

Figure 4.4 : Puissance moyenne optimale en fonction de la longueur et de la largeur.

2.1.1.2. Effet sur l'impédance électrique et le déplacement

En plus de la puissance électrique, d'autres grandeurs de sortie du générateur sont étudiées : l'impédance optimale Z_r , en lien avec le circuit de management de puissance (CGP), et le déplacement maximal au bout de la poutre, paramètre d'intérêt pour l'intégration du dispositif.

La figure 4.5 présente l'évolution de l'impédance Z_r en fonction des paramètres L et b . Pour une valeur de L_i donnée, la valeur de Z_r diminue avec l'augmentation de la largeur. Plus particulièrement, l'impédance Z_r diminue d'un facteur 11 quand la largeur est multipliée par 9 dans le cas $L = 36$ mm : ceci traduit l'augmentation de la capacité propre du bimorphe, puisque l'épaisseur varie faiblement (cf. figure 4.3). A une largeur plus faible, l'impédance Z_r est plus sensible à la longueur.

Au niveau de l'amplitude DBP maximale, la figure 4.6 montre que l'amplitude DBP maximale est plus sensible à la largeur qu'à la longueur. Le déplacement diminue en fonction de la largeur : par exemple, pour une longueur $L = 36$ mm, l'amplitude du déplacement diminue de 19% quand la largeur est multipliée par 9.

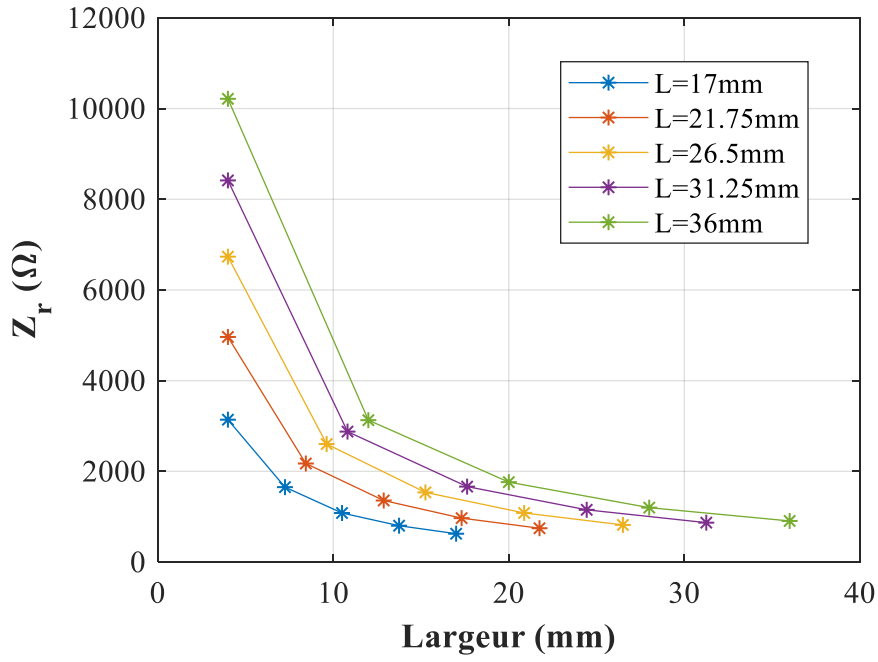


Figure 4.5 : Résistance Z_r en fonction de la longueur et de la largeur.

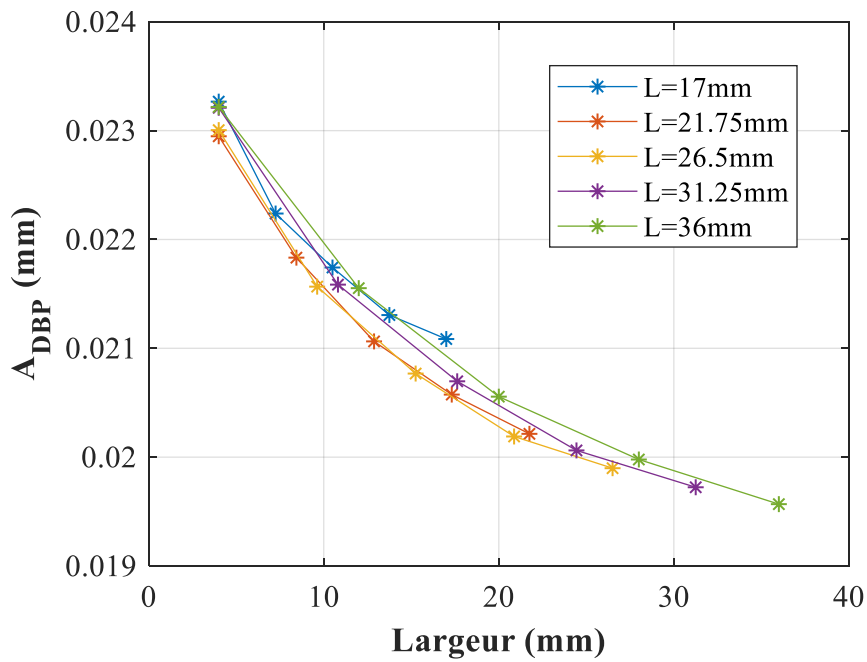


Figure 4.6 : Amplitude de déplacement en fonction de la longueur et de la largeur.

2.1.1.3. Effet sur la NPD et l'efficacité

Les autres grandeurs importantes à étudier, pour discriminer les figures de mérite à utiliser afin de comparer les générateurs, sont la densité de puissance normalisée NPD et l'efficacité du générateur.

Ainsi, la hauteur (H) du dispositif est définie comme la somme de l'épaisseur totale du bimorphe ajoutée à l'amplitude DBP maximale ($H = 2epP + epS + 2A_{DBP}$). La hauteur du dispositif et la densité de puissance normalisée ont été tracées en fonction de la largeur et de la longueur et sont présentées sur la figure 4.7. La largeur n'a pas beaucoup d'influence sur la hauteur tandis que l'influence de la longueur est plus importante : avec une longueur plus grande, la hauteur du dispositif est plus grande (cf. figure 4.7.a), tendance qui vient principalement de l'évolution de l'épaisseur epP (cf. figure 4.3). La figure 4.7.b montre que la densité de puissance normalisée change significativement avec la longueur : par exemple à $b = 4$ mm, la NPD augmente de 44 % lorsque L augmente de 17 mm à 36 mm. En revanche, la NPD diminue avec la largeur, par exemple à $L = 36$ mm, la NPD diminue de 14 % quand la largeur augmente de 4 mm à 36 mm. Comme la puissance électrique, la NPD augmente lorsque la longueur augmente. Par contre, au contraire de la puissance, la NPD diminue lorsque la largeur augmente.

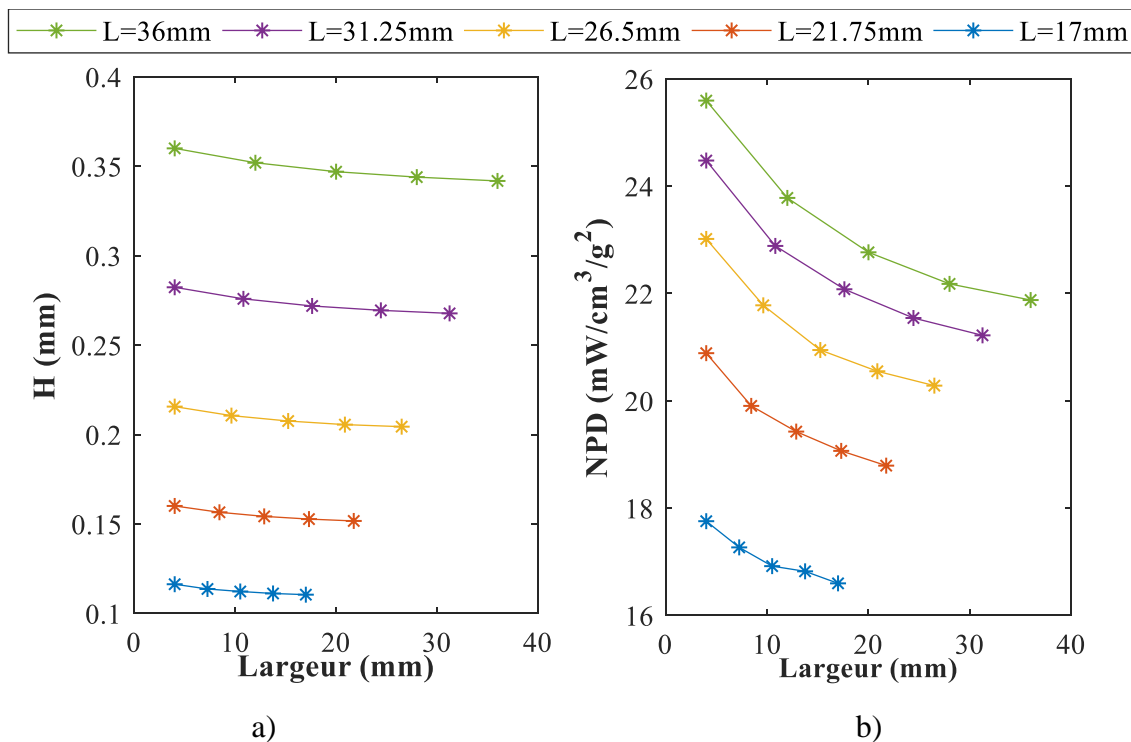


Figure 4.7 : Hauteur du dispositif a) et densité de puissance normalisée b) en fonction de la largeur et paramétrées par la longueur L .

L'efficacité du générateur (η) est définie comme le rapport entre l'énergie électrique récupérée et le travail mécanique à l'entrée du générateur. L'efficacité du générateur à la résonance est déduite de l'équation (32) et s'exprime de la manière suivante [7] :

$$\eta = \frac{V_{RMS}^2/R}{\frac{1}{2}m \times \ddot{X} \times \dot{Z}} \quad (40)$$

Dans l'équation (40) le numérateur correspond à la puissance électrique (délivrée à la charge R par le générateur) et le dénominateur correspond à la puissance mécanique transférée par la source de vibration au générateur (P_m).

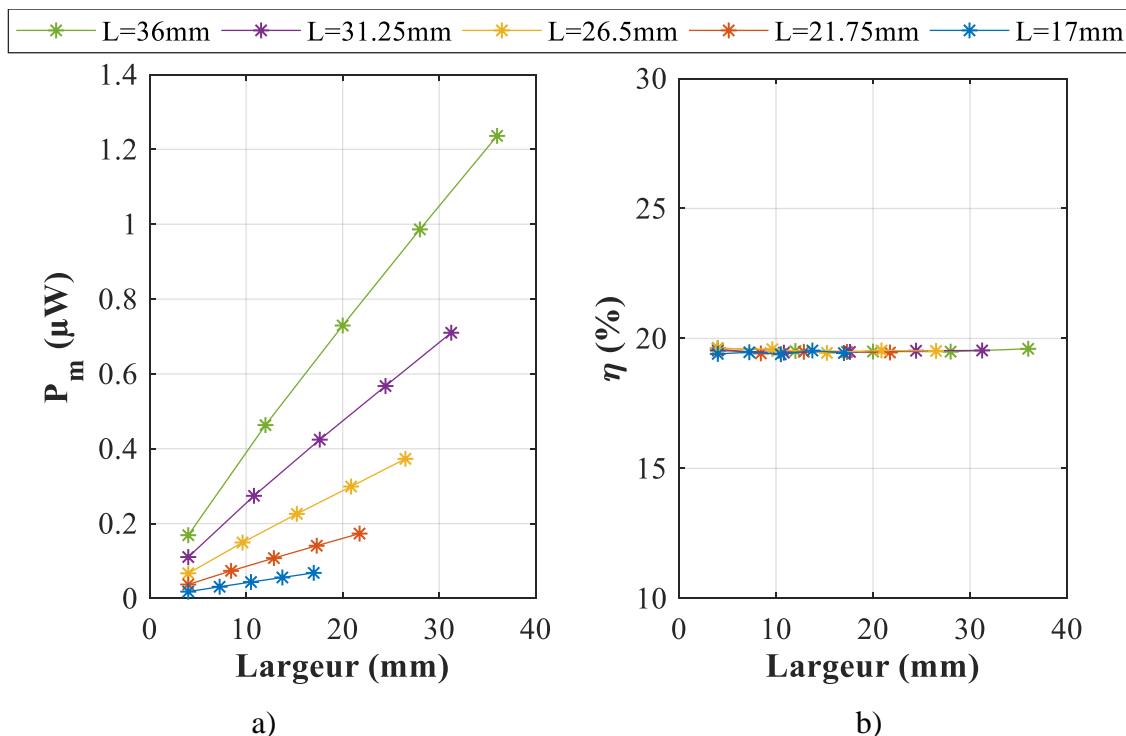


Figure 4.8 : Puissance mécanique transférée et efficacité du bimorphe en fonction de la largeur et de la longueur.

La puissance mécanique P_m augmente proportionnellement avec la largeur (cf. figure 4.8 a), et cette tendance est accentuée avec la longueur. En effet, l'évolution de la puissance mécanique en fonction de la largeur et de la longueur peut s'expliquer par l'évolution de la masse du générateur (cf. figure 4.9). L'influence des paramètres géométriques latéraux sur la puissance mécanique a la même tendance que la puissance électrique récupérée (cf. figure 4.4). L'efficacité du générateur reste donc constante autour de 19,5% pour toutes les valeurs de largeur et de longueur. Cela montre que l'efficacité du générateur ne dépend que des

paramètres intrinsèques du générateur notamment le coefficient de couplage électromécanique, le coefficient d'amortissement et elle ne dépend pas de paramètres géométriques du générateur. Ce constat est valable seulement dans le cas où l'excitation mécanique reste constante (l'amplitude d'accélération et la fréquence d'excitation sont inchangées).

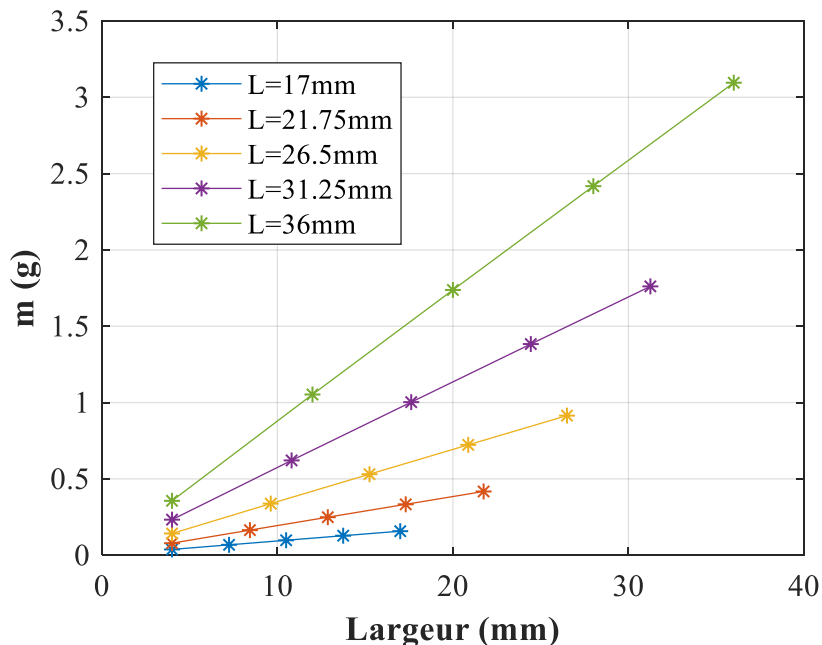


Figure 4.9 : Masse du générateur en fonction de la largeur et de la longueur L .

2.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche piézoélectrique et de l'épaisseur de la couche de shim

Afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique et de l'épaisseur du shim sur la réponse vibratoire du bimorphe soumis à une accélération de 5 mg, une étude paramétrique est réalisée. La fréquence d'excitation est fixée à 132,3 Hz. La largeur est fixée à 4 mm, et la longueur à 36 mm. L'étude paramétrique est réalisée en faisant varier la valeur de l'épaisseur epP de 25 μm à 152 μm , tandis que l'épaisseur du shim epS est ajustée, pour chaque valeur de epP , afin garder la fréquence de résonance constante.

Pour chaque configuration (epP_i) du bimorphe envisagée, la figure 4.10 montre l'épaisseur epS ajustée pour que la fréquence de résonance du dispositif reste constante. L'épaisseur epS diminue linéairement avec l'épaisseur epP (avec un taux de détermination R^2 de 99.77 %).

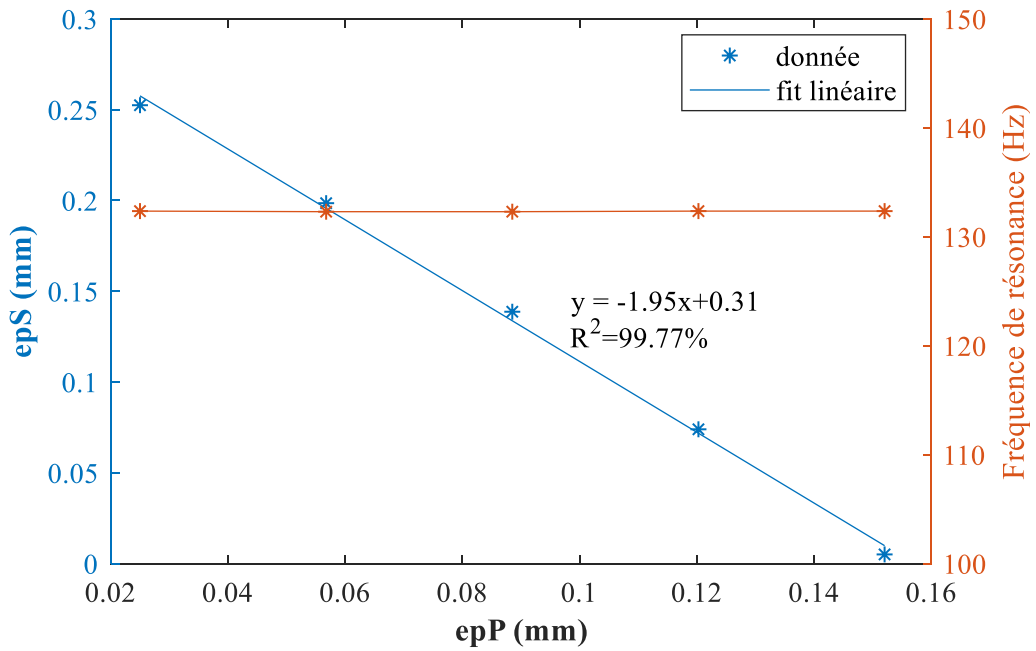


Figure 4.10 : Epaisseur du shim en fonction de l'épaisseur epP .

2.1.2.1. Effet sur la puissance électrique

La figure 4.11 présente la puissance moyenne optimale en fonction de l'épaisseur epP . La puissance P_r augmente quand l'épaisseur epP diminue, et donc quand l'épaisseur epS augmente.

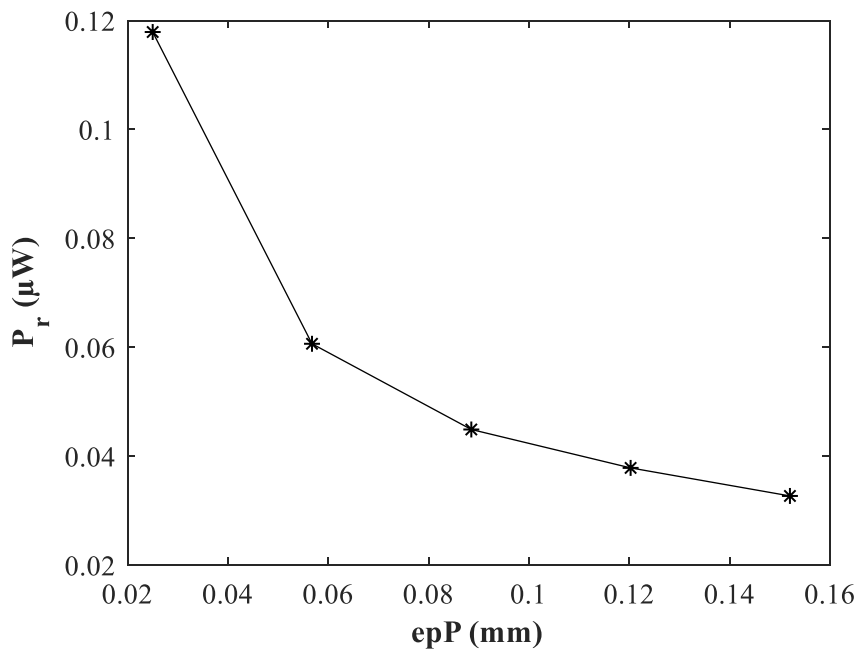


Figure 4.11 : Puissance moyenne en fonction de l'épaisseur des couches piézoélectriques.

Pour un matériau parfaitement élastique, la relation entre la contrainte (σ) et la déformation résultante (ε) est décrite par la loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (41)$$

où E est le module de Young ou le module d'élasticité. Or en réalité, une dissipation de l'énergie mécanique dans le matériau a lieu par la friction interne, et des états d'équilibre thermodynamique de la structure interne. Afin de modéliser ce phénomène, le module de Young est défini comme un coefficient complexe pour prédire simplement le comportement viscoélastique [144] :

$$E^* = E(1 + i \times \tan\delta_m) \quad (42)$$

où $\tan\delta_m$ est la tangente de l'angle de pertes entre la contrainte et la déformation, également appelée le facteur d'amortissement. Le facteur d'amortissement représente le rapport de l'énergie dissipée par la chaleur à l'énergie élastique conservée. Il dépend de la fréquence et la température, selon des lois qui peuvent être déterminées expérimentalement et qui n'ont pas de formulations analytiques [144].

Toutefois, le facteur d'amortissement du shim n'est pas souvent pris en compte dans les modèles analytiques pour modéliser le générateur. Pourtant, quand l'épaisseur du shim augmente, de fait, les pertes élastiques du shim interviennent de manière plus importante dans l'amortissement global du système (ξ).

Pour prendre en compte ce phénomène, le taux d'amortissement (appelé ensuite par le coefficient d'amortissement, ca) du shim en laiton est donc caractérisé par la mesure vibratoire d'une couche en laiton de 50 μm d'épaisseur car il n'est pas évident de caractériser une couche de laiton très souple de 12 μm comme celle utilisée pour fabriquer des bimorphes. Le coefficient d'amortissement, déterminé en utilisant la méthode à mi-puissance dite « half of power » [145], est égal à 0,007. Cette valeur est cohérente avec la littérature, le coefficient d'amortissement d'un métal ou d'un alliage de métal étant compris entre 0,001 et 0,1 [146].

L'étude paramétrique de l'épaisseur epP est ensuite faite avec quatre valeurs de coefficient d'amortissement : $ca=0$ (cas idéal), $ca = 0,001$, $ca = 0,01$ et $ca = 0,007$ (valeur mesurée). Pour chaque valeur de ca et de epP , l'épaisseur epS est ajustée pour respecter une valeur de fréquence de résonance constante égale à 132,3 Hz. La figure 4.12 montre que

l'évolution de l'épaisseur epS en fonction de l'épaisseur epP ne dépend pas de la valeur du coefficient d'amortissement du shim.

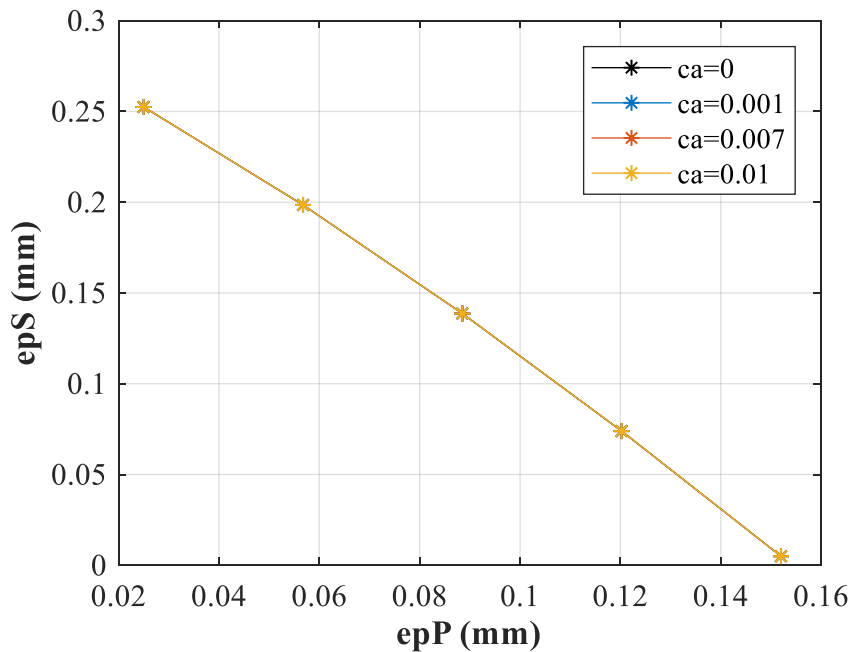


Figure 4.12 : Epaisseur du shim en fonction de l'épaisseur epP pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement du shim.

En revanche, la figure 4.13 montre que dans le cas où $ca = 0$ et $ca = 0,001$, la puissance Pr augmente quand l'épaisseur epP diminue (ie quand l'épaisseur epS augmente). En effet, pour une valeur faible ou nulle du coefficient ca du shim, le coefficient d'amortissement du générateur diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du shim, la puissance est donc augmentée. Dans les cas où les pertes sont considérables ($ca = 0,007$ et $0,01$ dans cette étude) la puissance Pr passe à un maximum en fonction de l'épaisseur epP .

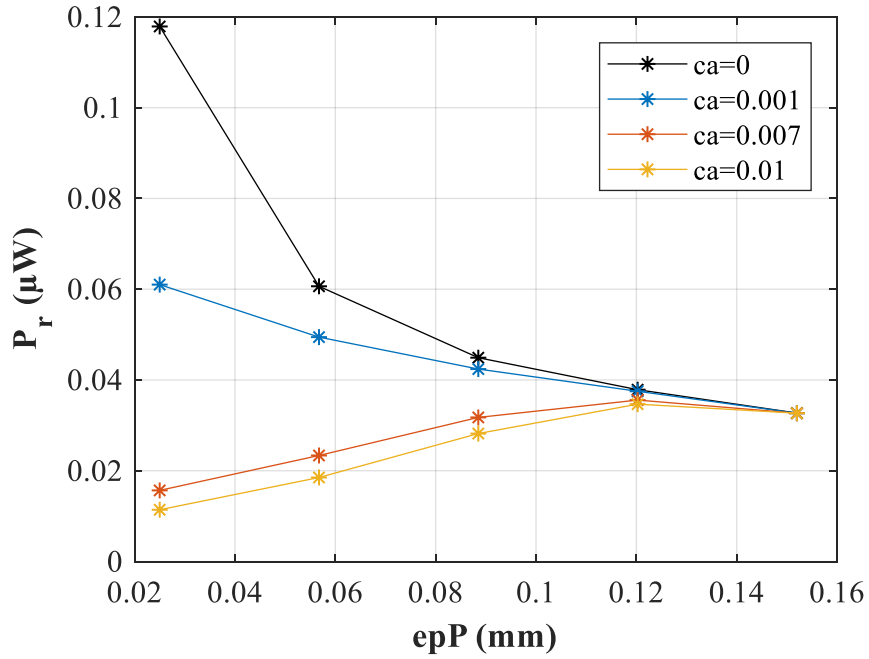


Figure 4.13 : Puissance moyenne optimale en fonction de l'épaisseur epP pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement du shim.

Effectivement, la puissance Pr maximale est déterminée grâce à la routine d'optimisation (cf. figure 4.2) et est montrée sur la figure 4.14. A ce point optimal, l'épaisseur epP est de 120,6 μm et l'épaisseur epS est de 73 μm . Par rapport à notre configuration expérimentale ($epP = 152 \mu\text{m}$ et $epS = 12 \mu\text{m}$), on peut constater une différence de puissance de 9 %.

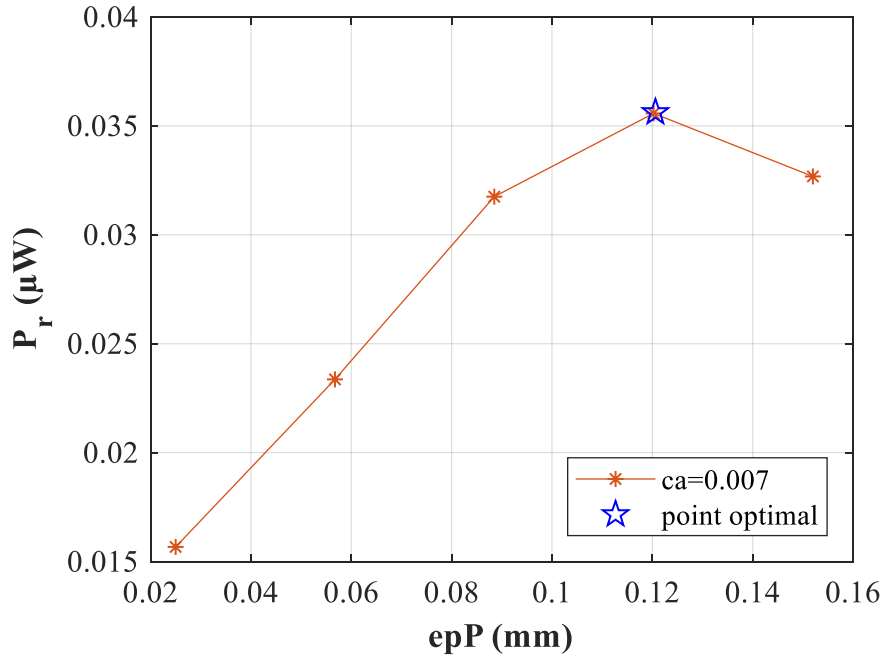


Figure 4.14 : Résultat de l'étude d'optimisation de la puissance moyenne pour la valeur $ca = 0,007$.

2.1.2.2. Effet sur l'impédance électrique et le déplacement

L'influence des épaisseurs epP et epS sur l'impédance optimale Z_r et sur l'amplitude du DBP est montrée sur la figure 4.15. Dans le cas où la valeur du coefficient ca du shim est faible, l'impédance Z_r augmente quand l'épaisseur epP augmente (et donc l'épaisseur epS diminue). Pour des valeurs plus importantes du coefficient ca du shim ($ca = 0,007$ et $ca = 0,01$), l'impédance Z_r décroît puis croît lorsque l'épaisseur epP augmente (et l'épaisseur epS diminue). L'impédance Z_r dépend donc à la fois des épaisseurs epP et epS mais aussi du coefficient d'amortissement du shim, et plus généralement du coefficient d'amortissement du système. Ce constat est également observé dans [11].

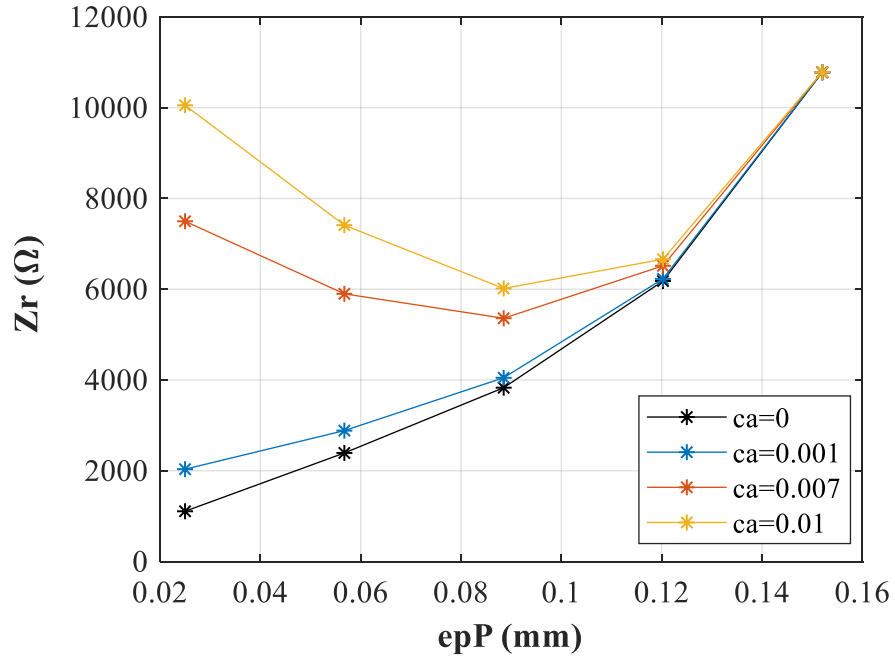


Figure 4.15 : Evolution de l'impédance Z_r en fonction de l'épaisseur epP pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement du shim.

Par ailleurs, la figure 4.16 montre que l'évolution de l'amplitude du DBP, en fonction de l'épaisseur epP et de la valeur du coefficient ca du shim, est similaire à celle de la puissance Pr (cf figure 4.13). Dans le cas où $ca = 0$ et $ca = 0,001$, l'amplitude du DBP diminue quand l'épaisseur epP augmente. Dans les cas où les pertes sont considérables ($ca = 0,007$ et $0,01$ dans cette étude), l'amplitude du DBP passe par un maximum en fonction de l'épaisseur epP .

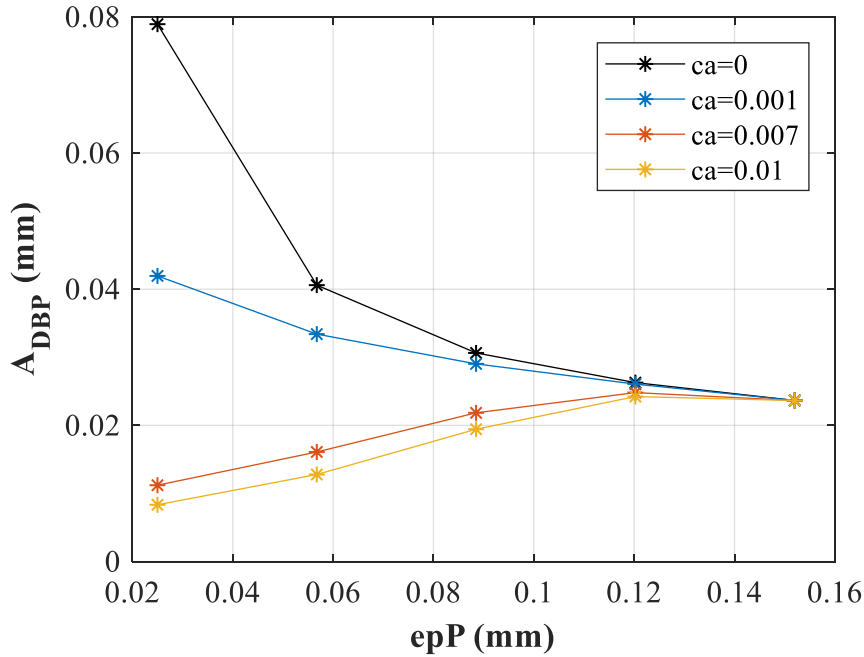


Figure 4.16 : Evolution du déplacement maximal en fonction de l'épaisseur epP pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement du shim.

2.1.2.3. Effet sur la NPD et sur l'efficience

La hauteur H du dispositif et sa NPD en fonction de l'épaisseur epP pour $ca = 0,007$ sont présentées sur la figure 4.17. La hauteur du dispositif ne change pas significativement avec l'épaisseur epP (variation de 12 % de hauteur lorsque epP varie de 300 %).

Même si leurs évolutions sont similaires, la NPD est plus sensible au paramètre epP que la hauteur H . En effet, la NPD varie de 107 % lorsque epP varie de 300% et passe par un maximum en fonction de l'épaisseur epP . On peut noter que la NPD peut augmenter de 6,5 % comparée à la configuration avec l'épaisseur $epP = 152 \mu\text{m}$ (le point le plus à droite) et de 102 % comparée à la configuration avec l'épaisseur $epP = 25 \mu\text{m}$ (le point le plus à gauche). Comparée à notre configuration expérimentale ($epP = 152 \mu\text{m}$), on peut constater une différence de 6,5 % par rapport au maximum.

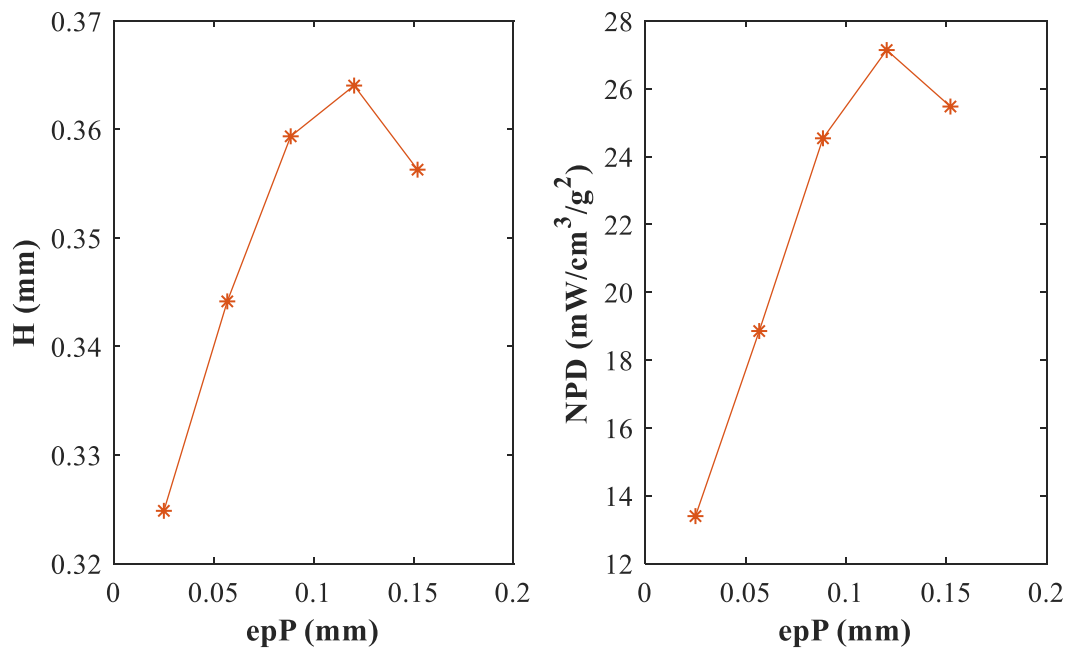


Figure 4.17 : Hauteur du dispositif et la NPD en fonction de l'épaisseur epP.

La figure 4.18 présente la puissance mécanique P_m transmise de la source d'excitation au générateur, ainsi que l'efficacité η du générateur. La puissance P_m et l'efficacité η en fonction de l'épaisseur epP (et de l'épaisseur epS) suivent la même tendance que la puissance P_r . Le point optimal est de 19,6 % pour l'efficacité, et l'efficacité ne varie pas beaucoup : l'écart entre le point optimal et la valeur la plus faible est de 0,52 % seulement.

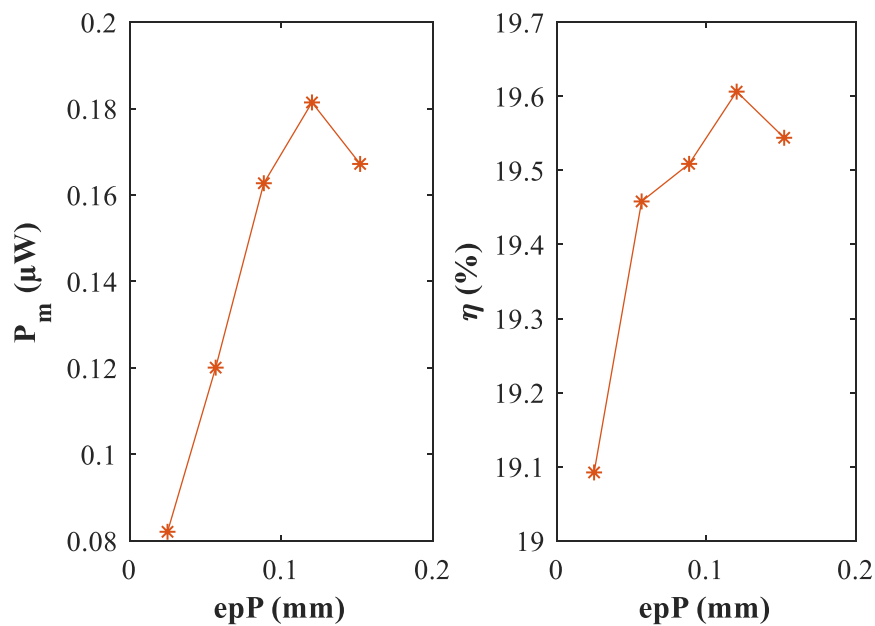


Figure 4.18 : Puissance mécanique transférée au générateur et son efficacité en fonction de l'épaisseur epP.

2.2. Etude d'un générateur de type bimorphe avec la masselotte

Dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire, on a vu que la fréquence fondamentale des sources de vibrations est généralement très basse (< 200 Hz). A des fins d'ajustement à cette source, il est possible d'ajouter une masselotte au bout de la poutre pour modifier la fréquence de résonance du générateur. De plus, la masselotte permet d'augmenter l'énergie mécanique à l'entrée du système et donc d'augmenter la puissance électrique générée. L'effet de la masselotte est étudié dans de nombreux travaux [147][148][149]. Généralement, la masselotte est réduite à une masse ponctuelle au bout de la poutre dans la plupart des modèles analytiques [108]. Néanmoins, dans la pratique, la masselotte est déposée sur le bimorphe avec autant de façons différentes qu'il existe de processus de fabrication [149][150][81][151]. Dans notre cas, la masselotte est composée de deux masses collées de part et d'autre du bimorphe, comme montré sur la figure 4.19.

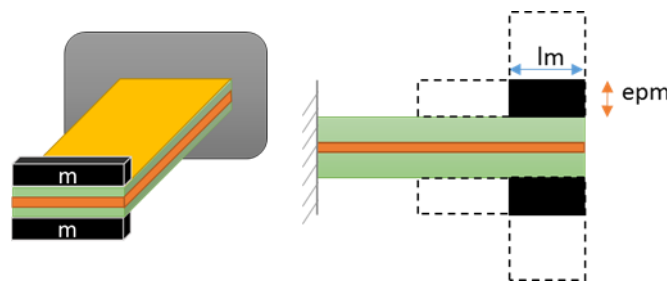


Figure 4.19 : Schéma du bimorphe avec la masselotte.

Afin d'étudier l'influence de la masselotte sur la réponse vibratoire du bimorphe, celui-ci est soumis à une accélération de 5 mg à une fréquence d'excitation de 50 Hz . Les paramètres géométriques latéraux du bimorphe sont fixés à 4 mm de large et 36 mm de long. L'épaisseur du shim est fixée à $12 \text{ }\mu\text{m}$ et la largeur de la masselotte est égale à la largeur du bimorphe, soit 4 mm .

La masse de la masselotte est égale à la somme des masses des deux blocs la constituant. La masse de la masselotte est directement liée aux paramètres lm (la longueur de la masselotte) et epm (l'épaisseur de la masselotte). Des études paramétriques sur ces deux paramètres sont donc réalisées pour voir leur influence sur la réponse vibratoire du générateur.

Ainsi, autour d'une configuration de référence ($lm_0 = 4 \text{ mm}$, $epm_0 = 0,5 \text{ mm}$), l'épaisseur lm varie de 1 mm à 18 mm en 5 points ; et epm , de $0,125 \text{ mm}$ à $2,5 \text{ mm}$ en 6 points.

On voit bien évidemment que la masse de la masselotte est proportionnelle à son épaisseur et à sa longueur (cf. figure 4.20).

Pour chaque configuration (l_{mi}, ep_{mi}) envisagée, la figure 4.21 montre l'épaisseur epP ajustée pour conserver la fréquence de résonance du dispositif à une valeur constante. On peut constater que l'épaisseur epP augmente avec la masse de la masselotte. En effet, quand la masse de la masselotte augmente, la constante de raideur de la poutre augmente pour garder une fréquence de résonance constante.

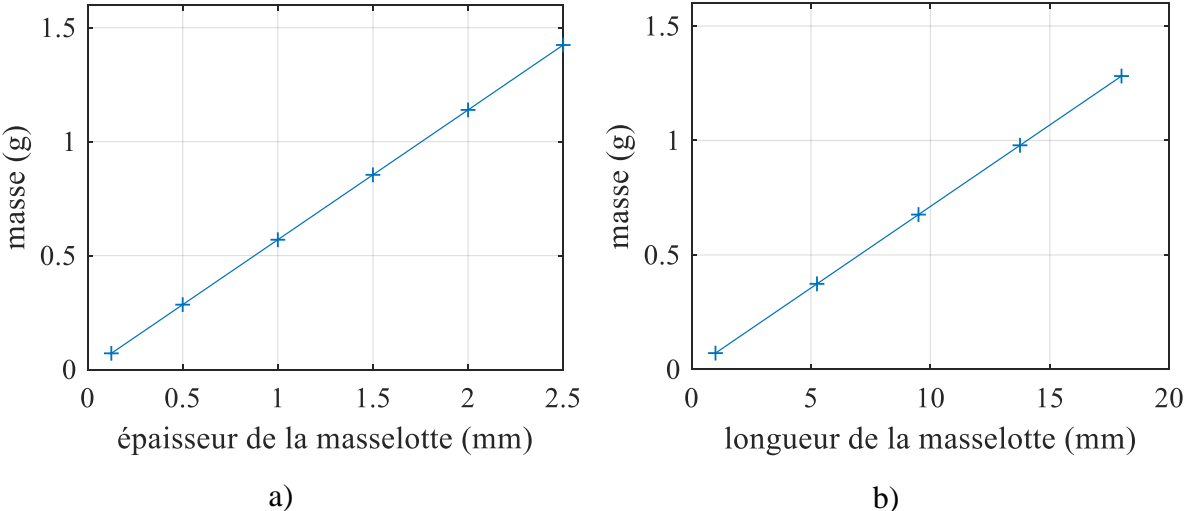


Figure 4.20 : Masse de la masselotte en fonction a) de son épaisseur et b) de sa longueur.

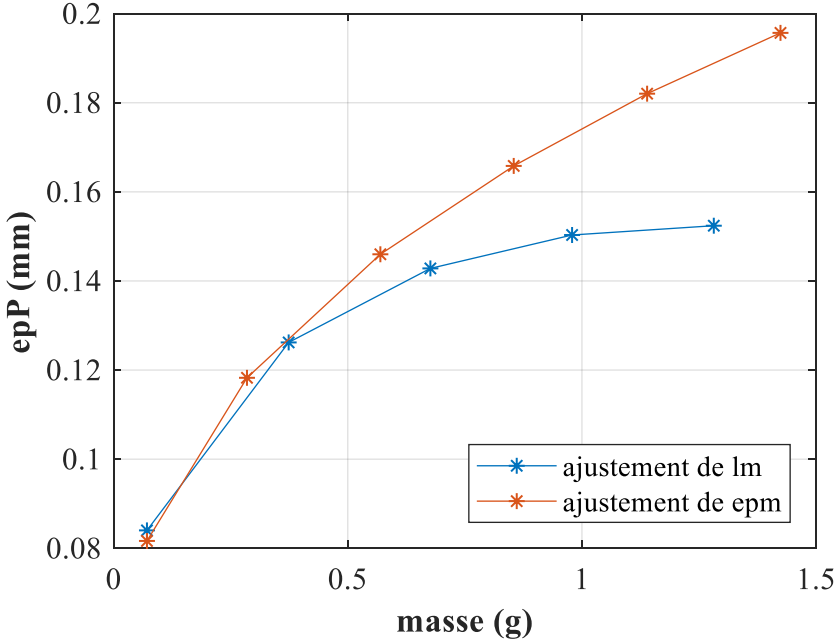


Figure 4.21 : Évolution de l'épaisseur epP en fonction de la masse de la masselotte.

2.2.1. Effet sur la puissance électrique

Pour des valeurs d'accélération et de fréquence de résonance du dispositif constantes, la puissance électrique P_r est proportionnelle à la masse de la masselotte et aux paramètres lm et epm (le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 99 % dans les deux cas) (cf. figure 4.22). Quand les paramètres lm et epm dépassent le point de référence (lm_0 et epm_0), avec une masse équivalente, l'augmentation du paramètre epm donne une meilleure valeur de P_r . Par exemple, avec une masselotte de 1,3 g, la puissance P_r dans le cas où epm est ajustée est 6 % plus grande que dans le cas où lm est ajustée.

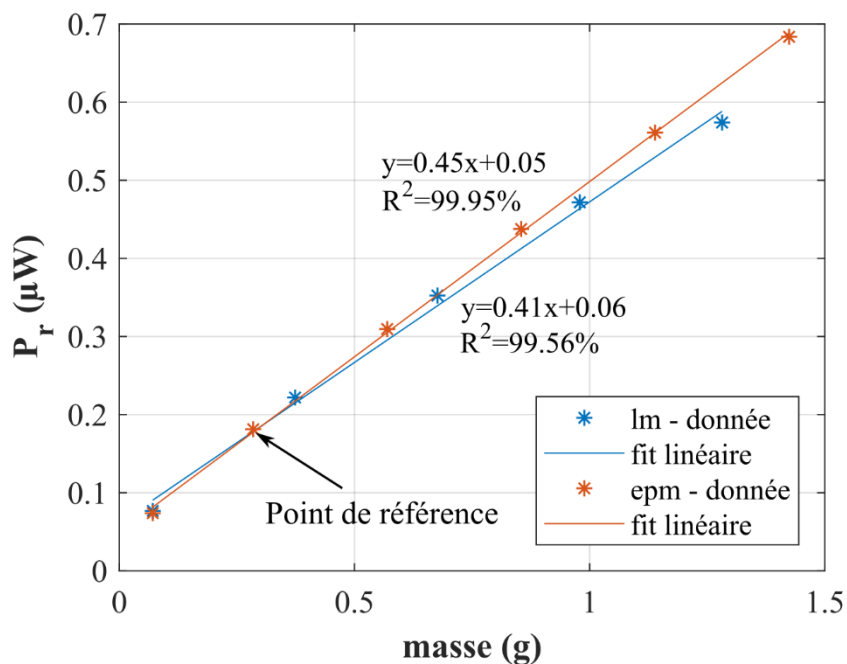


Figure 4.22 : Puissance moyenne optimale en fonction de la masse de la masselotte pour différentes valeurs de sa longueur (lm) et de son épaisseur (epm).

2.2.2. Effet sur l'impédance électrique et sur le déplacement

La figure 4.23 montre que l'impédance Z_r augmente avec la masse de la masselotte :

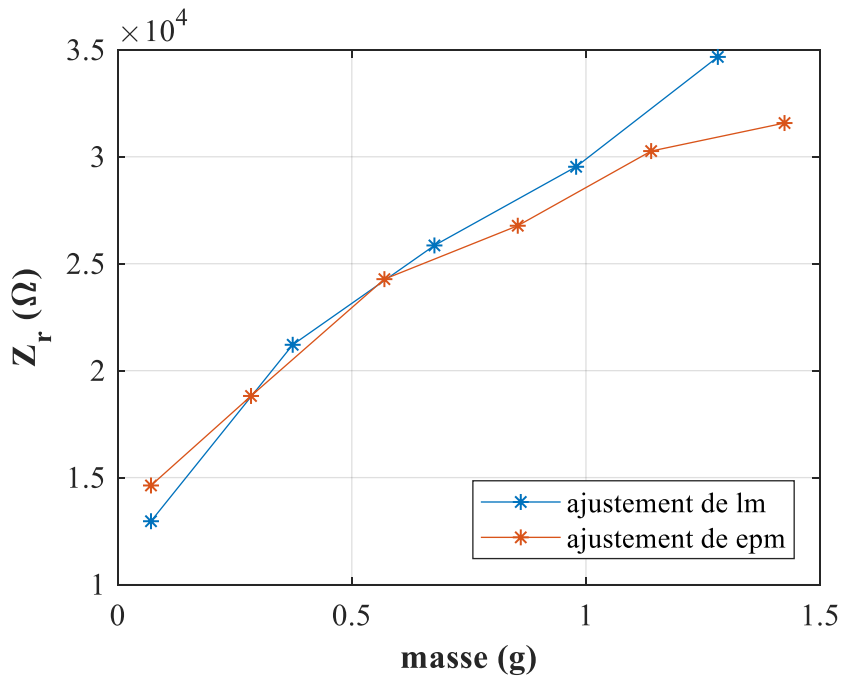


Figure 4.23 : Résistance Z_r en fonction de la masse de la masselotte pour différentes valeurs de sa longueur (lm) et de son épaisseur (epm).

Comme le montre la figure 4.24, l'amplitude du DBP ne change pas significativement selon que l'on ajuste lm ou epm : on note un écart de 20 μm environ entre les valeurs minimum et maximum du DBP avec une valeur moyenne sensiblement du même ordre de grandeur (0,135 mm pour lm et 0,12 mm pour epm).

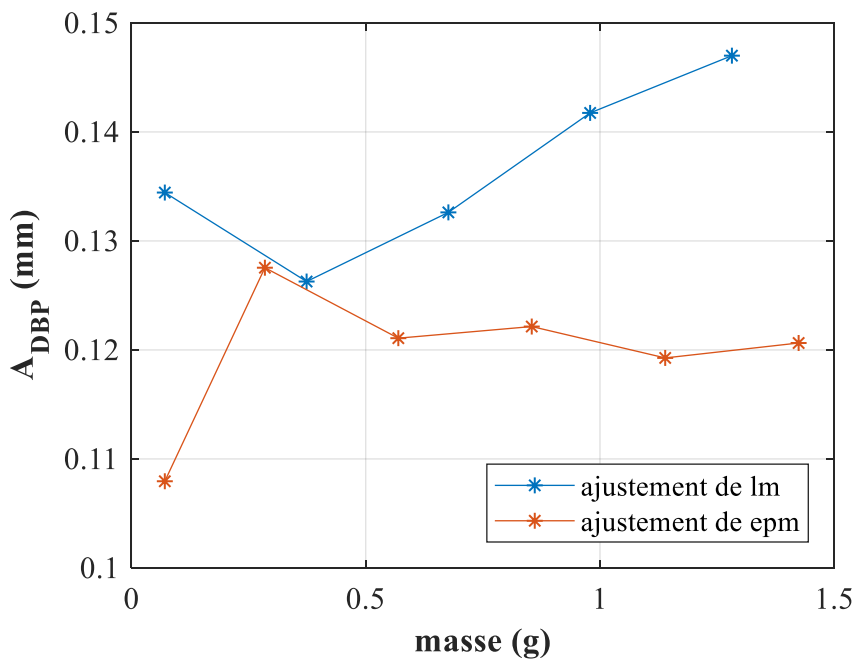


Figure 4.24 : Déplacement en fonction de la masse de la masselotte pour différentes valeurs de sa longueur (lm) et de son épaisseur (epm).

2.2.3. Effet sur la NPD et sur l'efficience

La figure 4.25 montre la relation entre la hauteur du dispositif et les paramètres lm et epm , et donc la masse de la masselotte. La hauteur H augmente avec l'épaisseur de la masselotte, ainsi qu'avec sa longueur même si dans ce cas l'évolution est plus lente. Un constat similaire peut être fait sur la densité de puissance normalisée (NPD) : celle-ci augmente avec la longueur de la masselotte, ainsi qu'avec son épaisseur, même si dans ce cas l'évolution est plus lente.

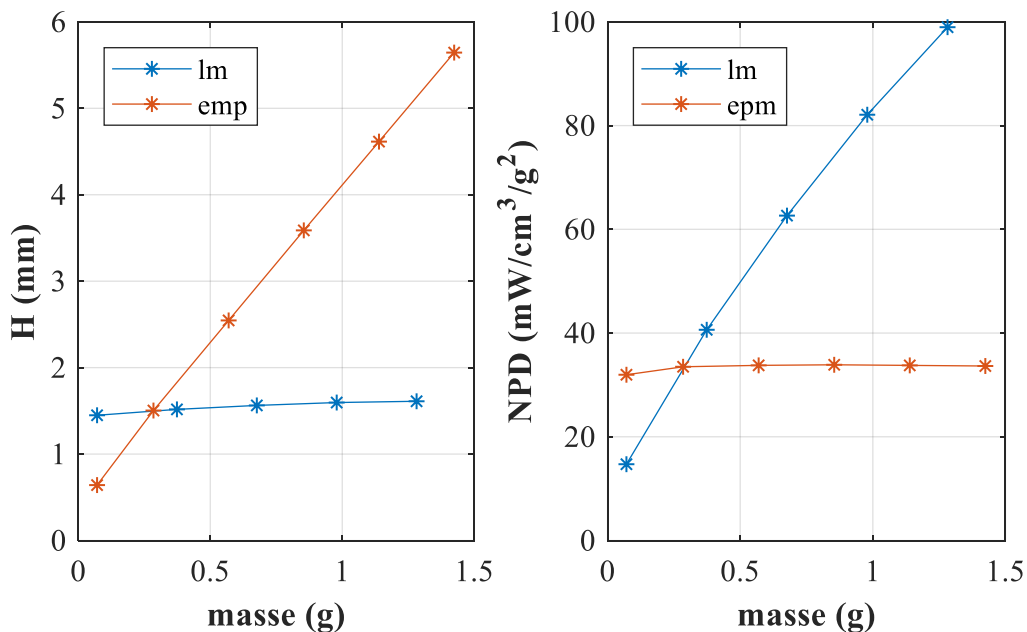


Figure 4.25 : Hauteur du dispositif et densité de puissance normalisée en fonction de la masse de la masselotte pour différentes valeurs de sa longueur (lm) et de son épaisseur (epm).

La figure 4.26 montre l'évolution de la puissance mécanique et de l'efficience en fonction de la masse de la masselotte. Dans les deux cas, on note une augmentation significative de ces indicateurs en fonction de epm . Ainsi Pm varie de +672 % et η de 20 % lorsque epm varie de +1900%. En ce qui concerne le paramètre lm , on note une augmentation de Pm similaire au cas epm et le passage par une valeur maximale pour l'efficience.

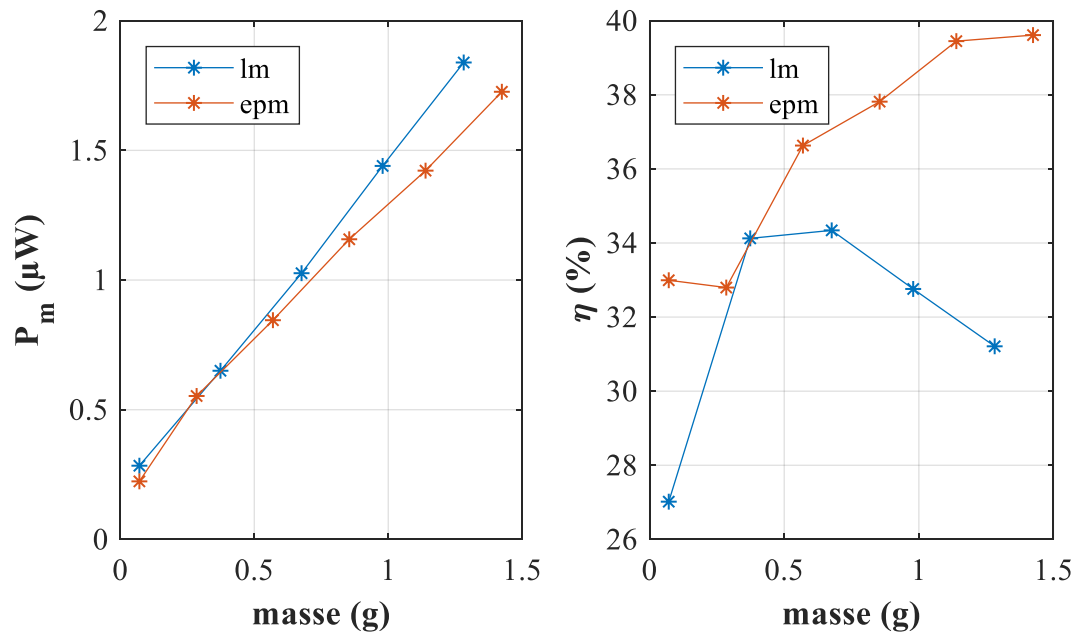


Figure 4.26 : Puissance mécanique et efficacité en fonction de la masse de la masselotte pour différentes valeurs de sa longueur (lm) et de son épaisseur (epm).

2.3. Règles de conception

Suite aux différentes études menées dans ce chapitre, nous pouvons dresser une liste de recommandations pour la conception d'un générateur en réponse à un cahier de charge spécifique :

- Les dimensions latérales du générateur doivent être maximisées dans l'espace latéral autorisé. La longueur est à privilégier, plutôt que la largeur.
- Les épaisseurs des différentes couches constitutives du dispositif (shim et piézoélectriques) doivent être optimisées pour ajuster la fréquence de résonance du générateur à la valeur de consigne.
- La masse de la masselotte doit être maximisée, dans la gamme de valeurs autorisée. Toutefois, une étude sur la contrainte maximale doit être réalisée pour s'assurer que la contrainte maximale en cours de fonctionnement du dispositif ne dépasse pas la limite élastique du matériau. En fonction de l'indicateur de performance choisi entre la puissance électrique récupérée et la NPD, à masse équivalente, on privilégiera l'épaisseur ou la longueur de la masselotte. En plus, la CAO du circuit électronique et le packaging doivent aussi être pris en compte pour concevoir la masselotte.

3. Conclusion

En résumé, dans cette partie, un point bibliographique sur les figures de mérite du générateur a été réalisé. Celles-ci ont été classées en deux catégories : les FOM intrinsèques et les FOM performance. Les FOMs intrinsèques montrent que pour un générateur travaillant en mode 3-1, le matériau avec un grand coefficient de couplage électromécanique k_{31} , un grand facteur de qualité Q_m et un faible coefficient de compliance élastique s_{11}^E , est plus performant pour les applications de récupération d'énergie. Concernant les FOMs performance, la densité de puissance normalisée est un critère pratique pour comparer la puissance électrique récupérée des générateurs au regard de ses tailles et ses excitations vibratoires. D'ailleurs, l'efficacité est intéressante pour la comparaison de différents générateurs au niveau de la conception (matériau, géométrie) pour avoir un générateur efficace. Enfin, la stratégie d'optimisation du générateur a été présentée et discutée en regard d'un cahier des charges spécifique. Suite à ces études, nous avons proposé quelques recommandations pour la conception du générateur, afin d'optimiser la performance du dispositif à élaborer.