

Développement d'un convertisseur mécanique-électrique adapté aux énergies renouvelables aux mouvements lents et intermittents

S.A. CLEMENT^a, F. JAUME^a, A. AUBRY^a, V. KOCHER^a, A. ELMAATAOUI^a, F. JEAN^a, F. MOSCA^a

a. PYTHEAS Technology, 100 Impasse des Houillères - ZA Le Pontet, 13590 Meyreuil
simon.clement@pytheas-technology.com

Résumé

Les systèmes de récupération d'énergie renouvelable tels que les éoliennes, hydroliennes, systèmes houlomoteurs, roues à aubes, ou encore vis d'Archimède ont pour point commun une faible vitesse de rotation de leur arbre tournant (entre 5 et 50 tours/minute), pouvant subir des changements de vitesse importants. Les technologies de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique actuelles relèvent pour la plupart des machines synchrones ou asynchrones bobinées ou à aimants permanents. Cependant, le rendement de ces machines chute à faible vitesse et elles nécessitent l'utilisation d'un multiplicateur à engrenages, conduisant à des pannes fréquentes et une perte de disponibilité.

Afin d'améliorer la rentabilité des systèmes de récupération d'énergie renouvelable, PYTHEAS Technology développe une génératrice basée sur la technologie piézoélectrique qui a pour but de répondre aux lacunes des génératrices traditionnelles mentionnées précédemment. Les céramiques piézoélectriques sont connues pour leur grande densité de puissance et les rend attractives pour des systèmes embarqués ou difficiles d'accès. Par leur caractère capacitif, elles génèrent une quantité d'électricité directement proportionnelle à leur fréquence de compression et permettent un rendement indépendant de la vitesse d'excitation.

Un prototype de cette génératrice piézoélectrique a été réalisé et testé sur banc d'essai. Ces tests ont validé la génération d'électricité par piézoélectricité pour de moyennes puissances (plusieurs centaines de Watts) et le procédé d'extraction de charges. Ils ont aussi prouvé que le rendement est indépendant de la vitesse de rotation de l'axe d'entrée, validant le principe fondateur de cette génératrice.

Abstract

Renewable energy harvesting systems such as wind and marine turbines, water wheels, wave energy converters, water wheels or Archimedes screws all have in common particularly low rotation speeds (between 5 and 50 rounds/minute), often with strong potential speed variations. Until now, most available mechanical to electrical convertors (also called power take-offs) are based on synchronous or asynchronous generator technologies. However, these technologies have decreasing efficiencies

below their nominal rotational speed and require a gearbox to adapt to the low speeds of the prime movers mentioned above. These gearboxes are an important source of failures and downtime, decreasing profitability of renewable energies.

To increase the competitiveness of renewable energies, PYTHEAS Technology is developing a mechanical/electrical convertor based on the piezoelectric technology, with the goal to tackle the limitations of traditional power-take-offs. Piezoelectric ceramics are known for their high power density, which makes them attractive for remote renewable energy systems. Moreover, thanks to their capacitive electricity charges generation, the mechanical to electrical conversion efficiency is independent of the excitation frequency.

A prototype of this piezoelectric power take-off was designed, built and tested in laboratory. These tests validated the piezoelectric materials capability to generate a high electrical power and the electronics required to do so. It also proved the conversion efficiency independent of the excitation frequency, thus validating the founding principle of this power take-off.

Mots clefs : Energies renouvelables, Génératrice, Piézoélectricité

1 Introduction

Le développement des énergies renouvelables est un des défis majeurs de notre temps. Afin d'exploiter l'énergie du vent, des océans et des cours d'eau, de nombreuses technologies sont en cours de développement ou de perfectionnement : éoliennes, hydroliennes, systèmes houlomoteurs, roues à aubes, vis d'Archimède, et d'autres. Tous ces convertisseurs d'énergie ont en commun une faible vitesse de rotation de leur arbre tournant (entre 10 et 50 tr/min), sur lequel est connecté un convertisseur mécanique-électrique (la génératrice d'électricité). Dans certains cas, cette vitesse peut aussi être fortement variable, voire subir des changements de sens de rotation.

Les technologies de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique actuelles relèvent pour la plupart des machines synchrones ou asynchrones bobinées ou à aimants permanents. Les versions classiques de ces alternateurs sont adaptées à des vitesses de rotation élevées, typiquement de l'ordre de 1500 ou 3000 tours/minute (tr/min), qui correspondent aux vitesses trouvées dans les centrales électriques traditionnelles à charbon, gaz ou dans les réacteurs nucléaires.

Pour les énergies renouvelables mentionnées précédemment, un multiplicateur de vitesses (à engrenages) est en général utilisé, conduisant à des pannes fréquentes et une perte de disponibilité et donc à une perte financière importante, comme montré sur la Figure 1. Ce problème est d'autant plus important pour les sources d'énergie intermittentes ou à vitesse variable, pour lesquels ces pannes augmentent sensiblement.

De plus, la variation du rendement en fonction de la vitesse est une problématique essentielle pour les génératrices traditionnelles. En effet, les machines asynchrones ont une plage de fonctionnement faible (environ +/- 10% de la vitesse nominale), légèrement augmentée lorsqu'une double alimentation est utilisée. Pour une machine synchrone à aimant permanent, le rendement diminue à faible vitesse, menant à une perte de production pour les sources d'énergie renouvelable à vitesse variable.

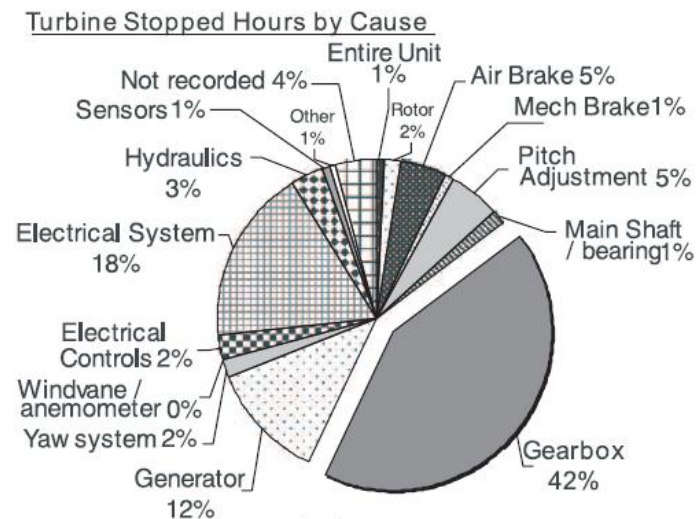


Figure 1 : Répartition du temps d'indisponibilité d'une éolienne par causes. WindStats, Wind turbine data summary tables, 2008

PYTHEAS Technology développe une génératrice basée sur la technologie piézoélectrique qui a pour but de répondre à ces contraintes particulières. Par l'utilisation de céramiques piézoélectriques et d'une électronique de puissance adaptée, elle a pour but d'offrir :

- Un rendement constant sur une large gamme de vitesses, en particulier entre 1 et 20 tr/min
- Un couple électrique contrôlable et indépendant de la vitesse, réduisant les efforts sur les structures mécaniques et améliorant les possibilités de contrôle/commande
- Une production de courant continu, nécessitant un seul étage de conversion pour se relier au réseau électrique
- Une densité de puissance élevée, facilitant son installation dans des emplacements difficiles (nacelles en altitude, plateformes off-shore ancrées ou flottantes)

Par leur comportement capacitif, les céramiques piézoélectriques fournissent une quantité d'énergie fixe par compression, pour un effort choisi, quelle que soit la fréquence de compression (loin de la fréquence de résonance). Avec une transmission mécanique transformant la rotation de l'arbre d'entrée en compression des piliers, on a alors une puissance produite proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre, avec un rendement indépendant de la vitesse.

Enfin, il faut noter que les céramiques piézoélectriques ont une densité de puissance plus élevée que les machines à aimants permanents, comme montré sur la Figure 2. Elles ont en plus l'avantage de ne pas posséder de terres rares, question qui gagne en importance à cause de la variabilité des prix, des difficultés liées à l'approvisionnement en terres rares aujourd'hui et aux pollutions causées par leur extraction.

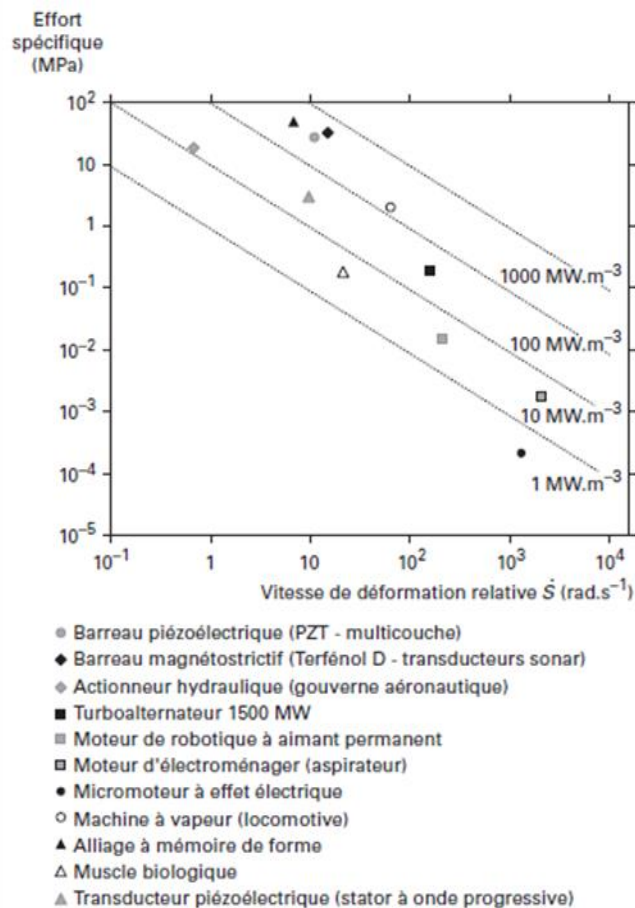


Figure 2 : Densité de puissance de différents procédés de conversion d'énergie électromécanique [1]

2 Développement de la génératrice piézoélectrique

2.1 Céramiques piézoélectriques et transmission mécanique

L'intérêt des matériaux piézoélectriques pour le développement d'une génératrice adaptée aux énergies renouvelables a été détaillé en introduction. Ces matériaux n'ont cependant jamais été utilisés dans ce domaine et pour de telles puissances. En effet, la plupart des systèmes de génération d'électricité à partir de matériaux piézoélectriques sont sous forme de patches, pour des puissances comprises entre quelques μW et quelques mW.

Plusieurs verrous technologiques doivent donc être levés pour permettre le développement d'une telle génératrice : le choix de céramiques piézoélectriques adéquates, une transmission mécanique pour transformer la rotation de l'arbre en compression des céramiques et une électronique de puissance pour l'extraction des charges électriques.

Afin d'atteindre des densités de puissance importantes et augmenter la course de compression pour un même effort d'entrée, les céramiques PZT (Titano-Zirconate de Plomb) souples ont été choisies. L'avantage des céramiques PZT en termes de densité de puissance a d'ailleurs été identifié par B. Nogaredo [1], comme montré sur la Figure 2.

Ces céramiques sont utilisées sous forme de disques d'environ 5mm d'épaisseur et 5cm de diamètre, empilés et connectés en parallèle. Un empilement de céramiques est appelé un pilier piézoélectrique et comporte en général entre 15 et 30 céramiques pour notre application.

Lorsque le pilier est mis sous compression, une différence de potentiel se crée aux bornes des céramiques et des charges électriques peuvent être extraites. Afin d'obtenir des puissances élevées, les piliers piézoélectriques doivent être comprimés à haute fréquence (plusieurs centaines de Hz). Transformer le mouvement de rotation lent sur l'arbre d'entrée en compression des piliers est donc bien entendu un défi technologique important. Plusieurs technologies ont été étudiées, menant à différents prototypes : un premier avec une transmission purement mécanique, qui a rencontré une durée de vie trop limitée, puis un second avec une transmission hybride mécanique/hydraulique, qui est celui étudié dans cet article.

Dans ce second prototype, un système bielle-manivelle convertit le mouvement de rotation de l'arbre d'entrée en compression d'une chambre hydraulique située sous plusieurs piliers piézoélectriques.

2.2 Electronique d'extraction des charges électriques

Lorsqu'un pilier piézoélectrique est laissé en circuit ouvert, des charges s'accumulent à ses bornes lorsqu'il est comprimé, mais disparaissent lorsqu'il revient à sa position de repos (ou vice-versa). Dans ce cas, les charges électriques ne sont pas extraites et aucune puissance électrique n'est générée.

Afin d'extraire ces charges et obtenir une puissance électrique utile, un circuit d'électronique de puissance doit être utilisé [2]. Deux architectures différentes ont été testées : le SECE (Synchronous Electric Charge Extraction) et SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor), le dernier en configuration parallèle.

Le principe du SECE est simple : le pilier piézoélectrique est laissé en circuit ouvert lors de chaque compression ou décompression et on détecte lorsque le maximum de tension est atteint. A ce moment, on connecte une charge à ses bornes, dans laquelle les charges électriques sont envoyées. Ce circuit a l'inconvénient d'envoyer de forts pics de courant, menant à un rendement relativement faible (entre 91 et 94% lors de nos essais).

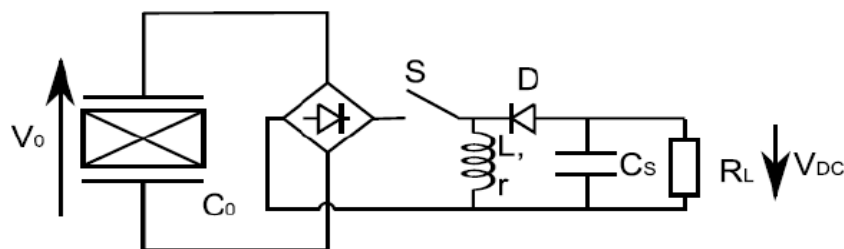


Figure 3 : Schéma électrique d'un circuit d'extraction SECE [3]

Afin de diminuer les pertes de l'extraction électrique, un montage SSHI parallèle a aussi été testé. Ce montage se compose d'une inductance placée en parallèle du pilier piézoélectrique, suivie d'un pont redresseur de tension et d'une charge. Le principe de fonctionnement de ce montage est le suivant : il permet d'inverser très rapidement la tension aux bornes du système piézoélectrique après extraction

des charges électriques à une tension fixe V_{dc} . Cette inversion de tension est créée grâce à un circuit résonnant LC, où le condensateur est la capacité équivalente du pilier piézoélectrique.

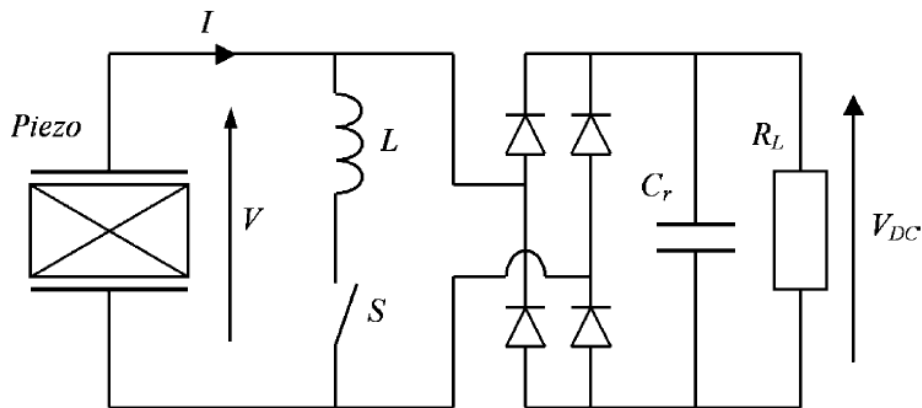


Figure 4 : Schéma électrique d'un circuit d'extraction SSHI parallèle [3]

Ce circuit a permis d'atteindre des rendements compris entre 96% et 98% pour l'extraction des charges électriques, en obtenant une tension continue en sortie.

3 La campagne d'essais

3.1 Description de l'installation expérimentale

Le banc d'essai permet la mise en rotation de l'arbre d'une génératrice pour des vitesses allant de 0 à 600 tr/min. Il faut noter que cette génératrice serait placée après un train épicycloïdal avec un rapport de réduction de 24 : pour une turbine à 20 tr/min, la maquette de génératrice tourne à 480 tr/min. Un moteur à courant continu entraîne une courroie, qui met en rotation l'arbre de la génératrice. Le rapport de vitesse entre l'arbre du moteur et l'arbre de la génératrice est de 5, le moteur peut donc tourner à des vitesses variant de 0 à 3000 tr/min. Une vue schématique du banc d'essai est donnée sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

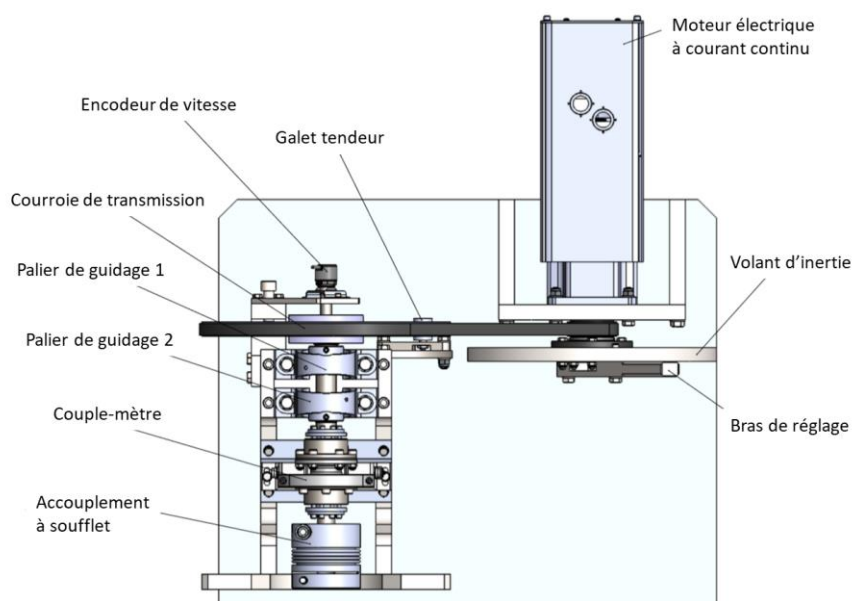


Figure 5 : Banc d'essai de génératrice

Un volant d'inertie permet de lisser le couple moteur et un bras de réglage peut être monté pour mettre l'arbre en rotation manuellement. Deux paliers auto-aligneurs et un accouplement à soufflet assurent le positionnement de l'arbre.

La vitesse de rotation de l'arbre est mesurée à l'aide d'un encodeur et le couple à l'aide d'un couplemètre. Ces mesures permettent de connaître la puissance mécanique d'entrée fournie à la génératrice.

L'arbre tournant à l'entrée du prototype de génératrice est connecté au banc d'essai via le soufflet d'accouplement. Un système de type bielle-manivelle permet de transformer le mouvement de rotation de l'arbre en une compression sur une chambre hydraulique. Cette chambre hydraulique monte en pression lorsque le piston du système bielle-manivelle vient la comprimer et les piliers piézoélectriques, dont l'embase est connectée à la chambre hydraulique, se compriment sous l'effet de la pression.

Les piliers se chargent à chaque compression et décompression et le système d'extraction crée un courant électrique à tension constante et intensité variable, qui est mesuré pour obtenir la puissance électrique de sortie.

3.2 Résultats

Plus de 400 essais ont été réalisés afin de caractériser le comportement des céramiques piézoélectriques, de l'électronique d'extraction de charges et de la transmission mécanique. L'essai final de caractérisation a consisté en une montée en vitesse par paliers, de 1 tr/min à 8.5 tr/min. L'objectif de cet essai est de valider le principal fondamental de la génératrice piézoélectrique, à savoir un rendement indépendant de la vitesse de rotation d'entrée.

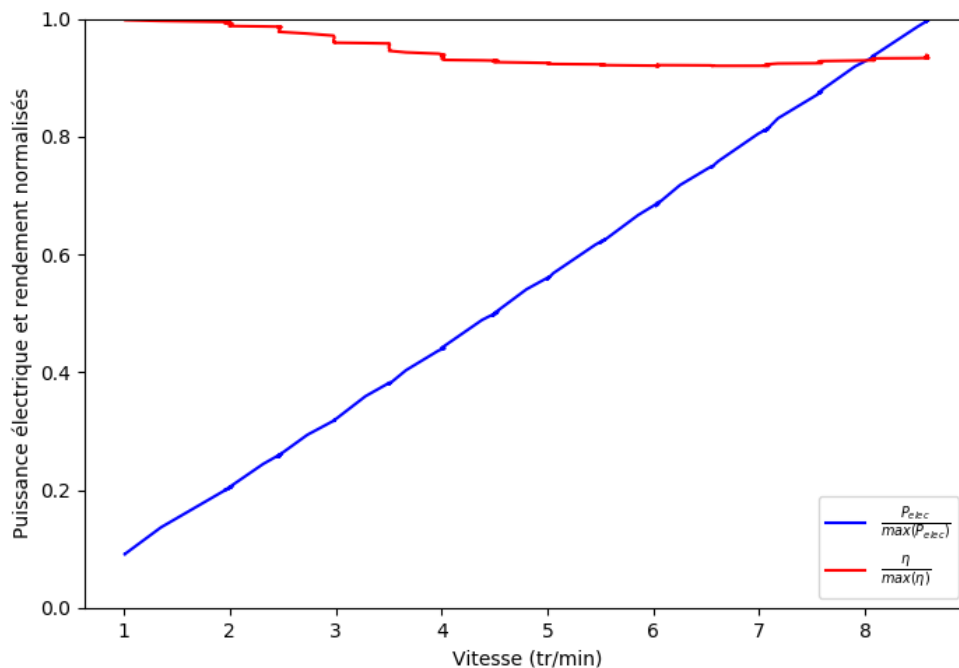


Figure 6 : Puissance électrique (P_{elec}) et rendement (η) normalisés en fonction de la vitesse, pour une montée en vitesse par paliers successifs

On peut observer que la puissance électrique produite est linéaire avec la vitesse de rotation d'entrée, comme attendu théoriquement. En effet, la fréquence de compression des céramiques piézoélectriques est directement proportionnelle à celle de rotation de l'arbre via le système de transmission bielle-manivelle. L'effort appliqué sur les céramiques restant constant, la puissance extraite est bien proportionnelle à la fréquence d'excitation des céramiques et donc à la vitesse de rotation de l'arbre. Cette mesure de la puissance électrique produite valide le procédé d'extraction de charge, en particulier le fait qu'elle n'introduit pas de pertes en fonction de la vitesse.

Le rendement, quant-à-lui, diminue légèrement lorsque la vitesse augmente. Ayant observé que la puissance produite évolue linéairement avec la vitesse et que l'on a donc pas de chute de puissance produite, on peut conclure que des pertes apparaissent lorsque la vitesse augmente. Ces pertes sont causées par la chaîne de transmission mécanique, en particulier par le système bielle-manivelle qui contient des roulements soumis à des efforts importants et des pièces en mouvements pouvant apporter de forts efforts d'inertie à haute vitesse.

Avec une transmission mécanique améliorée afin de supprimer (ou en tout cas limiter) cette chute de rendement d'environ 10%, la technologie piézoélectrique permet donc bien d'obtenir un rendement indépendant de la vitesse. En particulier, celui-ci reste élevé même pour des vitesses très faibles grâce au comportement capacitif des céramiques piézoélectriques.

4 Conclusion

Un prototype de génératrice piézoélectrique adaptée aux énergies renouvelables a été conçu, fabriqué et testé en laboratoire. Plusieurs verrous technologiques ont été levés, tels que la définition de matériaux piézoélectriques permettant d'atteindre de hautes densités de puissance et une électronique d'extraction de charges à faibles pertes.

Les essais ont validé un des principes fondamentaux de la génératrice, qui est une production électrique directement proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre tournant d'entrée. Cela permet d'obtenir des rendements élevés quelle que soit la vitesse. De faibles pertes sont pour l'instant présentes à haute vitesse à cause de la transmission mécanique, mais des améliorations sont en cours de développement pour y remédier.

Une amélioration de la transmission hybride/mécanique est à l'étude, ainsi qu'une transmission purement hydraulique, afin de limiter les pertes dans la transmission mécanique et en particulier dans les roulements, qui subissent des efforts importants dans le design actuel. Une fois la transmission mécanique finalisée, un démonstrateur de plus forte puissance (plusieurs kW) sera fabriqué.

Ce type de génératrice a donc un fort potentiel pour améliorer la production des énergies renouvelables et les rendre plus compétitives, en particulier celles avec des mouvements lents et intermittents, qui apportent les challenges les plus importants en termes de conversion électromécanique.

Références

- [1] B. Nogarede, Machines tournantes : conversion électromécanique de l'énergie, Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, 2001.
- [2] D. Guyomar, M. Lallart, Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation, Micromachines, 2011.
- [3] M. Lallart, Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie – Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.