



HAL
open science

Étude d'un Générateur Micro-cinétique: Modélisation Énergétique et Optimisation du Transfert d'Énergie

Marianne Lossec, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Carole Fredy, Florent
Le Bourhis, Sebastien Moya

► **To cite this version:**

Marianne Lossec, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Carole Fredy, Florent Le Bourhis, et al.. Étude d'un Générateur Micro-cinétique: Modélisation Énergétique et Optimisation du Transfert d'Énergie. EF 2009, Sep 2009, France. pp.P23. hal-00495668

HAL Id: hal-00495668

<https://hal.science/hal-00495668>

Submitted on 28 Jun 2010

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.

ETUDE D'UN GENERATEUR MICRO-CINETIQUE : MODELISATION ENERGETIQUE ET OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE

STUDY OF A MICRO-KINETIC GENERATOR: MODELIZATION AND OPTIMIZATION OF ENERGY CONVERSION

*LOSSEC Marianne, MULTON Bernard, BEN AHMED Hamid,
FREDY Carole, LE BOURHIS Florent, MOYA Sébastien
SATIE, ENS Cachan Antenne de Bretagne, CNRS, UEB, Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ
marianne.lossec@bretagne.ens-cachan.fr*

Résumé

Cet article présente des travaux menés sur un générateur micro-cinétique conçu initialement pour une montre bracelet, le système Autoquartz de la société Suisse ETA du groupe Swatch. Ce système électromécanique original (avec stockage d'énergie intermédiaire dans un ressort), permettant de récupérer l'énergie lors de mouvements, a été modélisé et testé en vue d'évaluer sa productivité énergétique en situation quelconque (autre qu'en horlogerie où la consommation est extrêmement faible). Un modèle électromécanique sous Matlab Simulink a été réalisé et validé expérimentalement sur des profils de mouvements quelconques. Nous avons notamment mis en évidence l'existence d'un transfert optimal d'énergie, pouvant être obtenu en régulant la tension en sortie du redresseur actif connecté au générateur, ce qui permet de maximiser la récupération d'énergie. Une solution de régulation a été élaborée afin de mettre en œuvre un régulateur à découpage commercial dans ce contexte original où la tension à réguler n'est pas la tension de sortie du convertisseur, mais celle d'entrée. Toutefois, il apparaît préférable, compte tenu des rendements sur cycle des convertisseurs statiques contrôlés de petite puissance, de concevoir le générateur pour qu'il fonctionne naturellement au voisinage de son rendement maximal.

Mots Clés : Générateur micro-cinétique, récupération d'énergie des mouvements humains, modélisation électromécanique.

Abstract

This article presents work on a micro-kinetic generator for wristwatch, the Autoquartz system of the Swiss company ETA, from the Swatch Group. This original electromechanical system (intermediate energy storage in a spring), which recovers the energy of the movements, was modeled and tested to evaluate its energy productivity in any situation (other than watchmaking, where consumption is extremely low).

We achieved an electromechanical model under Matlab Simulink which was then validated experimentally on any movement profiles. We have especially highlighted the existence of an optimal transfer of energy that can be obtained by regulating the output voltage of active rectifier connected to the generator, which helps to maximize energy recovery. A regulation's solution was found to implement a switching regulator in the original context where the regulated voltage is not the converter's output voltage, but the input one. However, it is preferable, according to the on cycle efficiencies of the low-power controlled static converters, to design the generator so that it can work naturally in the vicinity of its maximum efficiency.

Keywords: micro-kinetic generator, energy harvesting of human movement, electromechanical model.

INTRODUCTION

La montre Autoquartz fonctionne comme une montre à quartz traditionnelle avec la particularité qu'elle utilise le mouvement du porteur de la montre comme ressource énergétique. Une masse oscillante transmet son énergie mécanique à une microgénératrice puis à un accumulateur électrique par l'intermédiaire d'un ressort spiral intégré dans un micro-barillet (Figures 1 et 2).

La puissance mécanique fournie par la masselotte est distribuée vers deux roues à cliquets, dont l'une est solidaire de l'extrémité basse d'un ressort spiral. Les oscillations de la masselotte permettent de charger le ressort (avec un rapport de multiplication k_1 égal à 1,6) quel que soit son sens de rotation et l'amplitude de ses mouvements. Dès que le couple de rappel du ressort devient supérieur à l'amplitude du couple de détente de la génératrice transmis à travers un multiplicateur à engrenages, il se décharge brusquement entraînant en rotation une génératrice monophasée à aimants (structure du stator à griffes) avec un rapport de multiplication k_2 de 5 (la

figure 9 montre le cycle de variation de la force électromotrice mettant en évidence la variation de la vitesse durant ce cycle).

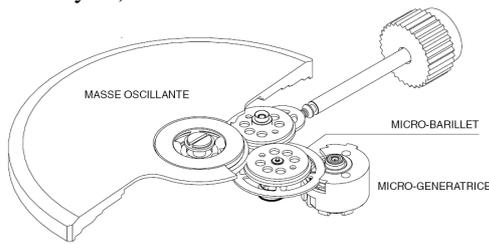


Figure 1 : Vue 3D [1] du système mécanique

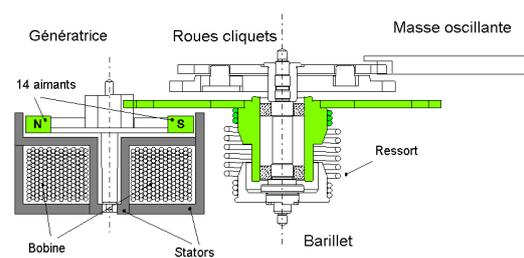


Figure 2 : Vue en coupe [2] du système mécanique

Un redresseur actif (pleine onde) à transistors MOS permet alors de convertir l'énergie pour charger un accumulateur tampon (supercondensateur ou élément lithium selon le modèle de montre) qui, comme dans les montres à quartz traditionnelles, redistribue l'énergie à l'électronique de comptage et de commande du moteur pas à pas assurant la bonne marche des aiguilles.

Certaines spécifications du système Autoquartz, utiles pour la modélisation, sont rassemblées dans le tableau ci-dessous [3,4]. Nous verrons par la suite que les identifications menées ont conduit à des valeurs légèrement différentes :

Eléments du système Autoquartz	Valeurs numériques
Diamètre externe du système Autoquartz	26.6mm
Epaisseur globale du système Autoquartz	3.95mm
Moment d'inertie masselotte	220g.mm ²
Rapport de multiplication masselotte/ressort	45:28=1.6
Raideur du ressort	12.5μNm/rad
Rapport de multiplication ressort/génératrice	60:12=5
Amplitude du couple de détente génératrice	8 à 15μNm
Intensité du flux inducteur	0.6mVs
Nombre de paires de pôles (génératrice)	7
Moment d'inertie rotor	300g.mm ²
Résistance interne de l'induit	320Ω
Résistance de canal des MOS	30Ω

Tableau 1 : Spécifications d'origine du système Autoquartz [3,4]



Figure 3 : Photo du système Autoquartz côté masselotte

MODELISATION ELECTROMECHANIQUE

Dans le cadre de l'étude d'un générateur multisources exploitant les ressources dans l'environnement humain [5,6] (chaleur, lumière, mouvements), nous avons élaboré un modèle de productivité énergétique du système de génération microcinétique Autoquartz sous Matlab-Simulink. À partir de différents profils de mouvements 3D d'excitation du système Autoquartz, l'objectif était de déterminer les profils de production électrique correspondant en sortie du système (Figure 4), avec l'ambition de pouvoir faire varier les paramètres de dimensionnement du système pour optimiser la productivité globale du système en fonction de l'ensemble des ressources disponibles.

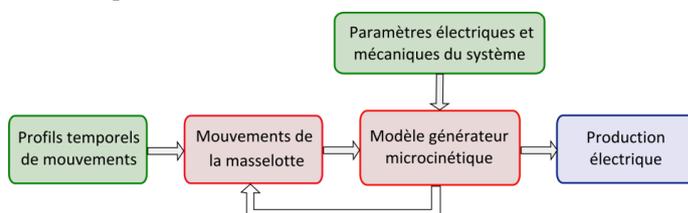


Figure 4 : Synoptique du modèle de production micro-cinétique à partir de profils de mouvement

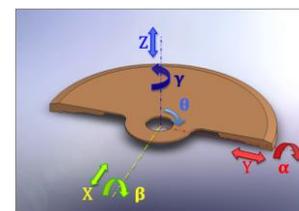


Figure 5 : Définition des translations et rotations du système Autoquartz [7]

Du mouvement du système Autoquartz au mouvement de la masse oscillante

Un modèle électromécanique global a été réalisé sous Matlab-Simulink [7]. La première étape de cette modélisation consiste à déterminer le déplacement angulaire $\theta(t)$ de la masse oscillante à partir de profils de mouvements 3D du système Autoquartz.

Il s'agit ici d'un problème de dynamique à six paramètres d'excitation (x , y et z pour les translations du centre du système et α , β et γ , pour l'inclinaison des plans de rotation (Figure 5)) et à seul un degré de liberté de la masselotte (θ la rotation de la masse autour de l'axe de son pivot). Les couples appliqués à la masse sont ceux de la pesanteur, du ressort, des frottements secs et des forces d'inerties (entraînement et Coriolis).

Du mouvement de la masse oscillante à la productivité électrique

L'ensemble de cette seconde partie de la modélisation repose sur le principe fondamental de la dynamique appliqué à un solide en rotation, ici le rotor de la génératrice. Nous considérons C_{rot} le couple de rappel transmis par le ressort à travers le multiplicateur de vitesse, les couples C_d de détente et C_{em} électromagnétique de la génératrice (proportionnel au courant de décharge), ainsi qu'un couple de frottements visqueux C_f (destiné à représenter l'ensemble des frottements et identifié expérimentalement indirectement).

La différence angulaire entre les deux extrémités du ressort associée à sa raideur k_r définit son couple de rappel $C_{ressort}$. Soient θ_b et θ_h les positions angulaires des extrémités basse et haute du ressort, le couple s'exprime alors par $C_{ressort} = k_r (\theta_b - \theta_h)$. Ce couple sera transmis sur l'arbre du rotor à travers un train d'engrenages de rapport k_2 , comme indiqué plus haut, il est noté C_{rot} ($C_{rot} = \frac{C_{ressort}}{k_2}$).

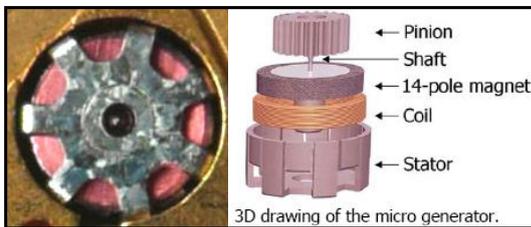


Figure 6 : Photographie et vue 3D de la micro-générateur [4]

La structure électromagnétique de la micro-générateur n'est pas classique (Figure 6) : il s'agit d'une structure à stator à griffes comme on en rencontre dans les moteurs pas à pas à aimants. Elle est monophasée à 7 paires de pôles. Les effets inductifs importent peu ici en raison des effets d'échelle et nous les négligerons par la suite.

La micro-générateur se trouve entraînée en rotation dès lors que le couple de rappel du ressort (sous l'effet de la tension réalisée par les rotations cumulées de la masselotte) devient supérieur à la valeur crête C_{dMax} du couple de détente. Ce couple, dû à la seule interaction des aimants avec la denture statorique et en l'absence de débit électrique de la génératrice, est fonction de l'angle du rotor. La figure 7 illustre, en convention générateur, l'interaction entre le couple de rappel du ressort et le couple de détente.

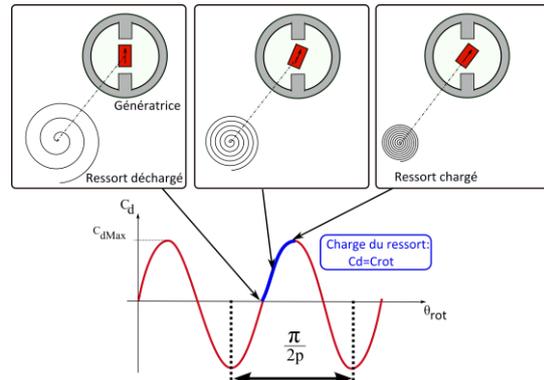


Figure 7 : Interaction couple de détente et couple du ressort

Notons que sur cette figure, la structure représentée de la génératrice est simplifiée, de façon à illustrer simplement les interactions entre les couples. En pratique, la structure à griffes donne lieu à un couple de détente présentant une forte asymétrie (2 maxima d'amplitude différente par période) mais nous n'avons pas pu l'identifier et nous n'avons pas pris en compte cette spécificité dans la présente étude.

Expérimentalement, nous avons observé que le cumul des déplacements angulaires θ de la masselotte conduisant à une décharge était de 150° soit 2.6 radians. Cela nous sert à identifier la valeur crête du couple de détente :

$$C_{dMax} = \frac{k_1 k_r \theta}{k_2} = 10 \mu\text{Nm} \quad (1)$$

avec k_1 le rapport de réduction entre la masselotte et le ressort, k_2 le rapport de réduction entre le ressort et la génératrice, et k_r la raideur du ressort égale à $12.5 \mu\text{Nm/rad}$. Ainsi la valeur du couple de détente détermine l'énergie maximale stockée dans le ressort qui sera transmise à la génératrice lors du cycle de décharge :

$$W_{ressort} = \frac{1}{2} k_2^2 \frac{C_{dMax}^2}{k_r} \cong 100 \mu\text{J} \quad (2)$$

Le couple électromagnétique est proportionnel au courant débité et à la dérivée du flux inducteur Φ_f par rapport à la position du rotor θ_{rot} :

$$C_{em} = i \frac{d\Phi_f}{d\theta_{rot}} \quad (3)$$

Enfin, le couple dû aux frottements est d'origine variée : frottements mécaniques divers et pertes magnétiques par courants de Foucault. Nous avons actuellement négligé les effets de frottement sec dus aux frottements mécaniques ainsi qu'aux pertes magnétiques par hystérésis, et nous ne conservons qu'une composante de frottement visqueux équivalent notée C_f , et identifiée à partir de l'évaluation énergétique rudimentaire suivante. Sachant que la puissance maximale productible par la génératrice est de 10 mW à 5000 tr/min [3], valeur correspondante à une adaptation d'impédance idéale (car les limitations de cette machine ne sont pas thermiques), nous avons supposé très arbitrairement (avant de mener plus loin une analyse de sensibilité) une puissance perdue par frottement visqueux d'environ 30%, ce qui correspondrait à une puissance perdue de $P_f = f_{rot} \cdot \Omega_{rot}^2 = 3mW$ à cette même vitesse. Ce qui conduit à une valeur du coefficient de frottement visqueux égale à $f_{rot} = 3 \cdot 10^{-9} Nm/rad/s$.

Ainsi le principe fondamental de la dynamique appliquée au rotor de la génératrice s'exprime par :

$$J_{rot} \frac{d\Omega_{rot}}{dt} = C_{rot} - C_d - C_{em} - C_f \quad (4)$$

Pour mieux illustrer le fonctionnement du système Autoquartz pendant une décharge du ressort, la figure 8 montre le schéma bloc de l'ensemble dans le cas où le redresseur actif débite sur une source de tension V_{red} , avec R la résistance globale, c'est-à-dire la somme de la résistance de l'induit de la génératrice avec celles des semiconducteurs du redresseur :

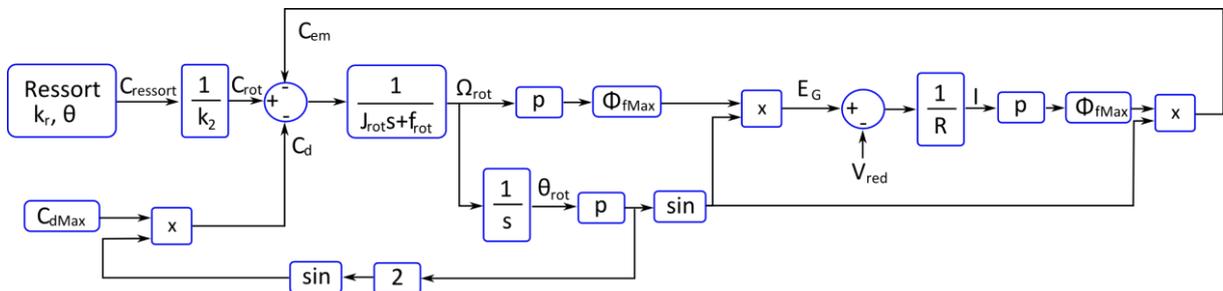


Figure 8 : Schéma bloc du système Autoquartz

L'allure de la force électromotrice E_G durant le cycle de décharge, obtenue d'après une simulation à vide (avec les paramètres identifiés plus bas), est représentée à la figure 9. Elle est similaire de celle mesurée par ETA [2]. Par contre, nous n'avons pas pu la mesurer expérimentalement car nous n'y avons pas accès directement (même après déconnection de l'accumulateur, il subsiste un condensateur interne et les circuits consommateurs qui n'ont pas pu être déconnectés). Notons le caractère très impulsionnel de la décharge qui dure environ 20ms chaque fois que le ressort a cumulé suffisamment d'énergie.

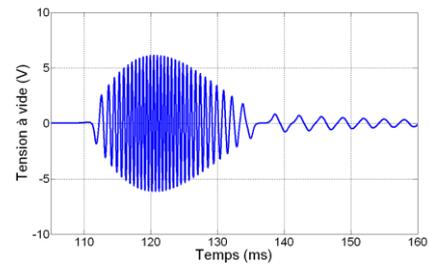


Figure 9: Forme d'onde simulée de la fem E_G

Une des finalités de cette étude est de modéliser le système Autoquartz connecté à un élément de stockage (accumulateur lithium ou supercondensateur) (Figure 10). Etant donné que la tension de l'élément de stockage fluctue inévitablement selon son état de charge et selon la puissance qui le sollicite, nous avons observé l'influence de la tension V_{red} , appliquée en sortie du redresseur sur l'énergie récupérée lors d'une décharge. Cette étude a été faite de manière expérimentale (mesure du courant à travers un shunt de 10Ω et à partir d'un oscilloscope Agilent 6000 series), et également en simulation, et nous a permis d'identifier expérimentalement certains paramètres.

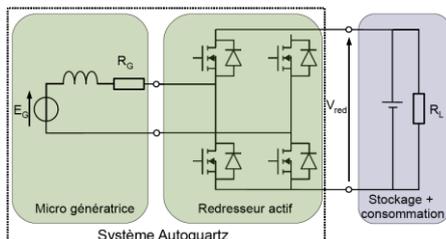


Figure 10 : Schéma du système Autoquartz connecté à une source de tension (ici un élément de stockage)

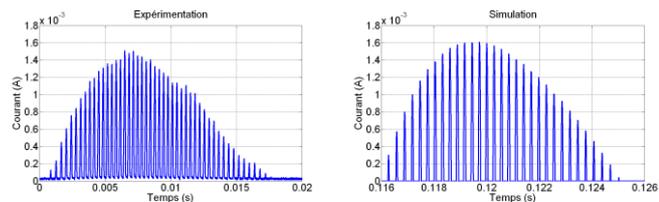


Figure 11 : Comparaison expérimentation/simulation du courant en sortie du système Autoquartz lors d'un débit sur source de tension $V_{red}=5V$

Le redresseur actif n'étant pas réversible en courant, les transistors MOS ne sont passants que lorsque la tension de la micro génératrice est supérieure à la tension V_{red} appliquée en sortie du système Autoquartz. Le courant a donc une allure pulsée de fréquence $f = \frac{p\Omega_{rot}}{\pi}$ (Figure 11). Les mesures de la vitesse Ω_{rot} et du courant maximal I_M , faites grâce aux relevés expérimentaux (mesure de la période), permettent de calculer le lien entre la résistance globale R (somme de la résistance interne de la génératrice et de celles des transistors MOS) et l'amplitude du flux inducteur Φ_{fMax} . Etant donné la dispersion dans les valeurs des paramètres calculés, nous avons moyenné nos résultats et identifié un couple de paramètres résistance globale $R=500\Omega$ et amplitude du flux inducteur $\Phi_{fMax}=0.51mVs$.

Ainsi, à partir des valeurs des paramètres identifiés expérimentalement ($C_{dMax}=10\mu Nm$, $\Phi_f =0.51mVs$ et $R=500\Omega$) et de celles estimées à partir des données constructeurs ($J_{rot}=300 g.mm^2$) ou d'une évaluation énergétique ($f_{rot}=3.10^{-9}Nm/rad/s$), nous avons pu comparer les résultats expérimentaux et simulés (globalisés) de l'énergie récupérée sur un cycle de décharge en fonction de la tension continue V_{red} (Figure 12).

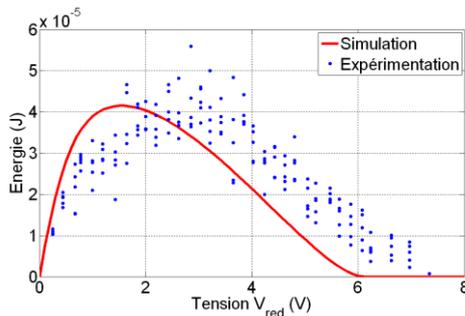


Figure 12 : Influence de la tension continue V_{red} sur l'énergie de décharge récupérée

Même s'il subsiste encore des écarts significatifs, la courbe issue de la simulation est assez proche du nuage de points obtenu par les mesures expérimentales. L'écart entre ces deux résultats peut être dû à des incertitudes sur les valeurs des paramètres donnés par le constructeur et celles estimées mais nous devons également rechercher du côté des dispersions sur les résultats (décrochements survenant à des valeurs variables du couple de détente dues à une grande instabilité au voisinage du maximum). Bien sûr, il est possible de trouver un ou des ensembles de paramètres qui permettraient d'approcher les résultats expérimentaux, mais nous avons préféré, sur la base des données initiales connues, effectuer une analyse de sensibilité aux différents paramètres.

Nous pouvons également remarquer sur la figure 12 que le rendement sur cycle de la décharge dépend de la valeur de la tension V_{red} , il atteint une valeur maximale d'environ 40% pour une tension au voisinage de 1,5 V dans la simulation et 3 V dans l'expérience.

Pour mieux comprendre les origines éventuelles des écarts entre simulations et expérimentations, nous avons mené une étude de sensibilité des simulations sur les valeurs de la résistance globale (induit + semi-conducteurs) R (Figure 13), de l'amplitude du flux inducteur Φ_{fMax} (Figure 14), de l'amplitude du couple de détente C_{dMax} (Figure 15) supposé sinusoïdal, du nombre de spires du bobinage global statorique (Figure 16) auquel sont proportionnelles R_G (à section de fil constante) et Φ_{fMax} , du moment d'inertie du rotor J_{rot} (Figure 17) et du coefficient de frottement f_{rot} (Figure 18).

Tous ces paramètres ont une influence directe sur la forme d'onde de la force électromotrice E_G (Figure 9) donc sur la forme de la courbe de l'énergie de décharge récupérée en fonction de la tension continue V_{red} .

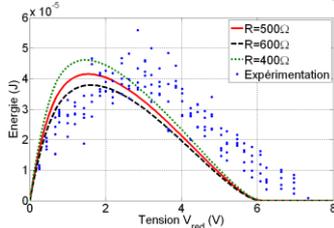


Figure 13 : Sensibilité à la valeur de la résistance globale R

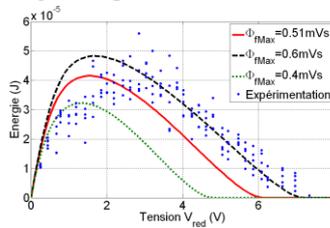


Figure 14 : Sensibilité à la valeur de l'amplitude Φ_{fMax} du flux inducteur

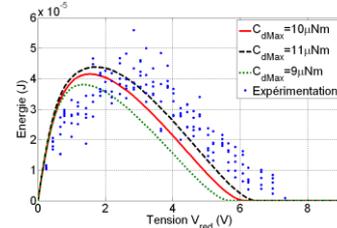


Figure 15 : Sensibilité à la valeur de l'amplitude du couple de détente C_d

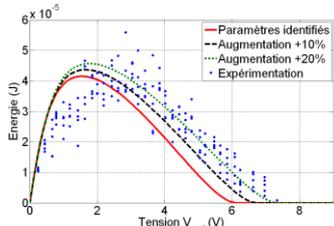


Figure 16 : Sensibilité à la valeur du nombre de spires (supposé proportionnel à R_G et Φ_{fMax})

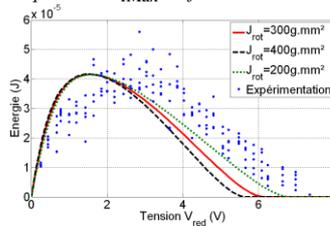


Figure 17 : Sensibilité à la valeur du moment d'inertie du rotor J_{rot}

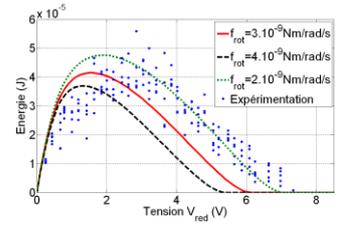


Figure 18 : Sensibilité à la valeur du coefficient de frottement visqueux f_{rot}

La résistance globale R influe directement sur l'amplitude du courant redressé qui est inversement proportionnelle à R , mais également sur les pertes par effet Joule. Ainsi, plus R est importante, plus l'énergie

récupérée est faible (dégradation du rendement). L'amplitude de la force électromotrice étant proportionnelle à l'amplitude du flux inducteur, plus cette dernière sera élevée, plus, à même tension V_{red} , le courant et donc l'énergie récupérée seront élevés, ce que montrent bien ces résultats de simulations. L'augmentation du couple de détente agit sur l'énergie emmagasinée dans le ressort. On observe bien que plus C_{dMax} est élevé, plus l'énergie récupérée augmente, mais on constate également que le rendement sur cycle de la décharge devient plus faible. En effet lorsque l'amplitude du couple de détente augmente de 10%, l'énergie emmagasinée par le ressort augmente de 21% (cf équation 2), mais l'énergie maximale récupérée en sortie du système n'augmente que de 5%. Le rendement sur cycle est donc dégradé. Augmenter le nombre de spires d'un facteur k revient à augmenter du même facteur k la résistance R (à section des fils constante) et l'amplitude du flux inducteur Φ_{fMax} . Ainsi, la figure 16 représente un compromis entre les figures 13 et 14. Lorsque l'on augmente le moment d'inertie du rotor, ce dernier tourne moins vite donc l'amplitude de E_G , proportionnelle à la vitesse de rotation Ω_{rot} , est plus faible. Ainsi, la forme de la courbe change pour les fortes valeurs de V_{red} . Par contre, aux faibles valeurs de V_{red} , le couple électromagnétique freine la rotation dès le départ, les vitesses atteintes sont assez faibles et donc l'augmentation ou la diminution du moment d'inertie du rotor n'affecte pas l'énergie récupérée. Enfin, le coefficient de frottement visqueux qui représente les pertes mécaniques et magnétiques joue également un rôle dans l'efficacité de la conversion d'énergie de la décharge et dans la durée de son cycle. Plus les pertes de frottements équivalents sont élevées plus le rendement se dégrade.

OPTIMISATION DU TRANSFERT DE PUISSANCE

Nous venons de constater grâce au modèle électromécanique mais également de manière expérimentale que, dans le cas du débit sur un bus continu, il existe une tension optimale en sortie du générateur pour laquelle la récupération d'énergie de chaque décharge du ressort sera maximale.

Pour un concepteur de machines électriques, la première solution qui vient à l'esprit pour maximiser la récupération d'énergie sans convertisseur est d'adapter le bobinage en agissant sur le nombre de spires n et sur la section des fils (pour maximiser le remplissage de la fenêtre bobinable). Dans ces conditions, à surface bobinable et coefficient de remplissage constants, la résistance globale R est proportionnelle à n^2 et l'amplitude du flux inducteur Φ_{fMax} est proportionnelle à n . Ainsi, il est possible d'optimiser n pour déplacer le maximum de la courbe sur la tension V_{red} souhaitée (Figure 20). De plus, le fait que la courbe soit assez plate permet de tolérer une assez large variation de la tension de l'accumulateur sans dégradation significative du rendement. Par exemple, sur la courbe de simulation de la figure 12, lorsque V_{red} est compris entre 1.1V et 2.1V, le rendement varie entre 40% et 41.5% (l'énergie emmagasinée dans le ressort étant ici de 100µJ). Cependant, si l'on ne peut agir sur la construction de la génératrice ou si la tension varie beaucoup (par exemple avec un supercondensateur), une deuxième solution pour optimiser le transfert d'énergie peut consister à insérer un convertisseur DC-DC contrôlé entre le système Autoquartz et l'élément de stockage qui permettra d'asservir la tension V_{red} en sortie du système Autoquartz. Ce système, composé du générateur Autoquartz et d'un convertisseur DC-DC boost de très faible puissance et haut rendement et d'un élément de stockage avec un circuit consommateur, est décrit à la figure 19. Dans tout ce chapitre, la tension V_{IN} (du convertisseur) correspond à la notation précédente V_{red} .

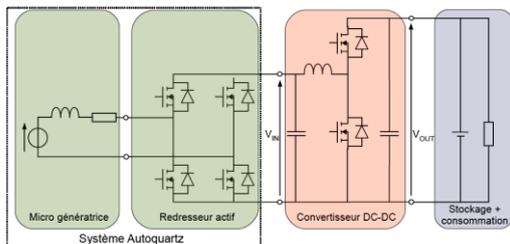


Figure 19 : Schéma de la chaîne électrique avec hacheur d'optimisation de la récupération en sortie

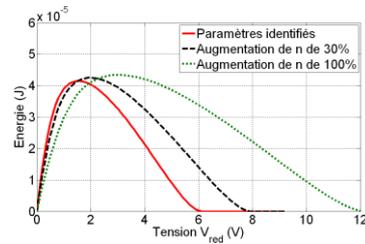


Figure 20 : Variation du nombre de spires n

A partir d'un régulateur à découpage synchrone du commerce, le LTC3537 (2,2 MHz) [8] prévu pour réguler la tension de sortie sur la base d'une référence interne fixe et d'une mesure de la tension de sortie effectuée à travers un pont diviseur (ajustable par résistances R_1 et R_2 : figures 21 et 22), et donc a priori totalement inadapté pour satisfaire notre besoin, nous avons trouvé une solution de régulation de la tension d'entrée avec consigne ajustable grâce à une architecture originale permettant de satisfaire notre besoin.

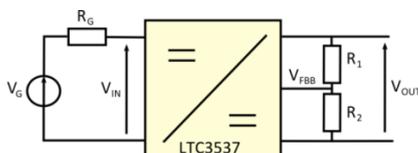


Figure 21 : Fonctionnement normal du régulateur LTC3537

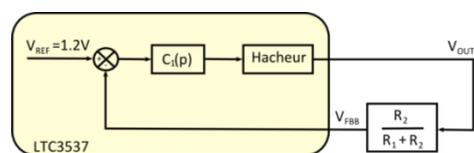


Figure 22 : Asservissement de la tension de sortie du LTC3537

(fonctionnement « normal »)

La solution proposée consiste à transformer l'entrée de retour de l'asservissement de la tension de sortie V_{FBB} en une entrée de commande. Une boucle d'asservissement externe a été mise en œuvre pour permettre de réguler la tension d'entrée du convertisseur comme expliqué sur les figures 23 et 24.

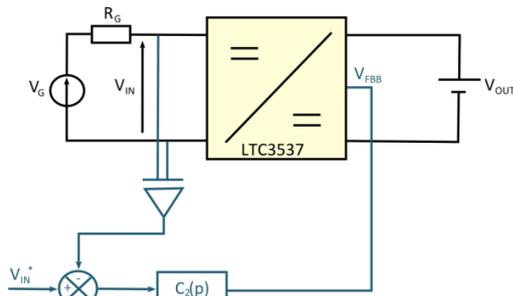


Figure 23 : Fonctionnement modifié du régulateur LTC3537

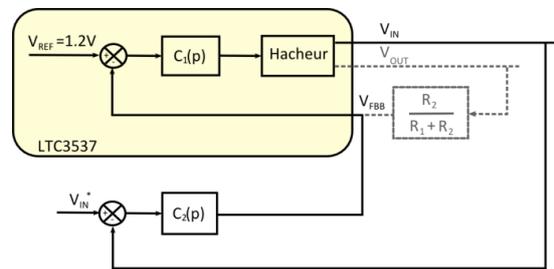


Figure 24 : Asservissement de la tension d'entrée du LTC3537

Comme le correcteur C_1 de la boucle d'asservissement interne du circuit intégré possède un intégrateur pour annuler l'erreur statique lors de la régulation de la tension de sortie, une identification du système en boucle ouverte est impossible. Le correcteur C_2 de la nouvelle boucle d'asservissement (externe) a dû donc être dimensionné à partir d'une évaluation en boucle fermée des performances de la boucle initiale. Le comportement intégrateur de la boucle ouverte permet logiquement d'annuler l'erreur statique, cependant la référence interne de tension joue dans ce cas le rôle d'une perturbation placée en amont de l'intégrateur. Le correcteur C_2 doit donc contenir une action intégrale.

La régulation a d'abord été testée avec en entrée une alimentation stabilisée de tension V_G avec une résistance $R_G=10\Omega$, et en sortie un accumulateur lithium ion de tension V_{OUT} . Les résultats de cette régulation sont présentés à la figure 25. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que la régulation rejette bien les perturbations, illustrées ici par une variation de la tension V_G .

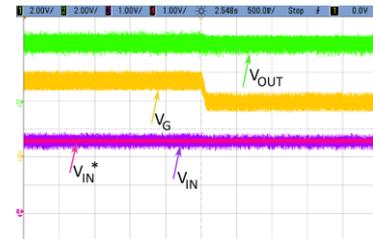


Figure 25 : Régulation de la tension V_{IN}

Afin d'évaluer les performances énergétiques du système complet, nous avons mesuré le rendement de conversion du régulateur à découpage LTC3537 en fonction du courant de charge, et ce pour plusieurs valeurs de tension d'entrée V_{IN} . Notons qu'il s'agit d'un rendement qui rend mal compte du fonctionnement sur cycle et qui devra être transformé en rendement énergétique sur cycle dans les conditions particulières d'emploi du système.

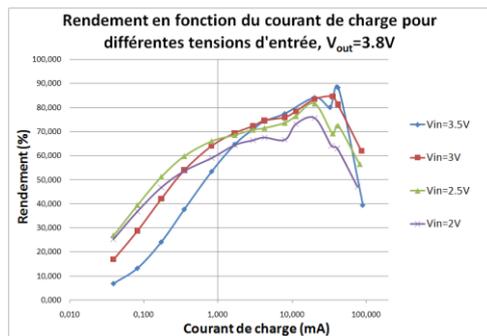


Figure 26: Rendement du convertisseur LTC3537

Le rendement du LTC3537 (Figure 26) peut atteindre les 80% mais est très dégradé pour de faibles charges. Ceci est principalement dû à ses pertes à vide (Tableau 2). Afin d'améliorer ce rendement en très faible puissance, un compromis de conception devrait sans doute être fait entre pertes à vide et pertes en charge.

Tension d'entrée (V)	Pertes à vide P_o (mW)
2	0.32
2.5	0.34
3	0.63
3.5	2.0

Tableau 2 : Pertes à vide du LTC3537

Nous venons de mettre en évidence deux solutions pour maximiser la récupération d'énergie. La première consiste à adapter le bobinage grâce à un ajustement, à la construction de la génératrice, du nombre de spires de son bobinage d'induit. La seconde consiste à exploiter un convertisseur DC-DC avec un contrôle MPPT (maximum power point tracking). Supposons que l'élément de stockage soit un accumulateur lithium et que sa tension varie dans la plage extrême 3 à 4.2V. La première solution nous permet de fixer le maximum d'énergie dans cette plage de tension avec un rendement global d'exploitation du cycle variant entre 30% et 40% (soit entre 75% et 100% du maximum d'énergie récupérable). La seconde solution (qui consiste à asservir la tension d'entrée, ici à 3V, pour récupérer le maximum d'énergie) conduit à des pertes à vide de l'ordre de $P_o=0.63mW$. Pour une puissance d'entrée élevée (par exemple $P_e=50mW$), le rendement du convertisseur est de l'ordre de

$\eta_{\text{conv}}=80\%$. Sachant qu'une décharge dure environ $t_d=20\text{ms}$ et en supposant une fréquence de répétition des décharges de $f = \frac{1}{T} = 2\text{Hz}$, le rendement du convertisseur sur cycle sera donc de :

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{W_s}{W_s + W_{\text{pertes}}} = \frac{\eta_{\text{conv}} P_e t_d - P_o (T - t_d)}{P_e t_d} = 50\% \quad (5)$$

soit un rendement global de l'ensemble de la chaîne de conversion (Autoquartz + convertisseur) de 20%. Si maintenant la puissance d'entrée est plus faible, de l'ordre du mW, le rendement du convertisseur chute à $\eta_{\text{conv}}=50\%$ et si la fréquence des décharges devient encore plus faible (par exemple une toutes les 1 s : 1 Hz), le rendement global s'effondre. Ainsi, pour un fonctionnement impulsif du convertisseur, la minimisation des pertes à vide est essentielle pour obtenir un rendement sur cycle acceptable avec la nécessité de réaliser un mode veille très efficace.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons analysé un générateur micro-cinétique original permettant de récupérer de l'énergie électrique à partir de mouvements quelconques. Ce dispositif, développé pour alimenter des montres, n'avait pas fait l'objet d'une telle étude de productivité énergétique. La modélisation électromécanique du générateur associée à des relevés expérimentaux nous a permis, notamment grâce à une analyse de sensibilité sur différents paramètres, de déterminer les éléments du modèle et de mettre en évidence l'existence d'un optimum de fonctionnement. Cependant, la précision de la modélisation, bien que satisfaisante pour une évaluation de productivité, peut être considérée comme encore insuffisante. Il reste notamment à expliquer la dispersion importante des résultats de mesure et à compléter le modèle pour l'améliorer, des pistes sont en cours.

Dans le cas d'un débit sur bus continu, la tension appliquée du bus joue un rôle important sur le rendement des cycles de décharge du ressort. La puissance moyenne récupérable peut atteindre les $40\mu\text{W}$ (en supposant une fréquence de répétition des décharges de 1Hz et un rendement du système Autoquartz de 40%). Il nous semble que la meilleure solution pour optimiser le transfert d'énergie est d'adapter le nombre de spires du bobinage de façon à positionner le maximum de la courbe d'énergie au milieu de la plage de variation de la tension du bus continu, afin que l'on puisse se passer de tout contrôle. En effet, la solution qui consiste à interfacer un convertisseur DC-DC avec un contrôle MPPT ne nous semble pas satisfaisante car il sera toujours difficile d'obtenir un rendement sur cycle élevé dans un tel système qui fonctionne par impulsions avec une faible fréquence de répétition (fréquence liée aux mouvements du boîtier), principalement à cause des pertes à vide. Les travaux en cours concernent la réalisation d'un modèle générique pour produire d'autres niveaux de puissance, sur la base de la même architecture.

Les auteurs remercient Yves Guérin, ingénieur développement chez ETA SA (Grenchen, Suisse), pour toutes les informations qu'il nous a aimablement fournies sur le système Autoquartz. Ils remercient également le département ST2I du CNRS qui a contribué à financer ce projet à travers un PEPS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GILOMEN B., SCHMIDLI P., ETA SA, Granges, Suisse
Mouvement à quartz dame (8 3/4") dont l'énergie est fournie par une génératrice, Calibre ETA 204.911
8e Congrès européen de Chronométrie - 2000 Genève - 28, 29 septembre 2000
- [2] GILOMEN B., BEGUIN J.-L., BUGMANN R., ETA SA
Mouvement à quartz dont l'énergie est fournie par une génératrice, calibre ETA 205.111
La montre automatique - de la mécanique à l'électronique - 1997
5e Journée d'Etude - Vallée de Joux, Le Sentier - 2 octobre 1997
- [3] Kinetron: The Micro Energy Company
The Micro Generating System for a Watch
http://www.kinetron.nl/cms/publish/content/downloaddocument.asp?document_id=9
- [4] Kinetron : The Micro Energy Company
The 14-pole Micro Generator with Sm2Co17 magnet (MG205)
http://www.kinetron.nl/cms/publish/content/downloaddocument.asp?document_id=7
- [5] LOSSEC M., «Etude, modélisation et réalisation d'un système de génération multisources exploitant les ressources énergétiques de l'environnement humain», stage de Master SEGE Nantes, SATIE, juillet 2008.
- [6] M. LOSSEC, B. MULTON, H. BEN AHMED, L. L'HOURS, P. QUINTON, G. NICOLAS, A. SOREL, J. PRIOUX, « Optimization Methodology for a Multi-Source-Energy Generation System using the Human Environment Energy Resource », NEST 2009 (New Energy Solutions in Tours), may 09.
- [7] MOYA S., LE BOURHIS F., FREDY C., «Modélisation mécatronique d'un générateur cinétique d'énergie électrique», stages de licence mécatronique, SATIE, juin-juillet 2008-2009.
- [8] LTC3537, Linear Technology, documentation constructeur
2.2 MHz, 600mA, Synchronous Step-Up DC/DC, Converter and 100mA LDO