



HAL
open science

Amélioration des performances d'un transformateur piézoélectrique par l'usage d'une charge non linéaire

Erika Minazara, Dejan Vasic, François Costa

► **To cite this version:**

Erika Minazara, Dejan Vasic, François Costa. Amélioration des performances d'un transformateur piézoélectrique par l'usage d'une charge non linéaire. EPF 2006, Jul 2006, Grenoble, France. <hal-00843230>

HAL Id: hal-00843230

<https://hal.science/hal-00843230v1>

Submitted on 16 May 2024

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.



HAL Authorization

Amélioration des performances d'un transformateur piézoélectrique par l'usage d'une charge non linéaire

E. Minazara, D. Vasic, F. Costa

Ecole Normale Supérieure de Cachan

Système et Application des Technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE, UMR8029)

61, avenue du président Wilson 94230 Cachan - France

Résumé : L'étude des convertisseurs utilisant un transformateur piézoélectrique (TP) montre la difficulté à les faire fonctionner à leur point de puissance maximale. La fréquence de résonance du TP, qui correspond au maximum de puissance, dépend fortement de la résistance de charge. Des méthodes d'asservissement de la fréquence grâce à une PLL ont déjà été développées, avec des résultats significatifs, mais elles nécessitent toujours une électronique compliquée, produisant un rendement détérioré. La méthode proposée ici est totalement originale; elle est basée sur un asservissement de phase entre la tension de sortie et la vitesse mécanique de vibration du TP. Cette technique, appelée le « Synchronized Switch Harvesting Inductor » (SSHI), est inspirée des travaux effectués sur l'amortissement des structures vibrantes. La confrontation de l'étude théorique et des résultats expérimentaux montre, que pour une charge donnée, le TP fonctionnera toujours à son point optimal.

I. INTRODUCTION.

Le transformateur piézoélectrique (TP), de par sa structure physique et ses propriétés, connaît actuellement un nombre croissant d'applications en électronique de puissance. Sa structure planaire le destine naturellement aux applications en conversion statique où miniaturisation et haute tension sont recherchées [1]. De plus, il présente l'avantage d'être facilement industrialisable, car il ne nécessite pas de composant bobiné. En utilisant des matériaux diélectriques de rigidité élevée, il est possible d'avoir également une très forte isolation galvanique; l'ordre de grandeur du champ de claquage peut être supérieur à plusieurs kV/mm. Par ailleurs, le mécanisme de transfert de puissance dans un TP consiste à transformer au primaire de l'énergie électrique en vibrations mécaniques, puis à récupérer au secondaire ces vibrations sous forme d'énergie électrique. En conséquence, il n'y a aucun couplage électromagnétique dans ce type de transformateur, ce qui est favorable en termes de CEM.

Cependant, le caractère intrinsèquement capacitif du TP lui confère des caractéristiques électriques très spécifiques qui, pour des raisons de rendement et de puissance transférée, ne lui permettent de fonctionner qu'à des fréquences et des charges fixes. En dehors du point de fonctionnement optimal, les performances sont rapidement détériorées. Cette spécificité trouve des conséquences vis-à-vis des structures de conversion dans lesquelles le transformateur est placé (figure 1). En effet, il est nécessaire de le faire fonctionner à son rendement maximal.

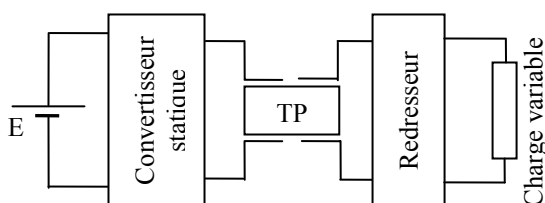


Figure 1 : Schéma de principe d'une alimentation DC-DC utilisant un transformateur piézoélectrique

Afin d'obtenir le point de fonctionnement optimal du TP, les techniques d'asservissement de puissance de type MPPT sont classiquement utilisées [2], mais présentent bon nombre de difficultés. Par exemple, il est difficile de déterminer les paramètres optimaux de l'asservissement. Il y a aussi le fait que la commande du convertisseur devient très complexe et donc beaucoup moins robuste. L'alternative présentée dans ce papier est basée sur un circuit de commutation au secondaire du TP, appelé SSHI, qui permet d'élargir le cycle de conversion électromécanique du matériau et en conséquence de mieux l'utiliser.

II. LE TRANSFORMATEUR PIEZOELECTRIQUE

Parmi les différentes structures de TP, et pour des raisons de simplicité, nous avons choisi de faire notre étude avec un transformateur fonctionnant en mode radial de la forme d'un disque massif (figure 2). L'emplacement des électrodes concentriques a été choisi de manière à optimiser le mode quart de longueur d'onde ($\lambda/4$), mode de résonance pour lequel le matériau est le mieux exploité.

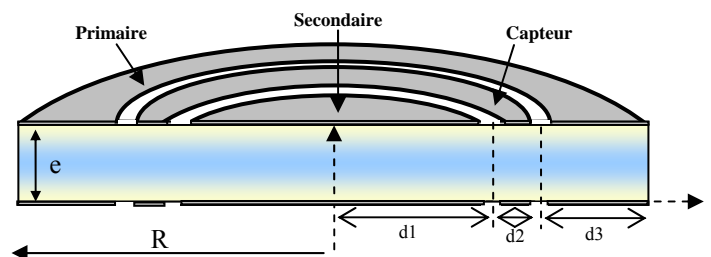


Figure 2 : Coupe du transformateur piézoélectrique

A. Description du transformateur piézoélectrique.

Les performances du transformateur piézoélectrique sont principalement données par le matériau, c'est-à-dire par la céramique utilisée. Les critères de choix portent principalement sur les trois coefficients suivants :

- le coefficient de couplage électromécanique k_p , représentant la capacité du matériau piézoélectrique à

transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique, et inversement,

- le facteur de qualité mécanique Q_m , permettant d'évaluer les pertes d'origine mécanique,
- et enfin le $\tan\delta$ de la céramique, retranscrivant les pertes diélectriques.

Le matériau utilisé dans notre étude est le Zirconate de Titanate de Plomb (PZT) polarisé suivant l'épaisseur, de référence P189, fourni par "Quartz & Silice". Il présente l'avantage d'avoir un grand facteur de qualité Q_m ce qui permet de maximiser le rendement du transformateur. Les principales caractéristiques de ce matériau, ainsi que les données géométriques du transformateur, sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques du matériau piézoélectrique et données géométriques

Q_m	k_p	ϵ_{33}^T/ϵ	$\tan\delta$ à 1kHz
>1000	0,51	1150	<0,2%
R	e	d_1	d_2
15mm	2.15mm	4mm	5mm

B. Modèle du transformateur piézoélectrique.

L'amplitude de l'onde mécanique, qui s'établit dans un transformateur piézoélectrique est maximale lorsque sa fréquence est proche de la résonance. Cette particularité impose au TP des caractéristiques électriques en fonction de la fréquence, (puissance transmise, rendement ou gain) de type filtre passe-bande. Une autre particularité de ce transformateur est que les caractéristiques citées précédemment dépendent aussi fortement de la charge au secondaire du transformateur et en particulier la fréquence donnant les maxima de ces caractéristiques. On comprend donc qu'il est important de toujours contrôler la fréquence de fonctionnement du TP pour le faire fonctionner dans ses conditions optimales.

Afin de mettre en évidence la dépendance de la fréquence de résonance f_r à la résistance de charge notée R_L nous allons nous servir du schéma électrique équivalent maintenant classique d'un transformateur piézoélectrique (figure 3). Ce schéma est valable uniquement autour de la fréquence de résonance correspondant au premier mode ($\lambda/4$). Il comprend une branche mécanique (circuit LCR série), un transformateur parfait (gain N) et des capacités C_1 et C_2 du primaire et du secondaire qui représentent le caractère capacitif de la céramique. R_L est la charge résistive connectée au secondaire.

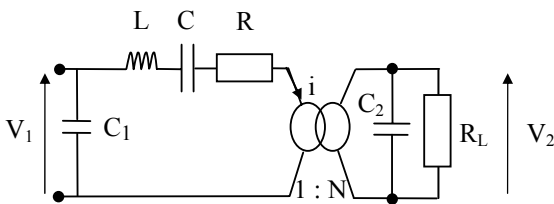


Figure 3 : schéma équivalent du transformateur piézoélectrique autour de 80kHz.

Nous avons identifié les éléments du schéma équivalent à partir de mesures faites sur un analyseur d'impédance HP

4194A. Les valeurs de ces éléments sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeur des éléments du schéma électrique du transformateur piézoélectrique

L	C	R	C_1	C_2	N
20,3mH	197,1pF	17,4 Ω	2nF	435,4pF	4,47N/V

Pour établir l'expression de la fréquence de résonance, dans le schéma de la figure 3 nous allons passer le circuit C_2R_L parallèle au primaire du transformateur parfait, (figure 4).

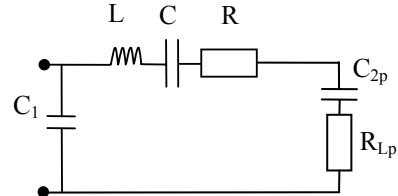


Figure 4 : schéma équivalent du transformateur piézoélectrique ramené au primaire

L'expression de la capacité C_{2p} et de la résistance R_{Lp} secondaires ramenées au primaire sont :

$$C_{2p} = N^2 \frac{1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2}{\omega^2 R_L^2 C_2^2} \text{ et } R_{Lp} = \frac{R_L}{N^2 (1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2)} \quad (1)$$

La résonance série qui s'établit dans cette nouvelle branche s'écrit :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C C_{2p}}{C + C_{2p}}}} \quad (2)$$

Son expression complète est donnée par (3). Cette fréquence dépend bien de la charge R_L .

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{C}{N^2 C_2} - \frac{LC}{(R_L C_2)^2} \right)^2 + \frac{LC}{(R_L C_2)^2}} \quad (3)$$

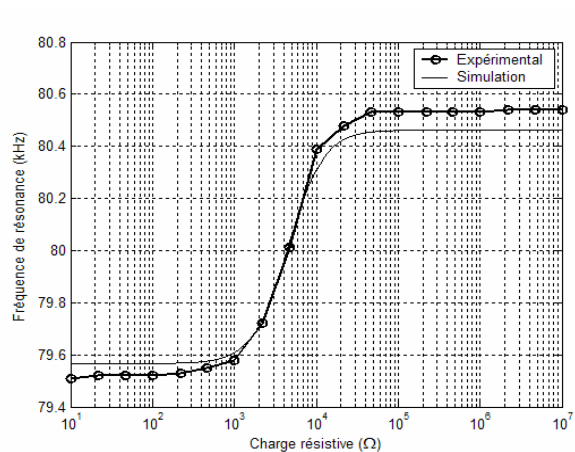


Figure 5 : Fréquence de résonance en fonction de la charge résistive R_L

La figure 5 présente la variation de la fréquence de résonance en fonction de la résistance de charge R_L (par simulation et expérimentalement).

Cette dépendance de la fréquence de résonance est un inconvénient majeur du TP et comme on l'a vu précédemment l'empêche de travailler au point de puissance maximale pour des charges variables. La technique qui consiste à asservir la fréquence à la valeur maximale de la puissance par une PLL, c'est-à-dire faire du MPPT existe déjà mais est compliquée. L'idée originale que nous développons dans ce papier est tout autre, elle consiste à faire en sorte que l'ensemble charge plus capacité secondaire C_2 se comporte comme une résistance équivalente et donc qu'au primaire nous ayons seulement le circuit LC de réactif. Cela donne une fréquence de résonance fixe. Pour arriver à cela il suffit d'imposer à la tension secondaire V_2 d'être toujours en phase avec le courant i au primaire du transformateur parfait. Cette mise en phase est réalisée par technique de charge non linéaire appelée SSHI. De plus cette technique a l'avantage de diminuer la circulation d'énergie réactive à travers le transformateur piézoélectrique et donc d'améliorer son rendement.

III. TECHNIQUE DE CHARGE NON LINEAIRE

La technique du SSHI a été développée pour l'amortissement de structures vibrantes [3]. Elle consiste à faire en sorte que l'énergie extraite d'un matériau piézoélectrique, collé sur une structure en vibration, soit maximisée, afin d'obtenir un effet d'amortissement. Mais l'énergie produite dans ce genre d'application n'est pas exploitée, elle est en général dissipée dans une résistance. Par la suite cette technique a été adaptée à la récupération d'énergie [4], [5]. Pour une même vibration mécanique la technique du SSHI permet de récupérer 10 fois plus d'énergie sur une pastille piézoélectrique. Pour notre part, nous proposons d'adapter cette même technique à l'amélioration des performances d'un transformateur piézoélectrique.

A. Principe du SSHI

En plus de la mise en phase de la tension V_2 et du courant i , cette technique permet d'optimiser le cycle de travail du matériau piézoélectrique. En effet, l'énergie électrique mécanique contenue dans la structure en vibration est mieux convertie en énergie électrique. Le rendement de conversion mécano-électrique est optimisé.

La technique consiste à ajouter une inductance L_{SSHI} au secondaire et à la faire résonner avec la capacité secondaire C_2 du TP. Le système comporte aussi deux interrupteurs et deux diodes (figure 6).

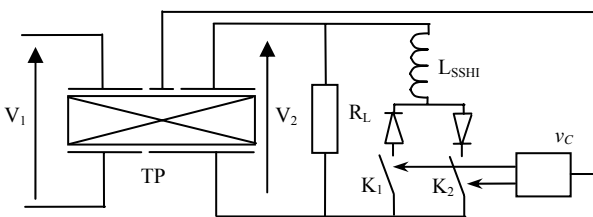


Figure 6 : Principe de la technique SSHI

On vient alors forcer la tension à changer de signe à chaque passage par zéro du courant i . Le courant i de la branche mécanique est capté grâce à une électrode supplémentaire placée sur le TP (figure 7). La tension alors obtenue en sortie du capteur (notée v_C) est proportionnelle à i . Elle conserve ainsi la même phase que i , puisque la capacité de la sortie capteur est mise en court circuit. L'amplitude de v_C n'a pas d'intérêt particulier, c'est l'image de la phase qui est capté.

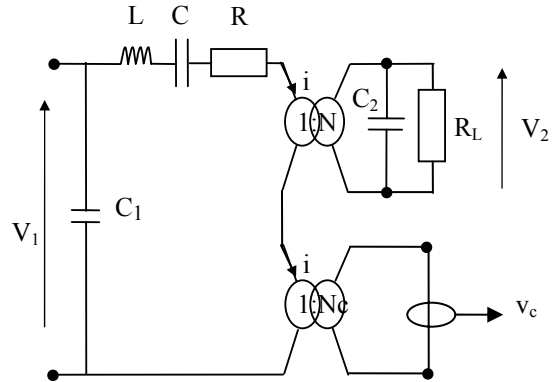


Figure 7: Mesure de la phase u courant de la branche mécanique

La séquence de commutation de K_1 et K_2 est ordonnée de sorte que la tension est forcée à changer de signe à chaque passage par zéro de i . On réalise là une forme d'autopilotage de la tension de sortie du TP ou encore d'asservissement de phase. Les interrupteurs K_1 et K_2 commutent une fois par période, dans un intervalle d'une demi-période. A la fermeture d'un interrupteur, la capacité secondaire C_2 du TP et l'inductance L se mettent à osciller (figure 8), ce qui permet de réaliser une inversion de la tension de sortie du TP. Puisque la période de l'oscillation $T=2\pi\sqrt{L_{SSHI}C_2}$ est très inférieure à la période de vibration du TP, nous pouvons considérer que l'inversion de la tension est quasi-instantanée. Finalement, cette inversion augmente l'amplitude de la tension de sortie, mais permet aussi de la déphaser. C'est cette dernière possibilité qui nous intéresse, car elle permet, si l'instant d'inversion est correctement choisi, de mettre en phase la tension de sortie et le courant i .

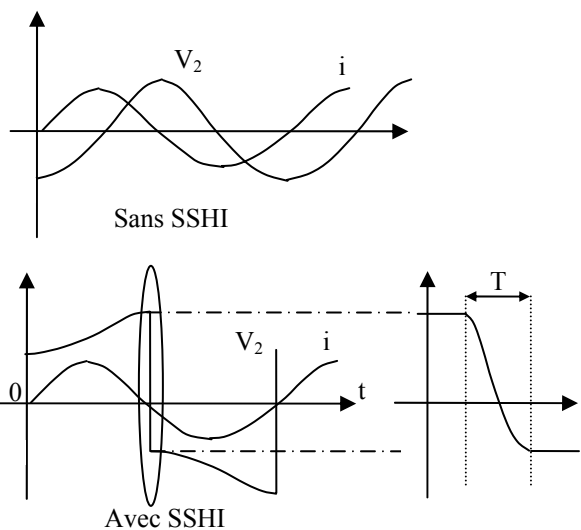


Figure 8 : Mise en phase de tension V_2 au courant i à l'aide de la technique SSHI

En faisant un raisonnement énergétique au premier harmonique, on peut considérer que l'ensemble C_2+R_L+SSHI est équivalent à une résistance $R_{\text{éq}}$. De ce fait, la fréquence de résonance devient indépendante de la résistance de charge R_L avec tout l'intérêt que cela représente.

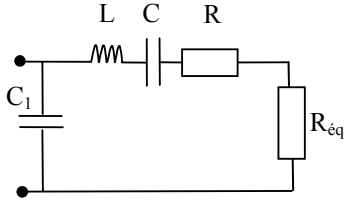


Figure 9 : Schéma équivalent du TP avec SSHI

Les courbes de la figure 10 représentent la tension au secondaire V_2 et l'image du courant i de la branche mécanique du TP.

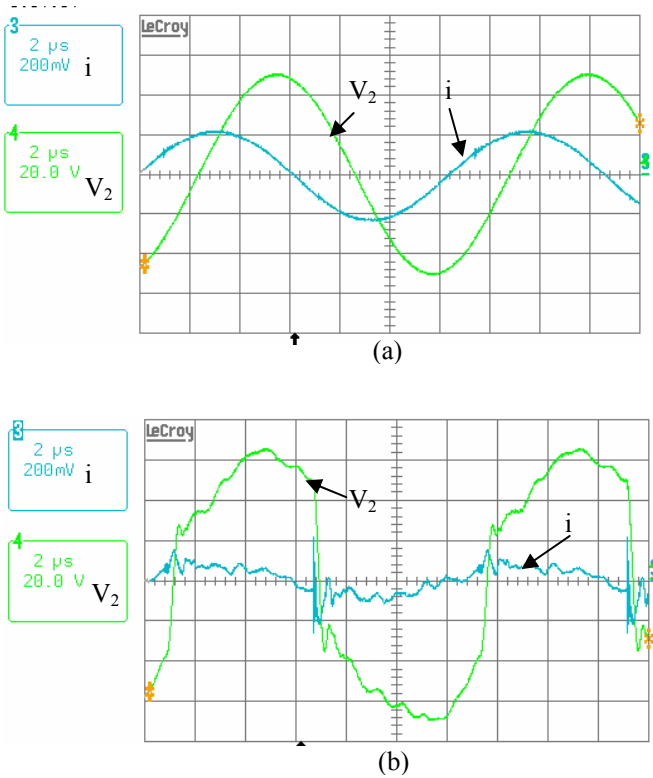


Figure 10 : Tension secondaire V_2 et image du courant i (a) sans SSHI (b) avec SSHI

B. Modélisation du SSHI

Le primaire du transformateur piézoélectrique est alimenté par une tension sinusoïdale d'amplitude fixe. Une charge résistive est directement connectée au secondaire en parallèle avec le circuit d'inversion. Sauf durant le processus d'inversion, l'équation différentielle qui relie la tension V_2 au courant i est donnée par (4). Le courant est supposé constamment sinusoïdal. L'expression (4) est

résolue entre les instants 0 et $\frac{T}{2}$; les conditions aux limites sont définies selon (5). L'évolution de la tension V_2 du transformateur piézoélectrique entre deux inversions est alors exprimée par (6). L'inversion à travers l'inductance

n'est pas parfaite, une part d'énergie électrique transiting est perdue dans le dispositif de commutation. Ces pertes sont modélisées par un facteur de qualité Q_L .

$$\frac{V_2}{R_L} = Ni - C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (4)$$

$$i = I_m \sin(\omega t) \text{ et } V(0) = V(T/2) e^{\frac{-\pi}{2Q_L}} \quad (5)$$

$$V_2(t) = \frac{NI_m}{C_2\omega} \frac{(R_L C_2 \omega)^2}{1 + (R_L C_2 \omega)^2} \left[\frac{1 + e^{\frac{\pi}{2Q_L}}}{e^{\frac{\pi}{2Q_L}} - e^{\frac{-\pi}{2Q_L}}} \right] e^{\frac{-t}{R_L C_2}} - \frac{NI_m}{C_2\omega} \frac{R_L C_2 \omega}{\sqrt{1 + (R_L C_2 \omega)^2}} \cos\left(\omega t + \arctan\left(\frac{1}{R_L C_2 \omega}\right)\right) \quad (6)$$

L'expression (7) indique que la tension V_2 est égale au produit d'une fonction dépendante du temps et de l'amplitude du déplacement, soit $V_2(t) = g(t)I_m$. Un bilan énergétique à la résonance permet d'obtenir l'expression de l'amplitude du courant I_m en fonction de l'amplitude de la tension appliquée au primaire V_{1m} .

$$I_m = \frac{V_{1m}\pi\omega}{\pi R\omega + \frac{g_{\text{eff}}^2}{R_L} \frac{2\pi}{\omega} + C_2 g_m^2 \left(1 - e^{\frac{-\pi}{Q_L}}\right)} \quad (7)$$

où g_{eff} est la valeur efficace de $g(t)$ et $Q_L = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{L_s}{C_2}}$, (R_s, L_s)

sont les éléments du modèle équivalent de l'inductance du circuit d'inversion, avec $L_s = 49,5\mu\text{H}$, $R_s = 4\Omega$, $Q_L = 1348,7$.

La puissance dans la résistance de charge R_L est exprimée par $P = \frac{V_{2\text{eff}}^2}{R_L}$, où $V_{2\text{eff}}$ est la valeur efficace de la tension au secondaire du transformateur.

En supposant qu'il n'y a pas de perte dans le circuit d'inversion, un raisonnement énergétique au premier harmonique permet de réécrire cette puissance de la façon suivante :

$$P = \frac{V_{2\text{fond,eff}}^2}{R_{\text{eq}} N^2}$$

où $V_{2\text{fond,eff}}$ est la valeur efficace du fondamental de la tension au secondaire du transformateur.

L'égalité entre ces deux expressions de puissance permet de déduire l'expression de $R_{\text{éq}}$ (8).

$$R_{\text{éq}} = \frac{R_L}{N^2} \frac{V_{2\text{fond,eff}}^2}{V_{2\text{eff}}^2} \quad (8)$$

Pour vérifier que l'ensemble C_2+R_L+SSHI se comporte réellement comme une résistance, nous avons mesuré expérimentalement $R_{\text{éq}}$ (figure 11). Il peut être constaté que $R_{\text{éq}}$ ne varie quasiment avec la fréquence; autrement dit, $R_{\text{éq}}$ se comporte vraiment comme une résistance. Ce qui tend à vérifier

que, lorsqu'on utilise un circuit d'inversion, notamment le SSHI, la tension et le courant sont mis en phase.

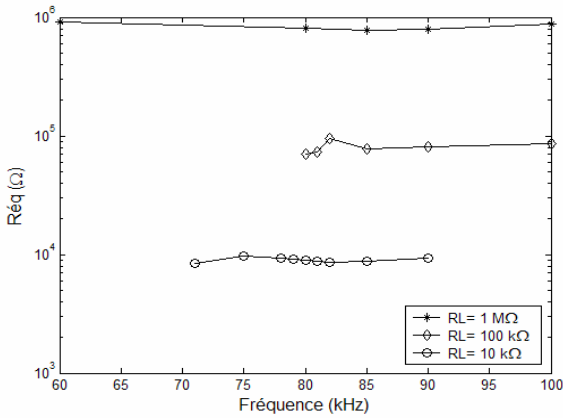


Figure 11 : Impédance secondaire du TP avec SSHI en fonction de la fréquence, $V_1=20$ Volts

Afin de montrer la validité du modèle du SSHI nous avons tracé des caractéristiques de la puissance au secondaire en fonction de la charge R_L , pour différentes valeurs de la fréquence.

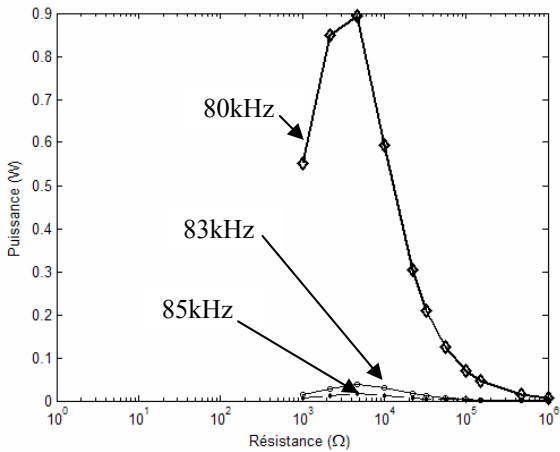


Figure 12 : Puissance dans la charge mesurée sans SSHI, $V_1=20$ Volts

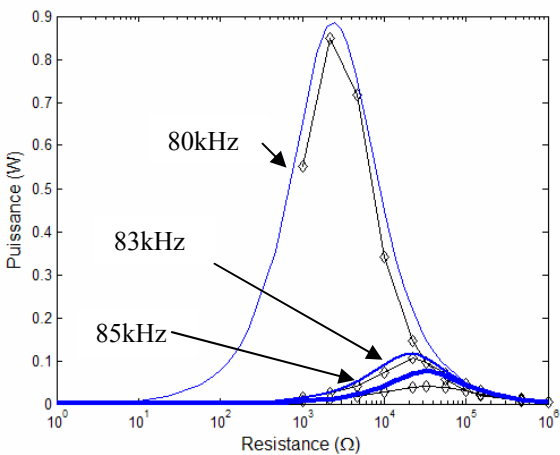


Figure 13 : Puissance dans la charge mesurée et simulée avec SSHI, $V_1=20$ Volts

Les figures 12 et 13 montrent l'évolution de la puissance $P = V_{2eff}^2 / R_L$ transmise dans la charge au secondaire du

TP, sans et avec SSHI, expérimentalement et analytiquement en fonction de R_L pour trois différentes valeurs de fréquence, une proche de la résonance 80 kHz et les deux autres à l'écart de la résonance, soit 83 kHz et 85 kHz. Le modèle et les mesures sont coïncidents.

On peut constater que, proche de la résonance 80 kHz, le maximum de puissance transférée dans la charge est très élevée tandis que, pour les fréquences éloignées de la résonance, le maximum de puissance est très faible. Pour les fréquences à l'écart de la résonance du transformateur, le SSHI est efficace à forte charge; il augmente la quantité de puissance transférée au secondaire. Par contre, le SSHI s'avère inutile lorsque le transformateur travaille à sa fréquence de résonance ou à faible charge; il en atténue au contraire la puissance. En effet, à faible charge ou à la résonance, la tension V_2 et le courant i sont déjà en phase; le fait de vouloir inverser V_2 avec le SSHI n'apporterait donc pas d'amélioration mais conduirait à des pertes supplémentaires dissipées dans le circuit de commutation. La puissance transférée au secondaire dans la charge n'est qu'une partie de la puissance transférée au secondaire. Pour évaluer la performance du transformateur, c'est la totalité de puissance qui arrive au secondaire que nous allons observer.

IV. PERFORMANCE DU TP AVEC SSHI.

Afin d'évaluer l'amélioration des performances du TP grâce à la technique du SSHI, nous avons tracé diverses courbes de caractéristiques telles que puissance et rendement en fonction de la charge ou de la fréquence.

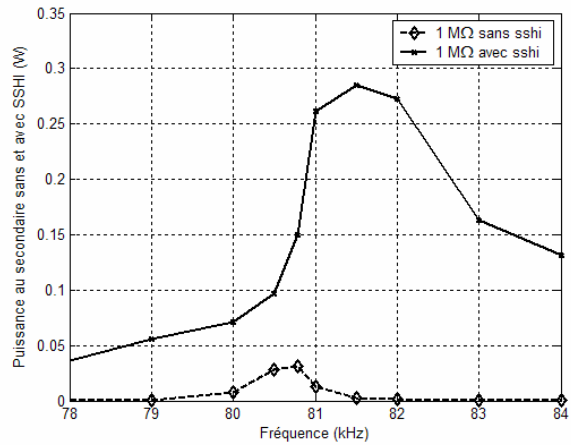


Figure 14 : Puissance au secondaire du TP sans et avec SSHI en fonction de la fréquence, charge $R_L=1$ MΩ, $V_1=20$ Volts

Pour une charge résistive élevée, par exemple dans le cas de la figure 14 et 15, avec respectivement $R_L=1$ MΩ et $R_L=100$ kΩ, sur la plage de fréquence 78 kHz à 84 kHz l'impédance de la capacité secondaire varie de 4,7 kΩ à 4,35 kΩ environ. L'impédance secondaire du TP est plus capacitive que résistive. Le courant i est alors déphasé par rapport à la tension V_2 . Le SSHI se trouve alors pleinement utile. On constate sur la figure 14 que la puissance transférée au secondaire du transformateur est fortement améliorée; le maximum passe de 30mW sans SSHI, à 280mW avec SSHI.

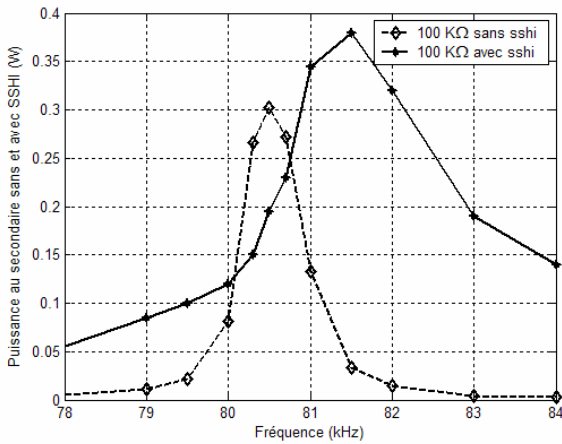


Figure 15 : Puissance secondaire du TP sans et avec SSHI en fonction de la fréquence, charge $R_L=100\text{ k}\Omega$, $V_1=20\text{Volts}$

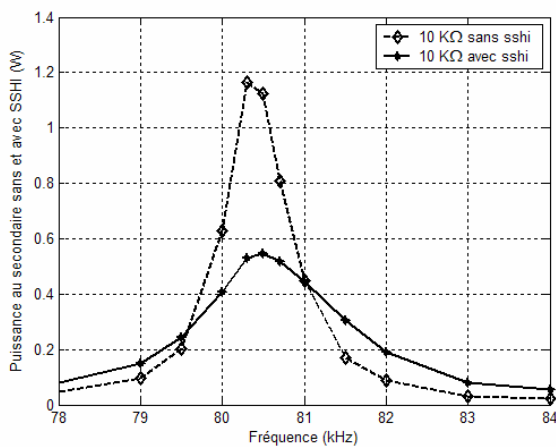


Figure 16 : Puissance secondaire du TP sans et avec SSHI en fonction de la fréquence, charge $R_L=10\text{ k}\Omega$, $V_1=20\text{Volts}$

Pour une charge résistive faible, par exemple dans le cas de la figure 16, où $R_L=10\text{ k}\Omega$, l'impédance secondaire du TP est faiblement capacitive. Le courant i est alors faiblement déphasé par rapport à la tension V_2 . Le SSHI devient peu utile. On constate sur la figure 16 que la puissance transférée au secondaire du transformateur est détériorée ; le maximum chute de 1,15W sans SSHI à 550mW avec SSHI.

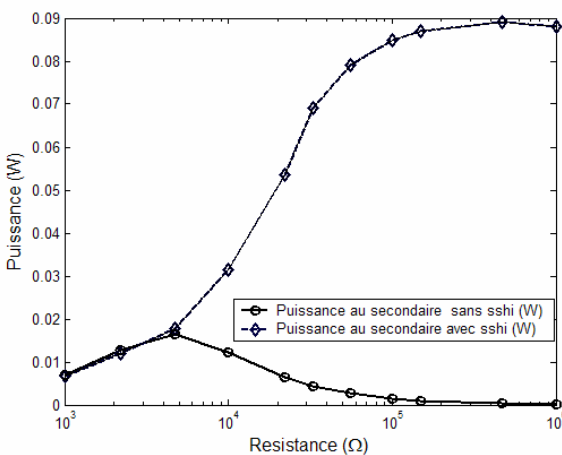


Figure 17 : Puissance secondaire du TP sans et avec SSHI en fonction de charge résistive à $f=85\text{ kHz}$, $V_1=20\text{ Volts}$

La figure 17 met en évidence l'intérêt de la technique du SSHI uniquement pour des valeurs de résistances de charge élevées (supérieures à $8\text{ k}\Omega$). Ainsi la puissance disponible au secondaire est nettement supérieure.

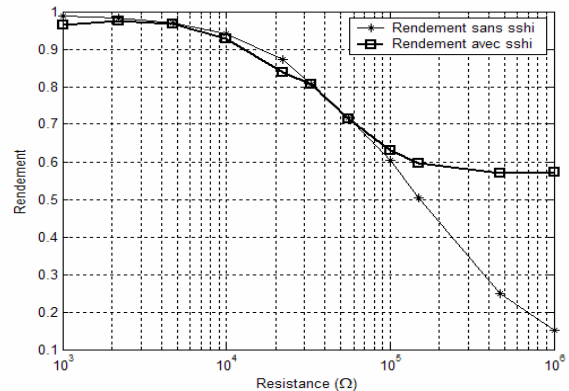


Figure 18 : Rendement du Tp sans et avec SSHI en fonction de charge résistive à $f=85\text{ kHz}$, $V_1=20\text{Volts}$

Enfin, la figure 18 montre l'amélioration du rendement du transformateur toujours pour des charges élevées. Il est à noter que la principale application industrielle du TP est l'alimentation des lampes à cathodes froides pour le rétro-éclairage des écrans LCD. L'impédance de ces lampes est de plusieurs $100\text{ k}\Omega$ qui est le domaine d'utilisation du SSHI.

V. CONCLUSION

L'amélioration des performances d'un transformateur piézoélectrique particulier a été démontrée et validée sur certaines plages de fonctionnement. Une modélisation du transformateur avec le système SSHI a été présentée et les résultats théoriques sont vérifiés par les résultats expérimentaux. L'établissement des caractéristiques de la puissance transmise et du rendement en fonction de la charge et de la fréquence a permis de situer les zones où le SSHI est bénéfique. Par exemple, l'apport du SSHI sur le rendement du TP est tout à fait remarquable particulièrement à forte valeur de résistance de charge. Pour les faibles résistances, la performance du TP se trouve améliorée pour des fréquences pas trop proches de la fréquence de résonance.

VI. REFERENCES

- [1] O. Ohnishi, H. Kishie, A. Iwamoto, Y. Sasaki, T. Zaitso, T. Inoue, "Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply", in Proc. IEEE Ultrasonics Symposium Conf., 1992, pp. 483-488.
- [2] Jean-Michel Jarrousse, François Costa, Dejan Vasic, Emmanuel Sarraute, « Low-power high-voltage DC-DC converter based on a PZT transformer » EPE 2003, Toulouse, France.
- [3] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, and G. Ching, "Semi passive damping using continuous switching of a piezoelectric device", Proceeding of SPIE: Damping and Isolation, vol. 3672, pp. 104-111, 1998.
- [4] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, D. Guyomar, "High performance piezoelectric vibration energy reclamation" *Proceedings of SPIE Conf.* 5390 (2004) pp. 379-387.
- [5] Adrien Badel, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », thèse de doctorat soutenue en 2005 devant l'Université de Savoie, France.