normale est convergée vers la loi de Student, c.à.d. cette dernière est une approximation de la loi Normale. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé cette loi pour déterminer l'intervalle de confiance.

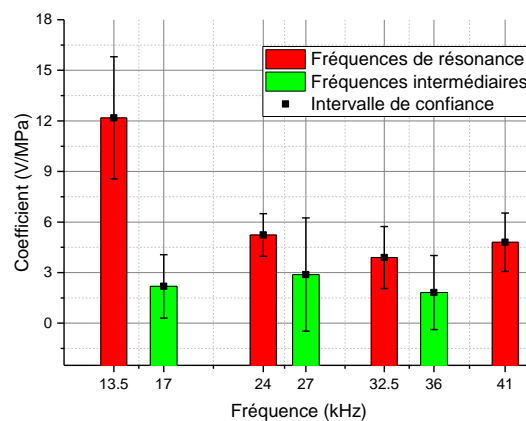


Figure III. 27 : Intervalle de confiance pour les coefficients de conversion d'énergie

V. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était l'application de la technique de récupération d'énergie dans un cas réel afin de démontrer l'efficacité du capteur sphérique en conversion d'énergie.

Dans un premier temps, une étude expérimentale a été effectuée pour déterminer les déplacements, les fréquences de résonance et les diagrammes de directivité d'un transducteur sphérique réel. Cette étude a été effectuée à l'aide d'une technique de vibrométrie laser. La deuxième étape a été une étude expérimentale concernant les déplacements et les champs de pression acoustique pour les deux sources acoustiques que l'on a utilisées dans les expériences (transducteur et sonotrode).

Ensuite dans la dernière étape de ce travail, un dispositif expérimental a été mis en place ce qui a permis de vérifier la faisabilité de la technique de récupération d'énergie par ce transducteur sphérique et de la caractériser. Dans cette phase expérimentale, plusieurs

facteurs sur la tension récupérée sont étudiés : atténuation, profondeur, position horizontale et angle de rotation.

Il a été démontré que malgré le fait que le transducteur sphérique ne soit pas omnidirectionnel, pour chaque angle d'orientation correspond un maximum dans le diagramme de directivité. Dans le contexte d'utilisation du transducteur dans les écoulements liquides turbulents en produisant du bruit d'énergie mécanique dans une large bande fréquentielle, cela représente un avantage de la sensibilité des réseaux des capteurs sphériques à leur orientation dans l'espace. Ce fait a été confirmé par les mesures de coefficient de conversion d'énergie vibratoire dans une large bande fréquentielle et pour différents angles d'orientation de la sphère.

Finalement, la capacité de conversion d'énergie du transducteur sphérique a été démontrée par le calcul des coefficients de conversion de l'énergie acoustique en énergie électrique dans le but d'assurer l'autonomie énergétique de circuits de mesure des paramètres d'environnement de ce capteur sphérique. Les maximums des coefficients sur les fréquences de résonance montrent une bonne concordance avec des pics de résonance de la résistance électrique du capteur mesuré par analyseur d'impédance.

Chapitre IV : Etude et réalisation du système d'extraction d'énergie en vue de l'autonomie du capteur sphérique

I. Introduction	86
II. Besoins énergétiques des systèmes autonomes	87
III. Circuit d'extraction d'énergie BQ25504.....	89
III.1 Description.....	89
III.2 Principe de fonctionnement	91
III.2.1 Suivi du point maximal de la puissance (MPPT).....	91
III.2.2 Protection de la batterie contre les sous-tensions.....	92
III.2.3 Protection de la batterie contre les surtensions	92
III.2.4 Tension de la batterie dans la plage de fonctionnement (VBAT_OK)	93
III.3 Modes de fonctionnement du circuit.....	93
IV. Modélisation du circuit d'extraction d'énergie.....	95
V. Validation expérimentale du circuit d'extraction d'énergie.....	96
VI. Etude expérimentale en cuve et validation du principe de fonctionnement	98
VI.1 Installation expérimentale.....	98
VI.2 Résultats et discussion	100
VI.3 Bilan énergétique et puissance récupérée	101
VII. Conclusion.....	103

I. Introduction

L'énergie électrique générée par les générateurs piézoélectriques n'est pas utilisable directement pour charger une batterie ou d'alimenter une charge. Un circuit électrique de récupération et de traitement d'énergie est obligatoire. Dans la plupart des cas classiques, un redresseur AC/DC puis un convertisseur DC/DC sont utilisés. Parallèlement, de nombreux chercheurs s'intéressent à l'utilisation de circuits d'extraction non linéaires pour optimiser la puissance électrique récupérée. Notamment, on peut citer les techniques SCEI (Synchronous Charge Extraction Interface) et SSHI (Synchronized Switch Harvesting Interface) qui apportent des améliorations significatives aux systèmes de récupération d'énergie piézoélectrique à base de vibrations [75].

La problématique de la gestion de l'énergie a été largement étudiée dans la communauté scientifique des systèmes électroniques. Cette problématique est souvent liée à la récupération d'énergie vibratoire ambiante qui impose plusieurs contraintes qui limitent l'évolution des circuits électriques de gestion de la puissance, à savoir :

- Développement d'une électronique qui s'adapte aux très faibles puissances récupérées.
- Fonctionnement à des tensions faibles (quelque mV) ou élevées (dizaines de V).
- Utilisation des charges et des décharges d'un ou de plusieurs élément de stockage, en assurant en même temps leur protection contre une surcharge ou décharge profonde.
- La production d'une ou de plusieurs tension régulées afin d'alimenter des systèmes électriques autonomes.

Dans ce chapitre nous présentons une architecture d'extraction et de conversion de l'énergie électrique. Ce circuit d'extraction est basé sur un convertisseur élévateur de tension à ultrabasse consommation sous le nom BQ25504-Texas Instruments. Dans un premier temps nous présenterons brièvement le contexte des systèmes électroniques et leurs consommations énergétiques. Ensuite, nous donnerons une description et le mode de fonctionnement du circuit d'extraction d'énergie utilisé dans ce travail. Des simulations du dispositif complet ont été effectuées et validées expérimentalement. Ce chapitre conclura sur la validation expérimentale en situation réelle de la technique de récupération d'énergie complète avec le circuit d'extraction et de stockage de l'énergie afin de démontrer le fonctionnement correct de ce principe en assurant l'autonomie énergétique de notre capteur sphérique.

II. Besoins énergétiques des systèmes autonomes

Beaucoup de dispositifs peuvent être alimentés par de faibles puissances, en particulier les capteurs et les implants médicaux. Ceux-ci ont besoin de quelques microwatts pour fonctionner. Les appareils mobiles tels que les lecteurs MP3, les téléphones portables et des systèmes de localisation GPS sont quant à eux dans l'intervalle énergétique 10 mW - 1 W. Ces équipements peuvent également être alimentés par des récupérateurs munis de dispositifs de stockage d'énergie. De nos jours, la tendance des technologies est de réduire la consommation en énergie électrique pour les systèmes électroniques afin d'augmenter leur autonomie énergétique.

Systèmes électroniques	Consommations énergétiques
Lecteur MP3	50 mW – 70 mW
Récepteur GPS	70 mW
Montre	1 – 5 μ W
Accéléromètre 3 axes	30 μ W
Capteur de température	30 μ W
Récepteur RF	30 mW – 50 mW
Emetteur RF	40 mW – 90 mW
Microcontrôleur (actif)	1 mW
Microcontrôleur (standby)	3 μ W
Neuro-stimulateur	50 μ W
Pacemaker	8 μ W

Tableau IV. 1 : Puissances électriques consommées par des systèmes électroniques [76]

Cette tendance fait que les consommations énergétiques présentées dans le tableau IV.1 sont en constante diminution ce qui rend ses dispositifs électroniques de plus en plus compatibles avec la récupération d'énergie vibratoire. Il faut bien noter que ces puissances consommées sont données dans le cas où les systèmes électroniques travaillent en permanence, tandis que les modes de fonctionnement intermittent d'un système (quelques secondes ou quelques minutes) diminuent la consommation moyenne de ces systèmes. Il est nécessaire donc de stocker l'énergie récupérée pendant les séquences où le système est mis en

veille et puis d'alimenter le dispositif électronique à partir d'un niveau suffisant d'énergie emmagasinée.

Pour les capteurs autonomes, une estimation de l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie nécessaire pour effectuer une mesure complète est comprise entre 50 μJ et 100 μJ [77]. Cette mesure est divisée en trois parties: premièrement la mesure avec le capteur, ensuite le traitement des informations par le microcontrôleur et la dernière étape est la transmission des données sans fils au récepteur.

En outre, en ce qui concerne les budgets de puissance des systèmes électroniques, il existe plusieurs appareils/systèmes/circuits ayant une faible consommation d'énergie et qui peuvent être alimentés directement par notre récupérateur d'énergie. Par exemple, Oshima et al.[78] ont présenté une technologie de circuit nano-watt pour un nœud constitué d'un très petit capteur avec récupérateur d'énergie. La puissance consommée par ce circuit est de 0.7 nW. En plus, Shimamura et al. [79] ont indiqué une gestion de l'énergie à base de MEMS pour les nœuds de capteurs sans fil. La consommation en énergie de ce système est de 2 nW. Conformément à ces exemples, notre récupérateur d'énergie à base de capteurs sphériques pourrait fournir une énergie suffisante à ces appareils/systèmes/circuits à très faible consommation d'énergie.

	Notre système	H. Park et al.[80]	J.C. Park et al.[81]	J.C. Park et al.[82]	W.J. Su et al.[83]	B. Ando et al.[84]	Y. Zhu et al.[85]	A. G. Fowler et al.[86]
Fonctionnalités	Mécanisme simple	Mécanisme simple	Mécanisme simple	Mécanisme simple	Mécanisme multiple	Mécanisme multiple	Mécanisme multiple	Mécanisme multiple
Nombre d'axes	Trois axes	Deux axes	Deux axes	Deux axes	Trois axes	Trois axes	Trois axes	Trois axes
Fréquence	10 - 60 kHz	116 Hz	40 Hz	115 Hz	10 Hz	370 Hz	38 kHz	36 kHz
Résistance de charge	25 kΩ	1 M Ω	100 k Ω	19,8 k Ω	1 M Ω	330 k Ω	100 Ω	1 M Ω
Puissance récupérée	0,4 - 3,26 μW	1 nW	1,4 mW	1 nW	25 μW	5,6 μW	22 nW	12,6 nW

Tableau IV. 2 : Caractéristiques et performances de la récupération d'énergie multi-axes

Pour mettre en évidence notre contribution, nous avons effectué une comparaison entre notre système sphérique et des travaux existants dans la littérature (Tableau IV.2). Ce tableau montre les caractéristiques et les performances de plusieurs systèmes pour la

récupération d'énergie. En outre, lors de la comparaison de la densité de puissance, la densité de puissance de notre récupérateur d'énergie et pour les autres récupérateurs représentés sont comparables et à un niveau similaire.

III. Circuit d'extraction d'énergie BQ25504

III.1 Description

Le dispositif BQ25504 est le premier d'une nouvelle famille de solutions intelligentes pour la gestion de l'énergie récupérée qui est bien adaptée aux besoins particuliers des applications à très faible puissance. L'appareil est spécifiquement conçu pour acquérir et gérer efficacement des puissances allant du microwatt (μW) au milliwatt (mW) issues d'une variété de sources DC comme des générateurs piézoélectriques, photovoltaïques ou thermiques. Le BQ25504 est le premier dispositif de son genre à mettre en œuvre un convertisseur/chargeur amplificateur hautement efficace destiné aux produits et aux systèmes, tels que les réseaux de capteurs sans fil ayant une puissance et des exigences opérationnelles strictes. Le premier étage de ce circuit est un convertisseur/chargeur DC-DC noté « boost » qui ne nécessite que des micro-générateurs d'alimentation pour commencer à fonctionner.

Ce convertisseur boost peut être démarré avec une tension d'entrée V_{IN} aussi basse que 330 mV et, une fois démarré, il peut continuer à récupérer de l'énergie jusqu'à $V_{\text{IN}} = 80$ mV.

Le BQ25504 implémente également un réseau d'échantillonnage de suivi du point de puissance maximum programmable pour optimiser le transfert de puissance dans l'appareil. L'échantillonnage de la tension d'entrée du circuit $V_{\text{IN_DC}}$ est programmé à l'aide de résistances externes et maintenu avec un condensateur externe (C_{REF}).

Par exemple, lors de l'utilisation avec des cellules solaires fonctionnant au point de puissance maximum (MPP) de 80% de leur tension à vide, le diviseur de tension pourra être réglé sur 80% de la tension $V_{\text{IN_DC}}$ et le réseau contrôlera le $V_{\text{IN_DC}}$ pour fonctionner près de cette tension de référence échantillonnée. Alternativement, une tension de référence externe peut être fournie par une MCU pour produire un algorithme MPPT plus complexe.

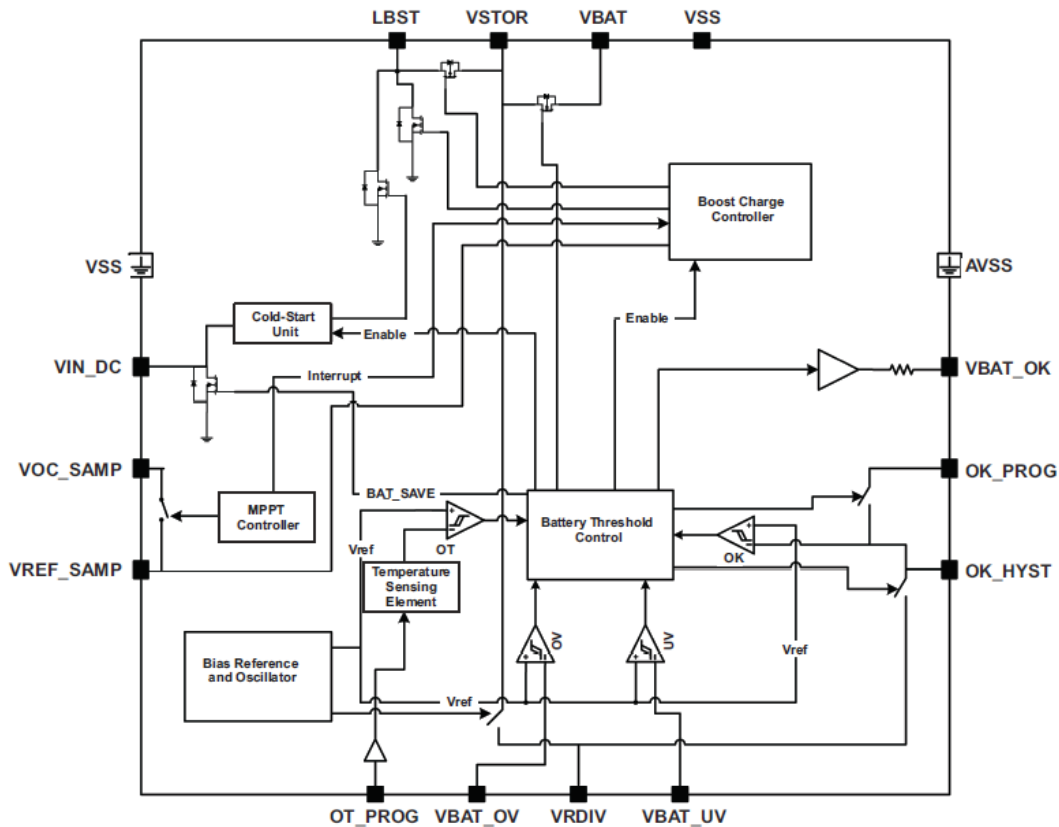


Figure IV. 1 : Architecture du circuit d'extraction BQ25504

Le BQ25504 a été conçu avec la flexibilité qui lui permet de supporter une variété d'éléments de stockage d'énergie. La disponibilité des sources à partir de laquelle les récupérateurs extraient leur énergie peut souvent être sporadique ou varier dans le temps. Les systèmes nécessiteront généralement un certain type d'élément de stockage d'énergie, comme une batterie rechargeable, un super condensateur ou un condensateur conventionnel. L'élément de stockage garantit une alimentation constante en cas de besoin pour les systèmes.

Pour éviter d'endommager l'élément de stockage, notamment lorsqu'il s'agit d'une batterie, les tensions maximales et minimales sont surveillées par rapport à un niveau bas (Under Voltage UV) et une surtension (Over Voltage OV) programmés par l'utilisateur.

Pour aider les utilisateurs dans la gestion stricte de leur budget d'énergie, le BQ25504 génère un signal indiquant que la batterie a atteint un niveau bas critique pour le microprocesseur alimenté par le circuit de récupération. Cette alarme doit déclencher l'effacement des courants de charge pour empêcher le système d'entrer dans un mode de sous-alimentation. Les seuils OV, UV et la batterie sont programmés indépendamment.

Le tableau IV.3 présente l'ordre de grandeur des caractéristiques électriques et thermiques utilisés dans la conception de ce circuit de stockage de l'énergie. Pour un bon

fonctionnement de ce circuit et par sécurité, il faut respecter les limites d'utilisation des grandeurs définies.

	MIN	NOMMAX		Unité
$V_{IN(DC)}$ Tension d'entrée DC dans VIN_DC	0,13	3		V
VBAT Plage de la tension de la batterie	2,5	5,25		V
C_{HVR} Capacité d'entrée	4,23	4,7	5,17	μF
C_{STOR} Capacité de stockage	4,23	4,7	5,17	μF
C_{BAT} Capacité équivalente de la batterie	100			μF
C_{REF} Capacité de stockage de référence échantillonnée	9	10	11	nF
$R_{OC1} + R_{OC2}$ Résistance totale pour le réglage de la référence MPPT	18	20	22	$M\Omega$
$R_{OC1} + R_{OC2} + R_{OC3}$ Résistance totale pour le réglage de la tension de référence	9	10	11	$M\Omega$
$R_{UV1} + R_{UV2}$ Résistance totale pour le réglage de la tension de référence	9	10	11	$M\Omega$
$R_{OV1} + R_{OV2}$ Résistance totale pour le réglage de la tension de référence	9	10	11	$M\Omega$
L_{BST} Inductance d'entrée	19,8	22	24,2	μH
T_A Température ambiante libre	-40	85		$^{\circ}C$
T_J Température de jonction	-40	105		$^{\circ}C$

Tableau IV. 3 : Conditions de fonctionnement recommandées.

III.2 Principe de fonctionnement

III.2.1 Suivi du point maximal de la puissance (MPPT)

Le suivi du point maximal de la puissance est implémenté afin de maximiser la puissance extraite d'une source d'énergie. Le convertisseur boost adapte indirectement l'impédance d'entrée du chargeur principal en réglant la tension d'entrée du chargeur présente sur l'entrée VIN_DC en référence à la tension échantillonnée stockée sur la broche VREF_SAMP. Le circuit MPPT obtient une nouvelle tension de référence tous les 16 s en désactivant périodiquement le chargeur pendant 256 ms et en échantillonnant une fraction de la tension de circuit ouvert (VOC) du récupérateur. Le rapport exact pour MPPT peut être optimisé pour s'adapter aux caractéristiques de la source d'entrée en connectant les résistances externes R_{OC1} et R_{OC2} entre VIN_DC et la masse avec un point milieu par rapport à VOC_SAMP. Le circuit MPPT interne et l'échantillonnage périodique de VIN_DC peuvent

être désactivés en connectant la broche VOC_SAMP à VSTOR. Une tension de référence externe peut être amenée à la broche VREF_SAMP.

$$VREF_SAMP = VIN_DC(OC) \cdot \left(\frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \right) \quad IV.1$$

Le convertisseur boost régulera alors VIN_DC à la référence fournie de l'extérieur. Si la régulation d'entrée n'est pas souhaitée VREF_SAMP peut être lié à la masse.

III.2.2 Protection de la batterie contre les sous-tensions

Pour empêcher les batteries d'être profondément déchargées et endommagées, un seuil de sous-tension (VBAT_UV) est réglé à l'aide de résistances externes. La tension de seuil VBAT_UV lorsque la tension de la batterie diminue est donnée par :

$$VBAT_UV = VBIAS \cdot \left(1 + \frac{R_{UV1}}{R_{UV2}} \right) \quad IV.2$$

Le constructeur recommande de ne pas dépasser $R_{UV1} + R_{UV2} = 10 \text{ M}\Omega$. Le seuil de sous-tension quand la tension de la batterie augmente est VBAT_UV plus une tension d'hystérésis interne indiquée par VBAT_UV_HYST. Pour que la fonction VBAT_UV fonctionne correctement, la charge doit être connectée à la broche VSTOR alors que l'élément de stockage est connecté à la broche VBAT. Une fois que la tension de la broche VSTOR dépasse le seuil (VBAT_UV + VBAT_UV_HYST), les broches VSTOR et VBAT sont effectivement court-circuitées. L'interrupteur reste fermé jusqu'à ce que la tension de la broche VSTOR tombe en dessous du seuil VBAT_UV. Le seuil VBAT_UV doit être considéré comme un système de sécurité. La charge du système doit être supprimée ou réduite en fonction du seuil VBAT_OK qui doit être réglé au-dessus du seuil VBAT_UV.

III.2.3 Protection de la batterie contre les surtensions

Pour éviter que les batteries ne soient exposées à des tensions de charge excessives et pour éviter de surcharger les éléments de stockage capacitif, un niveau de seuil de surtension (VBAT_OV) est réglé à l'aide de résistances externes. C'est aussi à cette valeur de tension que le chargeur régule la broche VSTOR/VBAT lorsque l'entrée a une puissance suffisante. Le seuil VBAT_OV lorsque la tension de la batterie augmente est donné par :

$$VBAT_OV = \frac{3}{2} \cdot VBIAS \cdot \left(1 + \frac{R_{OV1}}{R_{OV2}} \right) \quad IV.3$$

Là aussi, le constructeur recommande de ne pas dépasser $R_{OV1} + R_{OV2} = 10 \text{ M}\Omega$. Le seuil de surtension lorsque la tension de la batterie diminue est donné par $(\text{VBAT_OV} - \text{VBAT_OV_HYST})$. Une fois que la tension à la batterie atteint le seuil VBAT_OV , le convertisseur boost est désactivé. Le chargeur recommence une fois que la tension de la batterie diminue de VBAT_OV_HYST . En cas d'énergie d'entrée excessive, la tension de la broche VBAT ondulera entre les niveaux VBAT_OV et $(\text{VBAT_OV} - \text{VBAT_OV_HYST})$.

Remarque : Si VIN_DC est supérieur à VSTOR et que VSTOR est supérieur à VBAT_OV , l'entrée VIN_DC est connectée à la masse avec une petite résistance pour arrêter la charge de la batterie ou du condensateur. Il est essentiel que, si ce cas se produit, la source connectée à VIN_DC doit être d'impédance supérieure à 20Ω et non une source de faible impédance.

III.2.4 Tension de la batterie dans la plage de fonctionnement (VBAT_OK)

L'utilisateur est capable de régler une tension programmable indépendante des réglages de surtension et de sous-tension pour indiquer si la tension VSTOR est à un niveau acceptable. Lorsque la tension de la batterie diminue, le seuil est défini par :

$$\text{VBAT_OK_PROG} = \text{VBIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}}\right) \quad \text{IV.4}$$

Lorsque la tension de la batterie augmente, le seuil est défini par :

$$\text{VBAT_OK_HYST} = \text{VBIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}}\right) \quad \text{IV.5}$$

Avec $R_{OK1} + R_{OK2} + R_{OK3} = 10 \text{ M}\Omega$.

III.3 Modes de fonctionnement du circuit

Le BQ25504 dispose de trois modes de fonctionnement: démarrage à froid, chargeur principal activé et arrêt thermique. Le circuit de démarrage à froid est essentiellement un convertisseur avec un rendement inférieur par rapport au chargeur principal. Aucune autre fonction ne fonctionne pendant l'opération de démarrage à froid. Le but du circuit de démarrage est de charger VSTOR à une valeur supérieure à VSTOR_CHGEN afin que le chargeur principal puisse fonctionner. Lorsqu'un élément de stockage est initialement attaché à VBAT (Figure IV.2), le récupérateur peut fournir une tension supérieure à VIN (CS) et une puissance totale au moins PIN (CS). En supposant une charge ou une fuite minimale du

système à VSTOR et VBAT, le circuit de démarrage à froid peut charger VSTOR au-dessus de VSTOR_CHGEN.

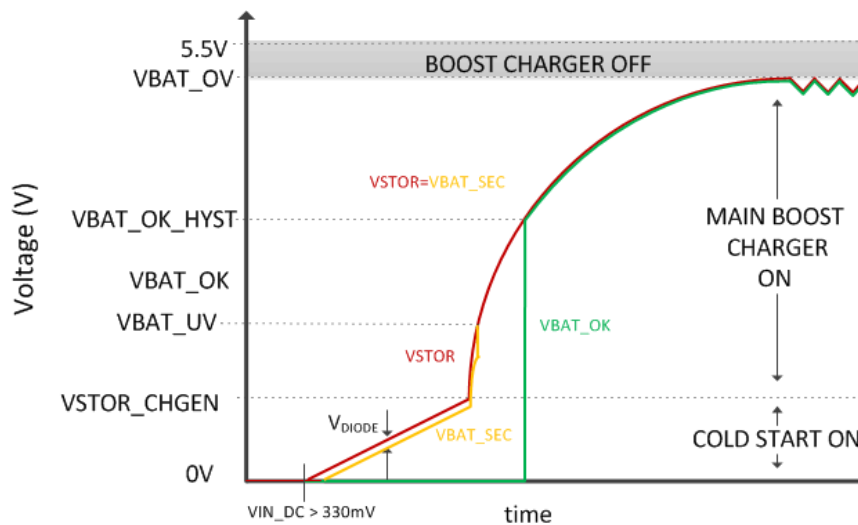


Figure IV. 2 : Les différentes phases de fonctionnement du circuit de récupération.

Dans le deuxième mode, le chargeur principal est activé si les conditions $VSTOR > VSTOR_CHGEN$ et $VIN_DC > VIN(DC)$ sont remplies. Une fois que VSTOR est au-dessus de VSTOR_CHGEN, le chargeur principal utilise la modulation de fréquence d'impulsion (PFM) pour réguler la tension à VIN_DC à une valeur proche de la tension de référence souhaitée. La tension de référence est définie par le schéma de contrôle MPPT. La régulation de la tension d'entrée est obtenue en transférant la charge de l'entrée à VSTOR uniquement lorsque la tension d'entrée est supérieure à la tension sur la broche VREF_SAMP. Le courant à travers l'inductance est commandé par un circuit de détection de courant interne. Le chargeur est désactivé lorsque la tension sur VSTOR atteint le seuil VBAT_OV pour protéger la batterie connectée à VBAT contre une surcharge.

Finalement le troisième mode fonctionnel est l'arrêt thermique destiné à protéger les batteries de températures trop élevées. L'application doit fournir cette protection de la batterie et s'assurer que la température ambiante ne soit jamais supérieure à la plage de fonctionnement prévue de 85 °C. Le BQ25504 utilise un capteur de température intégré pour surveiller la température de jonction du circuit.

IV. Modélisation du circuit d'extraction d'énergie

Dans cette partie, nous nous proposons de décrire la simulation du circuit d'extraction d'énergie utilisé dans notre projet (BQ25504). Cette simulation va nous permettre de valider la faisabilité de ce circuit électrique et de démontrer son efficacité à extraire la puissance à partir des vibrations ambiantes d'autre part. Les simulations sont effectuées sous SPICE en utilisant le logiciel TINA-TI 9.0 de Texas Instruments. Le schéma complet du dispositif est présenté sur la figure IV.3.

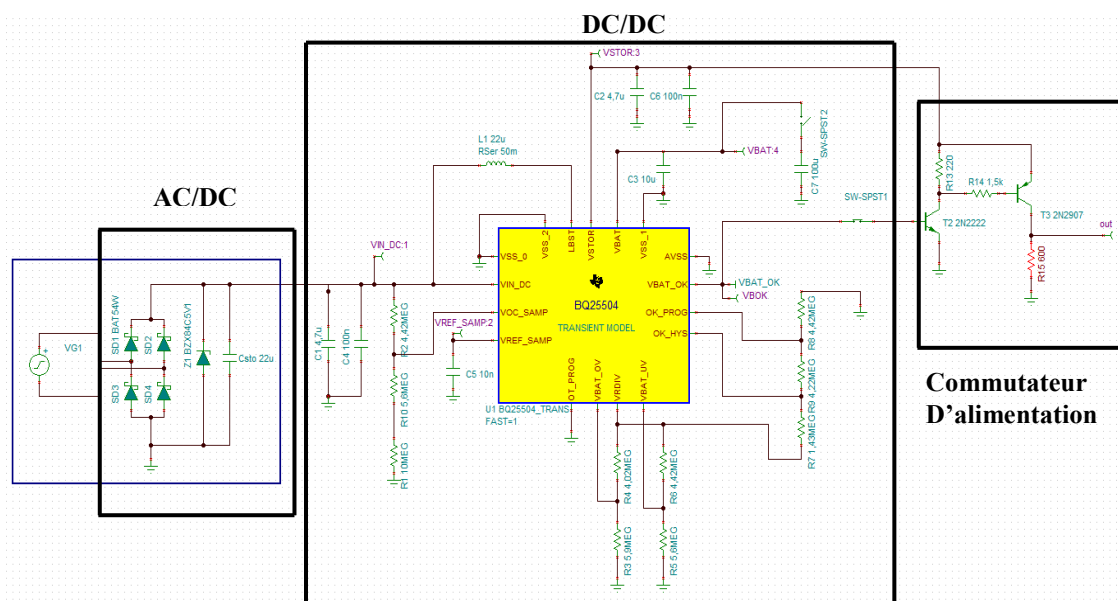


Figure IV. 3 : Schéma complet du circuit de gestion de l'énergie

Nous distinguons trois parties composant le système:

1. Un premier bloc fonctionnel est le convertisseur AC/DC constitué d'un pont de Graetz à diodes Schottky. Ces diodes ont la particularité d'être rapides avec une faible tension de seuil : 0,3 – 0,4 V. Le circuit est muni également d'un condensateur de filtrage et d'une diode Zener de protection, limitant les pointes de tension à 5V.
2. Un deuxième étage constituant le système de traitement d'énergie lui-même (BQ25504) dont le fonctionnement a été décrit dans le paragraphe précédent.
3. Finalement, nous avons ajouté un circuit de commutation permettant d'activer l'alimentation du circuit d'émission du capteur (Microcontrôleur connecté sur la broche OUT) lorsque l'énergie stockée dans le circuit d'extraction le permet.

Pour la simulation, l'élément piézoélectrique est remplacé par un générateur de tension qui produit une tension sinusoïdale d'amplitude 1 V (VG1). La figure IV.4 montre les évolutions de différentes tensions du circuit d'extraction d'énergie. La tension redressée VIN_DC à la sortie du convertisseur AC/DC atteint une valeur maximale environ 800 mV. Les deux tensions VBAT et VSTOR aux bornes du condensateur de stockage de l'énergie (C_{STOR}) croissent de 0 V jusqu'à 3 V pendant une durée de 2 s. Une fois le niveau de 3 V est obtenu, la sortie VBOK (VBAT_OK) passe à 1, et VSTOR est appliqué au microcontrôleur pilotant le circuit d'émission du capteur. Pendant le fonctionnement de ce circuit, les tensions VSTOR et VBAT diminues un peu, puis le condensateur (C_{STOR}) se recharge de nouveau impliquant l'augmentation de VSTOR et VBAT de façon cyclique.

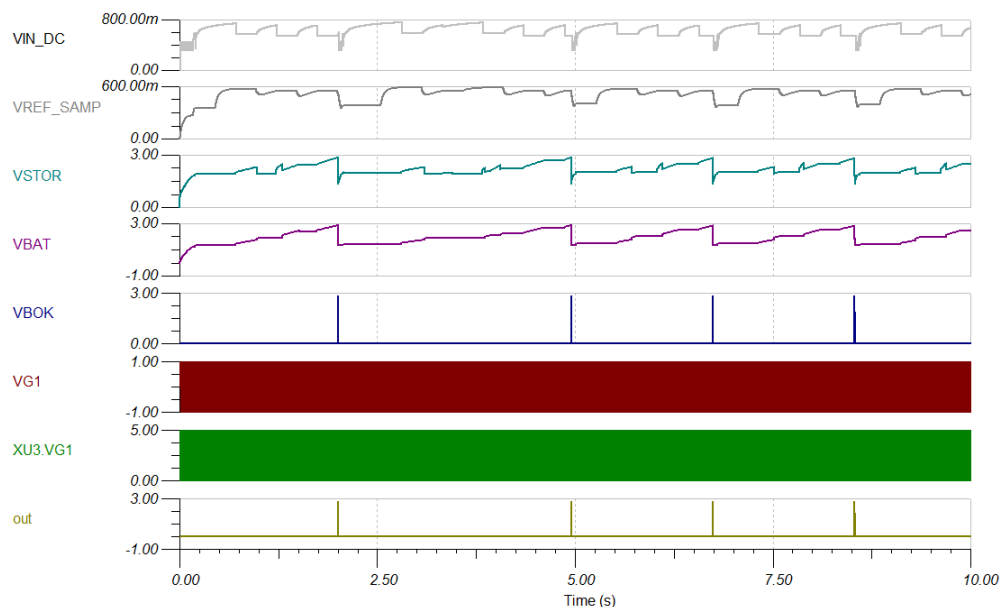


Figure IV. 4 : Evolutions des différentes tensions dans le circuit de gestion d'énergie

V. Validation expérimentale du circuit d'extraction d'énergie

Pour démontrer la faisabilité de la technique de récupération d'énergie vibratoire, et dans l'objectif de valider le principe de fonctionnement du circuit d'extraction d'énergie avec l'électronique embarquée du capteur sphérique, nous avons mis en place un dispositif expérimental complet avec le circuit électrique d'extraction et de stockage de l'énergie et l'électronique embarquée du capteur. La figure IV.5 illustre le dispositif expérimental de récupération d'énergie vibratoire composé de quatre blocs.

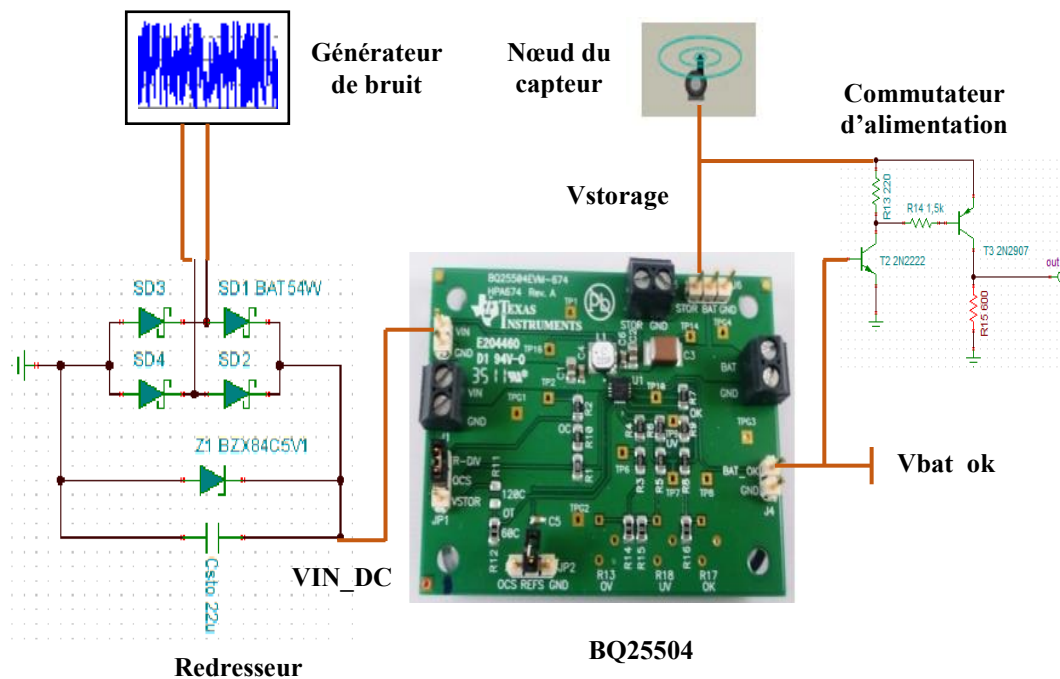


Figure IV. 5 : Schéma du système de récupération d'énergie avec le circuit d'extraction

Le premier bloc correspond à un générateur de bruit qui permet du signal de bruit issu du transducteur piézoélectrique. Le deuxième bloc correspond à la redresseur double alternance à diodes Schottky une diode Zener de protection et un condensateur. Le rôle de ce bloc est d'assurer une conversion AC/DC, filtrer (pré-stockage d'énergie) et de protéger l'entrée du récupérateur contre les surtensions. Le troisième bloc comporte le circuit de traitement et de stockage d'énergie (BQ25504) avec un circuit de commutation de l'alimentation. Ce circuit comporte un convertisseur DC/DC qui permet de produire une tension régulée sur une charge électrique (condensateur de stockage et circuit alimenté). Ce circuit permet d'accumuler l'énergie dans des condensateurs et une fois un niveau suffisant obtenu, de transférer cette énergie vers la charge. L'électronique du capteur représenté par le bloc 4, connecté à la capacité de stockage du circuit d'extraction (C_{STOR}). Lorsque la tension atteint un niveau suffisant, l'électronique du capteur est alimentée. Les résultats issus de cette expérimentation sont présentés sur la figure IV.6.

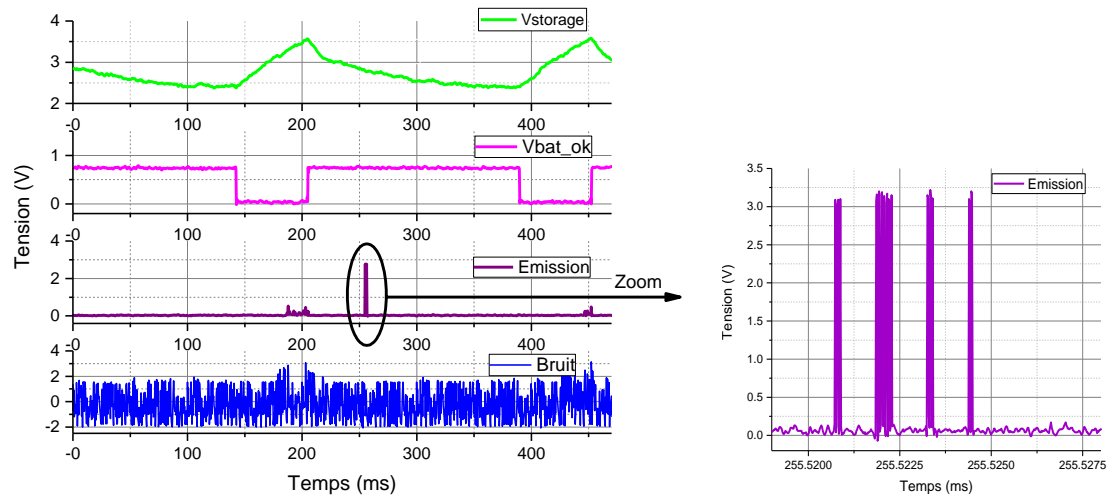


Figure IV. 6 : Alimentation autonome du microcontrôleur équipant le capteur.

Cette figure montre quatre courbes qui correspondent au bruit produit par le générateur d'entrée, au signal de validation VBAT_Ok, à la tension aux bornes du condensateur de stockage (Vstorage) et finalement le code émis par le capteur pendant la phase active de l'alimentation. Le bruit généré avec une amplitude environ 3,6 Vpp (courbe bleu). Le condensateur se charge et la tension entre ses bornes croit de 0 V jusqu'à 3,6 V (courbe verte). Lors de la charge, le signal VBAT_Ok est à 0 et le microcontrôleur ne fonctionne pas. Quand la tension Vstorage atteint le niveau de 3,6 V, la phase active commence. Durant cette phase, la tension VBAT_Ok passe à 1 (courbe rose), le microcontrôleur est alimenté par Vstorage et le capteur émet un code d'identification et éventuellement d'autres informations suivant l'application embarquée (courbe violette). Pendant la phase active, le circuit de régulation et d'émission du code consomme une partie de l'énergie stockée dans le condensateur ce qui diminue la tension Vstorage d'environ 1 V. Le cycle se répète après basculement du signal VBAT_OK à 0.

VI. Etude expérimentale en cuve et validation du principe de fonctionnement

VI.1 Installation expérimentale

L'objectif de cette étude expérimentale est de valider l'ensemble du dispositif de récupération d'énergie vibratoire avec le circuit d'extraction d'énergie en situation réelle, démontrant l'autonomie énergétique du capteur sphérique. L'installation expérimentale que

nous présentons dans cette partie permet d'exciter le capteur sphérique à partir des vibrations ambiantes dans une cuve à eau. Nous avons utilisé le même mode opératoire que celui décrit dans le chapitre 3 partie IV.2 en ajoutant le circuit d'extraction d'énergie (BQ25504), le pont redresseur et la puce contenant l'électronique embarquée du capteur sphérique. Dans un premier temps, le capteur sphérique est positionné dans la cuve à eau en face du transducteur ultrasonore (Figure IV.7).

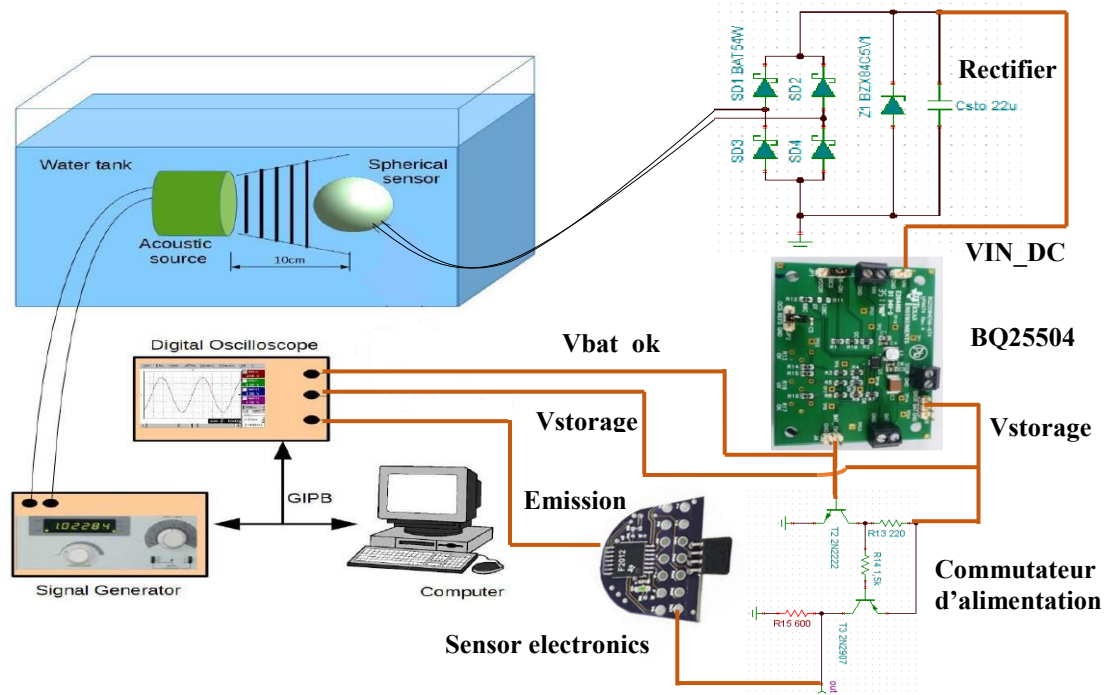


Figure IV. 7 : Installation expérimentale complète de la récupération d'énergie vibratoire

Le transducteur acoustique est excité par un générateur qui envoie des signaux sinusoïdaux de 20 cycles d'amplitude 5 Vpp. Un balayage fréquentiel est réalisé entre 10 et 60 kHz. Le signal reçu par la capsule sphérique est dirigé vers le pont redresseur à double alternance (AC/DC) qui transforme en tension continue les tensions sinusoïdales produites par l'anneau piézoélectrique. La tension de sortie du pont redresseur (VIN_DC) est appliquée sur le circuit d'extraction d'énergie (BQ25504) qui assure la charge du condensateur de stockage (C_{STOR}). Finalement, l'électronique du capteur est alimentée par un circuit de commutation qui applique, lorsque le signal VBAT_OK est à 1, la tension Vstorage à cette électronique. Un oscilloscope permet de visualiser la tension Vstorage, le signal Vbat_ok et le code émis par l'électronique du capteur sphérique.

VI.2 Résultats et discussion

La figure IV.8 montre les évolutions temporelles des trois grandeurs et du signal récupéré par l'anneau piézoélectrique. Cette dernière est utilisée comme donnée d'entrée pour le pond redresseur.

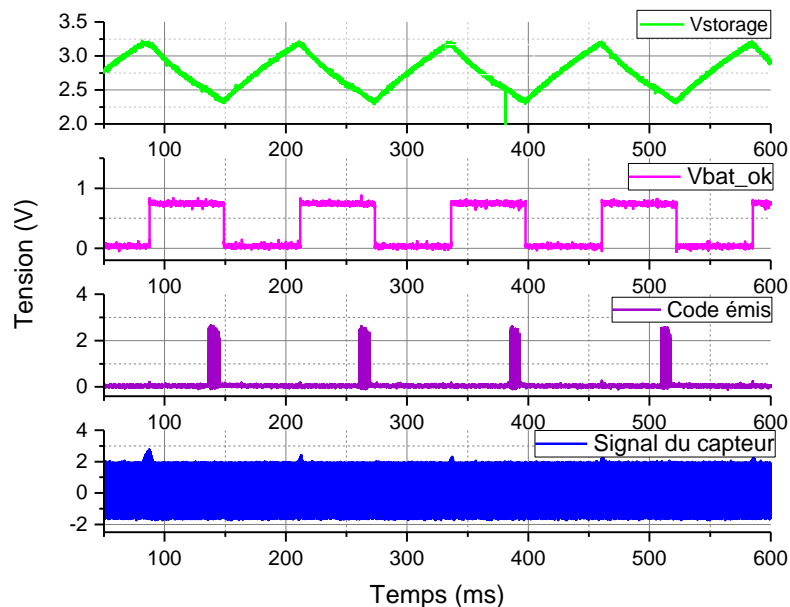


Figure IV. 8 : Autonomie énergétique du capteur sphérique et émission du code

La tension sinusoïdale générée par le capteur a une amplitude de 3,53 Vpp. Le condensateur C_{STOR} commence à charger, la tension $V_{storage}$ entre ses bornes croît de 0 jusqu'à 3,2 V. Quand la tension $V_{storage}$ atteint le niveau de 3,2 V, le signal $VBAT_Ok$ passe de 0 à 1 ce qui permet de valider le transfert de puissance vers l'électronique du capteur. A ce moment, le microcontrôleur est alimenté et le capteur émet un code. La mise en fonctionnement de tous les blocs du montage expérimental, provoque une diminution de la tension $V_{storage}$ et l'arrêt du fonctionnement du microcontrôleur. La tension $VBAT_Ok$ retombe à 0 et le condensateur recommence un cycle de charge jusqu'à atteindre un niveau suffisant pour alimenter le microcontrôleur. La tension $V_{storage}$ atteint un maximum sur les fréquences de résonance de la sphère qui récupère le maximum d'énergie sur ces fréquences, et par conséquent, l'émission du code aura lieu sur ces fréquences de résonance. A partir de ce dispositif expérimental, nous avons démontré la faisabilité de la technique de récupération d'énergie vibratoire pour alimenter notre capteur sphérique. Nous avons pu récupérer un niveau suffisant de tension pour assurer l'autonomie énergétique de ce capteur ultrasonore miniaturisé et autonome.

VI.3 Bilan énergétique et puissance récupérée

Un bilan énergétique et un calcul de puissance récupérée ont été effectués afin de quantifier la capacité du capteur sphérique en récupération d'énergie. Nous avons effectué cette étude en partant du même dispositif expérimental que celui utilisé dans la partie précédente (Figure IV.9)

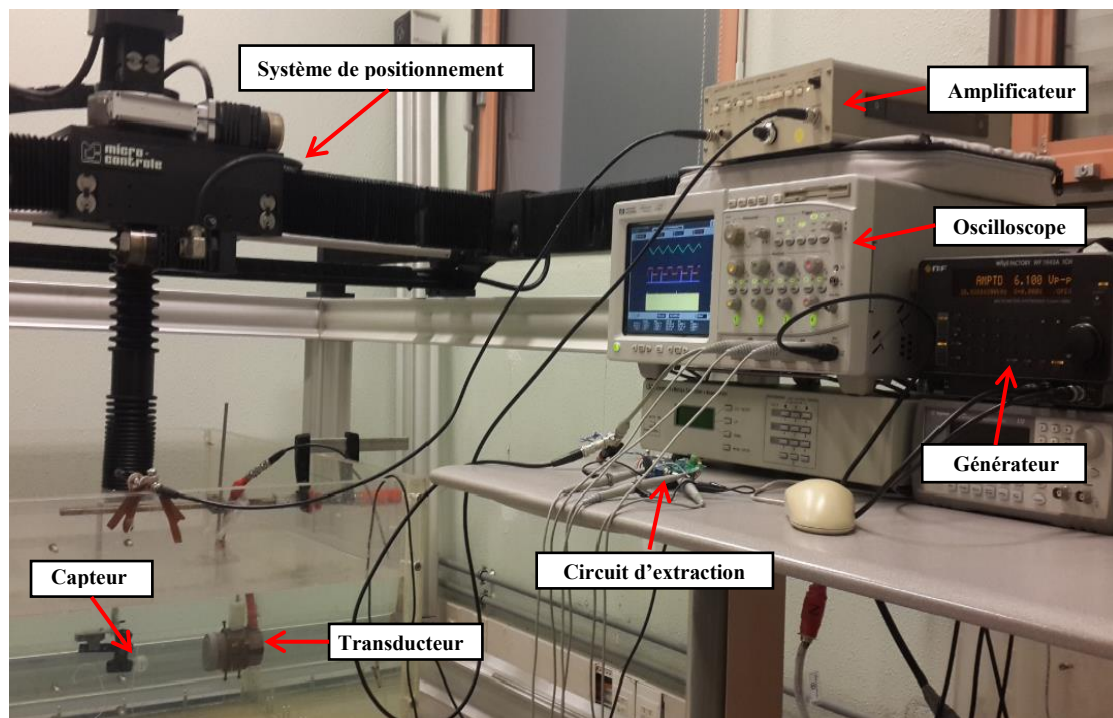


Figure IV. 9 : Vue du dispositif expérimental

Premièrement, nous avons effectué plusieurs mesures à plusieurs distances séparant le transducteur émetteur du capteur sphérique. Dans chaque cas, une mesure de la tension aux bornes du condensateur de stockage (V_{storage}) ainsi que le temps nécessaire pour atteindre le niveau de cette tension (V_{storage}) ont été réalisées. Le générateur de tension fournit une tension (V_G) d'amplitude 5 Vpp, différentes mesures étant effectués avec plusieurs tensions d'émission V_G (6 Vpp, 7 Vpp et 8 Vpp). Dans tous les cas étudiés, le niveau moyen de tension V_{storage} suffisant pour alimenter le capteur est d'environ 3 V. L'énergie emmagasinée dans le condensateur de charge ($C_{\text{STOR}} = 47 \mu\text{F}$) est d'environ 21 μJ déterminée par :

$$E_{\text{emmagasinée}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{stor}} \cdot V_{\text{storage}}^2 \quad \text{IV.6}$$

Les puissances électriques récupérées dans les différents cas sont présentés dans le tableau IV.4.

5 Vpp	Distance (cm)	5	8	10	15	18	20
	Vstorage (V)	3	3	3	2,9	2,9	2,1
	Temps (ms)	280	300	340	480	540	Pas d'émission
	Puissance (μW)	75	70	62	43	38	
6 Vpp	Distance (cm)	5	8	10	15	18	20
	Vstorage (V)	3	3	3	3	2,9	2,2
	Temps (ms)	200	280	300	460	500	Pas d'émission
	Puissance (μW)	105	75	70	45	42	
7 Vpp	Distance (cm)	5	8	10	15	18	20
	Vstorage (V)	3,1	3	3	3	2,9	2,5
	Temps (ms)	180	250	300	320	360	Pas d'émission
	Puissance (μW)	116	84	70	65	58	
8 Vpp	Distance (cm)	5	8	10	15	18	20
	Vstorage (V)	3,2	3	3	3	3	2,6
	Temps (ms)	120	200	260	300	320	Pas d'émission
	Puissance (μW)	175	105	80	70	65	

Tableau IV. 4 : Puissance électrique récupérée à différentes distances

Comme l'indique le tableau, l'augmentation du niveau de tension appliquée par le générateur à une distance constante augmente l'amplitude du signal reçus par le capteur sphérique et le temps de charge du condensateur diminue. Par conséquent, la puissance électrique récupérée devient de plus en plus importante. Prenant le cas où la distance est de 5 cm, pour $V_G = 5$ Vpp : le temps de charge est 280 ms et la puissance est 75 μ W. Tandis que, pour $V_G = 8$ Vpp : pendant une durée de 120 ms nous avons récupéré 175 μ W.

Nous pouvons remarquer finalement qu'à partir de 20 cm, la tension Vstorage atteint un niveau de 2,1 V et 2,6 V après une longue durée pour $V_G = 5$ Vpp et $V_G = 8$ Vpp respectivement. Dans ce cas-là, l'énergie emmagasinée dans le condensateur est inférieure à 21 μ J. Cette tension récupérée n'était pas suffisante pour alimenter le microcontrôleur et le code de reconnaissance n'est pas émis. La figure IV.10 illustre les traces des puissances récupérées en fonction de la distance capteur-émetteur pour les différentes amplitudes de la tension émise par le générateur.

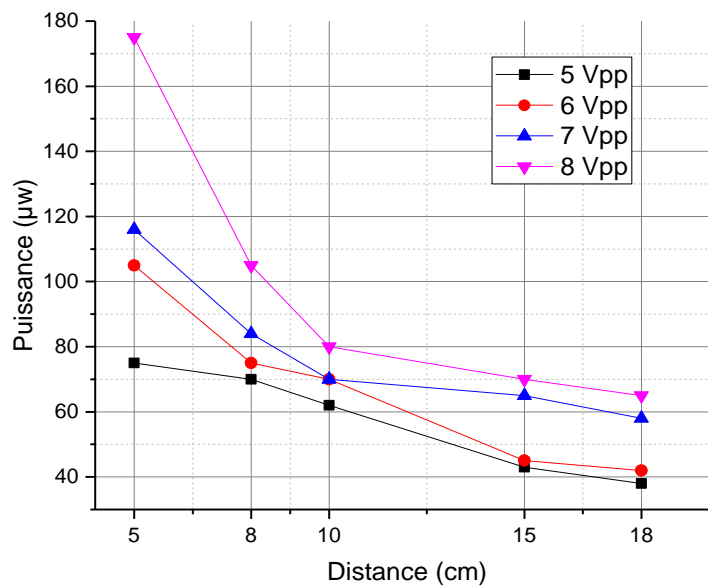


Figure IV. 10 : Traces des puissances récupérées en fonction de la distance

VII. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de proposer les validations expérimentales de la technique complète de récupération d'énergie vibratoire avec un circuit d'extraction et de gestion de la puissance récupérée. Premièrement, nous avons effectué une étude comparative entre notre système sphérique et des systèmes électroniques de la littérature concernant leurs capacités à récupérer l'énergie. La deuxième partie de ce chapitre s'est portée sur la description du circuit électrique de stockage d'énergie utilisé dans notre travail (BQ25504) et le principe de fonctionnement de ce circuit.

Ensuite, des simulations de ce circuit ont été effectuées afin de cerner la faisabilité et l'efficacité de ce circuit. Un générateur de tension a été utilisé comme équivalent d'un élément piézoélectrique produisant une tension sinusoïdale appliquée au système de gestion d'énergie pour charger un condensateur de stockage. Une étape expérimentale a été mise en place pour valider la réalisation de ce circuit d'extraction. Les deux analyses (simulations et expérimentale) ont montré des résultats similaires avec un condensateur de stockage chargé avec une tension d'environ 3 V. Ce niveau était suffisant pour alimenter le microcontrôleur et émettre un code par le système d'émission.

La dernière étape de ce chapitre est consacrée au test en situation réelle de la technique de récupération d'énergie vibratoire en utilisant la capsule sphérique. Le même

dispositif expérimental que celui utilisé au chapitre 3 a été exploité, avec l'ensemble des éléments du circuit de récupération et stockage couplé avec l'électronique embarquée du capteur sphérique. Nous avons récupéré une tension de 3,2 V aux bornes du condensateur de stockage, cette tension était capable d'alimenter l'électronique et d'envoyer un code programmé dans le système d'émission du capteur. Finalement, un bilan énergétique a été effectué afin de quantifier le niveau de la puissance récupérée en fonction de la distance et de la tension d'émission.

Conclusion générale

L'étude et la réalisation de la technique de récupération d'énergie vibratoire sur une large bande fréquentielle d'un capteur acoustique sphérique miniaturisé était l'objectif principal du travail de recherche présenté dans ce mémoire. C'est un concept de mesure proposé et basé sur un réseau de capteurs sphériques miniaturisés à électronique embarquée capable de répondre à des besoins industriels dans le domaine d'homogénéisation. Il est dédié encore pour caractériser des propriétés physiques et mécaniques des milieux hétérogènes ou des structures. Le manque des méthodes autonomes de caractérisation en ligne de ces propriétés, nous a poussés à proposer cet utile de mesure. C'est un capteur sphérique de taille réduite et de basse fréquence assemblé à partir de deux demi-sphères (en plexiglass) excité par un anneau piézoélectrique (en PZ26) pris à la jonction de deux-sphères. L'électronique embarquant l'application de ce capteur est positionné dans la partie vide de la sphère. Une très bonne concordance de son comportement vibratoire a été obtenue entre trois approches : analytique, numérique et expérimentale. Cette technique ultrasonore a donné satisfaction sur la sensibilité et la stabilité aux propriétés mesurées.

Pour rendre ce capteur plus efficace, notre projet de thèse a consacré sur son autonomie énergétique. Par conséquence, des modélisations analytiques de l'anneau piézoélectrique ont été effectuées selon les deux principaux modes de vibration: mode radial et mode d'épaisseur. En utilisant le modèle de Mason, chaque mode est décrit par un circuit électromécanique équivalent associant par l'intermédiaire d'un transformateur les grandeurs électrique en sortie (tensions et courants) aux grandeurs mécaniques de l'entrée (Forces et vitesses). A partir de chaque circuit, nous avons déterminé en fonction de la force mécanique la réponse électrique en tension résultante de vibration. Un modèle analytique de la récupération d'énergie a été proposé afin de déterminer la réponse totale en tension générer par le capteur sphérique. Un assemblage des deux modèles en équivalent électrique nous a conduits à estimer la tension globale utile et exploitable. Les résultats de cet assemblage ont été consolidés par un modèle numérique (Comsol Multiphysics) dont la comparaison a montré une très bonne concordance.

Des réalisations expérimentales de la technique de récupération d'énergie appliquées à un capteur sphérique réel ont été nécessaires pour valider les deux modèles précédents. Les déplacements et les diagrammes de directivité de la capsule sphérique sont étudiés avec la technique de vibrométrie Laser. Les champs d'émission des deux sources acoustiques sont

aussi déterminés grâce à deux méthodes : vibrométrie Laser et analyseur d'impédance. Ensuite, un dispositif expérimental de la récupération d'énergie a été mis en place. Ce dispositif a permis de vérifier la réalisation de la technique de récupération d'énergie par le capteur sphérique. Durant cette étude expérimentale, nous avons étudiés l'influence de plusieurs facteurs physiques et spatiaux sur la réponse en tension de la capsule sphérique : atténuation, profondeur, balayage en coordonnées transversales et l'angle de rotation de la sphère. Les résultats obtenus montrent une bonne sensibilité du capteur sphérique avec son environnement. Pour terminer cette étude expérimentale, nous avons démontré la capacité du capteur sphérique en récupération d'énergie par le biais des coefficients de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Afin de valider la faisabilité de cette technique de récupération, nous avons réalisé un système autonome complet de récupération d'énergie vibratoire. Ce système est capable de produire une puissance électrique à partir des vibrations ambiantes afin d'alimenter lui-même et de stocker l'énergie accumulée dans un condensateur. A cet effet, un circuit d'extraction d'énergie a été étudié et mis en place (BQ25504). Les résultats issus d'un modèle numérique ont été validés par des résultats expérimentaux d'un dispositif comportant un générateur de bruit, un pont redresseur, le circuit de stockage (BQ25504) et l'électronique de notre capteur. Une amplitude de 3,6 V de la tension continue aux bornes du condensateur de charge a été atteinte, ce niveau de tension était suffisant pour alimenter le microcontrôleur du capteur et d'envoyer un code de reconnaissance. Enfin, le concept global a été placé dans une installation expérimentale pour démontrer l'autonomie du capteur sphérique dans un environnement réel. Le signal récupéré par la sphère est dirigé dans un circuit de gestion d'énergie pour charger un condensateur. Nous avons pu récupérer un niveau de tension environ 3,2 V qui était suffisant à alimenter l'électronique embarquée de notre capteur sphérique, menant ainsi ce travail à son objectif souhaité.

Annexe

A. Effet piézoélectrique

A.1 L'origine de la piézoélectricité

La piézoélectricité est un mot d'origine grec « piézein » (presser, appuyer), elle est découverte par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880. C'est une propriété particulière possédée par certains matériaux ayant une anisotropie cristalline. Elle se traduit par deux effets:

- Effet direct : Un matériau se polarise électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique.
- Effet inverse : Sous l'effet d'un champ électrique appliqué à la céramique, il y a apparition d'une déformation mécanique.

L'effet piézoélectrique s'explique par la cristallographie des matériaux. A l'état de repos (contrainte nulle) le cristal est électriquement neutre, c.à.d. les barycentres des charges positives et négatives sont confondus. L'application d'une contrainte mécanique crée un dipôle électrique en écartant les barycentres des charges positives et négatives, qui fait naissance à des champs électriques élémentaires donnant un champ électrique macroscopique, c'est l'effet direct. Inversement, l'application d'une tension électrique aux bornes du cristal apporte des charges électriques, donc pour rétablir l'équilibre des forces électrostatiques, la maille cristalline se déforme, c'est l'effet inverse ou réciproque.

Pour alimenter notre capteur sphérique, la transduction électromécanique s'effectue par l'intermédiaire de l'anneau piézoélectrique placé à la jonction des deux demi-sphères. En fait, les capteurs et les récupérateurs d'énergie utilisent l'effet direct, contrairement aux actionneurs qui se basent sur le sens inverse. Les matériaux piézoélectriques présentent de nombreuses propriétés qui en font des matériaux très utilisés à nos jours : capteurs (accélération, force), récupération d'énergie, horloge (quartz), génération d'ultrasons...

A.2 Applications, les capteurs

La première application industrielle la plus utilisée jusqu'à maintenant utilisant l'effet piézoélectrique sont les capteurs, qui sont appelés encore transducteurs piézoélectriques.

Grâce à la capacité des matériaux piézoélectriques à générer un courant électrique par l'application d'une force extérieure, plusieurs types de capteurs sont développés :

- Capteurs de vibrations: certains capteurs piézoélectriques sont utilisés pour capter les vibrations qui forment aussi une contrainte mécanique, par exemple les systèmes anti cambriolage des voitures et le phonographe.
- Capteurs de vibrations sonores: c'est une application très importante, comme plusieurs systèmes innovants, a été développé par l'armée. Un système capable de capter des vibrations ultrasonores créées par lui-même, à l'aide d'une plaque de quartz, il est capable de construire une image d'un environnement lointain ou invisible (cela en calculant la durée aller-retour de l'onde émise et réfléchi) : c'est le premier sonar. De plus ces capteurs sont utilisés comme des microphones.
- Capteurs d'impact: des systèmes comportent des transducteurs afin de calculer l'intensité et le moment d'une force appliqué. Par exemple, les batteries électriques (instrument de musique), ou des capteurs de proximité comme dans le métro japonais ou les escaliers électriques qui se mettent en marche après que le capteur envoie un signal de présence de quelqu'un.

A.3 Matériaux piézoélectrique

Rapidement après la découverte de la piézoélectricité, plusieurs matériaux ayant cette propriété ont été trouvés et qui continuent à apparaitre jusqu'à maintenant avec des meilleures performances. Ces matériaux, leurs tailles et leurs présentations peuvent s'adapter à des applications pratiques, c'est pour cette raison les découverts dans le domaine de la piézoélectricité sont à l'ordre du jour.

Les matériaux piézoélectriques sont présents sous différentes natures. Les principaux types utilisés pour la récupération d'énergie sont [87] :

Piézo-céramiques monolithiques :

Ce type des matériaux piézoélectriques est à base du plomb, zirconium et titane (PZT), sont les matériaux les plus courants dans le domaine de récupération d'énergie, à nos jours. Ces Piézo-céramiques sont très rigides, et de plus leur nature céramique en fait un matériau très cassant. Ils sont majoritairement utilisés selon le mode 31 en récupération d'énergie.

Les polymères :

Plusieurs polymères ayant des propriétés piézoélectriques qui rendent possible leur utilisation en récupération d'énergie. Par exemple, le PolyFluorure de Vinylidène (PVDF) est le polymère le plus utilisé. Les polymères possèdent beaucoup des avantages, par exemple leur souplesse qui permet au contraire du PZT de subir de très grandes déformations. Tandis que le faible coefficient de couplage électromécanique de ces polymères est un grand inconvénient qui rend la récupération d'énergie difficile [88].

Les composites :

Les composites sont fabriqués de manière à introduire des fibres PZT dans une matrice d'époxy afin d'augmenter la flexibilité du matériau tout en gardant les coefficients de couplage électromécanique élevés du PZT [89]. Ces matériaux sont aussi très directifs à cause de l'utilisation de longues fibres piézoélectriques. La majorité de ces composites sont utilisés suivant les modes 31 ou 33.

Le Tableau A.1 montre quelques paramètres piézoélectriques pour différents types de matériaux PZT, nous nous sommes intéressés dans notre travail par le matériau de l'anneau piézoélectrique qui est fabriqué en PZ26.

Symboles	Unité	PZ26	PZ24	PZT4	PZT8
$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$	-	700	239	635	582
c_{11}^E	10^{10} N/m ²	16,8	16,2	13,9	13,7
c_{12}^E	10^{10} N/m ²	11	8,84	7,78	6,97
c_{13}^E	10^{10} N/m ²	9,99	8,75	7,43	7,16
c_{33}^E	10^{10} N/m ²	12,3	13,4	11,5	12,4
c_{11}^D	10^{10} N/m ²	16,9	16,3	14,5	14
c_{12}^D	10^{10} N/m ²	11,2	8,94	8,39	7,28
c_{13}^D	10^{10} N/m ²	9,33	8,07	6,09	6,08
c_{33}^D	10^{10} N/m ²	15,8	18,1	15,9	16,1
s_{11}^E	10^{-12} N/m ²	13	10,5	12,3	11,5
s_{12}^E	10^{-12} N/m ²	-4,35	-3,13	-4,05	-3 ,38
s_{13}^E	10^{-12} N/m ²	-7,05	-4,77	-5,31	-4,69
s_{33}^E	10^{-12} N/m ²	19,6	13,6	15,5	13,5
s_{44}^E	10^{-12} N/m ²	33,2	23	39	31,9
e_{31}	C/m ²	-2,8	-1,45	-5,2	-4
e_{33}	C/m ²	14,7	9,9	15,1	13,8

h_{31}	10^8 V/m	-4,52	-6,88	-9,2	-7,8
h_{33}	10^8 V/m	23,7	47	26,8	26,9
k_p	-	-0,575	-0,568	-0,58	-0,51
k_{31}	-	-0,327	-0,292	-0,33	-0,3
k_{33}	-	0,684	0,659	0,70	0,64
ρ	kg/m^3	7700	7700	7500	7600

Tableau A. 1 : Paramètres piézoélectriques pour différents matériaux PZT

La performance des matériaux piézoélectriques diffère d'un type à un autre, leur prix et leur accessibilité sont encore inégaux. La plupart des matériaux sont très rares ce qui les rend trop chers, et très peu d'entreprises les fabriquent et les distribuent.

A.4 Equations constitutives de la piézoélectricité

L'effet piézoélectrique peut se définir comme un couplage entre les tenseurs mécaniques de rang 2 (contraintes T et déformations S) et les tenseurs électriques de rang 1 (champ électrique E et induction électrique D) d'un matériau. Donc pour un matériau piézoélectrique, on peut dire que S et T sont fonction de D et E. Les constantes piézoélectriques (d, e, g et h) qui relient ces tenseurs sont aussi des matrices d'ordre (3,6). Les relations fondamentales des équations constitutives de la piézoélectricité sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} S = s^E \cdot T + d \cdot E \text{ et } D = \varepsilon^T \cdot E + d \cdot T \\ E = \beta^T \cdot D - g \cdot T \text{ et } S = s^D \cdot T + g^t \cdot D \\ D = \varepsilon^S \cdot E + e \cdot S \text{ et } T = c^E \cdot S - e^t \cdot E \\ E = \beta^S \cdot D - h \cdot S \text{ et } T = c^D \cdot S - h^t \cdot D \end{cases}$$

Les matrices avec un suffixe t en exposant (e^t) représentent des matrices transposées, tandis que les autres grandeurs en exposant signifient que ces grandeurs sont constantes ou nulles, par exemple s^E et ε^T définit le coefficient de compliance à champ électrique constant ou nul et la permittivité électrique à contrainte constante ou nulle respectivement.

L'ordre des tenseurs et leurs nombres montrent la nécessité d'un grand nombre des constantes scalaires pour décrire le phénomène de la piézoélectricité, grâce aux symétries on peut réduire beaucoup ce nombre des constantes. Le Tableau I.4 montre les différentes grandeurs mécaniques, électriques et piézoélectriques avec leurs tailles matricielles.

Grandeurs	Abréviation	Définition	Taille de matrice
Mécanique	S	Déformation relative	(6,1)
	T	Contrainte (N/m ²)	(6,1)
	s	Compliance (m ² /N)	(6,6)
	c	Raideur élastique (N/m ²)	(6,6)
Electrique	E	Champ électrique (V/m)	(3,1)
	D	Induction électrique (C/m ²)	(3,1)
	β	Imperméabilité diélectrique (m/F)	(3,3)
	ε	Permittivité électrique (F/m)	(3,3)
Piézoélectrique	d	Constante piézoélectrique: Relation entre charge et contrainte à champ constant ou nul (C/N ou m/V)	(3,6)
	e	Constante piézoélectrique: Relation entre charge et déformation à champ constant ou nul (C/m ²)	(3,6)
	h	Constante piézoélectrique: Relation entre champ et déformation à induction constante ou nulle (N/C ou V/m)	(3,6)
	g	Constante piézoélectrique: Relation entre champ et contrainte à induction constante ou nulle (m ² /C)	(3,6)

Tableau A. 2 : Grandeurs caractéristiques de la piézoélectricité

Les matrices des coefficients élastiques sont de la forme suivant (identique pour c^E , c^D , s^E et s^D):

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \end{bmatrix}$$

Les matrices des coefficients piézoélectriques (le même pour d, e, g et h) sont données par :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{13} & e_{13} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les matrices des coefficients diélectriques (identique pour ε^S , ε^T , β^S et β^T) sont :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

B. Champ proche et champ lointain d'un transducteur ultrasonore

L'émission et la réception d'ondes acoustiques sous-marine se fait à l'aide de transducteurs. Deux genres des transducteurs qui existent: Electro-acoustiques et Acousto-électriques qui s'appliquent respectivement à l'émission et à la réception des signaux. Dans le cas de l'émission on parle plus précisément d'émetteur ou de projecteur, qui correspond à la conversion de la tension électrique sous la forme d'ondes acoustiques. Par contre inversement pour la réception on parle sur les hydrophones qui sont capables de convertir les ondes ultrasonores en courant électrique.

La pression acoustique rayonnée par un transducteur ultrasonore cylindrique est caractérisée par un champ d'émission qui est décomposé en deux régions : Le champ proche et le champ lointain, comme représenté sur la figure suivante :

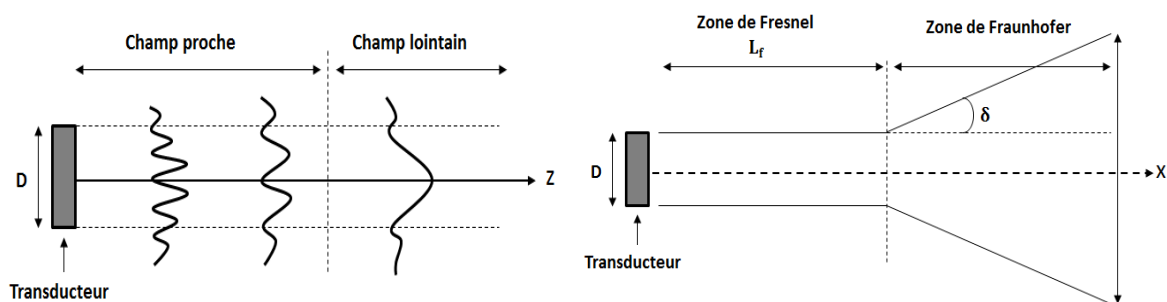


Figure B. 1 : Champ d'émission d'un transducteur acoustique

La région située à proximité du transducteur est appelée champ proche ou zone de Fresnel, c'est une région dans laquelle le champ acoustique a pratiquement la forme d'un cylindre. Dans cette zone la pression acoustique varie fortement et rapidement dans l'espace le long de l'axe du cylindre quand on se trouve proche de la surface du transducteur et moins en moins en éloignant. La longueur de cette zone nommée longueur de Fresnel est définie par la position du dernier maximum de la pression acoustique donnée par [90] :

$$L_f = \frac{D^2}{4\lambda} \quad \text{B.1}$$

Où D est le diamètre du transducteur et λ la longueur d'onde.

La zone situé au-delà du champ proche est appelé champ lointain ou zone de Fraunhofer, c'est une région dans laquelle les variations spatiales de l'intensité du champ acoustique sont moins fortes, en plus le diamètre du faisceau acoustique est plus large par

rapport au diamètre du transducteur sous l'influence de la diffraction. La divergence du faisceau δ au sommet du cône de diffraction est donné par [90] :

$$\sin(\delta) = \frac{1,22\lambda}{D} \quad \text{B.2}$$

C. Calcul de la réponse en tension du modèle analytique

```

clc;
clear;
close all;

%%Mode longitudinal%%

L = 1e-3;
ro = 7700; Re = 11e-3; Ri = 10e-3; R = 10.5e-3;
h_33 = 23.7e8;
c_33 = 15.8e+10;
A = pi*(Re^2-Ri^2);
eps_33S = 700*8.85e-12;
C_0 = eps_33S*A/L;
f = [10:0.1:60];
w = 2*pi*f*1000;

dp = load('pression 10-60 KHz.txt', '-ascii');
F = A*dp(10,4:end);

Plot(f, abs(F(1:length(f))), 'b');
xlabel('Frequency (kHz)');
ylabel('Force (N)');
grid;

C = (1 + j*0.003)*C_0; %pertes

Zintl = 24000;
Z = A*sqrt(c_33*ro);
Z_1 = (j*Z)*(tan((L/2)*sqrt(ro/c_33).*w));
Z_3 = Z./(j*sin(L*sqrt(ro/c_33).*w));
Zelecl = -1./(j*C.*w) + Zintl./(1 + j*C.*w.*Zintl);
H_lon = (2*h_33*C*Zintl)./((1 + j*C*w*Zintl).*(2*(h_33)^2*(C)^2*Zelecl + 2*Z_3 + Z_1));
V_l = (H_lon).*(F);

figure(2)
plot(f, abs(V_l), 'b');
xlabel('Fréquence (kHz)');
ylabel('Tension (V)');
axis([10,40,0,1.4])
legend('Tension longitudinale')
grid;
hold on

%%Mode radial%%

ro = 7700;
c_11 = 16.8e+10;
c_13 = 9.99e+10;
c_33 = 15.8e+10;
c_12 = 11.2e+10;
s_12 = -4.35e-12;

```

```

s_11 = 13e-12;
d_31 = -130e-12;
nu = -s_12/s_11;
a = 11e-3;
b = 10e-3;
S_b = 2*pi*b*L;
S_a = 2*pi*a*L;
S = pi*(a^2-b^2);
eps_33T = 1300*8.85e-12;
C_0r1 = (eps_33T*S/L)*(1 - ((2*d_31^2)/(eps_33T*(s_11 + s_12))));
C_0r = (1 + j*0.003)*C_0r1;

Zintr = Zintl;

alpha = w*sqrt(ro/c_11);
v_r = sqrt(c_11/ro);
Z_rb = ro*v_r*S_b;
Z_ra = ro*v_r*S_a;
N_31 = (pi^2*alpha*a*b)*(d_31/(s_11 + s_12));

J_0a = besselj(0,a*alpha);
J_1a = besselj(1,a*alpha);
J_0b = besselj(0,b*alpha);
J_1b = besselj(1,b*alpha);

Y_0a = bessely(0,a*alpha);
Y_1a = bessely(1,a*alpha);
Y_0b = bessely(0,b*alpha);
Y_1b = bessely(1,b*alpha);

Z_3 = (j*Z_rb/2)*((pi*alpha*a)./(J_1a.*Y_1b - J_1b.*Y_1a));
L_1 = (Y_1a.*J_0b - J_1a.*Y_0b)./(J_1a.*Y_1b - J_1b.*Y_1a) + (1 - nu)./(alpha*b);
R = (Y_1a.*J_0b - J_1a.*Y_0b)./(J_1a.*Y_1b - J_1b.*Y_1a) - (1 - nu)./(alpha*a);
Z_1 = ((pi^2*(alpha*a).^2*Z_rb)/(4*j)).*L_1 - Z_3;
Z_2 = ((pi^2*(alpha*b).^2*Z_ra)/(4*j)).*R - Z_3;
Zeq = Z_3 + (Z_1.*Z_2)./(Z_1 + Z_2);
Zelectr = Zintr./(1 + j*C_0r*w.*Zintr);
H_rad = (2*N_31.*Zintr)./((1 + j*C_0r*w.*Zintr).*(2*N_31.^2.*Zelectr + 2*Z_3 + Z_2));
V_r = (H_rad).*(F);

figure(3)
plot(f,abs(V_r),'b');
xlabel('Fréquence (kHz)');
ylabel('Tension (V)');
axis([10,40,0,1.4])
legend('Tension radiale')
grid;
hold on

%%Assemblage de deux modes%%

figure(4)
Vt = (V_1) + (V_r);
Vt = abs(Vt);
plot(f,Vt,'b');
xlabel('Frequency (kHz)');
ylabel('Voltage (V)');
grid;

%%% comparaison Analytique - Eléments Finis %%%

V = load('VComsol 10-60 KHz.txt','-ascii');
Vsimul = (V(10,4:end));
figure (5)
plot(f,Vt,'b',f,abs(Vsimul(1:length(f))),'r');

```

```
xlabel('Frequency (kHz)');  
ylabel('Voltage (V)');  
legend('Analytical','Finite Elements')  
grid;
```

Références

- [1] Wireless Underwater Sensor Networks in *Wireless Sensor Networks*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd p. 399-442, 2010.
- [2] N. Goyal, M. Dave, et A. K. Verma, « Data aggregation in underwater wireless sensor network: Recent approaches and issues », *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, mai 2017.
- [3] M. R. Jafri, M. M. Sandhu, K. Latif, Z. A. Khan, A. U. H. Yasar, et N. Javaid, « Towards Delay-sensitive Routing in Underwater Wireless Sensor Networks », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 37, p. 228-235, janv. 2014.
- [4] F. K. Shaikh et S. Zeadally, « Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, p. 1041-1054, mars 2016.
- [5] D. Ye, D. Gong, et W. Wang, « Application of wireless sensor networks in environmental monitoring », *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)* vol. 1, p. 205-208, 2009.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, et T. Melodia, « Underwater acoustic sensor networks: research challenges », *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, p. 257-279, mai 2005.
- [7] A. Davis et H. Chang, « Underwater wireless sensor networks », in *2012 Oceans*, p. 1-5., 2012.
- [8] S. El-Rabaie, D. Nabil, R. Mahmoud, et M. A. Alsharqawy, « Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN), Architecture, Routing Protocols, Simulation and Modeling Tools, Localization, Security Issues and Some Novel Trends », *Netw. Commun. Eng.*, vol. 7, p. 335-354, 2015.
- [9] H. Karimi et al., « Implementing a Reliable, Fault Tolerance and Secure Framework in the Wireless Sensor-actuator Networks for Events Reporting », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 73, p. 384-394, janv. 2015.
- [10] W. A. Kuperman et P. Roux, « Underwater Acoustics », *Springer Handb. Acoust. ISBN 978-0-387-30446-5 Springer-Verl. N. Y. 2007 P 149* vol. 1, p. 149, 2007.
- [11] J. Wang, W. Shi, L. Xu, L. Zhou, Q. Niu, et J. liu, « Design of optical-acoustic hybrid underwater wireless sensor network », *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 92, p. 59-67, août 2017
- [12] S. Roundy, P. K. Wright, et J. M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*. Boston, MA: Springer US, 2004.
- [13] B. S. Srujana, Neha, P. Mathews, et V. P. Harigovindan, « Multi-source Energy Harvesting System for Underwater Wireless Sensor Networks », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 46, p. 1041-1048 janv. 2015.
- [14] D. A. Mann, D. M. Higgs, W. N. Tavalga, M. J. Souza, et A. N. Popper, « Ultrasound detection by clupeiform fishes », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, p. 3048-3054 juin 2001.
- [15] M. Stojanovic, « Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer », in *2008 Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services*, 2008, p. 1-10.
- [16] P. Naughton et al., « Ambient noise correlations on a mobile, deformable array », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 140, no 6, p. 4260-4270, déc. 2016.
- [17] Y. Xi et al., « High efficient harvesting of underwater ultrasonic wave energy by triboelectric nanogenerator », *Nano Energy*, vol. 38, no Supplement C, p. 101-108, août 2017.
- [18] N. Z. Zenia, M. Aseeri, M. R. Ahmed, Z. I. Chowdhury, et M. Shamim Kaiser, « Energy-efficiency and reliability in MAC and routing protocols for underwater wireless sensor network: A survey », *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 71, no Supplement C, p. 72-85, août 2016.
- [19] P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, et N. M. White, « An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 110, no 1, p. 344-349, févr. 2004.

- [20] P. D. Mitcheson, P. Miao, B. H. Stark, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, et T. C. Green, « MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 115, no 2, p. 523-529, sept. 2004.
- [21] S. Roundy et P. K. Wright, « A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics », *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no 5, p. 1131, 2004.
- [22] Z. L. Wang et J. Song, « Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays », *Science*, vol. 312, no 5771, p. 242-246, avr. 2006.
- [23] R. Ahmed, F. Mir, et S. Banerjee, « A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity », *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no 8, p. 085031, 2017.
- [24] A. Toprak et O. Tigli, « Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges », *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no 3, p. 031104, sept. 2014.
- [25] S. Kim, W. W. Clark, et Q.-M. Wang, « Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Analysis », *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no 10, p. 847-854, oct. 2005.
- [26] H. Sayyaadi, F. Rahnama, et M. A. Askari Farsangi, « Energy harvesting via shallow cylindrical and spherical piezoelectric panels using higher order shear deformation theory », *Compos. Struct.*, vol. 147, no Supplement C, p. 155-167, juill. 2016.
- [27] S. Kim, W. W. Clark, et Q.-M. Wang, « Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Experimental Study », *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no 10, p. 855-863, oct. 2005.
- [28] M. Lallart, D. Guyomar, C. Richard, et L. Petit, « Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no 5, p. 2739-2748, nov. 2010.
- [29] C. B. Williams et R. B. Yates, « Analysis of a micro-electric generator for microsystems », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 52, no 1, p. 8-11, mars 1996.
- [30] D. Zhu, M. J. Tudor, et S. P. Beeby, « Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no 2, p. 022001, 2010.
- [31] F. Cottone et al., "Introduction to vibration energy harvesting," NiPS Energy Harvesting Summer School, 2011.
- [32] G. Simon et al., "Sensor network-based countersniper system, in sensys proceedings of 2nd international conference on embedded networked sensor systems," 2004.
- [33] P. Sikka et al., "Wireless sensor devices for animal tracking and control," *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 2004.
- [34] S. Kim et al., "Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks," *In 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2007.
- [35] H. Durou et al., "Vers l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs embarqués: conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro-dispositif de stockage capacitif en technologie silicium," 2011.
- [36] E. Arroy et al., "Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes, dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone," 2012.
- [37] G. Poulin et al., "Generation of electrical energy for portable devices Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004.
- [38] H. B. N. Ehrardt, C. Gatamel & B. Dalloz-Dubrujeaud, "Algorithme pour la mesure capacitive en ligne de la qualité de mélange en poudre en écoulement", *9ème congrès français de génie de procédés, Saint Nazaire*, Septembre 2003.
- [39] D. G. P. Frake, S.M. Grierson, J.M. Hempenstall & D.R. Rudd, "Process control and end-point determination of a fluid bed granulation by application of near infra-red spectroscopy," *International Journal of Pharmaceutics*, 151 (1997) 70-80.
- [40] K. A. Bakeev et al., "Near Infrared spectroscopy as a process application tool, *Pharmaceutical Technology Europe*," 15(9) (2003) 27-32.

- [41] O. Berntsson, B. Lagerholm & S. Folstad, "Quantative in-line monitoring of powder blending by near infra red reflexion spectroscopy, *Powder Technology*", 123 (2002) 185-193.
- [42] D. Rielly, J.A. Lindley, K. Niranjana & V.R. Phillips, " Mixing process for agricultural and food materials : Part 4, assecement and monitoring of mixing systems", *Journal of Organic engieniering Research*, (1994) 1 – 18.
- [43] C. André, C. Gatamel, H. Berthiaux, G. Delaplace, "Dimensional analysis of a planetary mixer for homogenizing of free flowing powders: Mixing time and power consumption", *Chemical Engineering Journal*, 198–199 (2012) 371–378.
- [44] B. N. a. J. C. G. Nassar, "In-Line Dynamic Acoustic Behavior of a Viscoelastic Complex Media: Dough Application", *The Open Acoustics Journal*, vol. 5, 2012.
- [45] J. B. Mehl et al., "precision acoustic measurements with a spherical resonator: Ar and C₂H₄", *The Journal of Chemical Physics*, 1981.
- [46] M. G. He et al., "Measurement of speed of sound with a spherical resonator: HCFC-22, HFC-152a, HFC-143a, and Propane", 2002.
- [47] A. GUILLOU et al., "Détermination de la constante de Boltzmann au plus haut niveau d'exactitude par spectroscopie acoustique dans un résonateur quasi sphérique", 2012.
- [48] Medjdoub A. et al., "Etude et conception d'un capteur acoustique sphérique, miniaturisé, codé et autonome", *Thèse* p. 104, 2014.
- [49] G. Martin et al., "Speed of sound in water by a direct method, urnal of research of the national bureau of standards", vol. 59(4), 1957.
- [50] H. Lamb et al., "On the Vibrations of an Elastic Sphere", *Proc. London Math. Soc.*, vol. 14, 1882.
- [51] W. E. BAKER et al., "Axisymmetric Modes of Vibration of Thin Spherical Shell", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33, 1961.
- [52] A. Kalnins et al., "Effect of Bending on Vibrations of Spherical Shells", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, 1964.
- [53] R. Duffey et al., "Strain growth in spherical explosive chambers subjected to internal blast loading", *International Journal of Impact Engineering* 28: 967–983, 2003.
- [54] T. Duffey et al., "VIBRATIONS OF COMPLETE SPHERICAL SHELLS WITH IMPERFECTIONS", *International Modal Analysis Conference*, 2005.
- [55] Wilkinson et al., "Natural Frequencies of Closed Spherical Shells", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 38, 1965.
- [56] M. Brissaud et al., "Matériaux piézoélectriques caractérisation, modélisation et vibration", *livre*, 2007.
- [57] N. a. Arafat et al., "Axisymmetric vibrations of closed spherical shells: Equations of motion and bifurcation analysis", *Struct. Control Health Monit.*, 13, pp. 388-416, 2006.
- [58] M. a. Sonstegard et al., "Axisymmetric response of a closed spherical shell to nearly uniform radial impulse", *J. Acoust. Soc. Am.*, 40(6), pp. 1540-1547, 1966.
- [59] A. Silbiger et al., "Free and forced vibrations of a spherical shell", *CAA, Inc. Report U-106-48*, 1960.
- [60] Q. Dong, Q. M. Li, and J. Y. Zheng, "Further study on strain growth in spherical containment vessels subjected to internal blast loading", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 196-206, 2010.
- [61] S. e. et al., "Three-dimensional and shell-theory analysis of elastic waves in a hollow sphere", *J. Appl. Mech.*, 36, 431-439, 1969.
- [62] F. Niordson et al., "Free vibrations of thin elastic spherical shells", *Int. J. Solids Struct.*, 20, pp. 667–687, 1984.
- [63] A. Silbiger et al., "Nonaxisymmetric modes of vibration of thin spherical shells", *J. Acoust. Soc. Am.*, 38, pp. 367–368, 1965.
- [64] J. R. QUESADA et al., "Récupérateur d'énergie vibratoire utilisant une raideur non-linéaire", 18 Sep 2014.

- [65] T. SAINTHUILE et al., "Récupération d'Énergie Vibratoire pour Systèmes de Contrôle Santé Intégré de Structures Aéronautiques", thèse, décembre 2012.
- [66] L. Garbuio et al., "étude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionnaires piézoélectriques", thèse, juin 2006.
- [67] Lin S. and Tian H., "Study on the sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in thickness vibration", *IOP science* vol. 17, p. 015034 (9pp), 2008.
- [68] Evan M. et al., "Determination of resonant frequency of a piezoelectric ring for generation of ultrasonic waves", *Innovative Systems Design and Engineering*, vol. 2, 2011.
- [69] Lin S. et al., "Electro-mechanical equivalent circuit of a piezoelectric ceramic thin circular ring in radial vibration", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 134 pp. 505–512, 2007.
- [70] K. Mueller et al., "Coverslip Induced Artifacts in High Resolution Scanning Laser Acoustic Microscope Images", *Proceedings of the International Symposium on Acoustical Imaging*, vol. 12, pp. 37-47, 1982.
- [71] S. Fischer et al., "Développement d'une instrumentation ultrasonore pour la mesure des vitesses des liquides au-delà de la limite de Nyquist par une approche spectrale", *Thèse de Doctorat*, 13 décembre 2004.
- [72] W. DJERIR et al., "Modélisation du fonctionnement en réception d'un hydrophone piézoélectrique a PVDF", *Equipe de Recherche Physique des Ultrasons, Faculté de Physique, Algerie* 04 Mars 2015.
- [73] T. Boutkedjirt et al., "Reconstruction de champs ultrasonores à partir de valeurs spatialement moyennées par déconvolution des effets d'ouverture du transducteur récepteur", *Thèse de Doctorat*, 2003.
- [74] G. Saporta et al., "Probabilités, Analyse des données et Statistiques", *Paris, Éditions Technip*, 2006.
- [75] J. QIU, H. JIANG, H. JI, K. ZHU., "Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits", *Mechanical Engineering*, 07 March 2009.
- [76] A. Cadei et al., "Kinetic and thermal energy harvesters for implantable medical devices and biomedical autonomous sensors", *Measurement Science and Technology*, 2014.
- [77] S. Boisseau et al., "Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes", *Journées scientifiques*, mars 2014.
- [78] S. Oshima, K. Matsunaga, T. Shimamura, H. Morimura, and M. Harada, "Nanowatt circuit technology for an ultrasmall wireless sensor node with energy harvester", *NTT Tech. Rev.*, Feb. 2013.
- [79] B. Tar and U. Cilingiroglu, "Nanowatt-scale power management for onchip photovoltaic energy harvesting beacons", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, septembre 2014.
- [80] H. Park, Y. Na, J. Park, "A hair-cell structure based piezoelectric energy harvester operating under three dimensional arbitrary vibrations", *J. Phys., Conf. Ser.*, 2013.
- [81] J. C. Park, J. Y. Park, "Asymmetric PZT bimorph cantilever for multi-dimensional ambient vibration harvesting", *Ceram. Int.*, 2013.
- [82] J. C. Park, S. Khym, "Micro-fabricated lead zirconate titanate bent cantilever energy harvester with multi-dimensional operation", *Appl. Phys. Lett.*, 2013.
- [83] W.-J. Su and J. Wu, "An innovative tri-directional broadband piezoelectric energy harvester", *Appl. Phys. Lett.*, 2013.
- [84] B. Andò, S. Baglio, F. Maiorca, and C. Trigona, "Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energy harvester", *Sens. Actuators A, Phys.*, Novembre 2013.
- [85] Y. Zhu, R. Moheimani, and M. R. Yuce, "A 2-DOF MEMS ultrasonic energy harvester", *IEEE Sensors J.*, Janvier 2011.
- [86] A. G. Fowler et al., S. O. R. Moheimani, and S. Behrens, "A 3-DoF MEMS ultrasonic energy harvester", *Proc. IEEE Sensors*, Octobre 2012.
- [87] S. R. Anton et al., "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)", *Smart Materials and Structures*, 2007.

- [88] "Piezo Film Sensors - Technical Manual - (1005663-1 REV B)", Measurement Specialties, Inc., Norristown, Etats-Unis, 86 p.
- [89] H. A. Sodano et al., "An experimental comparison between several active composite actuators for power génération", *Smart Materials and Structures*, 2006.
- [90] D. T. Blackstock et al., "Fundamentals of physical acoustics", *John Wiley & Sons, Inc*, 2000.

Résumé

Un nouveau capteur acoustique sphérique autonome est proposé. Il est destiné à être immergé dans un milieu liquide ou pâteux pour mesurer certaines propriétés physiques du milieu et récupérer l'énergie vibratoire ambiante pour assurer son autonomie. Le capteur est composé de deux coquilles hémisphériques en plexiglas et d'une bague piézoélectrique en PZ26 fixée entre les deux coquilles. Cette structure peut être utilisée aussi bien en excitateur que capteur. Un modèle de simulation de la récupération d'énergie vibratoire a été développé en considérant seulement deux modes de vibration: mode épaisseur et mode radial. Pour chaque mode, le comportement de l'anneau est décrit par un circuit électromécanique équivalent reliant les ports mécaniques (forces et vitesses) au port électrique (tension et courant). Ce choix est guidé par la possibilité de combiner la partie électromécanique avec l'électronique qui traite l'énergie directement dans un simulateur basé sur Spice. Pour valider cette approche, une simulation par éléments finis a été réalisée et comparée aux résultats produits par le circuit électromécanique. Les fréquences de résonance ont également été vérifiées expérimentalement avec un analyseur d'impédance. Toutes ces vérifications donnent des résultats en très bon accord avec le modèle électromécanique proposé en termes de fréquences de résonance, de tension et de puissance collectées. Enfin, plusieurs validations expérimentales sont présentées avec un prototype de capteur sphérique. Ces validations montrent l'adéquation des prédictions avec les résultats expérimentaux. Finalement, un test du circuit de récupération est effectué en situation réelle.

Mots-clés : Récupération d'énergie, Capteur sphérique, Anneau piézoélectrique, Modélisation analytique, Eléments finis, Extraction d'énergie.

Abstract

A new spherical autonomous acoustic sensor is proposed. It is intended to be immersed in a liquid or pasty medium to measure some physical properties of the medium and should harvest ambient energy to ensure its autonomy. The sensor is composed of two Plexiglas half-spherical shells and a PZ26 piezoelectric ring clamped between the two shells. This structure can be used as well as in exciter or sensor. A simulation model of vibrational energy harvesting has been developed considering only two modes of vibration: thickness and radial modes. For each mode, the ring behavior is described by an equivalent electromechanical circuit connecting the mechanical ports (forces and velocities) to the electrical port (voltage and current). This choice is guided by the possibility to combine the electromechanical part with the electronics that process the energy directly in a Spice based simulator. To validate this approach, a finite elements simulation was realized and compared to the electromechanical circuit results. Resonance frequencies were also verified experimentally with an impedance analyzer. All these verifications give results in very good agreement with the proposed electromechanical model, as well as in terms of resonant frequencies, harvested voltage and power. Finally several experimental investigations are presented with a prototype of spherical sensor. These validations show the adequacy of the predictions with the experimental results. Finally, a test of the harvesting circuit is done in real situation.

Keywords: Energy harvesting, Spherical sensor, Piezoelectric ring, Analytical modeling, Finite elements, Energy extraction.