



HAL
open science

Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes

Sébastien Boisseau, Pierre Gasnier, Ghislain Despesse, Jerome Willemin,
Jean-Jacques Chaillout, Maxime Gallardo, Matthias Perez, Alexandre-Benoit
Duret, Sébastien Brulais, Stéphanie Riché

► **To cite this version:**

Sébastien Boisseau, Pierre Gasnier, Ghislain Despesse, Jerome Willemin, Jean-Jacques Chaillout, et al.. Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes. URSI - Journées Scientifiques 2014 - L'Homme connecté, Mar 2014, France. hal-00959773

HAL Id: hal-00959773

<https://hal.science/hal-00959773>

Submitted on 26 Mar 2014

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.

Pour citer:

S. Boisseau, P. Gasnier, G. Despesse, J. Willemin, JJ. Chaillout, M. Gallardo, M. Perez, AB. Duret, S. Brulais, S. Riché, "Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes", URSI – Journées scientifiques 2014 – L'Homme connecté, pp. 41-48, 2014.



L'HOMME CONNECTÉ

Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes Biomechanical Energy Harvesting and Autonomous Systems

Sebastien Boisseau, Pierre Gasnier, Ghislain Despesse, Jerome Willemin, Jean-Jacques Chaillout, Maxime Gallardo, Matthias Perez, Alexandre-Benoit Duret, Sébastien Brulais, Stéphanie Riché

CEA-LETI, Minatec, 17 rue des Martyrs - 38054 Grenoble Cedex 9, France - sebastien.boisseau@cea.fr

Mots clés : Récupération d'énergie, Capteurs autonomes communicants, Énergie biomécanique – Energy Harvesting, Autonomous Wireless Sensor Networks, Biomechanical Energy

Introduction

La récupération d'énergie (Energy Harvesting) est une thématique en plein essor visant à utiliser l'énergie ambiante (lumière, vibrations, gradients thermiques) présente dans l'environnement direct de dispositifs électroniques (capteurs, équipements mobiles) pour les alimenter, de façon à prolonger leur durée de fonctionnement, voire à les rendre totalement autonomes. La récupération d'énergie est généralement mise en œuvre pour alimenter de petits systèmes électroniques tels que des capteurs autonomes communicants pour le transport, l'industrie ou l'habitat du fait des puissances récupérées assez faibles [1]; appliquée au cas de l'Homme, la récupération d'énergie peut atteindre des puissances de plusieurs milliwatts voire de plusieurs watts permettant d'alimenter des systèmes plus complexes tels que des lecteurs MP3, des téléphones portables ou des systèmes de localisation GPS.

De nombreuses sources d'énergie présentes dans l'environnement de l'Homme peuvent être exploitées: le soleil, le gradient thermique entre la peau et l'extérieur, la déformation des vêtements, les contraintes dans les chaussures... Cet article se focalise plus particulièrement sur la récupération d'énergie mécanique issue du corps humain et présente des exemples de dispositifs et d'applications issus de l'état de l'art montrant que la récupération d'énergie est déjà une réalité; et qu'elle permettra sur le plus long terme d'alimenter des dispositifs placés directement à l'intérieur du corps humain tels que des implants médicaux ou des pacemakers.

1 Récupération d'énergie et Systèmes autonomes

1.1 La récupération d'énergie

Il faut tout d'abord différencier la récupération de la production d'énergie (Figure 1a). On considère que la récupération d'énergie consiste à récupérer une énergie qui naturellement serait perdue et non une énergie qui a volontairement été produite pour cette finalité. L'idée consiste à récupérer une partie de l'énergie perdue lors d'un mouvement, d'un déplacement, ou d'une action usuelle de l'utilisateur. De plus, la récupération d'énergie doit être, dans l'idéal, complètement transparente du point de vue de l'utilisateur. Ainsi, une lampe dynamo nécessite une action volontaire d'actionnement d'une manivelle/levier de la part de l'utilisateur pour produire de l'énergie alors qu'un panneau solaire placé sur un sac à dos sera un système de récupération d'énergie : l'énergie lumineuse serait perdue si elle n'était pas récupérée et, de plus, cette solution ne demande pas une action particulière de l'utilisateur.

Quatre sources d'énergie ambiante peuvent être exploitées dans l'environnement de l'homme: l'énergie mécanique (contraintes, vibrations, chocs, déformations), l'énergie thermique (gradients thermiques ou variations temporelles de température), l'énergie radiante (radioactive, solaire, infra-rouge, radiofréquence) et l'énergie biochimique (bio-pile avec combustible renouvelé naturellement). La Figure 1b présente des ordres de grandeurs des puissances volumiques disponibles dans l'environnement par type de source d'énergie. Ainsi, $100\mu\text{W}$ à 1mW par cm^3 de récupérateur d'énergie est un bon ordre de grandeur; et, bien que cette puissance soit relativement faible, elle se révèle être suffisante pour de nombreuses applications.

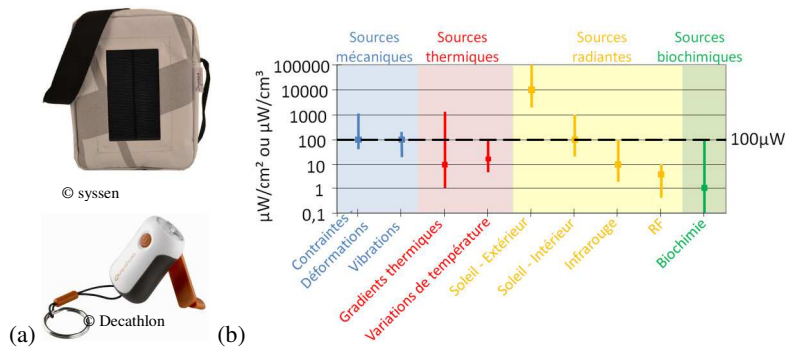


Figure 1. (a) Récupération d'énergie vs Production d'énergie et (b) densité de puissance des sources ambiantes

1.2 Systèmes autonomes, besoins énergétiques et application à l'homme connecté

En fait, de nombreux dispositifs ne nécessitent que peu de puissance pour fonctionner, c'est par exemple le cas des capteurs et des implants médicaux qui peuvent être alimentés par quelques dizaines de μW . Quant aux appareils nomades tels que les téléphones, les lecteurs MP3... ils sont plutôt dans la gamme 10mW-1W mais peuvent également être rechargés par des systèmes de récupération d'énergie. De plus, la tendance est à une réduction de la consommation électrique des dispositifs électroniques nomades dans le but d'augmenter leur autonomie, ce qui fait que les puissances présentées dans le tableau 1 devraient baisser dans les prochaines années, rendant tous ces dispositifs plus facilement compatibles avec la récupération d'énergie.

Tableau 1. Consommations électriques de systèmes électroniques courants et implantés

Systèmes électroniques	Consommations moyennes	Systèmes électroniques implantés [2]	Consommations moyennes [2]
Lecteur MP3	50mW-70mW	Implant auditif	145 μW -5.16mW
Récepteur GPS	70mW	Pompe à médicament	400 μW
Smartphones	0.5W-1W	Neurostimulateur	50 μW
Accéléromètre 3 axes	30 μW	Stimulateur musculaire	1.3mW
Montre	1-5 μW	Pacemaker	8 μW
Capteur de température	30 μW		
Récepteur RF	30mW-50mW		
Emetteur RF	40mW-90mW		
LED	1mW-10mW		
Microcontrôleur (actif)	1mW		
Microcontrôleur (standby)	3 μW		

A noter que les puissances présentées dans le tableau 1 supposent que le système électronique est alimenté en permanence. Il est également possible d'adopter un mode de fonctionnement intermittent: le système électronique n'est mis en route qu'une fois toutes les secondes, toutes les minutes voire plus, ce qui permet de faire chuter sa consommation moyenne. Il suffit donc de stocker l'énergie récupérée, puis d'alimenter le système électronique dès que le niveau d'énergie stockée est suffisant. Ainsi, théoriquement, tout dispositif peut être alimenté par la récupération d'énergie, la seule contrainte étant le temps d'attente entre deux séquences de fonctionnement. Pratiquement, cette durée ne doit pas dépasser 10-15 minutes pour que le récupérateur d'énergie soit pertinent.

Dans le cas des capteurs autonomes communicants, un bon ordre de grandeur de l'énergie nécessaire pour faire une mesure complète (mesure avec le capteur + traitement de l'information par un microcontrôleur + envoi de l'information par la puce RF) est comprise entre 50 μJ et 500 μJ (Figure 2a). Ainsi, même avec un système de récupération d'énergie ne récupérant que 10 μW , le capteur autonome communicant peut fonctionner toutes les 10 secondes, ce qui est suffisant pour de nombreuses applications; avec 100 μW , ce temps de latence n'est plus que de 1s (Figure 2b).

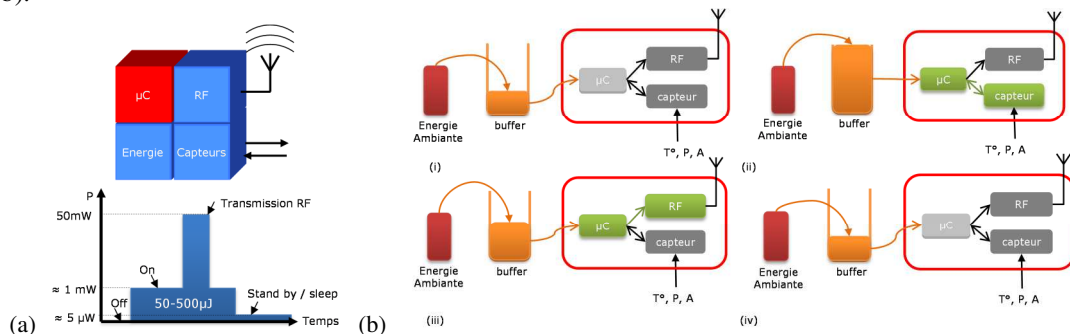


Figure 2. (a) Capteur autonome communicant et consommation, et (b) cycle de fonctionnement intermittent (i) stockage de l'énergie – tous les circuits électroniques sont en veille, (ii) démarrage du microcontrôleur et interrogation du capteur, (iii) envoi de l'information par RF et (iv) retour en mode veille, en attente d'un nouveau cycle

L'état de l'art regorge de dispositifs de récupération d'énergie pour les applications nomades, pour les capteurs autonomes et pour les implants médicaux. Des dispositifs sont par ailleurs déjà disponibles dans le commerce (panneaux solaires, montres autonomes); une multitude d'autres sont étudiés dans les laboratoires de recherche, notamment en récupération d'énergie thermique, mécanique ou biochimique.

Cet article se concentre plus particulièrement sur les systèmes de récupération d'énergie mécanique issue de l'Homme.

1.3 Energie mécanique et convertisseurs électromécaniques

1.3.1 Sources d'énergie mécanique et potentiel de l'énergie biomécanique

Un homme consomme de l'ordre de 11MJ d'énergie par jour, soit 127W en moyenne – 100W lorsqu'il dort et 1630W lorsqu'il court [3]. Une partie de cette énergie sera utilisée sous forme mécanique: pour se déplacer, respirer, faire circuler le sang... et pourra être récupérée grâce à un récupérateur d'énergie mécanique placé par exemple dans une chaussure, une genouillère voire à l'intérieur du corps humain (Figure 3a).

Starner et al. [4] ont estimé les puissances mécaniques récupérables sur un être humain et ont montré qu'il était théoriquement possible d'atteindre une dizaine de watts (Figure 3b), néanmoins les bons ordres de grandeurs sont plutôt dans la gamme 1mW-1W.

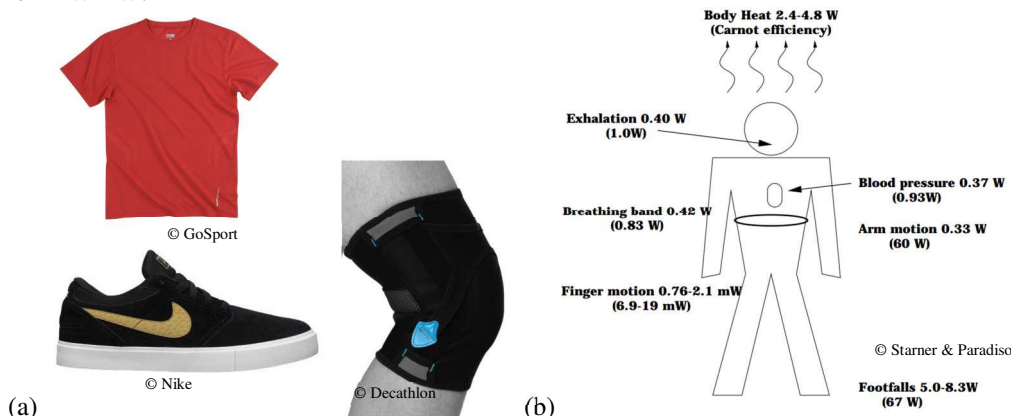


Figure 3. (a) Exemples d'objets dans lesquels un système de récupération d'énergie peut être intégré et (b) potentiel de l'énergie biomécanique [4] (entre parenthèse, puissance totale de l'action).

1.3.2 Convertisseurs électromécaniques de base

Trois principaux types de convertisseurs électromécaniques permettent de transformer cette énergie mécanique, issue des mouvements humains, en énergie électrique, qui pourra ensuite être utilisée pour alimenter un système autonome:

- Les convertisseurs piézoélectriques (Figure 4a): ils exploitent les propriétés piézoélectriques de certains matériaux tels que le PZT, l'AlN, le PVDF ou le BaTiO₃ à générer de l'énergie électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.
- Les convertisseurs électromagnétiques (Figure 4b): ils sont constitués d'un aimant permanent se déplaçant à l'intérieur d'une bobine et exploitent la loi de Lenz. Le déplacement de l'aimant induit une variation du flux magnétique traversant les spires de la bobine, ce qui génère un courant électrique.
- Les convertisseurs électrostatiques (Figure 4c): ils utilisent une capacité variable polarisée par un électret ou par un cycle de charge/décharge pour convertir le déplacement relatif d'une électrode par rapport à la seconde ou de façon plus générale toute variation de capacité en électricité.

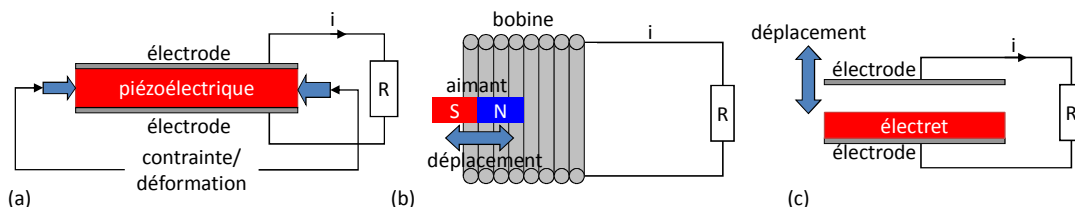


Figure 4. (a) Convertisseur piézoélectrique, (b) convertisseur électromagnétique et (c) convertisseur électrostatique

Ces 3 moyens de conversion sont à la base de tous les systèmes que nous verrons par la suite soit sous leur forme basique, soit couplés à d'autres convertisseurs tels que des systèmes résonants masse-ressort, des masses excentrées, des matériaux magnétostrictifs...pour devenir des récupérateurs d'énergie. En fait, globalement, les récupérateurs d'énergie mécanique peuvent être classés en deux catégories: les récupérateurs à conversion directe et les récupérateurs inertiels.

- Les récupérateurs à conversion directe: ils exploitent le convertisseur électromécanique de base et convertissent directement une pression (bouton poussoir, semelle de la chaussure,...), un mouvement de rotation (manivelle,...) ou un déplacement relatif entre deux éléments (de part et d'autre du genou, coude...) en électricité.
- Les récupérateurs inertiels: ils exploitent soit un système masse-ressort (Figure 5a) soit une masse excentrée (Figure 5b) pour générer un mouvement relatif entre deux éléments à partir de vibrations (mouvements lors de la marche,...), de chocs (chaussures,...) ou de mouvements oscillants (montres,...). Ce mouvement relatif est ensuite transformé en électricité à l'aide d'un des 3 convertisseurs de base mentionnés ci-dessus.

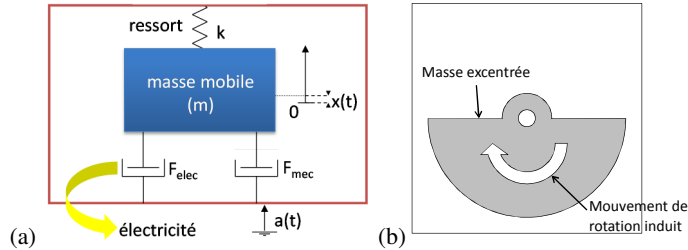


Figure 5. (a) Système masse-ressort et (b) système à masse excentrée

2 Systèmes de récupération d'énergie biomécanique – état de l'art

De nombreux systèmes de récupération d'énergie biomécanique ont été étudiés pour des applications externes (à l'extérieur du corps humain), mais également pour des applications internes dans le but d'alimenter des implants médicaux.

2.1 Systèmes de récupération d'énergie biomécanique externes

2.1.1 Systèmes inertiels

La conversion électromagnétique a été très largement plébiscitée pour les systèmes inertiels externes. Le premier système inertiel de récupération d'énergie mécanique adapté aux mouvements humains et commercialisé fut la montre Seiko (1988). Elle était capable de convertir les mouvements du poignet en électricité à l'aide d'un système à masse excentré couplé à un convertisseur électromagnétique (Figure 6a). Les puissances de sortie étaient de l'ordre de $5\mu\text{W}$ en moyenne (1mW en mouvement forcé) [4] ce qui était suffisant pour alimenter la montre. Le récupérateur inertiel le plus connu est probablement la lampe autonome alimentée par un générateur électromagnétique qui produit de l'énergie en le secouant (Figure 6b) (ce dispositif est à la base un système de production d'énergie mais peut récupérer l'énergie de la marche en étant inséré dans une poche). Les puissances générées peuvent atteindre plusieurs dizaines de mW, suffisamment pour recharger un lecteur MP3. A noter également d'autres systèmes de récupération d'énergie qui sont plutôt au niveau de la recherche: par exemple, le sac à dos récupérateur d'énergie (Figure 6c) utilisant une conversion électromagnétique et capable de récupérer jusqu'à 7W lors de la marche [5].



Figure 6. (a) Récupérateur d'énergie dans une montre ©Seiko [6] (b) système de récupération d'énergie inertiel pouvant être placé dans une poche ©Excalibur Products [7] et (c) sac à dos récupérateur d'énergie [5]

2.1.2 Conversion directe

Concernant les systèmes de récupération d'énergie à conversion directe, tous les principes de conversion, piézoélectriques, électromagnétiques et électrostatiques ont été mis en œuvre avec des puissances pouvant atteindre plusieurs dizaines de watts.

A l'état de système commercialisé, on retrouve tout d'abord les interrupteurs et télécommandes autonomes, essentiellement à base de convertisseurs piézoélectriques (Figure 7a) développés par exemple par Arveni [8], Algra [9] ou Lightning Switch [10]; ou électromagnétiques conçus par EnOcean (Figure 7b) [11]. Les énergies générées par appui sont de l'ordre de $50\text{-}100\mu\text{J}$ ce qui est suffisant pour envoyer l'information de mise en marche à distance sans pile.

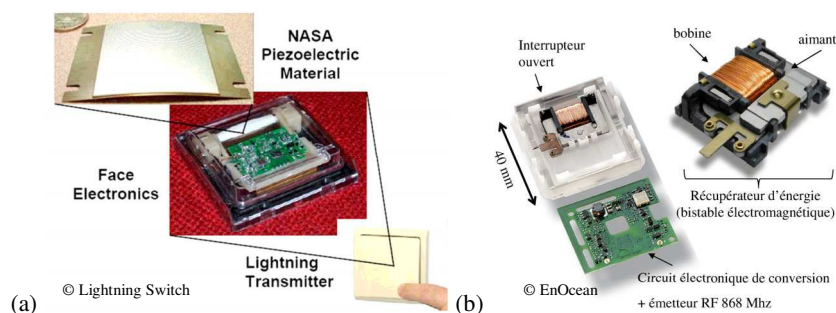


Figure 7. (a) Interrupteur piézoélectrique autonome ©Lightning Switch [10] et (b) interrupteur électromagnétique autonome ©EnOcean [11]

De nombreux chercheurs se sont également intéressés à la récupération d'énergie dans les chaussures; Niu et al. [12] ont notamment montré que la puissance maximale disponible dans une chaussure est de l'ordre de $2W@2Hz$. Ainsi, dès 1998, le MIT s'est intéressé à cette récupération d'énergie à l'aide de systèmes piézoélectriques (Figure 8a) et électromagnétiques (Figure 8b). Les puissances générées atteignent $8.4mW$ [13] pour la structure piézoélectrique et $60mW$ pour la structure électromagnétique [14]. Des essais ont également été menés sur des systèmes électrostatiques à base d'élastomères comprimés sous l'effet du poids lors de la marche (Figure 8c) avec des puissances de $0.7W$ [15] ou exploitant les variations de permittivités induites par un fluide circulant dans une structure capacitive et mis en mouvement par appuis alternatifs sur des chambres placées à l'avant et à l'arrière de la chaussure (Figure 8c). La société InstepNanopower [16] qui a conçu ce récupérateur d'énergie annonce une puissance de sortie de 20Watts.

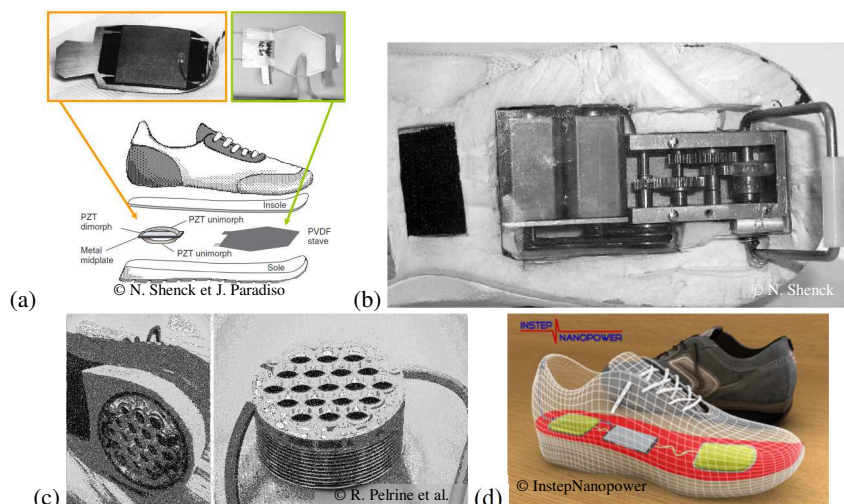


Figure 8. Récupération d'énergie dans les chaussures (a) conversion piézoélectrique [13], (b) conversion électromagnétique [14], (c) conversion électrostatique à base d'élastomères comprimés [15] et (d) conversion électrostatique à base de circulation de fluides [16]

Il est également possible de récupérer l'énergie au niveau des genoux lors de la marche, ce qu'a démontré Donelan et al. [17] et la société BionicPower [18] à l'aide de générateurs électromagnétiques; les puissances atteignent plus de $10W$ avec des applications visées essentiellement militaires (Figure 9a). Il est à noter que ces puissances sont largement suffisantes pour alimenter la plupart des systèmes nomades, smartphones inclus, par contre ils sont relativement volumineux et pas entièrement transparents vis-à-vis de l'utilisateur (masse embarquée importante et effort non négligeable à fournir). En pratique, il s'agit de faire un compromis entre le confort de la marche et la puissance récupérée; au-delà de $100mW$ le système n'est plus complètement anodin vis-à-vis de l'utilisateur.

D'autres récupérateurs d'énergie exploitant le PVDF, qui est un matériau piézoélectrique souple, ont été mis en œuvre pour récupérer l'énergie de la respiration, plus précisément les mouvements de la cage thoracique à l'aide de ceintures, et avec des puissances affichées de $2.3mW$ (Figure 9b) [3]; d'autres se sont intéressés à la récupération des déformations des sangles d'un sac à dos, avec des puissances atteignant $46mW$ [19] (Figure 9c).

Concernant les systèmes électrostatiques, Vu-Cong et al. [20] ont démontré qu'il était possible de récupérer de l'énergie de déformation en utilisant un élastomère, polarisé par un électret en Téflon. La puissance récupérée atteint $46.6\mu W$ à $2Hz$ pour une structure de $15cm^2$ et une déformation de 50% .

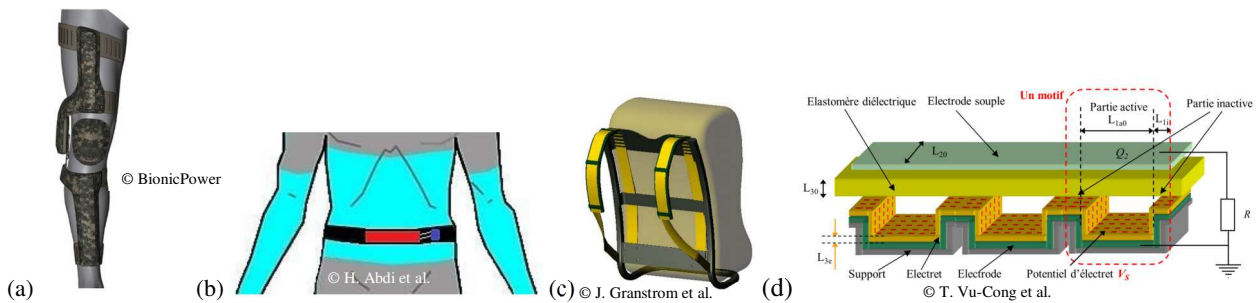


Figure 9. (a) Récupération d'énergie de la marche ©BionicPower [18], (b) récupération de l'énergie de la respiration [3], (c) sac à sangles en PVDF [19] et (d) récupération d'énergie issue de la déformation d'un polymère couplé à un électret [20].

2.2 Systèmes de récupération d'énergie biomécanique internes

La recherche s'oriente aujourd'hui vers les systèmes de récupération d'énergie biomécanique internes, qui peuvent être une formidable opportunité pour l'alimentation d'implants médicaux (pacemakers, pompes à médicaments,...), les rendant ainsi totalement autonomes. Les récupérateurs d'énergie biomécanique internes sont aujourd'hui encore à l'état d'étude mais devraient très prochainement passer en phase de tests cliniques. Comme dans le cas des récupérateurs externes, les systèmes à conversion directe et les systèmes inertiels ont été étudiés.

2.2.1 Systèmes inertiels

D'importantes actions de recherche sont menées sur la récupération d'énergie des vibrations induites par le cœur dans le but de rendre autonomes les pacemakers de demain. Des solutions inertielle à base de systèmes masse-ressort ont notamment été proposées par le CEA-LETI (solution électrostatique - Figure 10a) [21], le TIMA (solution piézoélectrique) et l'université du Michigan [22] (solution piézoélectrique - Figure 10b) avec des objectifs de puissances de l'ordre de $10\mu W$. A noter également un système proche de la montre autonome Seiko©, à base d'un rotor à masse excentrée, proposé par Zurbuchen et al. [23] qui a également été utilisé pour récupérer les mouvements du cœur (Figure 10c). Le dispositif a fourni $16.7\mu W$ lors d'un test in-vivo sur une chèvre, ce qui est théoriquement assez pour alimenter un pacemaker (tableau 1).

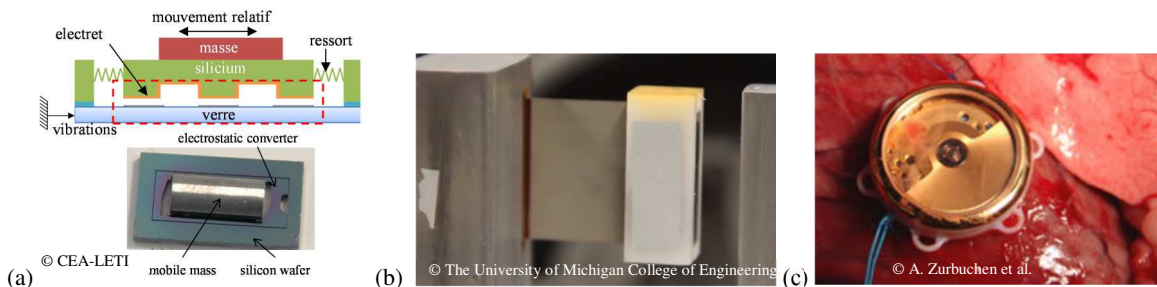


Figure 10. Systèmes de récupération d'énergie inertiels implantés (a) vibratoire à conversion électrostatique [21], (b) vibratoire à conversion piézoélectrique de l'université du Michigan [22] et (c) à rotor excentré et à conversion électromagnétique [23]

2.2.2 Conversion directe

Concernant les systèmes de récupération d'énergie à conversion directe, nous pouvons tout d'abord évoquer les travaux de C. Dagdeviren et al. qui ont conçu un système de récupération d'énergie piézoélectrique souple adapté à la récupération d'énergie des déformations du cœur, du diaphragme ou des poumons; la puissance générée est de $0.18\mu W/cm^2$ (Figure 11a) [24]. D'autres concepts ont vocation à être intégré dans des prothèses pour récupérer l'énergie au niveau des articulations: le dispositif présenté par Platt et al. (Figure 11b) [25] est placé dans une prothèse de genou et récupère $4.8mW$ à l'aide de trois céramiques piézoélectriques (PZT). A noter finalement la structure de récupération d'énergie conçue par Deterre et al. [26] visant à convertir les variations de pression dans le cœur en énergie électrique à l'aide d'une cavité (soufflet) se déformant sous l'effet de la pression, couplée à un convertisseur piézoélectrique; la puissance récupérée est de $4.15\mu W/cm^3$.

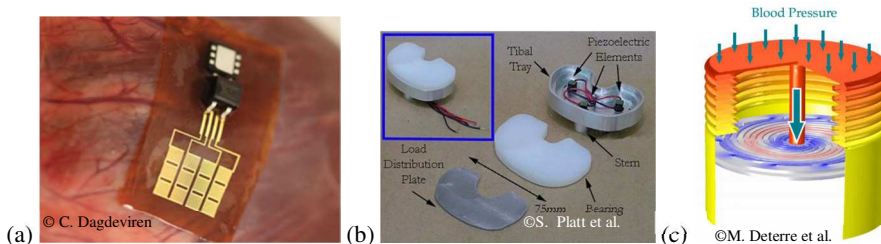


Figure 11. Systèmes à conversion directe implantés (a) capable de récupérer les déformations du cœur [24], (b) placé dans une prothèse pour récupérer l'énergie de la marche [25], et (c) récupérant les variations de pression au niveau du cœur à l'aide d'une cavité déformable (soufflet) et d'une membrane piézoélectrique [26]

3 Gestion de l'énergie, stockage et utilisation

La question de la gestion de l'énergie issue des récupérateurs d'énergie mécanique n'est pas systématiquement abordée dans les publications mais peut se révéler critique vu les faibles puissances en jeu et la difficulté d'avoir de bons rendements entre la sortie du récupérateur et le système à alimenter.

Tout d'abord, la puissance issue du système de récupération d'énergie n'est pas utilisable telle quelle; elle est généralement alternative, de trop forte tension ou au contraire de trop basse tension et un circuit de gestion de l'énergie se révèle toujours indispensable. Le schéma classique d'un système autonome alimenté par de la récupération d'énergie est présenté Figure 12. Il est constitué du récupérateur d'énergie, du circuit de gestion de l'énergie (power management) et d'un buffer (capacité ou batterie) permettant de stocker l'énergie.

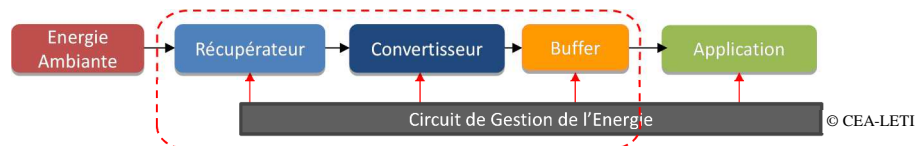


Figure 12. Chaîne de conversion d'énergie – Du système de récupération d'énergie au système autonome

Pour que le convertisseur de puissance soit efficace, il est généralement nécessaire d'utiliser un circuit de gestion de l'énergie actif, comprenant des transistors et des circuits de détection, qui doit donc être alimenté pour assurer le fonctionnement des éléments actifs. Ainsi, un problème se pose si l'on souhaite développer des systèmes de récupération d'énergie sans pile car cela implique qu'au démarrage du système, il n'y a pas d'énergie et les éléments actifs ne peuvent pas être commandés. Une solution, proposée par le CEA-LETI, consiste à utiliser un circuit électronique capable d'alternier entre (i) un mode de fonctionnement passif de type pont de diode-capacité, qui n'est pas optimal en terme de rendement, pour charger des capacités qui permettront ensuite d'alimenter l'électronique de gestion et (ii) un mode actif optimal (Figure 13a). Ce concept a été mis en œuvre avec un circuit discret (Figure 13b) [27] puis avec un ASIC (Figure 13c) [28] et a montré qu'il était possible d'alimenter un capteur autonome communicant de façon intermittente dès $10\mu\text{W}$ de puissance récupérée; la consommation électrique de ces deux circuits ne dépasse pas $3\mu\text{W}$ dans le pire des cas et les rendements atteignent plus de 60%.

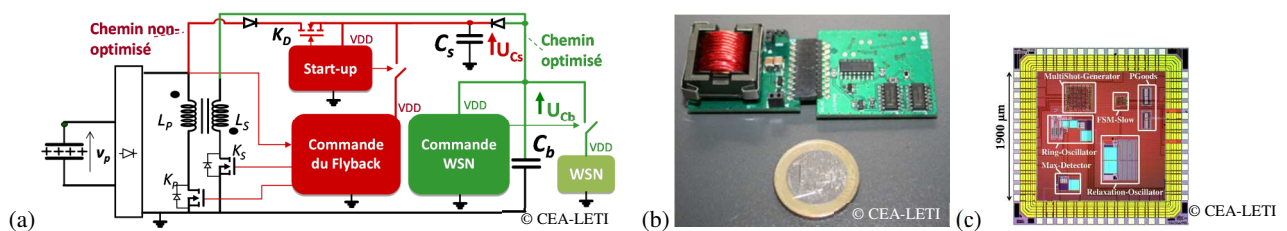


Figure 13. Circuit de Power Management du CEA-LETI [27] (a) schéma, (b) circuit discret et (c) ASIC

De nombreux autres circuits de gestion de l'énergie pour les récupérateurs d'énergie ont été mis en œuvre; nous citerons par exemple les travaux de Hehn et al. [29] (ASIC) et de Romani et al. [30] en discret qui sont, comme le circuit précédent, capables de fonctionner sans pile.

4 Conclusions

La récupération d'énergie biomécanique offre des possibilités intéressantes pour alimenter ou pour prolonger la durée de vie des appareils nomades, des capteurs autonomes et des implants médicaux. De nombreux dispositifs ont été prototypés avec des puissances de sortie allant de quelques microwatts à plusieurs dizaines de watts; certains d'entre eux sont par ailleurs déjà commercialisés. On notera l'importance de la vision "système" prenant en compte tous les paramètres et toutes les contraintes de l'ensemble de la chaîne : caractéristiques de la source d'énergie – conversion de l'énergie primaire en énergie électrique - mise en forme et stockage de l'énergie électrique – gestion des cycles de fonctionnement de l'application. Cette analyse système est d'autant plus importante que les puissances en jeu sont faibles, de façon à ne pas tout perdre dans un des éléments de la chaîne, et d'exploiter au mieux la source d'énergie ambiante.

La récupération d'énergie peut être une formidable opportunité permettant d'offrir l'autonomie énergétique aux objets, capteurs, vêtements, de l'Homme connecté; et sera sans aucun doute un des piliers de l'internet des objets (IoT) [31].

Références bibliographiques

- [1] S. Boisseau et al., "Energy harvesting, wireless sensor networks & opportunities for industrial applications," *EETimes*, 2012.
- [2] A. Cadei et al., "Kinetic and thermal energy harvesters for implantable medical devices and biomedical autonomous sensors,"

Measurement Science and Technology, vol. 25, 2014.

- [3] H. Abdi et al., "Human Passive Motion and a User-friendly Energy Harvesting System".
- [4] T. Starner et al., "Human Generated Power for Mobile Electronics," in *Piguet, C.(ed), Low-Power Electronic, CRC Press*, vol. Chapter 45, pp. 45.1-45.35, 2004.
- [5] L. Rome et al., "Generating Electricity While Walking with Loads," *Science*, 2005.
- [6] Seiko. [Online]. www.seikowatches.com
- [7] Excalibur Products. [Online]. www.foreverflashlights.com
- [8] Arveni. [Online]. www.arveni.fr
- [9] Algra. [Online]. www.algra.ch
- [10] Lightning Switch. [Online]. www.lightningswitch.com
- [11] www.enocean.com.
- [12] Niu et al., "Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting," *Proc. Power Electronics Specialists Conference*, 2004.
- [13] N. Shenck et J. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted," *IEEE Micro*, vol. 21, no. 3, pp. 30-42, 2001.
- [14] N. Shenck, "Demonstration of Useful Electric Energy Generation from," *Master of science, MIT*, 1999.
- [15] R. Pelrine et al., "Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications," *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, vol. 148, 2001.
- [16] instepnanopower.com.
- [17] J. Donelan et al., "Biomechanical Energy Harvesting," *Proc. PowerMEMS*, 2008.
- [18] BionicPower. bionic-power.com.
- [19] J. Granstrom et al., "Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, pp. 1810-1820, 2007.
- [20] T. Vu-Cong et al., "Electrets substituting external bias voltage in dielectric elastomer generators: application to human motion," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, 2013.
- [21] S. Boisseau et al., "Toward pacemakers powered by heartbeats," *EETimes*, 2012.
- [22] M. Karami et al., "Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, p. 042901, 2012.
- [23] A. Zurbuchen et al., "Energy harvesting from the beating heart by a mass imbalance oscillation generator," *Ann Biomed Eng.*, 2013.
- [24] C. Dagdeviren et al., "Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm," *PNAS*, 2013.
- [25] S. Platt et al., "On low-frequency electric power generation with PZT ceramics," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, pp. 240-252, 2005.
- [26] M. Deterre et al., "Micromachined piezoelectric spirals and ultra-compliant packaging for blood pressure energy harvesters powering medical implants," *Proc. MEMS*, pp. 249-252, 2013.
- [27] S. Boisseau et al., "Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters," *Proc. PowerMEMS*, 2013.
- [28] P. Gasnier et al., "An Autonomous Piezoelectric Energy Harvesting IC based on a Synchronous Multi-Shots Technique," *Proc. Essecirc*, 2013.
- [29] T. Hehn et al., "A fully autonomous pulsed synchronous charge extractor for high-voltage piezoelectric harvesters," *Proc. Essecirc*, pp. 371-374, 2011.
- [30] A. Romani et al., "Micropower design of a fully autonomous energy harvesting circuit for arrays of piezoelectric transducers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 729-739, 2014.
- [31] J. O Callaghan. (2013) How Energy Harvesting Wireless Paves the Way to the Internet of Things. [Online]. www.rtc magazine.com/articles/view/103206