HAL open science

Modélisation d'un transfomateur piézoélectrique multi-électrodes par l'extraction de ses paramètres électriques

Thomas Martinez, Gaël Pillonnet, Dejan Vasic, François Costa

To cite this version:

Thomas Martinez, Gaël Pillonnet, Dejan Vasic, François Costa. Modélisation d'un transfomateur piézoélectrique multi-électrodes par l'extraction de ses paramètres électriques. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02051493v2

HAL Id: hal-02051493

https://hal.science/hal-02051493v2

Submitted on 28 Oct 2020

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.

Modélisation d'un transfomateur piézoélectrique multi-électrodes par l'extraction de ses paramètres électriques

Thomas MARTINEZ[1], Gaël PILLONNET[2], Dejan VASIC[1,3], François COSTA[1,4]

[1]Laboratoire des Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie -SATIE-
[2]CEA-LETI, Université Grenoble Alpes [3]Université de Cergy Pontoise [4]Université Paris Est Créteil

RESUME – Les transformateurs piézoélectriques multi-secondaires à onde progressive sont une nouvelle topologie de transformateur permettant la génération d'un système polyphasé de tensions en sortie. Dans ce papier, nous présentons une méthode de représentation de ces transformateurs avec un nombre élevé d'électrodes (supérieur à 10). Cette méthode dite « boite noire » se base sur des mesures sur le transformateur pour extraire la matrice d'admittance du multipôle. En extrapolant des fonctions de transfert à partir de ces admittances, on peut représenter le transformateur multi-électrodes avec un modèle circuit permettant sa simulation dans les domaines temporel et fréquentiel. Dans cet article nous présentons le détail de la méthode d'extraction puis de simulation et l'appliquons à un transformateur centimétrique de 12 électrodes travaillant à une fréquence de 83 kHz. Les résultats obtenus par simulation sont comparés à l'expérimentation permettant de valider la méthode de simulation sur une certaine plage de tension d'entrée et de résistance de charge.

Mots-clés—Transformateur piézoélectrique, multi-électrode, paramètres Y, onde progressivse, simulation.

1. INTRODUCTION

Les transformateurs piézoélectriques ont acquis un intérêt particulier en électronique de puissance grâce à différents atouts : forte isolation galvanique, rapports de transformation élevés, facteur de qualité élevé, bonne densité de puissance et faibles perturbations en termes de CEM. Les topologies classiques de transformateur piézoélectrique tels que le transformateur de Rosen sont utilisés dans différentes applications : convertisseur élévateur haute tension pour les alimentations de lampes CCFL [1], pour la génération de plasma [2], commande rapprochée de transistors [3] ou plus récemment pour le démarrage de convertisseurs pour la récupération d'énergie [4].

Cependant, la plupart des transformateurs ont un fonctionnement basé sur la transmission d'énergie par l'intermédiaire d'une onde stationnaire dans la céramique piézoélectrique pour réaliser la conversion d'énergie entre le primaire et le secondaire. L'intérêt de l'onde stationnaire est de pouvoir travailler à la résonance du matériau où celui-ci présente un minimum de la partie réelle de son impédance (c'est-à-dire minimum sur les pertes actives) qui permet donc d'obtenir des transferts de puissance les plus élevés. Toutefois, une onde stationnaire présente des nœuds et ventres qui limitent le choix du placement des électrodes primaire et secondaire sur le transformateur. Seule une électrode sous laquelle la moyenne de la contrainte est maximale présentera une tension en sortie maximale. C'est pourquoi la plupart des transformateurs piézoélectriques sont limités à deux ou trois jeux d'électrodes.

Nous avons proposé une nouvelle topologie de transformateur piézoélectrique basé sur un fonctionnement à onde progressive [5]. L'intérêt de cette topologie par rapport à un fonctionnement à onde stationnaire est d'obtenir un système polyphasé de tensions en sortie du transformateur. La génération d'une onde progressive est possible grâce à l'utilisation d'une architecture multi-électrodes. Une géométrie possible pour réaliser ce système est représentée Fig. 1 et consiste en un cylindre piézoélectrique de vingt-quatre électrodes. Le système complet comprend les électrodes d'entrée commandées par une tension et les charges sur les électrodes de sortie.

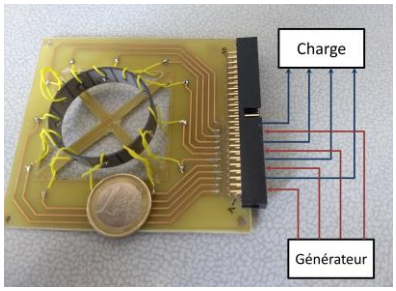

Fig. 1. Transformateur piézoélectrique multi-électrodes à onde progressive

Dans le cadre de l'électronique de puissance, il est nécessaire de pouvoir simuler les performances et le comportement du transformateur avec ce nouveau principe de fonctionnement. Ainsi, la problématique se pose dans sa modélisation. En effet, pour les transformateurs piézoélectriques classiques à onde stationnaire, par analogie mécanique/électrique, il est possible d'aboutir à un circuit équivalent RLC représentant le transformateur à la résonance [6]. Dans le cas d'un transformateur multi-électrodes, cette modélisation n'est pas applicable du fait des nombreux couplages existant entre les électrodes. De plus, la modélisation par un circuit RLC n'est possible que parce que les architectures classiques présentent des conditions aux

limites dans le sens de propagation de l'onde ce qui n'est pas le cas d'un cylindre. Des premiers travaux ont été réalisés pour aboutir à un modèle équivalent analytique du transformateur piézoélectrique traduisant le comportement du système sous certaines hypothèses contraignantes [7] : le cylindre est séparé en sections correspondant à chaque électrode et assimilé à des poutres rectilignes. Cela permet de se ramener alors à une étude unidimensionnelle sans prendre en compte la courbure du cylindre.

Ces modèles type « boite blanche » permettent de décrire le comportement d'un transformateur dans sa globalité et aide à sa conception et à son dimensionnement. Malgré tout, les comportements prédits peuvent s'éloigner des performances réelles. Notamment, il apparait difficile de prévoir de façon précise les pertes dans le transformateur. Le modèle dit « boite noire » lui intervient après la conception sur un transformateur déjà construit. Pour pouvoir simuler le système réel et mieux prendre en compte les pertes dans le système, ce modèle traduit le fonctionnement du transformateur à partir de mesures sur celui-ci. Pour les transformateurs à onde stationnaire, il est possible à l'aide d'analyseur d'impédance d'extraire rapidement les paramètres équivalents du circuit RLC le représentant du fait du faible nombre d'électrodes et ainsi pouvoir simuler le modèle réel du transformateur. Dans notre cas, du fait du grand nombre d'électrodes et de la complexité du couplage entre électrodes, il n'est pas trivial d'obtenir rapidement un modèle équivalent RLC « boite noire » du système pour sa simulation. Nous présentons ainsi dans cet article une méthode d'extraction des paramètres de couplage inter-électrodes basé sur la mesure de paramètres Y [8]. On peut obtenir ainsi les admittances de couplage entre électrodes qui permettent la simulation du système ainsi représenté par des logiciels de simulation électrique.

Dans un premier temps, nous présenterons le transformateur et la méthode représentation avant de nous intéresser à la méthode d'extraction des paramètres de couplage. Ensuite nous expliquerons le principe de simulation du système à l'aide des paramètres Y. Enfin dans un dernier temps nous comparerons les résultats obtenus expérimentalement à ceux obtenus par la simulation du système.

2. Methode de representation du transformateur piezoelectrique

Un transformateur à onde progressive multi-électrodes peut prendre la forme d'un anneau ou d'un cylindre creux comme représenté à la Fig. 1. Le transformateur considéré est constitué de vingt-quatre électrodes réparties sur les surfaces intérieures et extérieures. Chaque électrode sur la surface extérieure est couplée à l'électrode directement opposée sur la surface intérieure pour former un couple d'électrodes. L'intérêt du modèle dit « boite noire » est ainsi de transcrire le couplage entre ces différents couples d'électrodes.

Le comportement du transformateur est complètement traduit par la matrice d'admittance Y_{tot} reliant les différents courants I et tensions V de chaque couple d'électrodes. Cette matrice d'admittance pour un transformateur à n couples d'électrodes est exprimée de la façon suivante :

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_j \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2j} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{1i} & Y_{2i} & \vdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{1j} & Y_{2j} & \vdots & Y_{ij} & \vdots & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & Y_{2n} & \vdots & Y_{in} & \vdots & Y_{jn} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = Y_{tot} V \qquad \textbf{(1)}$$

Cette représentation s'inspire de celle des quadripôles adaptée à un nombre plus élevé d'électrodes. Dans la suite on appellera ainsi notre système un multipôle. Cette matrice d'admittance est définie sur une gamme de fréquence et permet ainsi de déterminer complètement le comportement du transformateur. De plus, le système est considéré réciproque et la matrice Y_{tot} est donc symétrique.

La représentation par matrice d'admittance est la même que celle utilisée dans la modélisation analytique détaillée dans [7]. La différence réside dans la détermination de ces paramètres : dans un modèle "boite blanche", une modélisation électromécanique du système permet de les trouver. Dans la suite nous décrirons la méthode d'extraction expérimentale de ces paramètres.

3. Extraction des Admittances Electriques Du Transformateur Piezoelectrique Multipole

3.1. Protocole de mesure

Pour extraire les paramètres d'admittance, la technique s'inspire de l'extraction des paramètres d'un quadripôle. Dans le cas d'un quadripôle, il est possible de déterminer expérimentalement les paramètres S qui permettent ensuite de déterminer les paramètres Y d'admittance. Nous allons donc chercher à extraire les paramètres S du transformateur piézoélectrique.

Pour réaliser la mesure des paramètres S, nous utilisons un analyseur de réseau vectoriel Agilent E5061B. Le protocole de mesure générique est le suivant. Dans le cas général, le transformateur présente n couples d'électrodes. La mesure des paramètres S de toutes les électrodes en même temps est peu précise. Pour simplifier la mesure, on ne considère pour chaque mesure qu'un couple d'électrodes et en se ramenant à un quadripôle. Pour ne considérer qu'un seul quadripôle composé de deux couples d'électrodes, des résistances de 50 **Ω** sont placées en terminaison des couples d'électrode restants. On détermine ainsi les paramètres S entre ces deux couples sans considérer les autres [9]. Sur la Fig. 2, on peut observer l'installation qui permet de réaliser la mesure. Le transformateur piézoélectrique (DUT) est connecté sur un PCB avec un connecteur relié à la carte mère. La carte mère est une carte d'interface matricielle permettant de choisir si un couple d'électrode est branché avec une terminaison 50 Ω ou connecté au VNA pour réaliser la mesure du paramètre Y correspondant.

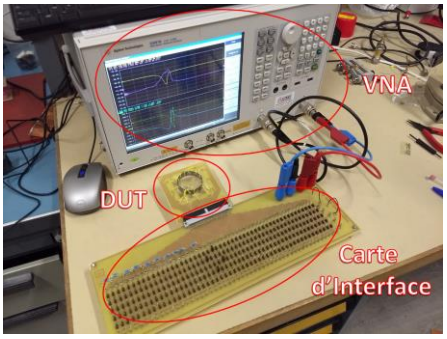

Fig. 2: Banc de mesure des paramètres Y

Si l'on s'intéresse par exemple aux couples i et j, la mesure des paramètres S_{ii}, S_{ij} et S_{jj} nous permet alors d'obtenir les admittances Y_{ii}, Y_{jj} et Y_{ij}. Il faut alors réaliser $\frac{n(n-1)}{2}$ mesures pour obtenir la matrice complète d'admittance. Cette mesure permet de déterminer le gain et la phase de ces admittances sur toute une gamme de fréquence.

3.2. Résultats de mesure des paramètres Y

Les résultats présentés ci-après viennent de l'analyse du transformateur piézoélectrique présenté à la Fig. 1 par la méthode présentée. Ce transformateur est un cylindre constitué de 12 couples d'électrodes. L'épaisseur du cylindre est 2 mm, son rayon extérieur 40 mm et sa largeur 1 cm. Les électrodes du transformateur piézoélectrique sont assemblées par couple et numérotées de 1 à 12 (voir aussi Fig.11).

Ce placement d'électrodes est optimisé pour un fonctionnement en onde de de volume avec une résonance proche de 84 kHz. Le mode de résonance correspondant à cette fréquence de résonance est représentée Fig. 3 à différents instants montrant ainsi la propagation de l'onde progressive. On voit sur cette représentation que le mode de résonance comprend trois longueurs d'onde le long de la circonférence du cylindre.

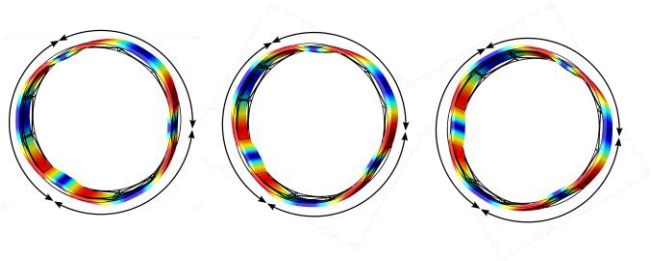

Fig. 3: Mode de vibration étudié avec 3 longueurs d'onde à différents instants.

Sur la Fig. 4 sont représentées les admittances Y_{11} et Y_{22}. Ces admittances représentent les admittances propres des couples d'électrodes. Du fait de la symétrie du système on pourrait s'attendre à des couplages Y_{ii} identiques quel que soit le couple. Cependant on voit sur la mesure qu'il existe un décalage de la résonance entre ces deux couples.

Sur la Fig. 5 sont représentées les admittances Y_{12} et Y_{13} qui représentent le couplage entre l'électrode 1 et respectivement l'électrode 2 et 3. On note des

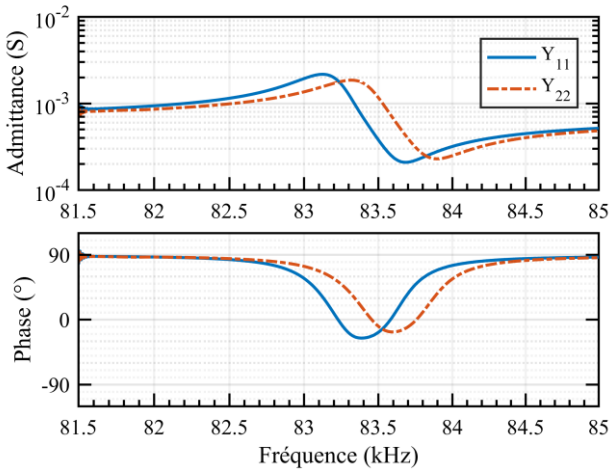

Fig. 4: Admittances mesurées Y_{11} et Y_{22}

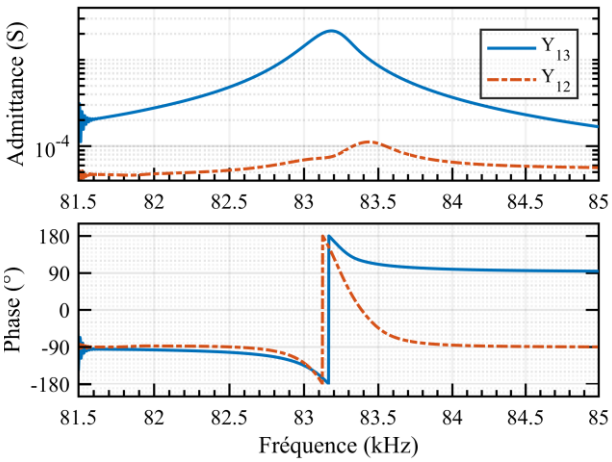

Fig. 5: Admittances mesurées Y_{12} et Y_{13}

comportements différents suivant la parité des électrodes. En effet l'admittance Y_{13} s'apparente à celle d'un circuit RLC série donc d'ordre 2 avec une valeur nettement supérieure à celle de l'admittance Y_{12} qui s'apparente à un circuit du quatrième ordre.

Ces différents couplages sont dus à la géométrie des électrodes et au mode de résonance excité. Si une électrode i se situe sur un ventre du mode excité alors les électrodes directement voisines correspondent à des nœuds et les électrodes suivantes à des ventres mais d'amplitudes opposées. Cela explique la différence d'amplitude entre les admittances Y_{12} et Y_{13}. On retrouve par ailleurs le décalage en termes de fréquence de résonance entre les deux courbes. La différence de couplage entre les électrodes 2 et 3 témoigne donc de ce décalage entre les électrodes. Par la mesure, on s'aperçoit que les électrodes paires et impaires constituent deux systèmes presque indépendants avec peu de couplage entre les deux. C'est le choix de la position des électrodes qui engendre cela et permet ensuite de générer l'onde progressive.

4. Representation de la matrice d'admittance

La matrice Y_{tot} représente le comportement du transformateur sur une certaine gamme de fréquence. Pour déterminer les performances électriques du système deux approches sont possibles.

La première est une analyse harmonique. A l'aide de la matrice Y_{tot} on peut prédire les performances du transformateur en supposant une charge linéaire à la sortie et des tensions sinusoïdales en entrée. Une résolution numérique permet de déterminer complètement le circuit. On définit les électrodes d'entrée par une tension complexe représentant l'amplitude complexe de la tension en entrée. Pour les sorties, la définition de l'impédance de la charge de sortie suffit alors à la résolution complète du système, i.e. à la caractérisation des niveaux de tension en sortie, de courant en entrée et de puissance.

Cette simulation harmonique du système n'est valable que pour étudier le comportement du transformateur sur une charge linéaire. En électronique de puissance, les charges peuvent être non-linéaires, par exemple dans le cas d'un redresseur. Une analyse harmonique n'est plus valable et il est nécessaire de réaliser des simulations dans le domaine temporel. Dans ce cadre, on se doit d'avoir un modèle circuit représentant les couplages entre les électrodes, de la même façon que le circuit RLC série en parallèle avec un condensateur peut représenter un transformateur Rosen près de la résonance. Pour obtenir un modèle circuit, on revient à la représentation circuit d'un quadripôle. Un quadripôle défini par (2) peut être représenté par une admittance en parallèle avec une source de courant liée comme représenté sur la Fig. 6.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

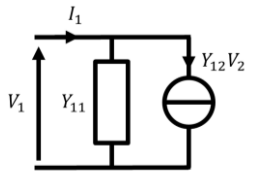

Fig. 6: Modèle équivalent circuit d'une électreode dans le cas d'un quadripôle

Cette représentation permet de lier les différentes électrodes avec un modèle circuit à l'aide de la matrice Y. Dans le cadre de notre multiport, il est possible d'adapter la même représentation en adaptant le nombre d'électrodes au transformateur étudié. Si on reprend l'exemple considéré dans ce papier, on peut représenter l'électrode i par le schéma électrique de la Fig. 7 comme évoqué dans [10]. Il y a autant de sources de courant qu'il y a de couples d'électrodes. Cette modélisation est la même pour toutes les électrodes restantes. On peut alors théoriquement réaliser une simulation dans le domaine temporel du circuit.

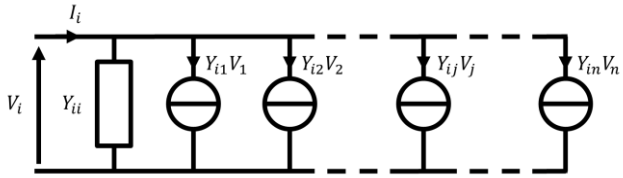

Fig. 7: Modèle circuit de l'électrode i du multiport

Cependant les admittances que nous avons mesurées sont définies de façon discrète sur la gamme de fréquence considérée. Pour réaliser la simulation des sources de courant liées, plusieurs solutions sont possibles. La première vise à définir l'admittance par sa représentation discrète comme il est possible avec les sources contrôlées des logiciels de type SPICE [11]. Cela permet de réaliser des simulations AC mais pour réaliser une simulation temporelle précise et proche du comportement réel il est nécessaire de définir l'admittance sur toutes les fréquences. De plus, les temps de simulation dans ce type de résolution peuvent être assez longs. Une deuxième solution consiste à représenter le système par un modèle équivalent circuit des admittances étudiées. On peut alors représenter les admittances de couplages d'ordre 2 par des RLC série ou bien les admittances propres par des circuits RLC série en parallèle avec un RC série. Toutefois, il apparait assez compliqué de représenter une admittance du type Y_{12} telle que montrée à la Fig. 5. De plus certaines admittances de couplage d'ordre 2 peuvent présenter le même gain mais des phases opposées obligeant à ajouter des éléments autres que R, L ou C pour émuler l'admittance souhaitée.

La solution utilisée dans cet article pour simuler la matrice Y_{tot} est basée sur la représentation des admittances par des fonctions de transfert rationnelles et stables [12]. A l'aide de fonctions de fitting, on peut représenter chaque admittance Y_{ij} par une fonction de transfert dont l'ordre dépend évidemment du type de couplage étudié. Sur la Fig. 8 sont représentées les fonctions de transfert associées aux admittances Y_{12} et Y_{13}. Il est possible d'augmenter l'ordre de

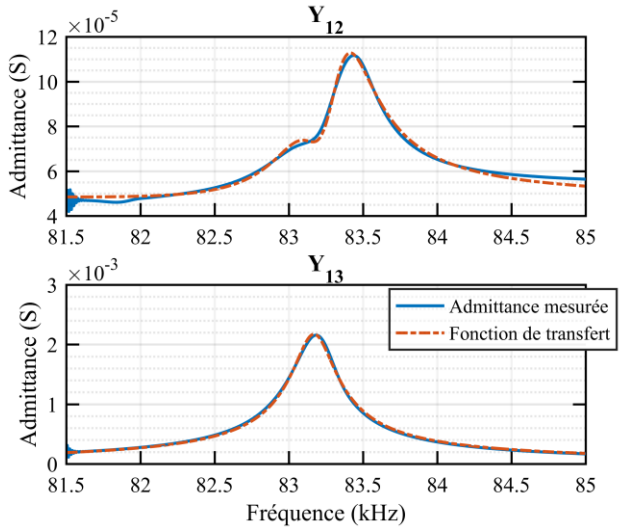

Fig. 8: Admittances mesurées et fonction de transfert correspondante pour Y_{12} et Y_{13}.

la fonction de transfert pour gagner en précision sur la gamme de fréquence considérée au prix d'instabilités de simulation et de précision moindre dans le comportement en dehors de cette gamme.

Cette représentation permet ensuite de définir pour chaque source liée le courant à partir des tensions V_i. Ces simulations ont été réalisées sur Simulink avec le module Simscape Electronics. On a représenté sur la Fig. 9 un modèle simplifié de l'électrode 1 du multiport avec simplement deux sources de courant liées. L'admittance propre de l'électrode 1 a été représentée par un circuit RLC série en parallèle avec un RC à partir de l'admittance mesurée Y_{11}. Des capteurs de tension permettent de suivre la tension aux bornes des n électrodes du système. Pour chaque électrode on peut alors définir les (n-1) sources de courant en multipliant la tension V_j par la fonction de transfert représentant Y_{ij}. Enfin, sur le schéma présenté Fig. 9, l'électrode seule est représentée, il convient de brancher le circuit correspondant en fonction de sa directionnalité. Si l'électrode agit comme une entrée, une source de tension sinusoïdale est ajoutée en parallèle de l'électrode alors que dans le cas d'une sortie, elle est connectée au circuit de sortie. Dans notre cas, pour les simulations et pour les sorties, une résistance sera ajoutée en parallèle du circuit RLC résonant.

5. Resultats et discussion

La géométrie du transformateur et le positionnement des électrodes ont été conçus pour pouvoir générer une onde progressive. Pour obtenir une onde progressive il est nécessaire de commander les électrodes d'une façon particulière [5]. On a représenté sur la Fig. 10, une vue de coupe du transformateur piézoélectrique où chaque section correspond à un couple d'électrodes. Les signaux de commande pour chaque couple permettant de générer l'onde progressive sont détaillés. On note que les électrodes paires sont commandées par des sinus et les impairs par des cosinus. C'est ce déphasage entre les deux systèmes d'électrodes qui permet de générer l'onde progressive. Les quatre électrodes de sortie permettent d'obtenir un système quadriphasé de tensions.

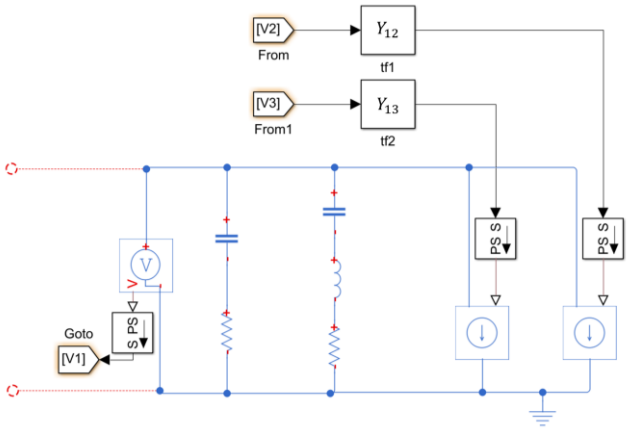

Fig. 9: Schéma électrique pour simulation de l'électrode 1 avec couplages aux électrodes 2 et 3

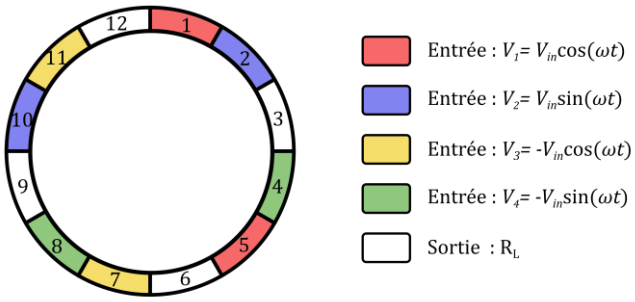

Fig. 10: Schéma des commandes pour le transformateur piézoélecrtique permettant de générer l'onde progressive.

5.1. *Résultats de simulation*

Dans un premier temps, on souhaite comparer la simulation temporelle avec l'étude harmonique. On simule donc le système présenté avec une tension V_{in} de 10 V et une résistance de charge de 5 kΩ. Les résultats sont présentés Fig. . Dans la suite de la discussion, l'accent sera mis sur la comparaison entre les méthodes de simulation et les résultats expérimentaux sans discuter plus précisément des performances du transformateur piézoélectrique. On remarque donc que la simulation temporelle à l'aide des sources liées avec les fonctions de transfert permet d'obtenir des résultats très semblables à ceux obtenus numériquement. Cela valide ainsi la méthode de représentation du transformateur piézoélectrique pour la simulation. De plus, on peut observer des fréquences de résonance différentes pour le couple V_{out1} et V_{out3} et pour le couple V_{out2} et V_{out4}. C'est la conséquence du déséquilibre observé dans la mesure des paramètres d'admittances entre les deux systèmes d'électrodes. Cela se traduit donc par des différences d'amplitude et de fréquence de résonance suivant que l'on considère des électrodes paires ou impaires.

5.2. *Résultats expérimentaux*

La méthode de simulation ayant été validée, on souhaite dorénavant s'intéresser à la précision de la méthode d'extraction pour la simulation en conditions réelles du transformateur piézoélectrique. Pour cela, il convient de comparer les résultats expérimentaux avec la simulation du modèle extrait. Un banc de test est mis en place pour obtenir des résultats expérimentaux. A l'aide d'amplificateurs

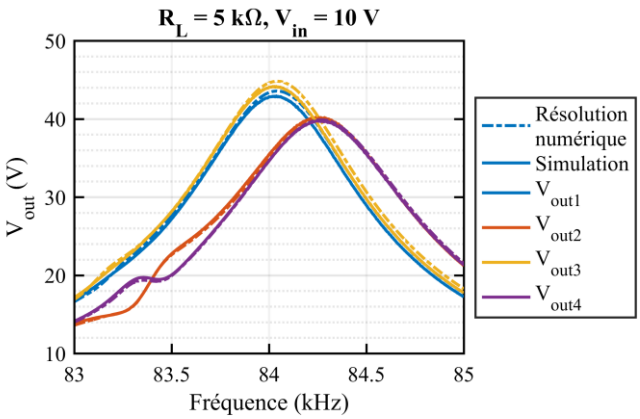

Fig. 11: Tensions de sortie obtenues par simulation transfitoire dans le domaine temporel et par analyse harmonique numérique.

linéaires, les électrodes sont commandées par des tensions sinusoïdales comme indiqué Fig. 10. On utilise des charges résistives en sortie et on mesure les niveaux des tensions en sortie du transformateur pour les comparer à la simulation.

Sur la Fig. 12, sont représentées les tensions de sortie en fonction du temps pour une charge $R_L = 1{,}5\ \mathrm{k\Omega}$ et une tension $V_{in} = 4\ \mathrm{V}$ à la fréquence $f = 84\ \mathrm{kHz}$. L'onde progressive est bien présente puisqu'on obtient le système polyphasé de tensions en sortie qui traduit ce comportement. Concernant la comparaison entre la simulation et la mesure, le comportement est identique malgré quelques différences en termes d'amplitude. On retrouve par ailleurs le déséquilibre qui existe entre les différents systèmes d'électrodes. Notre modèle est ainsi validé. On cherche maintenant à étudier les différences en termes de performances mesurées et simulées en fonction des conditions de fonctionnement.

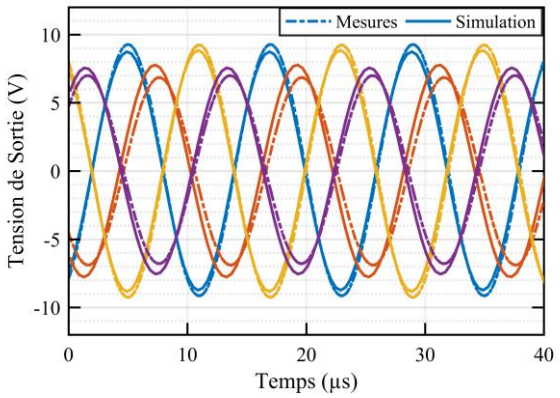

Fig. 12: Allure des tensions de sortie mesurées et simulées pour $V_{in} = 4\ \mathrm{V}$ et $R_L = 1.5\ \mathrm{k\Omega}$

Dans un premier temps, on s'intéresse à la tension en sortie du transformateur pour différentes valeurs de charge. Pour cela on se place à une tension $V_{in} = 4\ \mathrm{V}$ qui permet de limiter les niveaux de tension en sortie du transformateur. Les tensions de sortie en fonction de la fréquence sont représentées sur la Fig. 13 pour différentes valeurs de résistances R_L. Quelle que soit la résistance de charge, on observe bien la séparation des tensions de sortie en deux groupes avec des fréquences de résonance et des gains différents ce qui était anticipé par la simulation. De plus le décalage de la fréquence de résonance est aussi bien caractérisé. Lorsque la résistance augmente, la fréquence de résonance est aussi décalée vers de plus hautes fréquences. Cependant, il existe des décalages entre les simulations et l'expérimental en fonction de la résistance de charge. Pour des valeurs faibles de R_L, le comportement est globalement bien anticipé par la simulation : les résonances apparaissent aux mêmes endroits et les niveaux de tension sont assez proches. Lorsque la résistance de charge augmente, la simulation et l'expérience ont tendance à se décaler. On observe ainsi une résonance plus marquée par la mesure que par la simulation pour une résistance de 22 kΩ. Cela s'explique par la méthode d'extraction des paramètres utilisée. Lorsque l'on réalise la mesure des paramètres, le niveau de tension en entrée est plus faible (environ 700 mV)

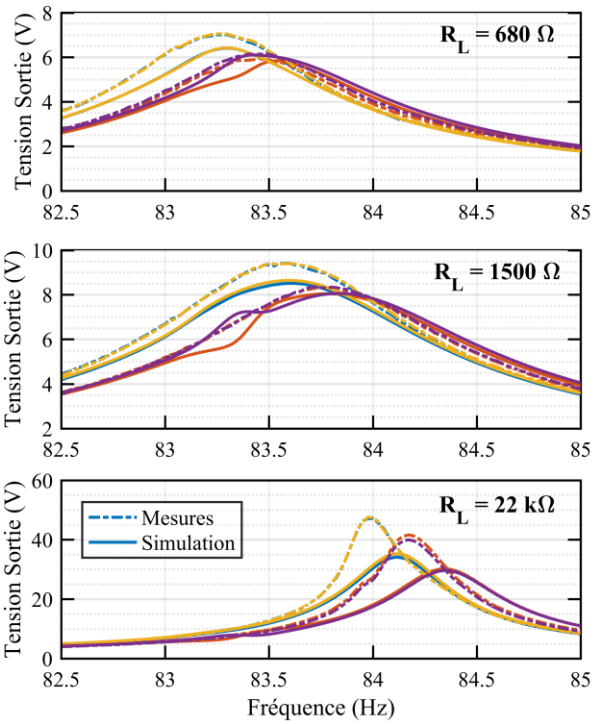

Fig. 13: Tensions de sortie obtenues expérimentalement et par simulation pour différentes résistances de charge R_L et pour $V_{in} = 4\ \mathrm{V}$

et la plupart des électrodes sont chargées sous une résistance de 50 Ω. Lorsque la résistance de charge est grande, le comportement du transformateur piézoélectrique n'est plus exactement le même : l'amplitude de la vibration est plus grande et ainsi d'autres phénomènes mécaniques apparaissent qui ne sont pas pris en compte lors de l'extraction des paramètres. Toutefois, à résistance faible (jusqu'à deux décades par rapport à 50 Ω lors de l'extraction des paramètres), le comportement est très bien traduit par la simulation des paramètres extraits.

L'influence de la tension d'entrée est étudiée ensuite. Les résultats pour la tension de sortie en fonction du niveau de tension d'entrée sont représentés sur la Fig. 14 pour une charge $R_L = 1\ \mathrm{k\Omega}$. Pour des niveaux de tensions inférieurs

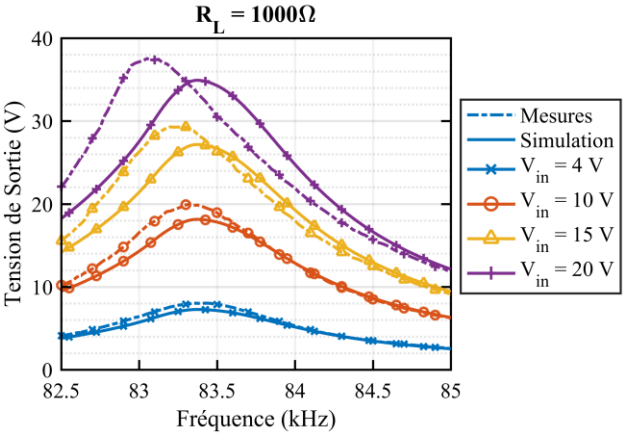

Fig. 14: Tensions de sortie obtenues expérimentalement et par simulation pour différentes résistances de charge R_L et pour $V_{in} = 4\ \mathrm{V}$

à 10 V le comportement du transformateur est bien caractérisé par la simulation. Pour des niveaux de tension plus élevés la fréquence de résonance mesurée est décalée alors qu'elle reste constante en simulation. La première raison pour cela est un échauffement dû aux pertes mécaniques. Cet échauffement a tendance à décaler la fréquence de résonance [13]. De plus, des phénomènes non-linéaires apparaissent dans la céramique piézoélectrique quand la tension aux bornes du transformateur augmente [14]. Ces phénomènes non-linéaires apparaissent seulement pour des tensions élevées et sont difficilement caractérisables par la méthode d'extraction présentée ici. Toutefois, on peut voir que les résultats expérimentaux et les simulations sont assez proches en termes de valeur absolue et le comportement global du transformateur reste bien caractérisé par la simulation.

6. CONCLUSIONS

Nous avons étudié dans cet article la possibilité de l'extraction de paramètres d'admittance pour la simulation de transformateurs piézoélectriques multi-électrodes notamment pour l'étude des structures à onde progressive. Les paramètres d'admittance peuvent alors être représentés par des fonctions de transfert de type laplacien linéaires entre chaque couple d'électrode et les autres pour réaliser des simulations dans le domaine temporel et fréquentiel. Cette méthode d'extraction permet la simulation précise de systèmes multi-électrodes que l'on peut difficilement représenter par des circuits RLC pour certains niveaux de tension et de charge dépendant de la méthode d'extraction des paramètres. De plus, en modélisant le système directement par la mesure, on peut prendre en compte les pertes de façon plus précise que pour un modèle analytique. La comparaison entre les résultats issus de la simulation et expérimentaux pour une charge résistive montre son intérêt pour la simulation du transformateur piézoélectrique sur une certaine gamme de charge et tension en entrée. Il serait par ailleurs possible d'obtenir un modèle plus précis du transformateur en réalisant des essais paramétrés à divers températures et d'anticiper l'échauffement du transformateur par un modèle thermique.

Le procédé de représentation est validé mais l'intérêt de ce procédé de modélisation est de permettre la simulation du système multi-électrodes associé à un circuit d'électronique de puissance non-linéaire. Il permet par exemple de simuler un ensemble constitué du transformateur piézoélectrique et d'un redresseur polyphasé en sortie ; c'est donc un outil intéressant pour la conception d'un convertisseur de puissance utilisant un système multiports.

7. REFERENCES

[1] Wells E. 2002 Comparing magnetic and piezoelectric transformer approaches in CCFL applications *Texas Instruments Analog Appl. J.*

[2] Itoh H, Teranishi K and Suzuki S 2006 Discharge plasmas generated by piezoelectric transformers and their applications *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** S51–61

[3] Vasic D, Costa F and Sarraute E 2006 Piezoelectric transformer for integrated MOSFET and IGBT gate driver *IEEE Trans. Power Electron.* **21** 56–65

[4] Martinez T, Pillonnet G and Costa F 2018 A 15-mV Inductor-Less Start-up Converter Using a Piezoelectric Transformer for Energy Harvesting Applications *IEEE Trans. Power Electron.* **33** 2241–53

[5] Martinez T, Pillonnet G, Vasic D and Costa F 2017 Study and Modeling of a Traveling Wave Piezoelectric Transformer

[6] Syed E M 2001 *Analysis and modeling of piezoelectric transformers*

[7] Martinez T, Pillonnet G, Vasic D and Costa F 2018 Modeling of a multi-electrodes traveling-wave piezoelectric transformer *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII* vol 10595, ed A Erturk (SPIE) p 82

[8] Davis W A and Agarwal K 2001 Multiport Circuit Parameters and Transmission Lines *Radio Frequency Circuit Design* pp 51–83

[9] Chusseau L Paramètres S - Antennes

[10] Singh H and Abur A 1995 Multi-port equivalencing of external systems for simulation of switching transients *IEEE Trans. Power Deliv.* **10** 374–82

[11] Amin C, Kashyap C, Menezes N, Killpack K and Chiprout E 2006 A multi-port current source model for multiple-input switching effects in CMOS library cells *Proceedings of the 43rd annual conference on Design automation - DAC '06* (New York, New York, USA: ACM Press) p 247

[12] Porkar B, Vakilian M, Feuillet R, Ghassemi M and Akhavan A Multi-port frequency-dependent network equivalent for electromagnetic transient studies *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005.* (IEEE) pp 287–95

[13] Baptista F G, Budoya D E, de Almeida V A D and Ulson J A C 2014 An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. *Sensors* **14** 1208–27

[14] Yang J, Chen Z, Hu Y, Jiang S and Guo S 2007 Weakly nonlinear behavior of a plate thickness-mode piezoelectric transformer. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **54** 877–81