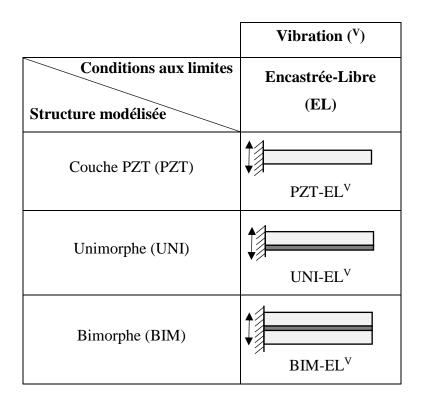
Modélisation et étude expérimentale des dispositifs en mode récupérateur d'énergie vibratoire

Après avoir déterminé le jeu des paramètres effectifs du matériau piézoélectrique aminci et étudié électriquement des dispositifs de plus en plus complexes (la couche PZT – 1 couche, l'unimorphe – 2 couches, le bimorphe – 3 couches) avec différents types de conditions aux limites mécaniques (libre-libre, encastrée-libre), nous présentons dans ce chapitre les études de la réponse vibratoire de ces dispositifs soumis à une excitation harmonique. Ces études sont menées dans le domaine linéaire où les petites déformations sont proportionnelles à la sollicitation. Le tableau 3.1 résume les différentes configurations abordées dans ce chapitre. Ainsi, le cas d'une poutre PZT encastrée-libre sera en premier lieu envisagé, car même si ce dispositif ne récupère pas d'énergie électrique lorsqu'il est soumis à une vibration, son étude nous permettra de comprendre l'influence de notre système d'encastrement sur la réponse vibratoire du dispositif. Par la suite, les études des générateurs encastrés-libres de type unimorphe et bimorphe seront menées.

Tableau 3.1 : Résumé de différentes études vibratoires



1. Présentation du banc expérimental

Pour mesurer les performances de nos dispositifs en termes de récupération d'énergie vibratoire, un banc de test a été développé et est présenté sur la figure 3.1. Celui-ci permet l'étude de l'influence des paramètres tels que le niveau d'accélération, la fréquence et la résistance de charge connectée aux bornes du dispositif afin de déterminer les performances optimales de nos récupérateurs d'énergie [103], [76]. Le banc est constitué des éléments suivants :

- un haut-parleur Dayton audio RSS315HF-4
- un générateur de signaux arbitraire Tektronix AFG3101 (GBF)
- un accéléromètre de haute précision PCB PIEZOTRONICS modèle 393B
- un oscilloscope Tektronix 3034B
- une boîte à décade programmable (produit développé par Vermon S.A.)
- un télémètre laser Keyence série LK-5000
- un amplificateur d'instrumentation INA114 de Burr-Brown®
- un ordinateur équipé du logiciel Matlab avec le module d'instrumentation virtuelle (Instrument Control Toolbox)

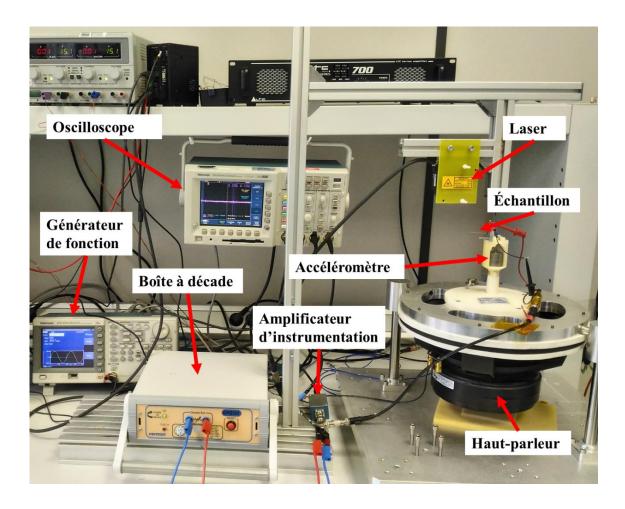


Figure 3.1 : Banc de caractérisation en vibration.

a) Principe de mesure

La caractérisation en vibration d'un dispositif est effectuée selon le scénario suivant : le générateur envoie un signal d'excitation sinusoïdal au haut-parleur qui va générer une vibration à la fréquence d'excitation. L'accélération est ensuite mesurée par l'accéléromètre.

Étant excité par une vibration harmonique, le dispositif de récupération d'énergie va générer une tension alternative au travers de la charge résistive connectée à ses bornes. Le déplacement à l'extrémité libre du dispositif est mesuré par un télémètre laser. Les grandeurs physiques (l'accélération, la tension générée aux bornes de la résistance, le déplacement à l'extrémité libre du dispositif) sont mesurées grâce à l'oscilloscope.

Un post-traitement des données sous Matlab permet alors de calculer la puissance moyenne récupérable aux bornes du dispositif, définie par :

$$P_{moy} = \frac{\left(V_S/\sqrt{2}\right)^2}{R}$$

où V_s est l'amplitude de tension générée et R est la charge résistive connectée aux bornes du dispositif (cf. figure 3.2).

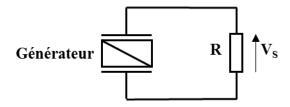


Figure 3.2 : Mesure de tension de sortie du dispositif.

b) Validation du banc de caractérisation vibratoire

Afin d'assurer le bon fonctionnement du banc de test, nous avons caractérisé le comportement du haut-parleur qui sert à générer l'excitation vibratoire appliquée à notre générateur piézoélectrique. Cette étape de validation est très importante pour caractériser et évaluer précisément la performance de notre générateur piézoélectrique en fonction de la consigne de vibration appliquée.

Le comportement vibratoire de notre haut-parleur est d'abord caractérisé en fonction de la fréquence et de l'amplitude de la tension électrique envoyée par le GBF. L'accélération générée par le haut-parleur est mesurée à l'aide des trois capteurs différents : un accéléromètre de haute précision PCB 393B de Piezotronics, un accéléromètre ADXL337 de Analog Devices et un capteur de déplacement 1D LK-G500 de Keyence.

La figure 3.3 présente l'accélération mesurée par les trois capteurs en fonction de la fréquence et de l'amplitude de la tension électrique envoyée par le GBF. Dans la gamme d'accélération de 100 mg à 600 mg, les trois capteurs donnent des résultats similaires. Par exemple, à une fréquence de 150 Hz et une tension de 5 V, les capteurs PCB 393B, ADXL337 et LK-G500 mesurent une accélération de 484,8 mg, 481 mg et 468,2 mg respectivement. L'écart maximal entre les trois capteurs est de 3,4 %.

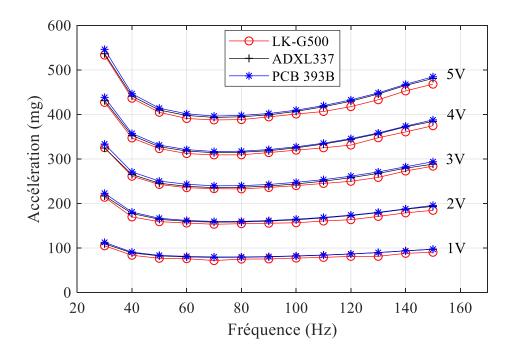


Figure 3.3 : Comparaison de l'accélération mesurée avec trois capteurs différents pour de fortes valeurs d'accélération.

Puisque nos études seront menées dans le domaine linéaire, les sollicitations à faible accélération sont requises. Nous sommes donc intéressés par un accéléromètre qui est capable de mesurer un faible niveau d'accélération, de l'ordre de 10 mg. La figure 3.4 présente la réponse des accéléromètres évoqués ci-dessus à une faible tension de 0,1 V et sur une gamme de fréquence de 30 Hz à 150 Hz. L'accéléromètre PCB donne une réponse qualitativement similaire au comportement attendu avec un faible bruit, les deux autres capteurs semblent incapables de mesurer les faibles accélérations. Par conséquent, l'accéléromètre PCB sera utilisé par la suite dans nos études pour mesurer de faibles accélérations.

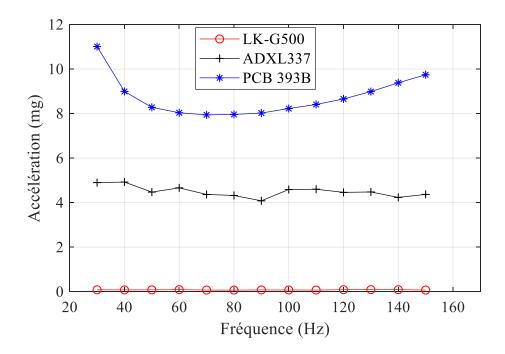


Figure 3.4 : Comparaison des trois capteurs à faible accélération.

La figure 3.5.a présente l'amplitude de l'accélération mesurée dans la bande de fréquence d'intérêt pour les applications visées, i.e. [10 Hz – 170 Hz]. Celle-ci n'est pas constante du fait d'une résonance de l'ensemble du système mécanique à 22 Hz. L'accélération est ensuite plus stable entre 80 Hz et 150 Hz.

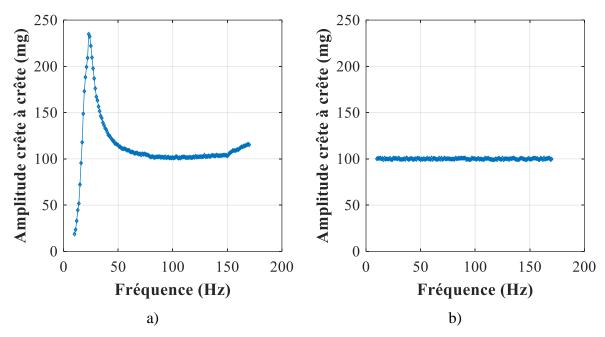


Figure 3.5 : Accélération mesurée avant a) et après b) la mise en place d'une boucle d'asservissement.

Ainsi, afin d'assurer une consigne d'accélération constante quelle que soit la fréquence, une boucle d'asservissement développée sous Matlab est mise en place (cf. figure 3.6). Une consigne d'accélération est fixée au début de la boucle, puis l'accélération générée par le haut-parleur est mesurée et comparée à la valeur de consigne. L'écart entre l'accélération mesurée et la consigne est imposé à 2 % pour optimiser la vitesse de l'ajustement. Si l'écart est inférieur à 2 %, on considère que la consigne est assurée et la mesure des dispositifs est démarrée ; sinon le programme développé sous Matlab va mettre en place une action proportionnelle, il détermine un coefficient de proportionnalité entre l'accélération mesurée et la tension sortie du GBF. Ensuite, il corrige la tension sortie du GBF pour atteindre la consigne d'accélération.

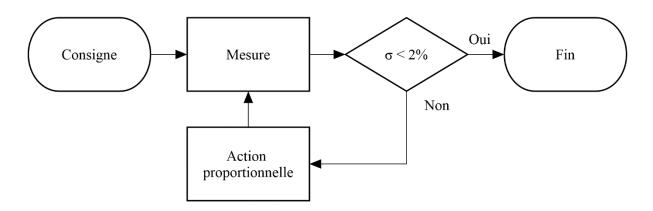


Figure 3.6 : Boucle d'asservissement développée sous Matlab.

La figure 3.5.b présente l'accélération mesurée après avoir asservi l'accélération : l'accélération mesurée est bien en accord avec la valeur de consigne de 100 mg sur toute la gamme de fréquences souhaitée. Le banc de caractérisation vibratoire est donc validé.

2. Estimation du déplacement de la couche PZT « encastrée-libre »

La poutre PZT étudiée précédemment dans le chapitre 2 est maintenant fixée sur le hautparleur du banc de vibration présenté dans la figure 3.1. Le mouvement vertical sinusoïdal est transmis à partir du haut-parleur au côté encastré de l'échantillon à travers le dispositif de serrage. Cela nous permet d'étudier le comportement vibratoire de l'échantillon.

En parallèle des expériences, une étude numérique a été menée. Les conditions suivantes sont appliquées pour la modélisation EF 3D :

• Le côté encastré est soumis une accélération harmonique de 10 mg crête-à-crête.

• La fréquence de sollicitation varie de 60 Hz à 72 Hz par pas de 0,1 Hz.

La figure 3.7 présente l'amplitude du Déplacement au niveau du Bout de la Poutre (DBP) PZT lorsqu'une accélération de 10 mg crête à crête est appliquée. La poutre PZT est en circuit ouvert (i.e. aucune charge électrique connectée). La comparaison entre la simulation et la mesure est présentée dans le tableau 3.2. Un écart de 3,5 % au niveau de la fréquence de résonance entre la simulation EF et la mesure est observé. Cet écart, même s'il reste raisonnable, monte à 7,3 % en ce qui concerne l'amplitude DBP.

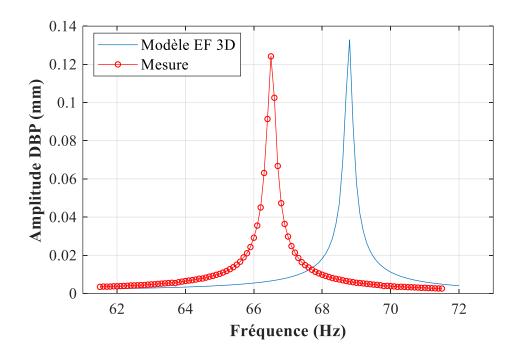


Figure 3.7 : Déplacement DBP d'une poutre PZT-EL^V à l'accélération de 10 mg.

Tableau 3.2: Comparaison de f_r et de l' A_{DBP} à 10~mg d'accélération crête-à-crête entre la mesure et la simulation EF.

	Mesure	Simulation EF	Ecart Δ (%)
f _r (Hz)	66,5	68,8	3,5
A _{DBP} (mm)	0,124	0,133	7,3

Une étude complémentaire a été menée sur différentes façons de considérer le dispositif de serrage du point de vue de sa modélisation [132] (cf. annexe 2). Celle-ci a montré qu'en

modélisant le dispositif de serrage par une constante de raideur ajustable, il est possible de gagner en précision (< 0,1 %) au niveau de la fréquence de résonance.

Ainsi, ces écarts entre expérience et simulation viennent probablement du dispositif de serrage lui-même et non pas des paramètres de la couche PZT utilisés pour la modélisation et dont l'identification a fait l'objet du chapitre précédent.

3. Cas de l'unimorphe

L'unimorphe, décrit dans le chapitre 2, est maintenant soumis à une vibration harmonique générée par le haut-parleur du banc de vibration. La puissance récupérée au travers d'une charge résistive *R* par l'unimorphe sera mesurée et simulée (cf. figure 3.8). Les conditions suivantes sont appliquées pour la mesure et la modélisation EF 3D :

- L'unimorphe est caractérisé en vibration à une accélération de 10 mg crête-à-crête.
- La fréquence de sollicitation varie de 70,1 Hz à 73,1 Hz par pas de 0,1 Hz.
- La valeur de la résistance R varie de 1 k Ω à 10 M Ω .

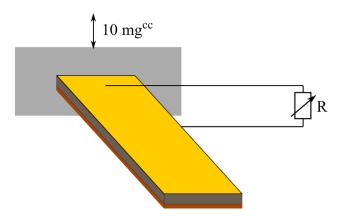


Figure 3.8 : Conditions d'étude de l'unimorphe fixé au dispositif de serrage UNI-EL^Z et relié à une charge résistive.

La figure 3.9 montre la cartographie de la puissance générée par l'unimorphe en fonction de la résistance connectée aux bornes de l'unimorphe et de la fréquence d'excitation. Un maximum de puissance égal à $0.02~\mu W$ est observé à une fréquence de 71.6~Hz et sur une résistance de $200~k\Omega$.

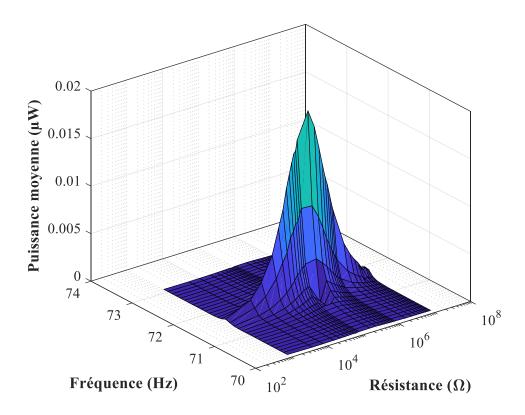


Figure 3.9 : Cartographie de la puissance moyenne UNI-EL^V en fonction de la fréquence et de la résistance, pour une accélération de 10 mg.

La puissance moyenne UNI-EL $^{\rm V}$ en fonction de la résistance pour une accélération de 10 mg crête-à-crête et à la fréquence de résonance, où la puissance est maximale, est présentée dans la figure 3.10. On peut voir sur la figure que le modèle a bien prédit la puissance électrique mesurée. Pour la valeur de la puissance à la résistance optimale, soit $200 \text{ k}\Omega$, on observe un écart de 9,2 % entre le modèle EF et la mesure.

La figure 3.11 présente la puissance moyenne en fonction de la fréquence à la résistance optimale Z_r = 200 k Ω pour une accélération de 10 mg crête-à-crête. Un écart de 4,3 % au niveau de la fréquence de résonance entre le modèle EF et la mesure est observé. De la même façon, l'écart est de 9,2 % sur la puissance optimale.

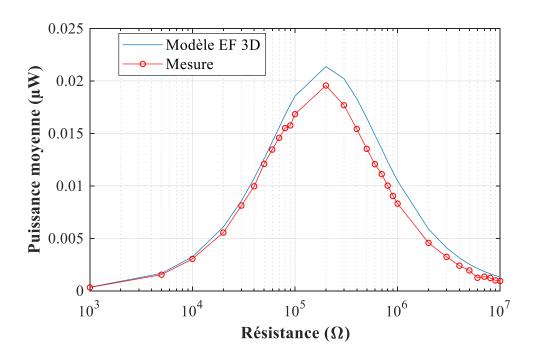


Figure 3.10 : Puissance moyenne UNI-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

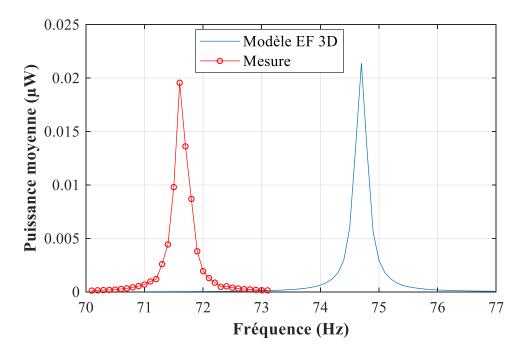


Figure 3.11 : Puissance moyenne UNI-EL V en fonction de la fréquence, à la résistance $optimale \ Z_r = 200 k\Omega \ et \ à \ l'accélération \ de \ 10 \ mg.$

Au niveau du déplacement au bout de la poutre « unimorphe » en fonction de la résistance, à la fréquence de résonance où l'amplitude DBP est maximale, un bon accord entre

le modèle et la mesure est obtenu (cf. figure 3.12). Un écart minimal entre le modèle et la mesure est observé à une résistance de $50 \, \mathrm{k}\Omega$, il est de 0,23 % et un écart maximal de 8,93 % est observé à une résistance de $8 \mathrm{M}\Omega$. Les deux courbes ont une tendance à diverger pour une haute impédance.

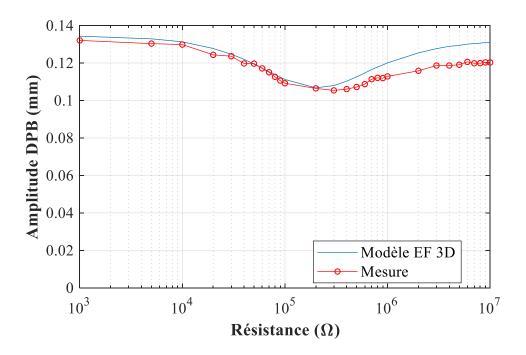


Figure 3.12 : Déplacement au bout de poutre UNI-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

La figure 3.13 présente la tension générée par le générateur en fonction de la résistance à la fréquence de résonance où l'amplitude de tension est maximale. On peut voir sur la figure que dans la zone où l'impédance est inférieure à $100~\text{k}\Omega$, le modèle et la mesure s'accordent bien, les écarts sont inférieurs à 6~%. Au-delà de $100~\text{k}\Omega$ la tension simulée commence à diverger de celle mesurée (14.8~% de différence à $10~\text{M}\Omega$).

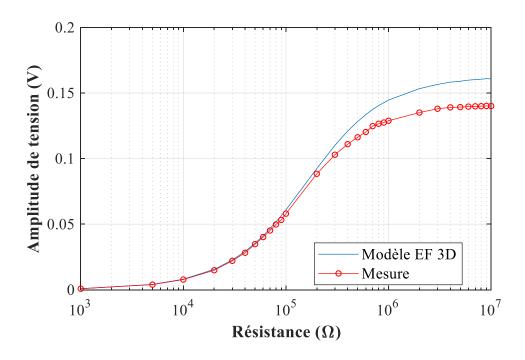


Figure 3.13 : Tension électrique UNI-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

Le tableau 3.3 synthétise les différences observées entre la simulation EF 3D et l'étude expérimentale de l'unimorphe en mode générateur. On peut ainsi constater que les écarts entre le modèle EF et la mesure sont faibles (< 10 %). D'autre part, les valeurs de l'amplitude DBP et de la tension à la résonance obtenues par la simulation EF sont très proches des valeurs expérimentales (moins de 5 % d'écart). Les écarts entre la simulation EF 3D et la mesure peuvent être dus au dispositif de serrage, comme nous l'avions observé dans la section précédente, et peuvent également provenir de la non-maîtrise de la couche de shim.

Tableau 3.3 : Synthèse des différences observées entre la simulation EF 3D et l'étude expérimentale de l'unimorphe en mode générateur.

	Mesure	Simulation EF	Ecart Δ (%)
f _r (Hz)	71,6	74,7	4,3
$Z_{r}\left(k\Omega\right)$	200	200	<0,1
$P_r(\mu W)$	0,0196	0,0217	9,2
$A^{\mathrm{DBP}}_{r}(\mathrm{mm})$	0,107	0,107	0,19
$V_{r}(V)$	0,088	0,092	4,56

4. Cas du bimorphe

Le bimorphe étudié dans le chapitre 2 est maintenant soumis à une vibration harmonique générée par le haut-parleur du banc de vibration. Les conditions suivantes sont appliquées pour la mesure et la modélisation EF 3D :

- Le bimorphe est caractérisé en vibration à l'accélération de 10 mg crête-à-crête.
- La fréquence de sollicitation varie de 129,7 Hz à 137,7 Hz par pas de 0,1 Hz.
- La valeur de la résistance varie de 1 k Ω à 10 M Ω .

La figure 3.14 montre que la puissance générée par le bimorphe dépend de la fréquence d'excitation et de la valeur de la résistance connectée aux bornes du dispositif. Contrairement au cas de l'unimorphe, on observe cette fois-ci deux maxima de puissance récupérée : l'un à la fréquence de résonance ($P_r = 0.029~\mu W$, $f_r = 131.9~Hz$) et l'autre à la fréquence d'anti-résonance ($P_a = 0.028~\mu W$, $f_a = 135.7~Hz$). Il est à noter que le pic de puissance récupérée à la fréquence de résonance correspond à une impédance ($Z_r = 10~k\Omega$) plus faible que celle du pic de puissance récupérée à l'anti-résonance ($Z_a = 5~M\Omega$).

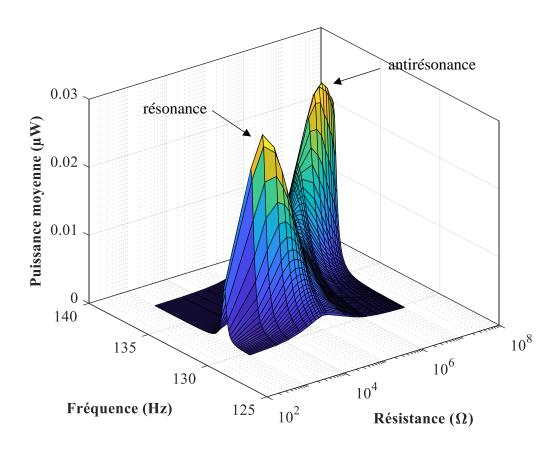


Figure 3.14 : Cartographie de la puissance moyenne en fonction de la fréquence et de la résistance à l'accélération de 10 mg crête-à-crête.

La puissance moyenne BIM-EL V en fonction de la résistance pour une accélération de 10mg crête-à-crête et à la fréquence optimale, où la puissance est maximale, est présentée dans la figure 3.15. On peut voir sur la figure que le modèle et la mesure concordent bien. Il y a deux maxima, l'un à la résistance de résonance $Z_r = 10~k\Omega$ et l'autre à la résistance d'anti-résonance $Z_a = 5~M\Omega$. A l'anti-résonance Z_a , les puissances simulée et mesurée sont relativement égales (environ 0,0281 μ W et 0,0283 μ W respectivement). Un écart de 0,7 % entre la simulation EF et la mesure est obtenu. Mais à la résistance de résonance Z_r , l'écart est relativement grand et il est égal à 16,4 %, soit une puissance de 0,0287 μ W et de 0,0235 μ W pour la mesure et la simulation respectivement.

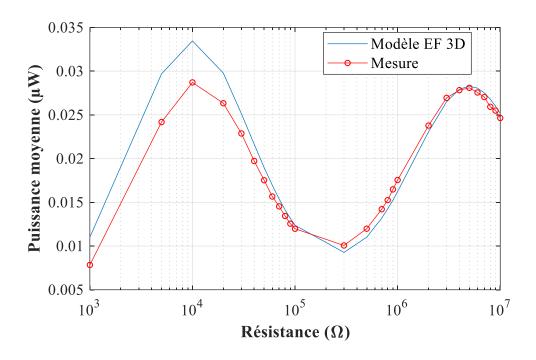


Figure 3.15 : Puissance moyenne BIM-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

Concernant la puissance moyenne en fonction de la fréquence, à la résistance de résonance $Z_r = 10 \text{ k}\Omega$ pour une accélération de 10 mg crête-à-crête, la fréquence de résonance mesurée est de 131,9 Hz et la fréquence de résonance simulée est de 134 Hz soit un écart de 1,6 %. De la même façon, l'écart de la puissance à la résonance est de 16,4 % (cf. figure 3.16).

La figure 3.17 présente la puissance moyenne en fonction de la fréquence, à la résistance d'anti-résonance $Z_a = 5 \text{ M}\Omega$ pour une accélération de 10 mg crête-à-crête. Les fréquences d'anti-résonance de la mesure et la simulation EF sont de 135,7 Hz et 137,9 Hz respectivement, soit un écart de 1,6 %. De la même façon, l'écart de la puissance à l'anti-résonance est de 0,7 %.

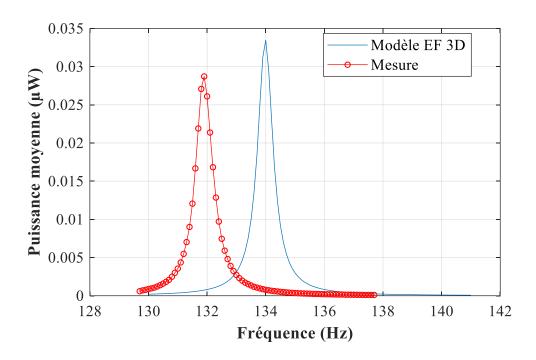


Figure 3.16. Puissance moyenne BIM-EL V en fonction de la fréquence, à la résistance de résonance $Z_{r}=10~k\Omega$ et à l'accélération de 10~mg.

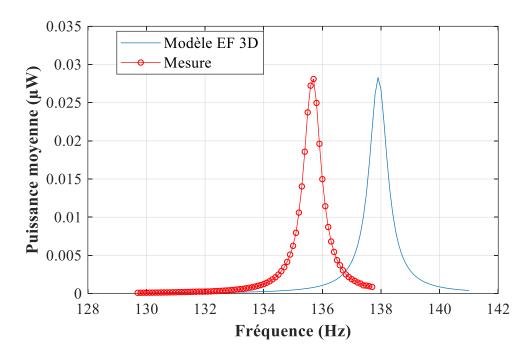


Figure 3.17 : Puissance moyenne BIM-EL V en fonction de la fréquence, à la résistance d'antirésonance $Z_a = 5M\Omega$ et à l'accélération de 10~mg.

Le déplacement au bout de la poutre « bimorphe » en fonction de la résistance à la fréquence où l'amplitude DBP est maximale est présenté dans la figure 3.18. Un bon d'accord entre le modèle et la mesure est obtenu. A la condition proche du court-circuit $R=1~k\Omega$, un écart de 14,1 % est observé entre la simulation et la mesure, l'amplitude DBP mesurée et simulée sont de 0,0364 mm et 0,0415 mm respectivement. A la résistance de résonance $Z_r=10~k\Omega$, l'amplitude DBP mesurée et simulée sont de 0,0221 mm et 0,0229 mm respectivement, ce qui équivaut à un écart de 3,8 %. A la résistance d'anti-résonance $Z_a=5~M\Omega$, l'amplitude DBP mesurée et simulée sont de 0,0198 mm et 0,0186 mm respectivement, ce qui équivaut à un écart de 6 %.

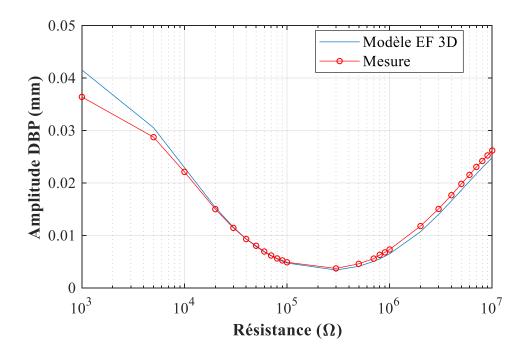


Figure 3.18 : Déplacement au bout de poutre BIM-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

La figure 3.19 présente la tension générée du bimorphe en fonction de la résistance à la fréquence où l'amplitude de tension est maximale. On peut constater que le modèle EF 3D a bien prédit la valeur de tension mesurée. Effectivement, à la résistance de résonance Z_r les tensions mesurée et simulée sont de 0,024 V et 0,0259 V respectivement, ce qui équivaut à un écart de 5,4 %. Tandis qu'à la résistance d'anti-résonance Z_a un écart de 0,3 % est obtenu entre la simulation (0,53 V) et la mesure (0,532 V).

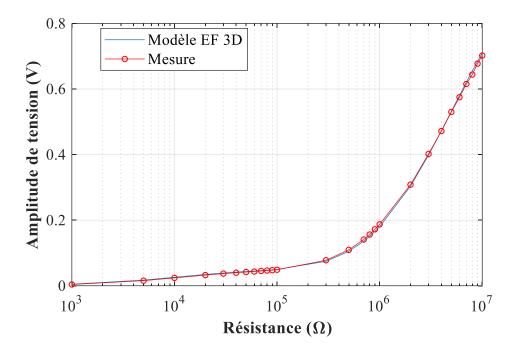


Figure 3.19 : Tension électrique BIM-EL^V en fonction de la résistance, à la fréquence optimale et à l'accélération de 10 mg.

Le tableau 3.4 synthétise les écarts observés entre l'étude numérique et l'étude expérimentale du bimorphe en mode générateur. On peut ainsi constater que les écarts des fréquences de résonance et anti-résonance entre la mesure et le modèle EF sont faibles (environs 1,6%) et que le modèle prédit parfaitement les valeurs des résistances Z_r et Z_a . Au niveau de la puissance récupérée, la mesure et la modélisation EF s'accordent mieux sur la valeur de la puissance à l'anti-résonance (écart < 1 %) que sur la valeur de la puissance à la résonance (écart de 16,4%). Les écarts sur les amplitudes DBP et les tensions électriques à la résonance et à l'anti-résonance sont inférieurs à 6%.

Tableau 3.4 : Synthèse des différences observées entre l'étude expérimentale et l'étude numérique du BIM-EL^V en mode générateur.

	Mesure	Simulation EF 3D	Ecart Δ (%)
f _r (Hz)	131,9	134	1,6
$Z_{r}\left(\Omega\right)$	10000	10000	<0,01
$P_r(\mu W)$	0,0287	0,0335	16,4
$A^{DBP}_{r}(mm)$	0,0221	0,0229	3,8
$V_{r}(V)$	0,024	0,0259	5,4

f _a (Hz)	135,7	137,9	1,6
$Z_{a}\left(\Omega ight)$	5e6	5e6	<0,01
Pa (µW)	0,0281	0,0283	0,7
A ^{DBP} _a (mm)	0,0198	0,0186	6
$V_a(V)$	0,53	0,5319	0,3

5. Conclusion

A travers ce chapitre, les résultats issus de modèles EF 3D ont été comparés à des mesures expérimentales. Le premier modèle a permis d'étudier la réponse mécanique d'une couche PZT encastrée-libre soumise à une excitation vibratoire harmonique et de valider le banc de test. Les deux autres modèles ont quant à eux permis de simuler les réponses des dispositifs de récupération d'énergie vibratoire en mode générateur. Les modèles EF 3D ont bien prédit les résultats expérimentaux. Plusieurs paramètres d'intérêt pour la récupération d'énergie ont ainsi été évalués à la ou aux fréquences utiles (fréquence de résonance dans le cas de l'unimorphe, fréquences de résonance et d'anti-résonance dans le cas du bimorphe) tels que la puissance récupérée, le déplacement en bout de dispositif, la tension à la sortie du dispositif. Ces paramètres tant mécaniques qu'électriques sont ceux qui prévalent pour la conception d'un dispositif de récupération d'énergie. Ils permettent de définir et de dimensionner précisément le récupérateur d'énergie en vue de son intégration avec les circuits électroniques de gestion de l'alimentation, de mesures et de communication intégrés au sein d'un même module. Dans le chapitre suivant, nous allons utiliser des modèles EF 3D développés afin d'optimiser le design de notre générateur en répondant à un cahier des charges spécifique.