

Extraction de l'énergie des vagues grâce à des cycles piézoélectriques d'Ericsson.

Benjamin DUCHARNE, Bin ZHANG*, GaelSEBALD, Daniel GUYOMAR, Jun GAO*

*Shandong University, China

Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

RESUME -Le travail présenté ici décrit une technique d'extraction de l'énergie des vagues basée sur une conversion piézo-électrique et une analogie avec les cycles thermodynamiques d'Ericsson. En synchronisant un champ électrique externe aux maximums et minimums de la contrainte d'excitation mécanique, nous augmentons considérablement le cycle vertueux de polarisation diélectrique correspondant au maximum d'énergie potentiellement récupérable. Dans cet article, une solution technique pour un déploiement in situ de la solution est proposée (détection de maximums et de minimums, synchronisation de la source de champ électrique externe ...). Un banc de caractérisation expérimentale a été développé pour générer l'excitation mécanique équivalente et déterminer précisément l'énergie potentiellement récupérable. Un modèle d'hystérésis adéquate est proposé et permet de déterminer numériquement la meilleure configuration (fréquence, amplitude) du champ électrique à imposer. Même si la technique d'Ericsson nécessite de l'électronique externe, la faible consommation des composants utilisés permet une amélioration importante de l'énergie extraite en comparaison à une technique de récupération basique.

Mots-clés— Energie, Cycle d'Ericsson, Piézoélectricité, modèle, hysteresis, dérivée fractionnaire.

1. INTRODUCTION

Les mouvements océaniques (vagues, courants marins) sont d'énormes, largement inexploitées ressources d'énergies; le potentiel d'extraction est colossal. Les principales recherches autour de cette thématique sont motivées par la nécessité de trouver une solution alternative aux énergies fossiles.

Ce champ de recherche a été relativement peu exploité par comparaison à d'autres solutions renouvelables telles que le solaire ou le vent. Même si des brevets ont été déposés au 18^{ème} siècle [1], la première crise pétrolière dans les années 70 fut un véritable catalyseur dans l'évolution de cette thématique [2]. L'attention toute particulière actuelle autour du changement climatique ainsi que l'élévation du taux de CO₂ dans l'atmosphère, contribue à rendre à nouveau la génération d'électricité par des sources renouvelables un important champ d'investigation scientifique. La puissance équivalente de l'ensemble des vagues de la planète est estimée à 2TW [3]. Il est supposé qu'environ 15% des besoins électriques de la planète pourraient être alimentés par cette ressource renouvelable. Si l'on combine ceci à la génération électrique

par hydrolienne et courants marins, environ 20% de cette demande pourrait être assouvie [4, 5]. De nombreux articles existent autour de cette thématique [6, 7]. Tous ces articles donnent un tour d'horizons relativement exhaustif de l'ensemble des techniques de récupération déjà existantes. La plupart de ces techniques sont toujours en cours d'exploitation, et un nombre relativement faible d'entre elles ont donné lieu à une réalisation large échelle et un déploiement offshore. Le projet LIMPET et la machine Pelamis en sont deux exemples, respectivement installés en 2001 et 2008 [8, 9]. Au-delà de ces extracteurs d'énergie large échelle, d'autres beaucoup plus petites échelles ont été développées pour convertir localement cette abondante ressource naturelle et alimenter des petits systèmes électroniques déportés. En revanche, l'énergie récupérée est en général très faible et à l'heure actuelle même si la consommation des composants et des capteurs électroniques a fortement diminuée, il est encore impossible d'alimenter la plupart de ces composants.

De nombreuses équipes de recherche travaillent à l'augmentation des rendements des systèmes d'extraction, partie mécanique et électrique sont traitées. Certaines équipes proposent des systèmes dit autoalimentés ou une partie de l'énergie électrique récupérée sert à alimenter l'électronique déportée nécessaire à l'amélioration de la conversion [10, 12]. D'autres, se concentrent sur la mise au point de systèmes mécaniques permettant une concentration des efforts et donc une augmentation de l'amplitude de contrainte mécanique [13-15]. L'amélioration du couplage électrique/mécanique constitue également une option alternative à l'augmentation de l'énergie récupérée. Citons par exemple, la technique des cycles d'Ericsson qui permet une augmentation de l'énergie récupérée qui peut atteindre 100 fois le taux d'origine [16].

Dans l'article proposé ici nous décrivons un système d'extraction de l'énergie des vagues basé sur cette technique des cycles d'Ericsson. Ici, l'utilisation d'une technique couplée permet une forte augmentation du taux d'énergie récupéré, mais elle implique l'utilisation de champs électriques élevés. Ces niveaux d'excitation importants impliquent un comportement non-linéaire des éléments piézo-électriques à l'origine de la conversion. Pour fournir une estimation précise de l'énergie extraite par la technique une modélisation précise incluant la prise en compte de l'hystérésis dynamique a été développée. Ce modèle temporel peut également être utilisé

pour définir en simulation et en laboratoire la loi de contrôle pour la synchronisation du champ électrique et de la contrainte mécanique requise par la technique d'Ericsson. Dans cet article, le banc de caractérisation dédié à la validation de la méthode est présenté ainsi qu'un grand nombre de comparaisons simulation/expérience pour comprendre le principe de fonctionnement de la technique et déterminer les meilleurs paramètres d'exploitation.

2. EXTRACTEUR DE L'ENERGIE DES VAGUES

2.1 Configuration parois

Les formes et géométries des océans sont perpétuellement remodelées par de lourdes charges dues aux impacts des vagues. Cette organisation dynamique et complexe a été fortement étudiée [17]. De tels niveaux d'énergie véhiculés peuvent être à la fois constructifs comme destructifs. Si des patches piézoélectriques sont positionnés à la surface de l'impact, la pression induite peut être utilisée pour générer de l'électricité. Dans les travaux d'Athanassoulis et al. [18], des tableaux verticaux, reliant en parallèle des séries d'éléments piézoélectriques. Dans cette configuration, le mode de couplage 33 est sollicité, le vecteur de polarisation résultant et le champ de contraintes appliquées agissent dans la même direction. La contrainte mécanique T_3 appliquée sur l'élément piézo-électrique est d'amplitude égale à la pression hydrodynamique. Cette contrainte donne naissance à un gradient de tension entre les deux électrodes des éléments piézoélectriques. L'élément piézoélectrique est court-circuité par une résistance qui voit un courant proportionnel au gradient de tension la traverser. Cette conversion est une des plus simples existantes, elle permet d'extraire de l'énergie des vagues et de la convertir en une énergie thermique traduite par l'élévation de température de la résistance. En revanche, l'énergie obtenue dont l'image se retrouve dans le cycle diélectrique d'hystérésis $P(E)$ de l'élément piézo-électrique est extrêmement faible. Pour améliorer les performances de cette configuration, nous proposons une nouvelle méthode d'extraction basée sur l'adaptation de la technique thermodynamique dite des « cycles d'Ericsson » à la piézoélectricité. En synchronisant une source de champ électrique extérieure (qui peut être en pratique une capacité pré-chargée) à la contrainte mécanique issue de la vague, le cycle vertueux lié à l'énergie disponible peut être fortement amplifié [16]. Pour obtenir les meilleurs performances, le champ électrique doit être imposé lorsque la contrainte mécanique atteint un maximum et supprimé lorsque cette contrainte est nulle.

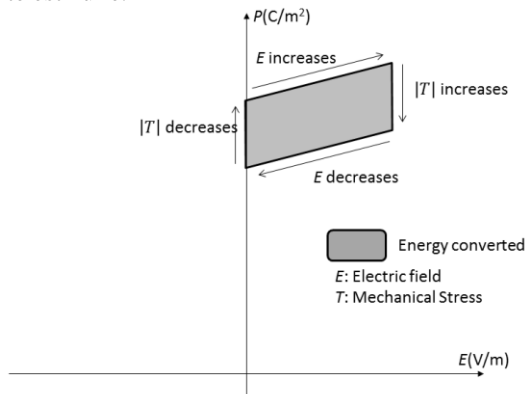


Fig. 1: Cycle d'hystérésis diélectrique équivalent à un cycle thermodynamique d'Ericsson.

La Figure n°1 donne une illustration du cycle d'Ericsson diélectrique équivalent. Lors de la première étape de la méthode, un champ électrique est imposé aux bornes de l'échantillon actif. La contrainte mécanique liée à l'excitation externe augmente jusqu'à atteindre un maximum. Lorsque ce maximum est atteint le champ électrique est supprimé. Finalement la contrainte mécanique diminue progressivement jusqu'à une annulation totale qui donne le départ à un nouveau cycle. La figure n°2 fournit une illustration de la configuration des parois de notre extracteur d'énergie. Les électrodes ont deux fonctions, imposer le champ électrique aux bornes de l'élément actif et assurer le déplacement des charges électriques liées à la variation de polarisation.

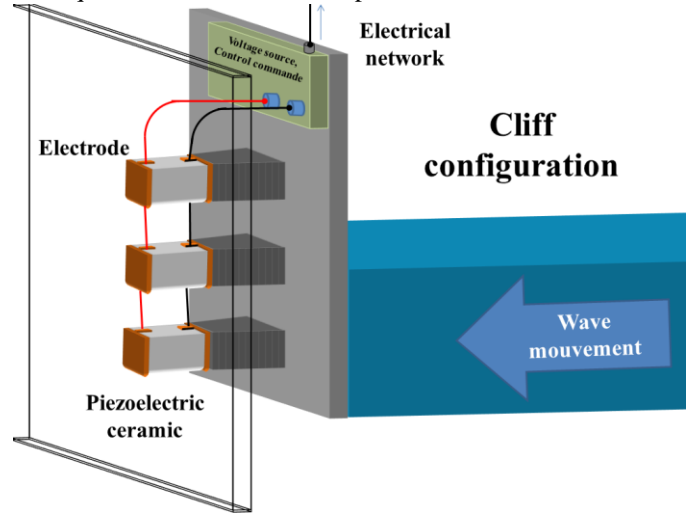


Figure 2: Extracteur de l'énergie des vagues, configuration parois.

Si nous supposons que la polarisation à travers l'élément piézoélectrique varie linéairement avec le champ électrique, l'évolution de l'aire du cycle d'hystérésis vertueux correspondant au maximum d'énergie disponible varie aussi linéairement en fonction de ce même champ électrique. Malheureusement dès lors que l'on atteint des niveaux d'excitation conséquents un comportement non-linéaire apparaît et pour déterminer en simulation la véritable quantité d'énergie disponible, un modèle plus compliqué tenant compte de l'hystérésis doit être utilisé. Ce type de modélisation est proposé dans la troisième partie de cet article.

2.2 Configuration support fixe au fond l'océan

La configuration précédente ne peut être utilisée que lorsque l'océan présente une configuration de type parois. Pour étendre la méthode à d'autres natures de bord de mer, une autre configuration est proposée. La configuration appelée « corps fixe au fond de l'océan » est particulièrement bien adapté au bord de mer de type plage, c'est-à-dire une faible variation de la profondeur en fonction de la distance au bord. La figure 3 donne une bonne illustration de cette configuration. Dans cette configuration, nous avons une structure rigide, qui vibre en accord avec les vibrations naturelles liées aux mouvements des vagues. Cette structure rigide est fixée sur le corps du dispositif à l'aide d'une liaison pivot. Cette liaison laisse un degré de liberté à la structure rigide qui peut tourner autour de la connexion pivot. La structure rigide transforme la pression hydrodynamique due aux mouvements des vagues en contrainte mécanique. La contrainte mécanique est transmise à la céramique piézoélectrique grâce à un concentrateur de contrainte conique. Cet élément permet d'élever l'amplitude de

la contrainte mécanique. Dès lors que l'élément conique atteint l'élément piézoélectrique, la contrainte est transmise. La technique d'Ericsson est utilisée pour augmenter les performances de la conversion. Un dispositif étanche est fixé à la base du système complet, il inclut les interrupteurs, la source de champ électrique (capacité) et l'électronique associée pour la commande de ces interrupteurs (détection de maximums et de minimums, source de champ électrique ...). La synchronisation du champ électrique aux maximums et minimums de contrainte permet d'augmenter fortement l'aire du cycle vertueux équivalente au maximum d'énergie disponible.

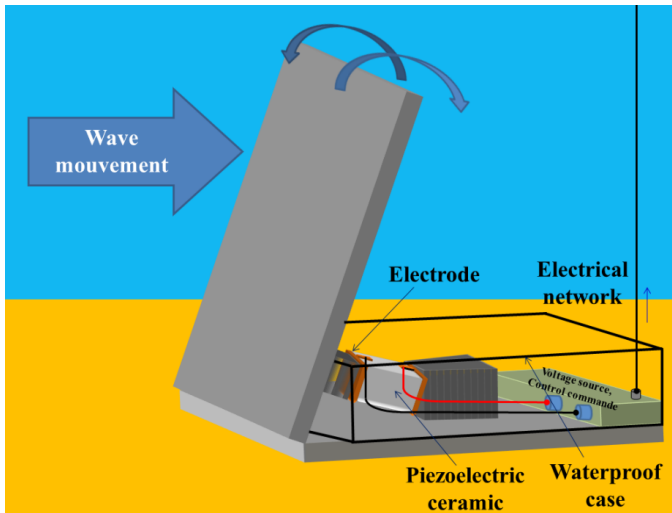


Figure 3: Extracteur de l'énergie des vagues, configuration corps fixe sur le fond des océans.

Quelle que soit la configuration, la céramique piézoélectrique joue un rôle clé dans le rendement du système complet. Comme expliqué précédemment, pour améliorer les performances, nous avons besoin d'excitation de fortes amplitudes ce qui se traduit par un comportement non-linéaire de l'élément actif. Dans la partie suivante, nous nous concentrons sur la description du modèle d'hystérésis utilisé donnant une estimation exacte de la conversion à travers le matériau testé.

3. MODELE DIELECTRIQUE

La plupart des systèmes de récupération d'énergie vibratoire environnante basée sur une conversion piézoélectrique, fonctionnent à des niveaux de contrainte suffisamment faible pour considérer que les quantités d'excitation et les quantités induites sont reliées par des relations linéaires. Dans le cas du système d'extraction décrit dans cet article, nous avons volontairement intensifié l'amplitude de l'excitation dans le but d'augmenter le taux d'énergie récupérée. Par conséquent, les relations linéaires ne peuvent plus s'appliquer et une modélisation plus compliquée incluant de la saturation, de l'hystérésis et de la considération dynamique est alors nécessaire pour obtenir des résultats numériques proches de ceux expérimentaux. A partir d'observations expérimentales, un modèle précis, large bande du comportement non-linéaire des céramiques piézoélectriques a été développé [19-21]. Ce modèle repose sur deux contributions.

3.1 Contribution quasi-statique

Pour de faibles niveaux de fréquence ($f \ll 1\text{Hz}$) et pour de fortes amplitudes d'excitation, des cycles d'hystérésis sont

observés quand nous traçons l'évolution de la polarisation diélectrique en fonction du champ électrique E . Pour de si faibles niveaux de fréquence, il est possible d'assimiler les mouvements des parois de domaine à des frottements secs mécaniques. Une équation statique (indépendante de la fréquence) a été établie en accord avec cette constatation. Un cycle correct d'hystérésis majeur $P(E)$ est obtenu par la translation de la courbe anhystérétique (la valeur de cette translation vaut $\pm E_c$, en fonction du signe de la dérivée temporelle de la polarisation).

$$P(t) = f \left(E(t) \pm E_c \text{sign} \left(\frac{dP(t)}{dt} \right) \right) \quad (1)$$

$$f(E) = \sigma \cdot \tan^{-1} \left(\frac{E}{\gamma} \right) \quad f^{-1}(P) = \gamma \cdot \tan \left(\frac{P}{\sigma} \right) \quad (2)$$

Equation (1) donne une description correcte du cycle majeur obtenu pendant les phase de régime permanent de la céramique sous des niveaux important de contrainte de champ électrique ($E_0 \gg E_c$) mais est inefficace pour des cycles dissymétriques obtenus lors des phases transitoires (courbe de première polarisation, cycles mineurs). Cette limitation peut être corrigée en utilisant une distribution de frottements secs. Chaque frottement (équation 1) est caractérisé par son propre champ coercitif et par son propre poids dans la reconstitution finale du cycle d'hystérésis. Nous regroupons sous la fonction spectre l'ensemble de ces poids, cette fonction spectre peut être obtenue grâce à ladéconvolution de la courbe de première polarisation par la courbe anhystérétique du matériau utilisé. L'équation n°3 donne l'expression finale de la contribution quasi-statique.

$$\begin{cases} P(t)_i = f \left(E(t) - E_{c_i} \cdot \text{sign} \left(\frac{dP(t)_i}{dt} \right) \right) \\ \sum_{i=1}^k \text{Spectrum}(i) \cdot P_i = P \end{cases} \quad (5)$$

Des détails complémentaires sur ce principe de modélisation ainsi que des validations expérimentales sont disponibles dans la littérature [19][20].

3.2 Contribution dynamique

Lorsque la fréquence augmente et dépasse la limite quasi-statique, les cycles d'hystérésis observés présentent des formes qui dépendent fortement de la fréquence. Une deuxième contribution est nécessaire pour tenir compte de cette dépendance. L'effet de fréquence est classiquement introduit comme le produit d'un élément dissipatif ρ et de la dérivée temporelle de la polarisation dP/dt . Ce produit se comporte comme un champ électrique équivalent. Comme expliqué dans [20], cette considération dynamique, n'est précise que sur une bande de fréquence relativement limitée ($0.1 < f < 10 \text{ Hz}$), la technique d'Ericsson impose de synchroniser la contrainte mécanique sur une source de champ électrique externe, du coup des fréquences importantes peuvent apparaître et par conséquent un modèle large bande est nécessaire. En fixant le paramètre ρ sur la partie basse fréquence de la courbe $\langle A \rangle(\text{freq})$, si l'on considère une dérivée entière de la polarisation ceci conduit à une surestimation de l'aire du cycle lorsque la fréquence augmente. Pour contenir ce problème, un

opérateur qui tient compte différemment des effets de fréquence est nécessaire. Des tels opérateurs existent, ce sont les opérateurs fractionnaires, également appelés dérivées fractionnaires. La surestimation est corrigée dans [20] en remplaçant le terme de dérivée entière par un terme fractionnaire. Après ajout de ce terme fractionnaire dans notre simulation, l'équation du modèle devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t)_i = f \left(E(t) - Ec_i \cdot \text{sign} \left(\frac{dP(t)_i}{dt} \right) + \rho \cdot \frac{d^n P_i(t)}{dt^n} \right) \quad (6) \\ \sum_{i=1}^k \text{Spectrum}(i) \cdot P_i = P \end{array} \right.$$

3.3 Cas de la contrainte mécanique

Il est bien connu que la polarisation diélectrique diminue sous l'effet d'une contrainte mécanique externe. Cette diminution de la polarisation se traduit par une dégradation des propriétés diélectriques dues aux réajustements ferroélectriques - ferro élastiques. Pour des raisons de symétries physiques, la contrainte mécanique T est introduite dans notre modèle via une fonction paire, équivalente à un champ électrique, produit d'une constante α , de la polarisation diélectrique et de la contrainte mécanique:

$$E_{equ} = \alpha TP \quad (7)$$

α est un paramètre caractéristique du matériau indépendant de la géométrie de l'échantillon et obtenu à partir de comparaisons mesures/simulations. En tenant compte de la contrainte mécanique l'équation 6 devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t)_i = f \left(E(t) + \alpha T(t)P(t) - Ec_i \cdot \text{sign} \left(\frac{dP(t)_i}{dt} \right) + \rho \cdot \frac{d^n P_i(t)}{dt^n} \right) \\ \sum_{i=1}^k \text{Spectrum}(i) \cdot P_i = P \end{array} \right. \quad (6)$$

4. BANC DE CARACTERISATION

4.1 Caractérisation mécanique des vagues.

Afin d'améliorer les performances de notre système d'extraction de l'énergie des vagues, nous avons jugé nécessaire de développer des dispositifs expérimentaux. Le premier dispositif est utilisé pour caractériser in-situ la contrainte d'excitation mécanique due au mouvement de la vague. La figure n°4 donne une illustration de ce banc de caractérisation. Ce banc de mesure est constitué de deux panneaux de poly méthyle méthacrylate (PMMA) (200*800mm & 200*1000mm) reliés entre eux à l'aide de liaisons pivot. Un vérin hydraulique est lié aux deux panneaux grâce à un mécanisme au design particulier qui lui assure une bonne connexion et surtout la liberté de déplacement. Cet assemblage permet d'ajuster l'angle entre les deux panneaux de PMMA quel que soit la situation in-situ. Un tuyau rempli d'huile permet de relier le vérin au capteur de pression. Le capteur de pression est un SY316 fourni par SensorShengyoumechanical and electricalco. (Shangai). Une carte d'acquisition DAQ modèle 3252 de chez ZLAD est utilisée pour l'enregistrement des données d'acquisition. La

figure n°5 montre quelques résultats typiques obtenus à l'aide de ce banc de caractérisation

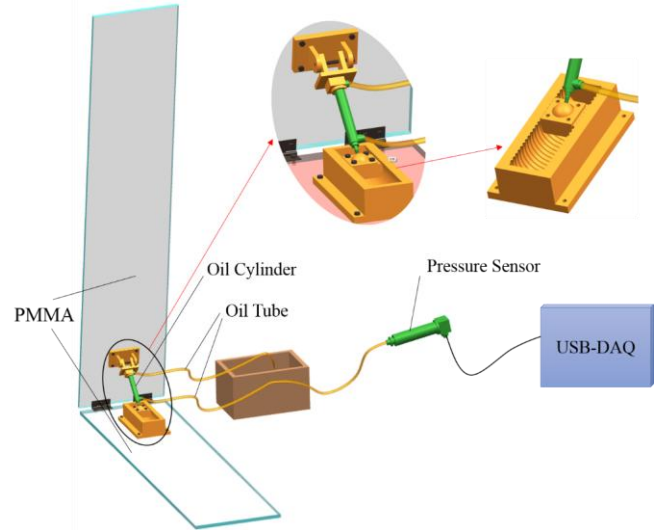


Figure 4: Dispositif de caractérisation des vagues.

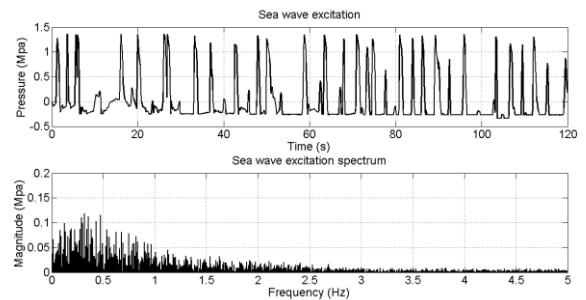


Figure 5: Caractérisation de la vague. Variation temporelle de la pression (a), spectre de fréquence associé (b).

Ces résultats expérimentaux seront utilisés comme commande des générateurs basses fréquences programmables qui commandent l'excitation du banc de caractérisation suivant. Cet autre dispositif expérimental est dédié à la reproduction en laboratoire du système complet d'extraction de l'énergie des vagues incluant la technique d'Ericsson.

4.1 Banc de caractérisation : technique des cycles d'Ericsson.

La technique d'Ericsson permet une augmentation importante de l'énergie récoltée. En revanche pour atteindre des gains importants, des niveaux élevés de champ électriques sont requis et les simulations utilisant des relations linéaires ne peuvent plus s'appliquer, pour obtenir des informations précises sur le comportement du matériau actif sous de telles conditions, un banc de caractérisation hybride couplant champ électrique et contrainte mécanique a été développé. La Figure 5 présente ce nouveau dispositif expérimental. Dans ce dispositif expérimental, un contrôleur temps réel dSPACE™ est utilisé pour la commande et le contrôle des excitations mécaniques et électriques. La première sortie dSPACE génère la forme d'onde affichée sur la figure 4, elle est connectée à un amplificateur de puissance (amplificateur HVPZT) qui impose la tension aux bornes d'un stack piézoélectrique. Le stack reproduit l'excitation mécanique dynamique. Une autre sortie dSPACE commande l'amplificateur haute tension qui impose le champ électrique. Pour déterminer les maximums et les

minimums de la contrainte mécanique, le schéma Simulink suivant a été utilisé [22] :

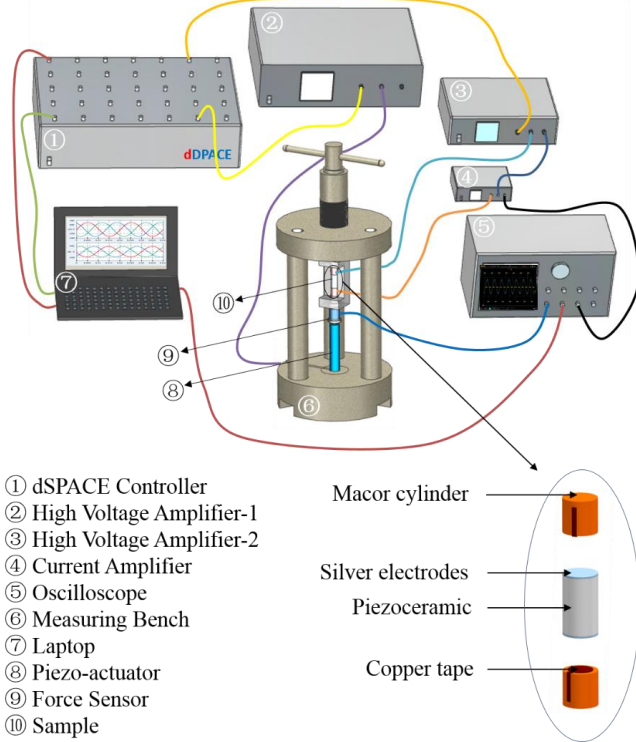


Figure 6: Dispositif expérimental, cycles piézo-électriques d'Ericsson.

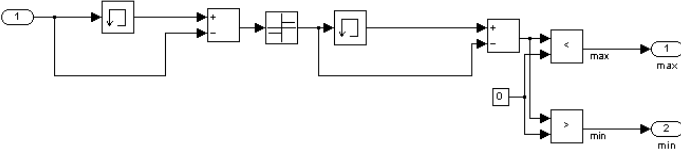


Figure 7: Schéma Simulink, détection des maximums et des minimums de la contrainte mécanique.

Les tests expérimentaux ont été réalisés sur un échantillon PZT de type Navy IV P188. Les données fabricant (Quartz & Silice) pour ce matériau sont données dans le tableau n°1.

Parameters	Symbol	Units	Typical values
Density	ρ	10^3 kg.m^{-3}	7.7
Poisson's constant	σ		0.3
Curie point	T_c	$^{\circ}\text{C}$	340
Dielectricpermittivity	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$		1850
Piezoelectric coefficient	d33	pC/N	425

Tableau 1. Caractéristiques principales d'une céramique du type P188.

L'actionneur stackpiezo est un P-246 de chez CeramicCompany (Allemagne), ses caractéristiques sont: une très grande rigidité, une force de poussé pouvant atteindre 30kN, et des déplacements jusqu'à 120 μm . La contrainte mécanique est mesurée à l'aide d'un capteur ultra-sensible (XFC200Rde chez FGPSensors and Instrumentation Company). Ses caractéristiques sont les suivantes : calibre pleine échelle de 0-2 à 0-10 kN, grande rigidité, fonctionne en statique et dynamique. Le capteur de contrainte est conditionné par un amplificateur ARD154 provenant du même

fournisseur. Deux disques de macor $\phi 4 \times 3 \text{mm}$ assurent l'isolation électrique. Pour mesurer les courants de polarisation à travers la céramique testée nous utilisons du scotch conducteur. Les variations de polarisation sont monitorées en court-circuitant l'amplificateur de courant Keithley modèle 428. La polarisation est obtenue par intégration du courant. La structure est précontrainte afin de préserver les connexions électriques même à des niveaux de fréquence élevés. Les signaux fournis par l'amplificateur de courant ainsi que par le capteur de contrainte sont monitorés à l'aide la carte d'acquisition dSPACE.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX, COMPARAISON MESURE / SIMULATION ET BILAN ENERGETIQUE

La figure 7-b montre une première comparaison simulation/mesure pour des cycles diélectriques d'Ericsson obtenus avec les profils d'excitation présentés sur la figure 4. Les maximums et minimums de contrainte mécanique sont détectés grâce au schéma Simulink et les résultats de simulation en utilisant le modèle diélectrique décrit dans la deuxième partie de l'article.

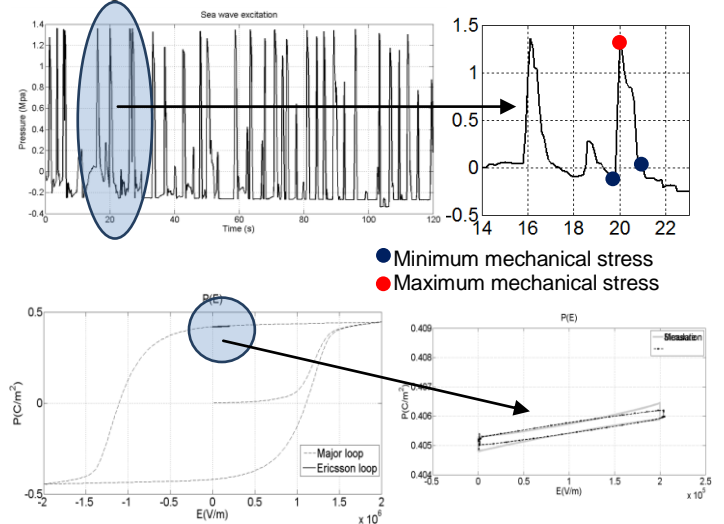


Figure 7: Comparaison mesure/simulation pour des cycles diélectriques d'extraction de l'énergie d'Ericsson.

Dans cette première figure de résultat affichée nous validons la bonne corrélation temporelle entre simulation et cycle d'Ericsson mesuré pour un niveau d'excitation important. Dans ce cas particulier, l'énergie extraite est approximativement de 200J/m^3 . Pour valider la méthode d'extraction, cette énergie doit être comparée à l'énergie nécessaire à la méthode de détection d'extremum ainsi que celle nécessaire pour imposer le champ électrique. Un premier schéma basique est proposé figure 8 pour le déploiement in situ de la technique, le système électrique doit être dimensionné pour optimiser les flux d'énergie entre les différents éléments. Juste les connexions électriques sont affichées ici. Deux interrupteurs autoalimentés et commandés par détection de maximum et de minimum définie [23] sont utilisés pour connecter et déconnecter la source électrique. Ces interrupteurs présentent une consommation instantanée de puissance de 1mW. Sur ce premier schéma, la capacité pré-chargée peut être considérée comme une source de champ électrique, nous supposons les fuites de courant à travers cette capacité négligeables. Dans la réalisation finale, il est possible de synchroniser à l'ensemble un système d'extraction des charges

(SECE) [24] pour maintenir la capacité continument chargée. Ce système peut être utilisé pour maintenir la capacité chargée avec d'extrêmement faibles besoins énergétiques. Dans la première étape de la technique, et comme illustré Figure 8, l'interrupteur 2 est fermé, l'élément piézoélectrique est court-circuité par la capacité pré-chargée qui crée un champ électrique entre les électrodes de l'élément actif. Au moment où la contrainte mécanique externe atteint son maximum, le système de détection ferme automatiquement l'interrupteur 1 et ou l'interrupteur 2, comme illustré figure 8. Cette configuration reste la même jusqu'à détection d'un minimum de contrainte qui renvoie les interrupteurs à leurs conditions initiales et donne le départ à un nouveau cycle.

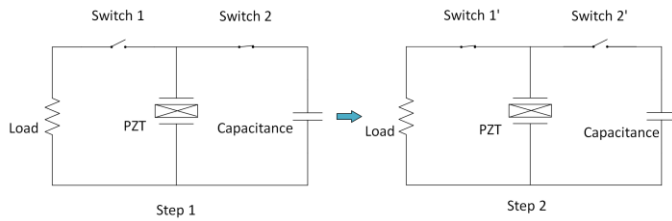


Figure 8: Electronique in situ associée au système d'extraction de l'énergie.

Concentrons-nous maintenant sur l'évolution de l'aire du cycle vertueux en fonction des différents paramètres. Les résultats de simulation sont présentés sur la dernière figure de l'article; différents paramètres sont testés. Nous testons différentes amplitudes de la contrainte mécanique ainsi que différentes amplitudes et fréquences du champ électrique. La fréquence de la contrainte mécanique est maintenue proche de 1Hz pour respecter les conditions expérimentales de la vague. Dans la figure 9, une énergie négative signifie que c'est une énergie récupérée. La figure 9 donne une bonne illustration de la meilleure configuration (amplitude, fréquence) de champ d'excitation électrique. Même pour une fréquence de champ électrique 100 fois supérieure à celle de la contrainte mécanique, l'énergie récupérable est relativement importante. Sur le dernier tracé de la figure n°9, nous pouvons également constater que pour des fréquences extrêmes de champ électrique (1 kHz) les pertes sont trop fortes et que quelle que soit l'amplitude du champ électrique, il est impossible de récupérer de l'énergie dans cette configuration.

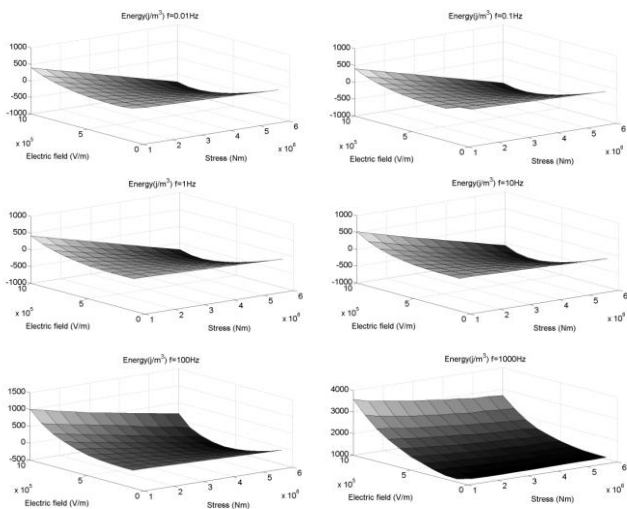


Figure 9: Estimation numérique de l'aire du cycle d'Ericsson en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la contrainte mécanique et du champ électrique.

Afin de conclure, nous pouvons affirmer que pour une vague classique, il semble réaliste d'espérer une énergie disponible de l'ordre de 600J/m^3 de matériau électro actif. Les céramiques standard dans leur plus grosse configuration peuvent atteindre un volume de $3 \cdot 10^{-5}\text{m}^3$ ce qui correspond à un niveau d'énergie proche de 17 mJ par cycle. Chaque cycle nécessite 4 mouvements fermeture/ouverture d'interrupteur qui consomment respectivement de l'ordre 0.5 mJ, finalement pour un élément piézoélectrique une énergie approximative de 15 mJ, peut être espérée. Même si cette énergie semble faible, le nombre d'éléments piézoélectriques peut être facilement multiplié pour améliorer les performances du système complet et atteindre des niveaux d'énergie suffisants à l'alimentation de petits systèmes électroniques déportés.

6. CONCLUSION

Les vibrations mécaniques telles que celles créées par le mouvement des vagues sont naturellement accessibles partout et représentent une ressource d'énergie quasiment illimitée. L'opportunité de recycler cette énergie ambiante et de créer des petits générateurs électriques à la durée de vie illimitée représente un véritable intérêt. Le niveau d'énergie collectée peut être fortement augmenté en couplant un champ électrique à la contrainte mécanique via le protocole défini par la méthode dite des cycles d'Ericsson. Cependant, ceci implique des niveaux de champ électrique importants qui induisent des non-linéarités dans les matériaux actifs ainsi qu'une électronique déployée complexe. Ces deux éléments doivent impérativement être pris en compte car ils réduisent l'efficacité de la méthode. Des compromis ainsi que des simulations informatiques doivent être réalisées pour obtenir la meilleure configuration en termes de rendement. Dans cet article, un modèle d'hystérésis diélectrique est proposé pour la prise en compte des non linéarités dans les matériaux actifs et converger vers la meilleure configuration lors d'un futur déploiement in situ. Un banc de caractérisation a été développé afin de caractériser le gisement énergétique (la vague), et des transformés de Fourier rapide ont permis de conclure que sur un jour normal la contrainte mécanique équivalente présente une bande de fréquence relativement restreinte et centrée autour de 0.5 Hz. Ces fréquences relativement faibles sont particulièrement bien adaptées à la technique d'Ericsson qui impose de synchroniser un champ électrique de forte amplitude lorsque la contrainte mécanique atteint un pic (maximum ou minimum). En utilisant les interrupteurs automatiques par détection de maximums et de minimums définis dans [23], la source de champ électrique peut être reliée à l'élément piézoélectrique dans un temps très court et avec une relativement faible consommation d'énergie. Toutefois, cette connexion ne doit pas être trop rapide en raison des pertes diélectriques à travers le matériau qui augmentent fortement avec la dynamique du système. Les résultats obtenus en laboratoire grâce à la technique d'Ericsson sont très prometteurs, il nous faut maintenant nous concentrer de façon plus approfondie sur les solutions techniques à proposer pour un déploiement in situ large échelle. Une exportation de la technique d'Ericsson à d'autres sources de vibrations naturelles (vent, déplacements de véhicules ...) est également envisageable.

7. REFERENCES

- [1] D. Ross, Power from the waves, 1995 (Oxford University Press, Oxford, UK).
- [2] S.H. Salter, Wave power. Nature, 1974, 249(5459), 720–724.

- [3] T.W. Thorpe, A brief review of wave energy, Technical report n° R120, Energy Technology Support Unit (ETSU), A report produced for the UK Department of Trade and Industry, 1999.
- [4] L. Duckers, Wave energy. In Renewable energy (Ed. G. Boyle), 2nd edition, 2004, ch. 8 (Oxford University Press, Oxford, UK).
- [5] J. Callaghan, R. Boud, Future marine energy: results of the marine energy challenge: cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy, Technical report, The Carbon Trust, January 2006.
- [6] B. Drew, A.R. Plummer, and M.N. Sahinkaya, A review of wave energy converter technology, Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy
- [7] M. Previsic, Offshore wave energy conversion devices, Technical report E21 EPRI WP-004-US-Rev 1, Electrical Power Research Institute, 2004.
- [8] K. McConnell, W. Allsop, I. Cruickshank (2004) Piers, jetties and related structures exposed to waves: guidelines for hydraulic loadings. Thomas Telford, London
- [9] TV. Heath, T.J.T Whittaker, The history and status of the LIMPET project, Institution of mechanical engineers seminar, Vol. 2000, Iss. 8, pp. 41-50.
- [10] D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, C. Richard, M. Lallart, Synchronized switch harvesting applied to self-powered smart systems: piezoactive microgenerators for autonomous wireless transmitters, Sens. Actuators A: Phys., 2007, vol. 138, pp. 151–160.
- [11] J.A. Paradiso and T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, IEEE Pervasive Comput., 2005, vol.4, pp.18–27.
- [12] P. Glynn-Jones, S.P. Beeby and N.M. White, Towards a piezoelectric vibration-powered micro-generator, IEE Proc.Sci. Meas. Technol., 2001, vol.148, pp.68–72.
- [13] G. Sebald, H. Kuwano, D. Guyomar, B. Ducharme, Experimental Duffing oscillator for broadband piezoelectric energy harvesting, Smart Mat. & Struct., 2011, Vol. 20, Iss. 10, Art. Num 102001.
- [14] T.W. Ma, Opportunities for using non-linear oscillators to enhance energy harvesting from impulsively loaded structures, Proceedings of the institution of mechanical engineers part I –Journal of systems and control engineering, 2011, Vol. 225, Iss. 14, pp.467-474.
- [15] R. Ramlan, M.J. Brennan, B.R. Mace, S.G. Burrow, On the performance of a dual-mode non-linear vibration energy harvesting device, Journal of intelligent material systems and structures, 2012, vol. 23, Iss. 13, pp. 1423-1432.
- [16] B. Zhang, B. Ducharme, D. Guyomar, G. Sebald, Energy harvesting based on piezoelectric Ericsson cycles in a piezoceramic material, Eur. Phys. J. – Spec. Top., vol. 222, Iss. 7, pp. 1733-1743.
- [17] GX. Wu, QW. Ma, R. Eatock Taylor, Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method. Appl. Ocean Res. Vol. 20 Iss. 6, pp. 337-355.
- [18] G. Athanassoulis, K. Mamis (2013) Modeling and analysis of a cliff mounted piezoelectric sea-wave energy absorption system. Coupled Syst Mech 2(1):53–83.
- [19] B.Ducharme, D.Guyomar, G.Sebald, Low frequency modeling of hysteresis behavior and dielectric permittivity in ferroelectric ceramics under electric field, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol.40, pp.551-555.
- [20] D.Guyomar, B.Ducharme, G.Sebald, Fractional derivative operator for modeling the dynamic polarization behaviour as a function of frequency and electric field amplitude, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2009, vol.56, pp.437-443.
- [21] D.Guyomar, B.Ducharme, G.Sebald, Time fractional derivatives for voltage creep in ferroelectric materials: theory and experiment, *J.Phys.D: Appl.Phys.*, 2008, vol.41, pp.125410.
- [22] B.Ducharme, L. Garbuio, M. Lallart, D. Guyomar, G. Sebald, JY. Gauthier, Nonlinear technique for energy exchange optimization in a piezoelectric actuators, IEEE Transaction on Power Electronic, 2013, pp. 3941-3948.
- [23] C. Richard, D. Guyomar, Self-powered electronic breaker with automatic switching by detecting maxima or minima of potential difference between its power electrodes, pattern WO 2007/063194 A1.
- [24] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, D. Guyomar, Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, vol. 16, pp. 865-876.