



HAL
open science

Autonomie des Systèmes : Récupération d'énergie, Gestion d'énergie et Electronique basse consommation

Sebastien Boisseau

► **To cite this version:**

Sebastien Boisseau. Autonomie des Systèmes : Récupération d'énergie, Gestion d'énergie et Electronique basse consommation. Electronique. Université Grenoble Alpes (France), 2019. tel-02102388

HAL Id: tel-02102388

<https://cea.hal.science/tel-02102388>

Submitted on 17 Apr 2019

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.



Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée par

Sébastien Boisseau

Ecole Doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique,
Traitement du Signal (EEATS)

Préparée au sein du Département Systèmes (DSYS) du CEA-LETI

Autonomie des Systèmes : Récupération d'énergie, Gestion d'énergie et Electronique basse consommation

Habilitation à Diriger des Recherches soutenue publiquement
le **28 mars 2019** devant le jury composé de :

M. Sébastien Grondel

Professeur des Universités – Université polytechnique des
Hauts-de-France / IEMN – Président

M. Nouredine Bouhaddi

Professeur des Universités – Université de Bourgogne-
Franche-Comté / Femto-ST – Rapporteur

M. Lionel Petit

Professeur des Universités – INSA de Lyon / LGEF –
Rapporteur

Mme Guylaine Poulin-Vittrant

Chargée de Recherche – CNRS / GREMAN Tours –
Rapporteur

M. Skandar Basrour

Professeur des Universités – Université Grenoble-Alpes /
TIMA – Examineur

M. Danick Briand

Enseignant-Chercheur – EPFL – Examineur



Préambule

L'Habilitation à Diriger des Recherches est une reconnaissance du travail fourni par un chercheur sur les aspects scientifiques, stratégiques et humains. Elle est également pour moi l'opportunité de présenter un bilan de mes activités et de leurs perspectives après dix ans de recherche.

Intégré dans les équipes du CEA Grenoble, au sein du département Systèmes, mes recherches se sont focalisées sur l'Autonomie des Systèmes de Capteurs, incluant la récupération d'énergie, la gestion d'énergie et l'électronique basse consommation. L'énergie est le fil conducteur de ces activités, permettant de passer d'un monde de la physique comme la mécanique, à l'électricité puis à l'électronique. Elle donne la possibilité de construire des modèles permettant de comprendre le fonctionnement de systèmes multiphysiques couplés. Appliquée à la récupération d'énergie, elle expliquera par exemple pourquoi une turbine ralentit lorsqu'on en extrait de l'énergie électrique ou pourquoi l'adaptation d'impédance au sens large permet de maximiser la puissance produite par un système.

Ces années au CEA ont été riches de projets en partenariat avec des acteurs privés et institutionnels. Les concepts issus de ces projets ont conduit à la réalisation de prototypes qui ont permis de valider les modèles, d'optimiser les performances et surtout de démontrer la viabilité de la récupération d'énergie pour rendre autonomes les systèmes électroniques. Les résultats présentés par la suite sont bien évidemment le fruit d'un travail d'équipe, et n'auraient pas été possibles sans les doctorants, les électroniciens, les mécaniciens, le management, les BizDevs et les équipes support du Département Systèmes et d'autres départements du CEA.

La gestion de projets et d'équipes projet a également représenté une partie importante de mes activités. A l'interface entre les équipes du CEA et de nos partenaires, la gestion de projets est toujours une expérience enrichissante conjuguant des aspects techniques (innovation, pragmatisme), stratégiques (roadmaps) et humains (confiance, délégation) pour atteindre les objectifs.

Aujourd'hui expert CEA et responsable de l'axe autonomie des systèmes de capteurs, je participe également à la stratégie du département Systèmes avec identification et évaluation de nouvelles technologies en matière de récupération d'énergie et de systèmes basse consommation.

Ce mémoire présente un bilan de ces sept années de recherche après la thèse. Il se compose de quatre sections, la première portant sur mon Curriculum Vitae et la seconde sur mes activités de recherche et d'encadrement. Les travaux scientifiques que j'ai conduits et les brevets et publications associés sont synthétisés Section 3. Enfin, des perspectives sont proposées Section 4.

Sommaire

Préambule	3
Sommaire.....	5
1 Curriculum Vitae	7
1.1 Etat Civil.....	7
1.2 Situation actuelle	7
1.3 Parcours.....	7
1.4 Activités d'enseignement	7
1.5 Synthèse des activités de recherche.....	8
a. Domaines de recherche.....	8
b. Production Scientifique et Bibliométrie.....	8
c. Brevets.....	8
d. Encadrements	8
e. Expertises	8
1.6 Collaborations académiques hors projets	9
1.7 Synthèse des projets industriels et collaboratifs.....	9
1.8 Résumé des travaux de recherche depuis 2011	10
a. Approche Système	10
b. Récupération d'énergie	10
c. Gestion d'énergie.....	12
2 Activités d'encadrement, de la recherche et publications	14
2.1 Activités d'encadrement.....	14
a. Encadrement de thèses (2 thèses soutenues – 1 en démarrage)	14
b. Stages de Master (3)	15
c. TIPEs / CPGE (2).....	15
d. Gestion d'équipe projet (6)	15
2.2 Activités de la recherche	15
a. Relectures d'articles scientifiques (28).....	15
b. Expertises de projet (6)	15
c. Participation à des jurys de thèses (4)	16
d. Autres jurys (1).....	16
e. Participation à la vie de la communauté scientifique.....	16
f. Montages de projets.....	16
2.3 Brevets déposés depuis 2011 (11)	17
2.4 Publications depuis 2011	17
a. Chapitres de livres (4)	17
b. Revues internationales avec comité de lecture (14)	17
c. Conférences internationales à comité de lecture avec actes (23)	18
d. Conférences nationales (6).....	19
e. Actes de communications/vulgarisation et séminaires (9)	20
3 Autonomie des Systèmes – Synthèse des activités de recherche depuis 2011	21
Introduction – Récupération d'énergie & Approche système	21
3.1 Energies ambiantes et récupération d'énergie – Etat de l'Art.....	21
a. Sources ambiantes et conversions d'énergie	21
b. Energie lumineuse.....	22
c. Energie des ondes RF.....	24
d. Energie thermique – Gradients et variations de température	24
e. Energie des écoulements d'air et d'eau	28

f.	Energie des vibrations	30
g.	Energie des chocs, contraintes et déformations.....	35
h.	Energie acoustique	38
i.	Bilans	40
3.2	Systèmes autonomes communicants et chaine de récupération d'énergie.....	41
a.	Analyse fonctionnelle	41
b.	Systèmes autonomes communicants et besoins	43
c.	Chaine de récupération d'énergie.....	45
3.3	Récupérateurs d'énergie à conversion électrostatique à électrets	45
a.	Conversion électrostatique à électret - Modèle général.....	46
b.	Electrets, texturation et stabilité.....	49
c.	Récupération d'énergie thermique par bilames	51
d.	Récupération d'énergie des flux d'air – fluttering & microturbinés.....	54
e.	Utilisation de liquides pour la conversion électrostatique à électrets.....	63
3.4	Récupérateurs d'énergie à conversion électromagnétique	63
a.	Conversion électromagnétique - Modèle général.....	64
b.	Récupération d'énergie des écoulements d'eau	65
c.	Systèmes basse fréquence et application à la récupération d'énergie biomécanique	68
d.	Récupération d'énergie des chocs.....	77
3.5	Récupérateurs d'énergie à conversion piézoélectrique.....	80
a.	Modèle général – conversion piézoélectrique et récupération d'énergie vibratoire.....	80
b.	Récupérateur d'énergie vibratoire pour applications aéronautiques.....	81
3.6	Systèmes mécaniques.....	83
a.	Ressorts non-linéaires en H.....	83
b.	Système masse-ressort à faible débattement vertical	87
3.7	Electroniques de gestion d'énergie.....	89
a.	Blocs basse consommation en électronique discrète – Comparateur à hystérésis.....	89
b.	Architectures non-linéaires & démarrage à froid	91
c.	Architectures non-linéaires pour récupérateurs d'énergie en parallèle	97
3.8	Conclusions.....	100
4	Perspectives de Recherche	101
4.1	Vers une démocratisation de la récupération d'énergie.....	101
4.2	Vers des systèmes plus robustes.....	101
4.3	Systèmes bas cout et environnements sévères comme axe de démarcation	102
4.4	Récupération d'énergie RF et transmission de puissance sans fil	102
4.5	Vers des systèmes miniaturisés	102
4.6	Applications aux domaines des capteurs et à la fonctionnalisation des surfaces.....	103
5	Bibliographie	104
	Résumé.....	109
	Abstract	109
	Remerciements.....	110

1 Curriculum Vitae

1.1 Etat Civil

Sébastien Boisseau

13/10/1985, Semur-en-Auxois (21)

33 ans

Nationalité Française

1.2 Situation actuelle

- Ingénieur de Recherche CEA – Département Systèmes (DSYS)
- Expert CEA
- Responsable de l'axe "Autonomie des Systèmes de Capteurs"

Domaines de recherche :

- Autonomie des Systèmes - Récupération d'énergie et Electronique basse consommation



Coordonnées professionnelles :
 CEA-LETI
 DSYS/SSCE/LAIC
 17, rue des martyrs
 38054 Grenoble Cedex 9
 sebastien.boisseau@cea.fr

1.3 Parcours

- 2011-2018 Ingénieur de Recherche, CEA Grenoble, LETI/DSYS
 Autonomie des Systèmes – Récupération d'énergie et Electronique basse consommation
- 2008-2011 Doctorat – CEA Grenoble (LETI/DSYS) et G2ELab
 Sujet : Récupération d'énergie vibratoire à électrets
 Soutenue le 20 octobre 2011 à Grenoble, devant le jury composé de :
- Sylvain Ballandras, Directeur de Recherche, Femto-ST, Besançon, Rapporteur
 - Lionel Petit, Professeur, INSA Lyon, Villeurbanne, Rapporteur
 - Skandar Basrour, Professeur, UJF, Grenoble, Président du Jury
 - François Costa, Professeur, IUFM Créteil, Paris, Membre
 - Lucien Dascalescu, Professeur, Université de Poitiers, Angoulême, Membre
 - Jean-François Rouchon, Professeur, ENSEEIHT, Toulouse, Membre
 - Alain Sylvestre, Maître de conférences, UJF, Grenoble, Directeur de thèse
 - Ghislain Despesse, Ingénieur-Chercheur, CEA-LETI, Grenoble, Encadrant CEA
- 2007-2008 Master Recherche – Option Micro et Nanotechnologies – Université des Sciences et Technologie de Lille (Lille 1)
- 2005-2008 Ingénieur – Ecole Centrale de Lille
 Spécialisation en Ondes, Micro et Nano Technologies

1.4 Activités d'enseignement

Années	Descriptif	Etablissement
2018	Intervention – Récupération d'énergie	INSA Lyon, Villeurbanne
2013-2015	BE MEMS	ENSE3, Grenoble
2010-2013	Colles de mathématiques en MPSI et PCSI	Lycée Champollion, Grenoble
2010-2011	TP Spectroscopie diélectrique	Polytech'Grenoble, Grenoble

1.5 Synthèse des activités de recherche

a. Domaines de recherche

- Autonomie des Systèmes
 - o Récupération d'énergie
 - o Gestion d'énergie
 - o Electronique basse consommation

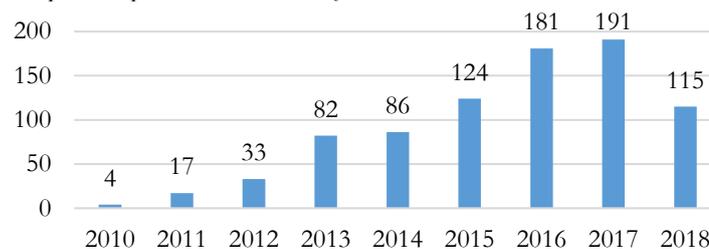
b. Production Scientifique et Bibliométrie

⇒ 1 à 2 articles de journaux scientifiques et 2 à 3 articles de conférences par an en auteur ou en co-auteur depuis 2011:

- 14 articles de journaux scientifiques
- 4 chapitres de livre
- 21 articles de conférences internationales à comité de lecture avec actes
- 6 articles de conférences nationales
- 9 actes de communication/vulgarisation/séminaire

⇒ h-index :

- Google Scholar : 14
 - o 837 citations réparties par année de la façon suivante :



- Web of Science : 10
- Scopus : 11

c. Brevets

- 11 brevets déposés depuis 2011 ⇒ 1 à 2 brevets par an en moyenne

d. Encadrements

- 2 thèses soutenues et 1 thèse en cours
- 3 stages de master encadrés
- 2 TIPEs encadrés
- Gestion d'équipe projet de 2 à 3 personnes dans le cadre de 6 projets

e. Expertises

- Expert OMNT, Observatoire des Micro et Nanotechnologies
- Expert CEA depuis 2016 : réflexion sur les axes stratégiques, responsable de l'axe "Autonomie des Systèmes de Capteurs"
- 1 analyse de projet par an en moyenne (ANR, Ville de Paris,...)
- 3 relectures d'articles scientifiques par an en moyenne (Smart Materials and Structures, Journal of Micromechanics and Microengineering, Applied Physics Letters,...)

1.6 Collaborations académiques hors projets

Collaboration	Cadre
G2Elab	<ul style="list-style-type: none"> - Thèse de Matthias Perez sur l'étude de récupérateurs d'énergie électrostatiques pour les écoulements d'air (JL. Reboud) [BR9, JS5, JS7, JS12, CI11, CI14, CI21] - Thèse de Boris Gusarov sur l'étude de récupérateurs d'énergie couplant les alliages à mémoire de forme au PVDF (O. Cugat, L. Gimenez) [JS8, CI13]
ESIEE Paris / ESYCOM	<ul style="list-style-type: none"> - Polarisation de structures MEMS de l'ESIEE Paris / ESYCOM en vue de former des électrets et tests d'électronique de gestion d'énergie ultra basse consommation avec alimentation de capteurs autonomes communicants (P. Basset) [JS6, JS9, CI15, CI16]
LTM	<ul style="list-style-type: none"> - Impact du potentiel de surface du Téflon sur les temps de glaciation de gouttes d'eau (C. Gourgon) [JS14]

1.7 Synthèse des projets industriels et collaboratifs

Années	Projet	Type de projet et objectifs	Partenaires	Rôle	Publications associées
2010-2013	HBS	FUI – MEMS de récupération d'énergie électrostatique pour le cœur	Sorin, TIMA, Cedrat, UJF, e2v, Tronics, Easii-IC	Modélisation, simulation, et caractérisation des démonstrateurs.	BR3, CI3, CI6
2013-2015	Vibr'Energy	Industriel – Récupérateur d'énergie pour le domaine militaire / Récupération d'énergie du choc à 20000G	Nexter Munitions	Montage de projet, Analyse de Faisabilité, Modélisation et simulations	CI17
2012-2016	HEATec	FUI – Récupération d'énergie à base de bilame thermique	ST, Genes'ink, DeltaConcept	Montage de projet, Chef de Projet CEA, Conception, réalisation et tests des démonstrateurs.	BR4, JS3, CI8, CI10
2015-2016	ITK	H2020 – Débitmètre autonome, récupération d'énergie des écoulements d'eau dans une canalisation	ITK	Montage de projet, Chef de projet CEA, Simulation et tests des démonstrateurs.	CI18
2015-2016	R'Cup	H2020 – Semelles intelligentes ultra basse consommation	R'Cup	Montage de projet, Conception et caractérisation du système	
2016-2018	InDeal	H2020 – Capteurs autonomes pour réseaux d'eau chaude et d'eau froide	City University, Cemitec, CERTH, IZNAB, CETRI, Net Technologies, Promar, Energetika, SNCU	Montage de projet, Expertise Technique	JS14

Années	Projet	Type de projet et objectifs	Partenaires	Rôle	Publications associées
2016-2017	L*	Industriel – Récupération d'énergie vibratoire – Industrie du luxe	Confidentiel	Montage du projet, Chef de Projet CEA, Modélisation des dispositifs, Electronique de gestion, Caractérisations des dispositifs	
2016-2018	Secur'Sport	FUI – Semelles intelligentes et récupération d'énergie dans la semelle	Natural Grass, Arts et Metiers, Cityzen Sciences, FeetMe	Montage du projet, Chef de Projet CEA, Conception du système	
2017-2019	Convergence	H2020 – Intégration système de capteurs basse consommation et récupération d'énergie	15 partenaires européens	Montage du projet, Suivi et expertise technique	
2017-2018	C*	Industriel – Récupération d'énergie Automobile	Industriel / Confidentiel	Montage du projet, Chef de Projet CEA, Modélisation des dispositifs, Electronique de gestion d'énergie	
2017-2019	U*	Industriel – Récupération d'énergie – conversion électromagnétique	Industriel / Confidentiel	Montage du projet, Chef de Projet CEA, Modélisation des dispositifs, Electronique de gestion d'énergie	

1.8 Résumé des travaux de recherche depuis 2011

Mes travaux de recherche sur la récupération d'énergie et l'autonomie des systèmes ont été réalisés au sein du Département Systèmes (DSYS) du CEA-LETI, où j'exerce en tant qu'ingénieur de recherche et chef de projet. Mon objectif principal depuis la fin de ma thèse a été d'accroître les collaborations et les axes de recherche avec des partenaires CEA, institutionnels et industriels dans le domaine de la récupération d'énergie et des systèmes autonomes communicants. J'ai ainsi monté ou participé au montage de plus d'une quinzaine de projets en lien avec cette thématique, dont la moitié avec des partenaires industriels. Ces projets ont donné lieu à des modèles avancés et des prototypes de récupérateurs d'énergie, de circuits de gestion d'énergie ou de systèmes électroniques basse consommation, qui ont fait l'objet de publications scientifiques ou de brevets. Ces travaux de recherche sont synthétisés ci-après et détaillés Section 3.

a. Approche Système

L'approche "Système" a été mon fil conducteur pendant ces sept années de recherche, avec l'objectif de travailler sur des systèmes complets allant de la source d'énergie ambiante au dispositif autonome communicant. Ainsi, mes investigations ont porté sur l'ensemble de la chaîne de récupération d'énergie, sur les récupérateurs d'énergie et notamment les récupérateurs d'énergie mécanique, sur les électroniques de gestion d'énergie et sur les systèmes basse consommation; mais également sur les compromis indispensables à chaque étage de la chaîne pour assurer le fonctionnement de l'ensemble.

b. Récupération d'énergie

Mes recherches sur les récupérateurs d'énergie ont essentiellement porté sur les convertisseurs électrostatiques et sur les convertisseurs électromagnétiques.

→ [Convertisseurs électrostatiques \(électrets, convertisseur et triboélectricité\)](#)

- [Adaptation des convertisseurs électrostatiques à d'autres sources d'énergie ambiantes](#)

Cela m'a tout d'abord conduit à transposer le convertisseur électrostatique à électrets, appliqué au vibrotoire pendant ma thèse, à d'autres types de récupération d'énergie et notamment à la récupération d'énergie des gradients thermiques via l'utilisation de bilames (projet HEATec) [BR4, JS3, CI8, CI10] puis à la récupération d'énergie des flux d'air en exploitant des effets de fluttering ou des microturbines électrostatiques (thèse M. Perez) [BR9, JS5, JS7, JS12, CI11, CI14, CI21].

- [Electrets et stabilité](#)

Mes travaux ont également porté sur la stabilité des électrets, la fabrication d'électrets texturés et la réalisation d'électrets de grande surface. Les électrets en $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{HMDS}$ et en Téflon se sont révélés particulièrement stables (stabilité à 5 ans validée avec moins de 4% de décharge) à condition d'être maintenus dans des environnements secs et sans poussière. La compatibilité du chargement des électrets avec des procédés 200mm a également été validée et appliquée dans le cadre du projet HBS pour la réalisation de MEMS électrostatiques de récupération d'énergie pour pacemakers autonomes [CI3, CI6]. Des actions communes de recherche ont également été menées avec ESIEE Paris/ESYCOM sur la polarisation de leurs structures MEMS par décharge Corona [JS6, JS9, CI15, CI16].

- [Triboélectricité](#)

Nous nous sommes néanmoins rendus compte qu'il était extrêmement difficile d'avoir des électrets stables dans des environnements sévères (chaleur, poussière, humidité). La triboélectricité est alors apparue comme une alternative aux électrets, permettant de gagner en robustesse. La triboélectricité, phénomène d'échange de charges électriques entre deux surfaces entrant en contact, permet en effet de recharger le "tribo"-électret tout au long de la durée de vie du système. Ce principe a notamment été mis en application pour la récupération d'énergie des écoulements d'air (thèse M. Perez) [JS12, CI20, CI21] et pour la récupération d'énergie dans les textiles (Thèse M. Geisler).

→ [Convertisseurs électromagnétiques \(chocs, turbines & générateurs basse fréquence\)](#)

La conversion électromagnétique, bien qu'ancienne, présente encore un intérêt fort pour la récupération d'énergie, permettant de réaliser des systèmes robustes et bas cout. J'ai travaillé sur différents concepts de récupérateurs d'énergie électromagnétiques et notamment dans le cadre de collaborations avec des partenaires privés.

- [Récupération d'énergie des chocs](#)

J'ai tout d'abord participé au développement d'un système de récupération d'énergie de chocs à 20000G pour des applications militaires, testé et validé en environnement réel, et présentant l'une des plus fortes densités de puissance de l'état de l'art [CI17].

- [Récupération d'énergie des flux d'eau](#)

J'ai également travaillé sur le développement de turbines à conversion électromagnétique pour la récupération d'énergie des écoulements d'eau. L'objectif était de minimiser la perte de charge induite par l'extraction d'énergie pour des applications de suivi de la consommation d'eau pour l'agriculture. Les récupérateurs d'énergie ont montré une perte de charge inférieure à 0.05 bars, équivalente à la perte de charge induite par un débitmètre à hélice standard et ouvrant la possibilité de développer des débitmètres autonomes communicants [CI18]. Ce concept a ensuite été adapté à de la récupération d'énergie des flux d'eau dans des réseaux de distribution d'eau chaude [JS14].

- [Récupération d'énergie biomécanique](#)

Finalement, la conversion électromagnétique a été mise en œuvre pour réaliser des systèmes de récupération d'énergie inertiels des mouvements humains dans le but d'alimenter des capteurs pour vêtements intelligents; ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Matthias Geisler, que j'ai encadrée avec Simon Perraud (CEA-LITEN) en directeur de thèse, et Cityzen Sciences comme entreprise

partenaire. Une optimisation sous contrainte de ces systèmes nous a permis d'atteindre des densités de puissance parmi les plus élevées de l'état de l'art [JS10, JS11, CI19].

→ [Convertisseurs piézoélectriques](#)

Finalement, la conversion piézoélectrique permet de réaliser des dispositifs de récupération d'énergie présentant une forte densité de puissance; en particulier pour la récupération d'énergie vibratoire. Ce convertisseur est par ailleurs bien adapté à la réduction des dimensions et aux technologies MEMS.

- [Récupérateur d'énergie vibratoire pour applications aéronautiques](#)

Nous présentons un dispositif de récupération d'énergie macroscopique développé pour des applications aéronautiques. Il se démarque de l'état de l'art par sa robustesse aux environnements sévères (>90°C, 20G d'accélération); nous faisons également la démonstration de l'alimentation d'un système complet testé en environnement réel avec récupération d'énergie, gestion d'énergie et alimentation d'un système de mesure d'accélération 3 axes.

→ [Conception de systèmes mécaniques](#)

L'aspect mécanique joue un rôle primordial dans le comportement des systèmes de récupération d'énergie vibratoire. Aussi, j'ai mené deux actions de recherche sur ce sujet : (i) la conception d'un système masse-ressort à faible débattement vertical pour les structures électrostatiques à électrets et (ii) l'étude de ressorts non-linéaires ajustables (structures en H) pour des récupérateurs d'énergie exploitant des vibrations variant en fréquence et en amplitude dans le temps.

- [Système masse-ressort à faible débattement vertical](#)

Les récupérateurs d'énergie électrostatiques à électrets sont constitués de 2 plaques superposées ; la plaque supérieure intégrant les ressorts et les électrets et la plaque inférieure les contre-électrodes. La force électrostatique entre les deux plaques peut entraîner un phénomène de collage (pull-in). Il est donc nécessaire d'avoir un ressort très rigide selon l'axe vertical et assez souple selon l'axe horizontal. La solution que nous avons proposée consiste à utiliser un cadre de rigidification dont le principe a été breveté [BR3] et validé en simulations éléments finis et expérimentalement.

- [Ressorts en H pour l'ajustement des effets non-linéaires](#)

Les effets non-linéaires sont régulièrement utilisés en récupération d'énergie pour accroître la bande passante des dispositifs. Nous avons proposé une structure de ressorts (ressorts en H) permettant d'ajuster le coefficient de non-linéarité de la raideur (k_3). L'impact de la non-linéarité a ensuite été simulé avec des vibrations réelles, montrant que l'apport des ressorts non-linéaires est difficile à anticiper et à généraliser; dans certains cas ils permettent d'accroître la puissance de sortie alors que dans d'autres cas ils n'apportent pas ou peu d'améliorations [JS2].

c. [Gestion d'énergie](#)

Les circuits de gestion d'énergie sont un élément clé de la chaîne de récupération d'énergie. Mes travaux de recherche sur ces circuits ont porté sur le développement de systèmes auto-démarrant [CI9] ainsi que sur la mise en œuvre des techniques non-linéaires à l'électrostatique [CI11] puis à la piézoélectricité [CI12]. Ces travaux ont conduit à la réalisation de blocs discrets basse consommation tels que des comparateurs à hystérésis [BR1].

→ [Démarrage à froid des électroniques de gestion d'énergie – systèmes sans pile](#)

La récupération d'énergie permet de développer des systèmes électroniques n'utilisant pas de batterie. Néanmoins, il peut être délicat de démarrer l'électronique et notamment l'électronique de gestion d'énergie (comparateur, transistor), sans énergie initiale. Pour résoudre ce problème, une solution que nous avons proposée consiste à alterner entre un mode de conversion d'énergie "passif" et un mode de conversion "actif" à deux capacités pour minimiser les temps de démarrage [CI9]. Ce circuit a été validé sur les générateurs piézoélectriques et électrostatiques à électrets; le principe a finalement été mis en œuvre dans un ASIC (thèse de P. Gasnier - [JS4]).

→ [Gestion d'énergie sur générateurs en parallèle](#)

Un autre volet de mes recherches a porté sur le développement de circuits de gestion d'énergie pour des récupérateurs d'énergie en parallèle; tout d'abord pour les dispositifs piézoélectriques [CI12], puis pour les dispositifs électrostatiques à électrets [CI20]. Dans les deux cas, une topologie flyback mettant en œuvre l'extraction synchrone (SECE) a été utilisée.

→ [Blocs discrets basse consommation - Comparateur à hystérésis](#)

La réalisation des électroniques de gestion d'énergie mentionnées précédemment a régulièrement nécessité le développement de fonctions de base n'existant pas sous la forme de composants intégrés. C'est notamment le cas de la fonction « comparateur à hystérésis » ultra basse consommation permettant de maintenir la fonction à alimenter déconnectée tant que la tension aux bornes de la capacité de stockage n'est pas suffisante. Avec une consommation inférieure à 50nA, ce circuit a été appliqué à tous nos circuits auto-démarrant [BR1] ainsi qu'aux systèmes de récupération d'énergie vibratoire [CI15, CI16] et RF de l'ESIEE/ESYCOM.

2 Activités d'encadrement, de la recherche et publications

2.1 Activités d'encadrement

a. Encadrement de thèses (2 thèses soutenues – 1 en démarrage)

Nom / Années	Description
Matthias Perez 2013-2016 Encadrement : 75%	Micro-récupération d'énergie des écoulements d'air par conversion électrostatique Résumé : Conception de récupérateurs d'énergie des flux d'air à base de conversion électrostatique. Deux grands principes ont été étudiés : les systèmes à base de fluttering et les microturbines Directeur de thèse : Jean-Luc Reboud (Professeur U. Grenoble-Alpes, Grenoble) Soutenance : 21/11/2016 - Admis Jury : Philippe Basset, Skandar Basrou, Olivier Doaré, Lucian Dascalescu, Lionel Petit, Sébastien Boisseau, Jean-Luc Reboud Publications & Brevets : BR9, JS5, JS7, JS12, CI11, CI14, CI20, CI21, CN3 Prix : Best Student Poster Award - Electrostatics 2015 Matthias Perez est actuellement en post-doc au LaMCoS (INSA Lyon).
Matthias Geisler 2014-2017 Encadrement : 75%	Récupération d'énergie mécanique pour vêtements connectés autonomes Résumé : Etude de trois concepts de récupérateurs d'énergie mécanique adaptés aux vêtements connectés. Mise en œuvre des approches électromagnétiques et triboélectriques Directeur de thèse : Simon Perraud (Ingénieur – Chercheur CEA-LITEN, Grenoble) Soutenance : 30/11/2017 - Admis Jury : Bernard Multon, Lionel Petit, Claire Jean-Mistral, Skandar Basrou, Noureddine Bouhaddi, Simon Perraud, Sébastien Boisseau Publications & Brevets : JS10, JS11, CI19, CN6 Matthias Geisler travaille actuellement dans la startup Styckr, qui se positionne sur la réalisation de systèmes autonomes à base de récupération d'énergie.
Olivier Freychet 2018-2021 Encadrement prévu : 30%	Transmission d'énergie et d'information au travers de parois métalliques Résumé : Cette thèse se propose d'étudier l'optimisation de la transmission sans fil d'énergie et d'informations, par le vecteur d'ondes mécaniques, au travers de parois métalliques opaques aux ondes radios. Les domaines d'applications concernés sont l'aéronautique, le naval et l'industrie pétrolière. Directeur de thèse : Ghislain Despesse (Ingénieur – Chercheur CEA-LETI, Grenoble) Co-encadrant : François Frassati (Ingénieur – Chercheur CEA-LETI, Grenoble)

b. Stages de Master (3)

Nom / Années	Description
Frédéric Pfister 2012 Encadrement : 80%	Chaîne de mesure très basse consommation pour des applications de récupération d'énergie.
Ugo Blandin 2015 Encadrement : 70%	Débitmètre autonome. Système de récupération d'énergie des flux d'eau exploitant une microturbine
Thomas Fayer 2016 Encadrement : 10%	Récupération d'énergie des flux d'airs pour des applications de chauffage, ventilation et climatisation : étude, simulation et caractérisation de micro-turbines pour les faibles vitesses d'air

c. TIPES / CPGE (2)

Années	Description
2011	Titre : Récupération d'énergie vibratoire à électrets Noms : Clémentine Renevier, Raphaël Payet-Burin (Lycée Champollion, Grenoble)
2014	Titre : Récupération d'énergie vibratoire à électrets Noms : Quentin Baudenon, Alban Cardonne, Maxime Manote (Lycée Pierre de Fermat, Toulouse)

d. Gestion d'équipe projet (6)

Années	Projet	Description
2012-2016	HEATec	Equipe de 3 personnes
2015-2016	ITK	Equipe de 2 personnes
2016-2017	Domaine du Luxe	Equipe de 3 personnes
2016-2018	Secur'Sport	Equipe de 3 personnes
2017-2018	Domaine de l'Automobile	Equipe de 2 personnes
2017-2019	Domaine de la Domotique	Equipe de 7 personnes

2.2 Activités de la recherche

a. Relectures d'articles scientifiques (28)

- 28 papiers au total depuis 2011 ⇒ 3 à 4 articles scientifiques analysés par an en moyenne

Journal	Nombre
Smart Materials and Structures	5
Sensors	3
Applied Physics Letters	2
AIP Advances	2
Sensors and Actuators : A. Physical	2
Journal of Micromech. Microeng.	2
Electron Device Letters	2

Journal	Nombre
Transactions on Power Electronics	1
Nano-Structures & Nano-Objects	1
Materials and Design	1
International Journal of Hydrogen Energy	1
Advances in Mechanical Engineering	1
Articles de conférence	4

- Outstanding Reviewer Award en 2017 et en 2018 - IOP Smart Materials and Structures



b. Expertises de projet (6)

⇒ 1 projet expertisé par an en moyenne

- ANR : 3
- Projets Carnot : 1

- Projets Franco-suisses (ANR-FNS) : 1
- Ville de Paris : 1

c. Participation à des jurys de thèses (4)

Docteur	Description
Arthur Arnaud Mar-2016	Titre : Modélisation et fabrication de systèmes de conversion thermo-mécanique pour la récupération d'énergie thermique Lieu : Grenoble Invité
Matthias Perez Nov-2016	Titre : Micro-récupération d'énergie des écoulements d'air par conversion électrostatique Lieu : Grenoble Encadrant CEA
Matthias Geisler Nov-2017	Titre : Récupération d'énergie mécanique pour vêtements connectés autonomes Lieu : Grenoble Encadrant CEA
Yingxian Lu Juin-2018	Titre : Communication and geolocation of a self-supporting RFID tag powered by low-frequency kinetic energy harvesters on a moving person Lieu : Paris Examineur

d. Autres jurys (1)

Etudiant	Description
Cuong Nguyen Oct-2017	Titre : Analytical modeling of electret-based microgenerators under sinusoidal vibrations – Master of Philosophy Université : The University of Adelaide, Australie Reviewer

e. Participation à la vie de la communauté scientifique

- Contributions à l'OMNT, Observatoire des Micro et Nanotechnologies
- Contributions aux groupes techniques CEA "Matériaux intelligents" et "Environnement"
- Expert CEA depuis 2016 : réflexion sur les axes stratégiques
- Tutoriel sur la récupération d'énergie électrostatique à la PowerMEMS School 2016

f. Montages de projets

Année	Projet	Description	Partenaires	Statut
2011	HEATec	FUI / Bilatéral	STMicroelectronics	Accepté
2012	Vibr-Energy	Bilatéral	Privé	Accepté
2013	G*	Bilatéral	Privé	Accepté
2015	ITK	H2020 Gateone	ITK	Accepté
2015	RCup	H2020 Gateone	R'Cup	Accepté
2015	S4I	H2020	9 partenaires européens	Refusé
2015	InDeal	H2020	City University, Cemitec, CERTH, IZNAB, CETRI, Net Technologies, Promar, Energetika, SNCU	Accepté
2015	Syflex-EhFilms	Projet Carnot	CEA-LITEN	Accepté
2016	Secur'Sport	FUI	Natural Grass, Arts et Metiers, Cityzen Sciences, FeetMe	Accepté
2016	TEESLAS	ANR	ESIEE/ESYCOM, LIP6	Refusé
2016	I*	Bilatéral	Privé	Accepté
2017	Convergence	H2020	15 partenaires européens	Accepté
2017	U*	Bilatéral	Privé	Accepté
2017	C*	Bilatéral	Privé	Accepté

2.3 Brevets déposés depuis 2011 (11)

⇒ 1 à 2 brevets déposés par an en moyenne

- BR1. S. Boisseau, G. Despesse, "Circuit de comparaison d'une tension à un seuil et conversion d'énergie électrique", EP2932588, 2012
- BR2. G. Despesse, S. Boisseau, D. Vicard, "Dispositif électrostatique de récupération d'énergie par effet triboélectrique", FR2987708, 2013
- BR3. S. Boisseau, JJ Chaillout, G. Despesse, AB. Duret, "Système masse-ressort à faible débattement transverse", FR3014093, 2013
- BR4. S. Monfray, A. Arnaud, T. Skotnicki, O. Puscasu, S. Boisseau, "Dispositif de conversion d'énergie thermique en énergie électrique", FR3009653, 2013
- BR5. M. Aubouy, S. Boisseau, G. Despesse, JF Mainguet, A. Paleologue, "Procédé de contrôle de l'authenticité d'un produit contenu dans un emballage", FR3017971, 2014
- BR6. S. Trochut, J. Willemin, S. Boisseau, S. Monfray, "Circuit de comparaison d'une tension a un seuil", US2016172898, 2014
- BR7. S. Boisseau, G. Despesse, JF. Mainguet, A. Paleologue, "Dispositif d'indication du niveau de remplissage d'un conteneur", FR3018605, 2014
- BR8. M. Aubouy, S. Boisseau, G. Despesse, JF. Mainguet, A. Paleologue, "Procédé de détection d'un rebouchage frauduleux d'une bouteille", FR3017860, 2014
- BR9. M. Perez, S. Boisseau, JL Reboud, "Convertisseur électrostatique", FR3046436, 2016
- BR10. S. Boisseau, G. Despesse, M. Boucaud, "Convertisseur d'énergie électromagnétique", FR1759028, 2017
- BR11. G. Despesse, S. Boisseau, "Convertisseur d'énergie électromagnétique", EP3435528, 2017

2.4 Publications depuis 2011

⇒ 1 à 2 articles de journaux scientifiques et 2 à 3 articles de conférence par an en auteur ou en co-auteur

a. Chapitres de livres (4)

- CL1. G. Despesse, J-J. Chaillout, S. Boisseau and C. Jean-Mistral, "La récupération d'énergie mécanique", Micro et nanosystèmes autonomes en énergie: des applications aux fonctions et technologies – Chapitre 6, Traité EGEM, Editions Hermes-Lavoisier, 2012
- CL2. S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, "Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting", Small-Scale Energy Harvesting – Chapitre 5, Intech, 2012
- CL3. B. Ahmed Seddik, G. Despesse, S. Boisseau and E. Defay, "Strategies for Wideband Mechanical Energy Harvester", Small-Scale Energy Harvesting – Chapitre 10, Intech, 2012
- CL4. E. Defay, S. Boisseau, G. Despesse, "Piezoelectric Materials for Energy Harvesting", Micro Energy Harvesting – chapitre 7, Wiley Online Library, 2015

b. Revue internationale avec comité de lecture (14)

- JS1. B. Ahmed Seddik, G. Despesse, S. Boisseau, E. Defay, "Increased Bandwidth of Mechanical Energy Harvester", Sensors & Transducers, 13, 62-72, 2011
- JS2. S. Boisseau, G. Despesse, B. Ahmed Seddik, "Nonlinear h-shaped springs to improve efficiency of vibration energy harvesters", Journal of Applied Mechanics, 80, 6, 061013, 2013
- JS3. S. Boisseau, G. Despesse, S. Monfray, O. Puscasu, T. Skotnicki, "Semi-flexible bimetal-based thermal energy harvesters", Smart Materials and Structures, 22, 2, 025021, 2013
- JS4. P. Gasnier, J. Willemin, S. Boisseau, G. Despesse, C. Condemine, G. Gouvernet, JJ. Chaillout, "An autonomous piezoelectric energy harvesting IC based on a synchronous multi-shot technique", IEEE Journal of Solid-State Circuits, 49, 7, 1561-1570, 2014
- JS5. M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, JL. Reboud, "An electret-based aeroelastic flutter energy harvester", Smart Materials and Structures, 24, 3, 035004, 2015

- JS6. Y. Lu, F. Cottone, S. Boisseau, F. Marty, D. Galayko, P. Basset, "A nonlinear MEMS electrostatic kinetic energy harvester for human-powered biomedical devices", *Applied Physics Letters*, 107, 25, 253902, 2015
- JS7. M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, M. Geisler, JL Reboud, "A cm scale electret-based electrostatic wind turbine for low-speed energy harvesting applications", *Smart materials and structures*, 25, 4, 045015, 2016
- JS8. B. Gusarov, E. Gusarova, B. Viala, L. Gimeno, S. Boisseau, O. Cugat, E. Vandelle, B. Louison, "Thermal energy harvesting by piezoelectric PVDF polymer coupled with shape memory alloy", *Sensors and Actuators A: Physical*, 243, 175-181, 2016
- JS9. Y. Lu, E. O'Riordan, F. Cottone, S. Boisseau, D. Galayko, E. Blokhina, F. Marty, P. Basset, "A batch-fabricated electret-biased wideband MEMS vibration energy harvester with frequency-up conversion behavior powering a UHF wireless sensor node", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26, 12, 124004, 2016
- JS10. M. Geisler, S. Boisseau, M. Perez, P. Gasnier, J. Willemin, I. Ait-Ali, S. Perraud, "Human-motion energy harvester for autonomous body area sensors", *Smart Materials and Structures*, 26, 3, 035028, 2017
- JS11. M. Geisler, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, C. Gobbo, G. Despesse, I. Ait-Ali, S. Perraud, "Looped energy harvester for human motion", *Smart Materials and Structures*, 2017
- JS12. M. Perez, S. Boisseau, M. Geisler, P. Gasnier, J. Willemin, G. Despesse, JL Reboud, "Aeroelastic flutter energy harvesters self-polarized by triboelectric effects", *Smart Materials and Structures*, 2017
- JS13. N. Frolet, J. Durret, M. Panabière, S. Boisseau, C. Gourgon, "Impact of Surface Electrostatic Potential on Icephobic Properties of Nanoimprinted Flexible Polymer Foils", *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2018
- JS14. P. Gasnier, E. Saoutieff, S. Boisseau, O. Soriano, B. Alessandri, J. Ojer-Aranguren, "Cm-Scale Axial Flow Water Turbines for Autonomous Flowmeters: an Experimental Study", *Smart Materials and Structures*, 2018

c. Conférences internationales à comité de lecture avec actes (23)

- CI1. T. Ricart, PP. Lassagne, S. Boisseau, G. Despesse, A. Lefevre, C. Billard, S. Fanget, E. Defay, "Macro energy harvester based on Aluminum Nitride thin films", *Proc. Ultrasonics, IEEE*, 1928 - 1931, 2011
- CI2. P. Gasnier, J. Willemin, JJ. Chaillout, C. Condemine, G. Despesse, S. Boisseau, G. Gouvernet, C. Barla, "Power conversion and integrated circuit architecture for high voltage piezoelectric energy harvesting", *Proc. NEWCAS*, 377-380, 2012
- CI3. S. Boisseau, AB. Duret, JJ. Chaillout, G. Despesse, "New DRIE-Patterned Electrets for Vibration Energy Harvesting", *Proc. 2nd European Energy Conference*, 2012
- CI4. P. Gasnier, M. Andraud, J. Willemin, S. Brulais, S. Boisseau, G. Despesse, C. Condemine, JJ. Chaillout, "An ultra low power maximum voltage detector for piezoelectric and electrostatic energy harvesters", *Proc. NEWCAS*, 2013
- CI5. P. Gasnier, J. Willemin, S. Boisseau, G. Despesse, C. Condemine, G. Gouvernet, J-J. Chaillout, "An autonomous piezoelectric energy harvesting IC based on a synchronous multi-shots technique", *Proc. ESSCIRC*, 2013
- CI6. S. Boisseau, JJ. Chaillout, JS. Danel, JB. Legras, G. Despesse, "Stable DRIE-patterned SiO₂/Si₃N₄ electrets", *Proc. Transducers*, 1942-1945, 2013
- CI7. B. Ahmed-Seddik, G. Despesse, S. Boisseau, E. Defay, "Self-powered resonant frequency tuning for piezoelectric vibration energy harvesters", *Proc. PowerMEMS*, 2013
- CI8. A. Arnaud, S. Boisseau, S. Monfray, O. Puscasu, G. Despesse, J. Boughaleb, Y. Sanchez, F. Battagay, M. Fourel, S. Audran, "Piezoelectric and electrostatic bimetal-based thermal energy harvesters", *Proc. PowerMEMS*, 2013
- CI9. S. Boisseau, P. Gasnier, M. Gallardo, G. Despesse, "Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters", *Proc. PowerMEMS*, 2013

- CI10. J. Boughaleb, S. Monfray, G. Vine, P.J. Cottinet, A. Arnaud, S. Boisseau, AB. Duret, S. Quenard, O. Puscasu, C. Maitre, "SPICE modelling of a coupled piezoelectric-bimetal heat engine for autonomous Wireless Sensor Nodes (WSN) power supply", Proc. PowerMEMS, 2014
- CI11. M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, N. Pourchier, M. Geisler, JL. Reboud, "Electret-based aeroelastic harvester and its self-starting battery-free power management circuit", Proc. NEWCAS, 2015
- CI12. S. Boisseau, P. Gasnier, M. Perez, C. Bouvard, M. Geisler, AB. Duret, G. Despesse, J. Willemin, "Synchronous Electric Charge Extraction for multiple piezoelectric energy harvesters", Proc. NEWCAS, 2015
- CI13. B. Gusarova, L. Gimeno, E. Gusarova, B. Viala, S. Boisseau, O. Cugat, "Flexible composite thermal energy harvester using piezoelectric PVDF polymer and shape memory alloy", Proc. Transducers, 722-725, 2015
- CI14. M. Perez, S. Boisseau, S; JL. Reboud, "Design and performance of a small-scale wind turbine exploiting an electret-based electrostatic conversion", Proc. Electrostatics, 2015
- CI15. Y. Lu, F. Cottone, S. Boisseau, D. Galayko, F. Marty, P. Basset, "Low-frequency MEMS electrostatic vibration energy harvester with corona-charged vertical electrets and nonlinear stoppers", Proc. PowerMEMS, 2015
- CI16. Y. Lu, F. Cottone, S. Boisseau, F. Marty, D. Galayko, P. Basset, "Low-frequency and ultra-wideband MEMS electrostatic vibration energy harvester powering an autonomous wireless temperature sensor node", Proc. MEMS, 2016
- CI17. J. Willemin, S. Boisseau, L. Olmos, M. Gallardo, G. Despesse, T. Robert, "20000G shock energy harvesters for gun-fired munition", Proc. PowerMEMS, 2016
- CI18. S. Boisseau, AB. Duret, M. Perez, E. Jallas, E. Jallas, "Water flow energy harvesters for autonomous flowmeters", Proc. PowerMEMS, 2016
- CI19. M. Geisler, S. Boisseau, M. Perez, I. Ait-Ali, S. Perraud, "Scaling effects in a non-linear electromagnetic energy harvester for wearable sensors", Proc. PowerMEMS, 2016
- CI20. M. Perez, S. Boisseau, M. Geisler, G. Despesse, JL. Reboud, "Trielectret-based aeroelastic flutter energy harvesters", Proc. PowerMEMS, 2016
- CI21. M. Perez, S. Boisseau, M. Geisler, G. Despesse, JL. Reboud, "A triboelectric wind turbine for small-scale energy harvesting", Proc. PowerMEMS, 2016
- CI22. P. Gasnier, J. Willemin, S. Boisseau, B. Goubault de Brugière, G. Pillonnet, B. Gomez, I. Neyret, A Cm-scale, low wind velocity and 250°C-Compliant Airflow-driven Harvester for Aeronautic Applications, Proc. PowerMEMS, 2018
- CI23. P. Gasnier, M. Boucaud, M.Gallardo, J. Willemin, S. Boisseau, A. Morel, D. Gibus, M. Moreau, A 120°C-20G Compliant Vibration Energy Harvester for Aeronautic Environments, Proc. PowerMEMS 2018

d. **Conférences nationales (6)**

- CN1. S. Boisseau, "From Ambient Mechanical Sources to Battery-free Wireless Sensor Nodes", Power Autonomous Communicating Objects, 2013
- CN2. S. Boisseau, P. Gasnier, G. Despesse, J. Willemin, JJ. Chaillout, M. Gallardo, M. Perez, AB. Duret, S. Brulais, S. Riché, "Récupération d'Energie Biomécanique et Systèmes Autonomes", URSI-Journées Scientifiques, 2014
- CN3. M. Perez, S. Boisseau, JL. Reboud, "Power generation from liquid motion combined with electret-based converters", JNRSE, 2015
- CN4. Y. Lu, F. Cottone, F. Marty, P. Basset, D. Galayko, S. Boisseau, "Low-Frequency MEMS Electrostatic Vibration Energy Harvester With Corona Charging of Vertical Electret Thin Film", JNRSE, 2015
- CN5. S. Boisseau, "Récupération d'énergie et autonomie énergétique des objets connectés", URSI-Journées Scientifiques, 2016
- CN6. M. Geisler, S. Boisseau, P. Gasnier, "Mechanical energy harvesting for smart wearables", JNRSE, 2017

e. Actes de communications/vulgarisation et séminaires (9)

- VS1. S. Boisseau, "Vibration Energy Harvesting: Toward autonomous Wireless Sensor Nodes for Industry", LETI Annual Review, 2012
- VS2. S. Boisseau, "Mechanical Energy Harvesting: How to Enable WSN Deployment in an Industrial Context?", IdTechEx, 2012
- VS3. O. Puscasu, S. Monfray, S. Boisseau, C. Maître, P. Ancey, G. Ricotti, F. Boeuf, F. Gaillard, D. Guyomar, T. Skotnicki, "HEATec - an innovative technology for thermal energy harvesting", Energy Harvesting and Storage Conference, 2012
- VS4. S. Boisseau, G. Despesse, "Energy harvesting, wireless sensor networks & opportunities for industrial applications", EETimes, 2012
- VS5. S. Boisseau, G. Despesse, "Vibration energy harvesting for wireless sensor networks: Assessments and perspectives", EETimes, 2012
- VS6. S. Boisseau, JJ Chaillout, M Deterre, R DalMolin, "Toward pacemakers powered by heartbeats", EETimes, 2012
- VS7. R. Dal Molin, A. Nguyen-Dinh, S. Boisseau, "Novel piezoelectric harvester for cardiac implants: Design, Optimisation & Fabrication", Smart Systems Integration, 2013
- VS8. S. Boisseau, "Récupération d'énergie par flux d'air", Synthèse annuelle de l'OMNT, 2015
- VS9. S. Boisseau, "Tutorial on electret-based and triboelectric mechanical energy harvesters", PowerMEMS School, 2016

3 Autonomie des Systèmes – Synthèse des activités de recherche depuis 2011

Introduction – Récupération d'énergie & Approche système

Les objets connectés sont un marché en plein essor. Leur but : ajouter plus d'intelligence, de connectivité, de simplicité d'utilisation aux objets de notre quotidien, aux capteurs industriels, aux compteurs d'eau, d'électricité... Un des verrous majeurs des objets connectés et à plus long terme de l'Internet des Objets (IoT) reste l'autonomie énergétique. Ce challenge peut cependant être levé grâce à la récupération et à la transformation en électricité de l'énergie présente dans l'environnement du dispositif à alimenter.

De nombreux centres de recherche et d'entreprises se sont lancés dans le développement de systèmes autonomes basés sur la récupération d'énergie, allant jusqu'à des produits industrialisés. Que l'énergie de base soit solaire, thermique, mécanique, fluïdique ou RF, la preuve a été faite qu'il est possible d'alimenter de nombreux dispositifs électroniques en exploitant l'énergie ambiante. Cependant, ceci nécessite d'optimiser toute la chaîne énergétique du système, de la puissance électrique produite par le récupérateur à la consommation de l'objet connecté en passant par l'efficacité de conversion du circuit de gestion d'énergie.

Outre l'aspect économique, la récupération d'énergie est un formidable sujet de recherche mettant en œuvre de nombreux phénomènes de couplages multiphysiques, permettant de mettre en place et de valider par l'expérience des modèles avancés, analytiques ou à base d'éléments finis, et dont les résultats et les méthodes de dimensionnement peuvent être adaptés à de nombreux autres sujets de recherche.

Ce mémoire synthétise mes activités de recherche depuis 2011. Un bilan des sources d'énergie ambiantes et des solutions de récupération d'énergie associées est présenté Section 3.1. Les besoins énergétiques des systèmes électroniques et la chaîne de récupération d'énergie sont exposés Section 3.2. Les Sections 3.3 à 3.5 récapitulent mes travaux sur les récupérateurs d'énergie électrostatiques, électromagnétiques et piézoélectriques ; la Section 3.6 sur les systèmes mécaniques. Les électroniques de gestion d'énergie sont finalement traitées Section 3.7. Les perspectives de ces travaux et ma vision sur le futur de la récupération d'énergie sont présentées Section 4.

3.1 Energies ambiantes et récupération d'énergie – Etat de l'Art

a. Sources ambiantes et conversions d'énergie

De nombreuses sources d'énergie ambiantes sont disponibles dans notre environnement et peuvent être classées en 5 grandes catégories: l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie rayonnante, l'énergie fluïdique et l'énergie chimique. Les ordres de grandeurs des densités de puissances disponibles avant conversion sont récapitulées Figure 1. Cinq ordres de grandeur séparent des solutions comme la lumière à l'extérieur et la RF. Néanmoins, la source d'énergie ambiante à privilégier pour alimenter un dispositif électronique dépendra de l'environnement dans lequel il est placé ; un bilan des énergies ambiantes disponibles se révèle toujours indispensable pour sélectionner la solution la plus pertinente.

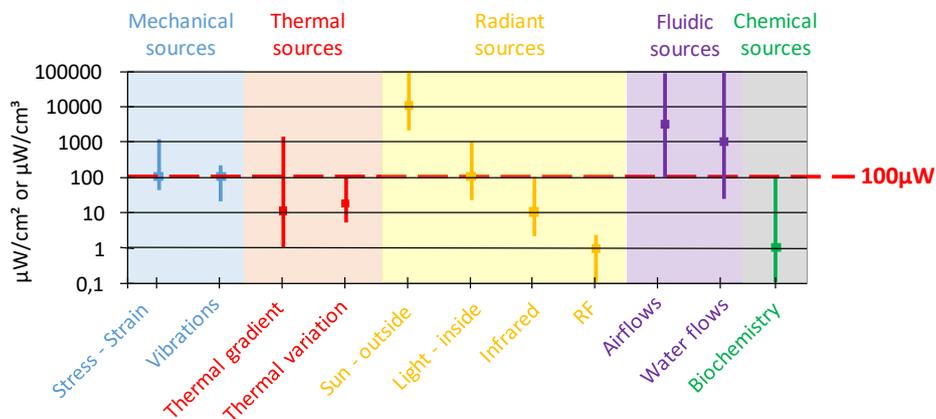


Figure 1 – Sources ambiantes et densités de puissance avant conversion

L'objectif en récupération d'énergie est de transformer cette forme d'énergie ambiante en énergie électrique pour alimenter des capteurs. Cette conversion peut être réalisée en une seule étape ou en plusieurs.

Pour la conversion directe, l'exemple le plus connu est la cellule photovoltaïque transformant l'énergie lumineuse en énergie électrique directement.

Pour la conversion indirecte, on pourra donner l'exemple de la récupération d'énergie des écoulements d'air passant par une étape d'énergie mécanique avant d'être convertie en énergie électrique. Les grands principes de conversion d'énergie sont récapitulés Figure 2 avec l'énergie électrique, qui est notre objectif, placée au centre.

Les sources d'énergie ambiantes et leurs caractéristiques sont détaillées dans les sections suivantes.

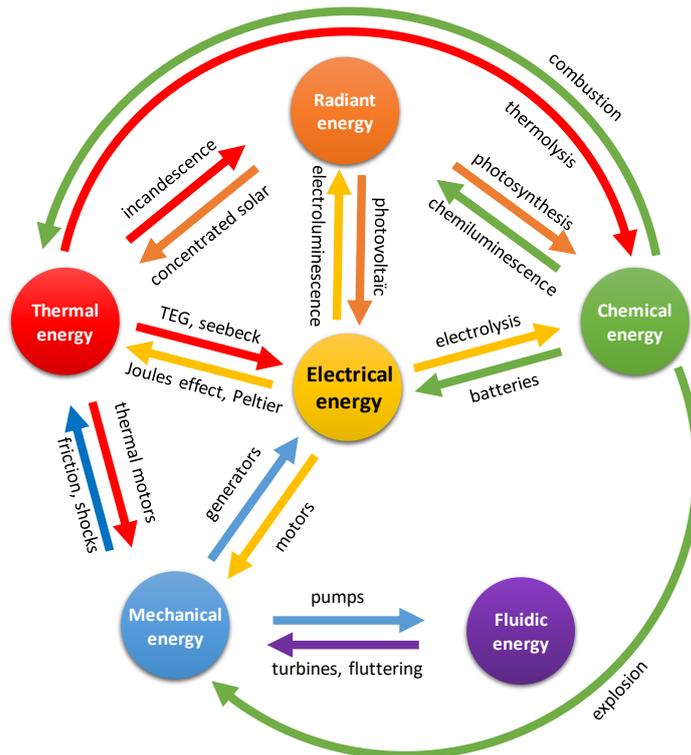


Figure 2 – Energies et grands principes de conversion d'énergie

b. Energie lumineuse

→ Cellules photovoltaïques

La récupération d'énergie issue du rayonnement solaire est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques fabriquées à partir de wafers de silicium dans la majorité des cas. Lorsqu'un photon arrive au niveau du semi-conducteur avec une énergie suffisante, il arrache un électron et crée un trou électronique. La structure présentée Figure 3 permet de diriger les électrons vers la bonne couche. Ainsi, les électrons se dirigent vers la couche dopée N (qui devient le pôle -) et les trous vers la couche dopée P (devenant le pôle +). On obtient alors un générateur électrique dont la tension à vide se situe autour de 0,6V.

L'énergie récupérable grâce au soleil varie énormément en fonction de l'ensoleillement (rapport 1:1000), et notamment entre l'outdoor et l'indoor.

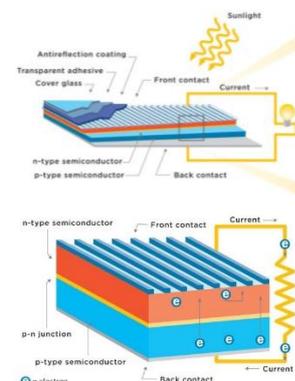


Figure 3 – Cellules photovoltaïques [1]

→ Outdoor

A l'extérieur, la solution photovoltaïque est bien souvent la plus performante des solutions de récupération d'énergie ambiante du fait de la forte puissance lumineuse reçue par la Terre. En France, ce gisement solaire disponible varie sur une année d'un facteur 2 entre le nord et le sud (Figure 4a) et est de l'ordre de 1000-2000kWh/m²/an. Cependant, il s'agit d'une valeur globale sur 1 an qui cache de fortes disparités en fonction de la période de l'année. Des simulations d'ensoleillement et de puissances disponibles peuvent être obtenues via le logiciel PVGIS [2]: les résultats pour Lille, Brest, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Dijon et Avignon sont présentés Figure 4b, mettant clairement en avant la différence d'ensoleillement en fonction des saisons.

Les cellules en silicium monocristallin ou polycristallin sont les mieux adaptées à l'extérieur. Avec un rendement de l'ordre de 15%, ces cellules photovoltaïques produisent en moyenne sur une année entre 1.7 et 3.4mW/cm² (prenant en compte le cycle jour/nuit et les saisons).

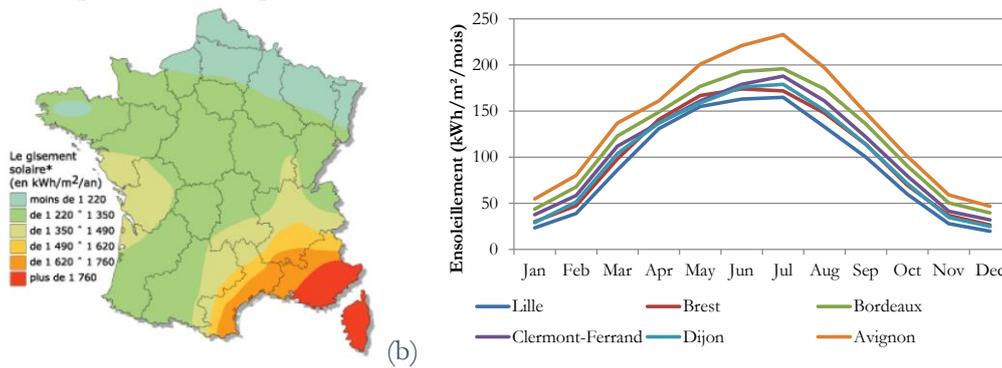


Figure 4 – (a) Cartographie de l'ensoleillement moyen par an et (b) Ensoleillement par mois pour 6 villes de France

→ Indoor

Les cellules amorphes sont les mieux adaptées aux milieux indoor; cependant leur rendement tombe à 8-10%. Il est également à noter que le gisement solaire chute rapidement à l'intérieur des bâtiments, comme le montre les chiffres présentés dans le Tableau 1. Pour donner des premiers ordres de grandeurs, nous avons pris un rendement de 10% pour l'indoor et 15% pour l'outdoor.

Tableau 1 – Puissance récupérable maximum et puissance générée par la cellule photovoltaïque

Ensoleillement	Puissance disponible maximum en entrée de cellule PV (mW/cm ²)	Puissance en sortie de cellule PV (mW/cm ²)
Plein soleil (outdoor)	100	15
Soleil voilé (outdoor)	50	7.5
Ciel nuageux (outdoor)	5 à 20	0.75 à 3
A l'intérieur – à proximité d'une fenêtre (indoor)	1 à 2	0.1 à 0.2
A l'intérieur – éclairage artificiel (indoor)	1 à 1.5	0.1 à 0.15
A l'intérieur – Bureau (indoor)	1	0.1
Entrepôt (indoor)	0.1-0.4	0.01 à 0.04

En très faibles luminosités (10-50 lux), les puissances produites par les cellules photovoltaïques chutent à 200nW/cm² - 1.5µW/cm² (Figure 5). On retiendra que la cellule photovoltaïque devient pertinente à partir de 200lux où elle produit de l'ordre de 50µW/cm².

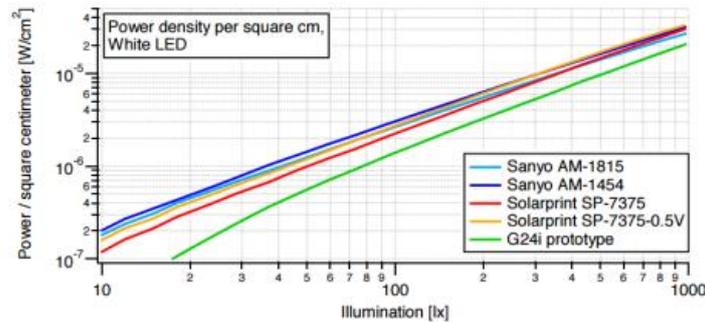


Figure 5 – Densités de puissance des cellules photovoltaïques du commerce [3]

c. Energie des ondes RF

La récupération d'énergie des ondes RF est une autre source d'énergie ambiante qui reste cependant complexe et difficile à utiliser du fait des faibles niveaux de puissances récupérées. Une étude de Drayson technologies [4] montre que la récupération d'énergie des ondes RF dans un bureau est typiquement de l'ordre de 20 à 35nW/cm² avant électronique de gestion (Figure 6); résultats confirmés par Adegoke et al. en 2015 [5].

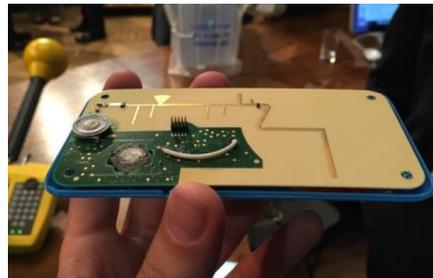


Figure 6 – Solution Freevolt (Drayson technology) [4]

Une autre possibilité consiste à télé-alimenter par RF sur de longues distances les capteurs autonomes (Figure 7). Ce choix a été fait par PowerCast qui commercialise sa solution de capteurs autonomes pour bâtiments. Ceci nécessite cependant d'installer un émetteur qui a une puissance d'émission de 3W@915MHz pour alimenter les dispositifs sur une dizaine de mètres (Figure 7).

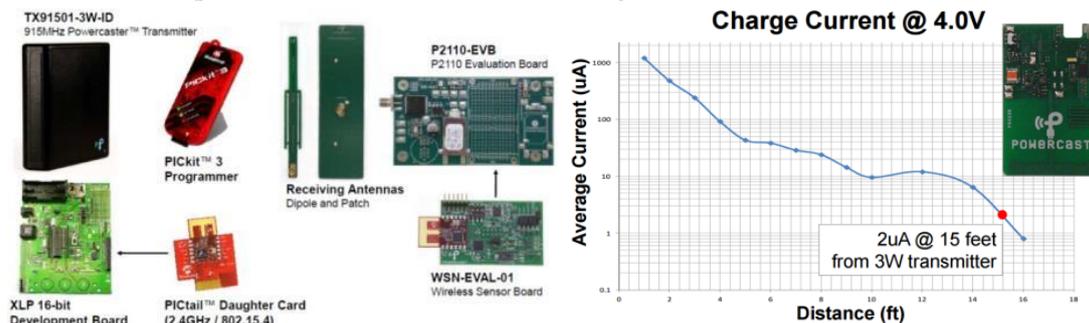


Figure 7 – Solution de télé-alimentation développée par PowerCast

d. Energie thermique – Gradients et variations de température

→ Effet Seebeck - thermoélectrique

Les systèmes thermoélectriques se servent d'un gradient de température pour produire de l'énergie électrique, ce que l'on nomme « effet Seebeck ». Ces dispositifs de récupération d'énergie sont basés sur l'utilisation de thermocouples : des jonctions p-n jointes par un matériau conducteur (Figure 8).

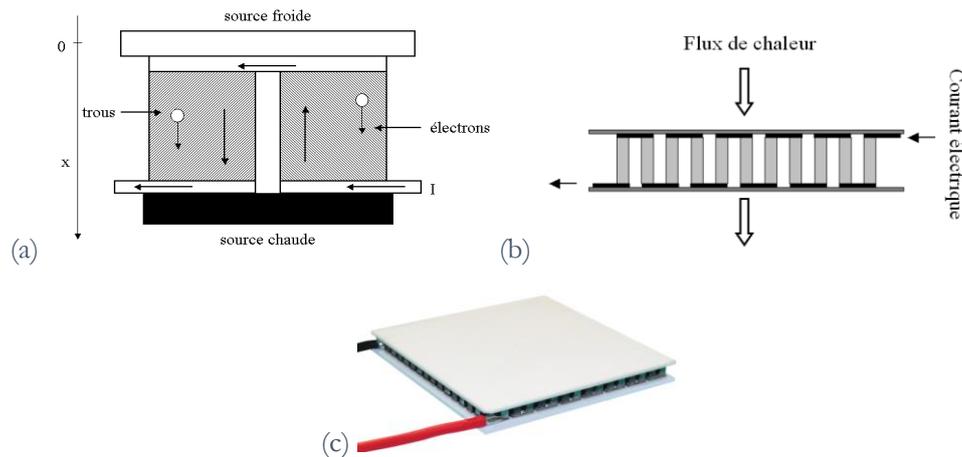


Figure 8 – (a) Thermocouple [6], (b) Thermocouples en série [6] et (c) module thermoélectrique

Les thermocouples sont placés en parallèle thermiquement et en série électriquement (Figure 8). Un flux de chaleur induit un déplacement des trous et des électrons dans les thermocouples et l'apparition d'un champ électrique \vec{E}_s (V/m) à la jonction de chaque couple de matériaux soumis au gradient de température $\vec{\nabla}T$:

$$\vec{E}_s = s \vec{\nabla}T \quad (1)$$

avec s le coefficient de Seebeck.

La performance d'un matériau thermoélectrique est évaluée par le biais d'une figure de mérite, le produit adimensionnel $Z\tilde{T}$ (2). Plus $Z\tilde{T}$ sera élevé, meilleure sera l'efficacité du convertisseur thermoélectrique.

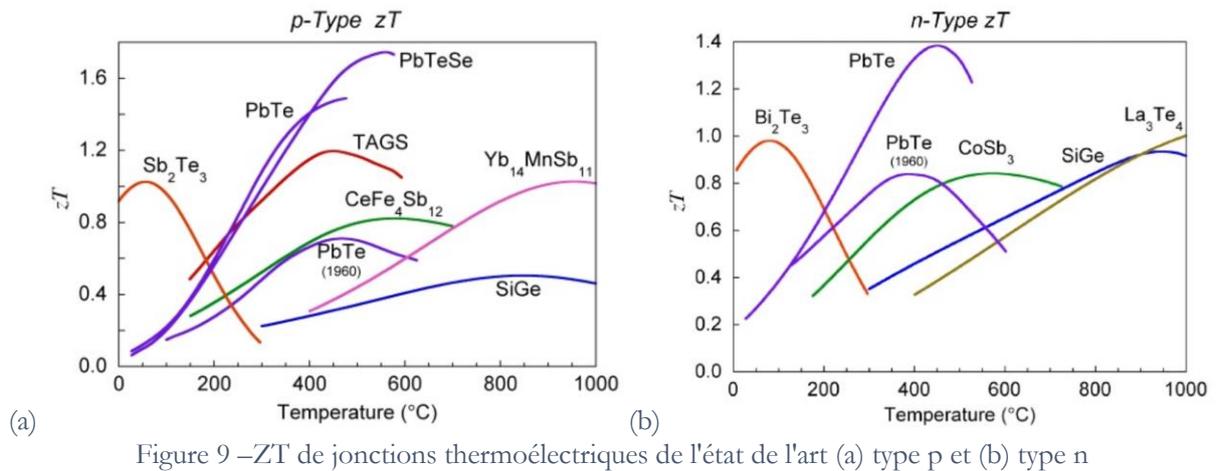
$$Z = \frac{s^2}{\rho\lambda} \text{ et } \tilde{T} = \frac{T_{chaud} + T_{froid}}{2} \quad (2)$$

avec ρ , la résistivité électrique et λ la conductivité thermique du matériau.

Le rendement de conversion d'un convertisseur thermoélectrique peut s'exprimer en fonction du rendement de Carnot et vaut:

$$\eta_{TEG} = \eta_{carnot} \frac{\sqrt{1+Z\tilde{T}}-1}{\sqrt{1+Z\tilde{T}}+\frac{T_{froid}}{T_{chaud}}} = \eta_{carnot} \cdot \eta_{th} \text{ avec } \eta_{carnot} = \frac{T_{chaud}-T_{froid}}{T_{chaud}} \quad (3)$$

Aujourd'hui, les coefficients ZT de l'état de l'art sont de l'ordre de 1 à $T=50^\circ\text{C}$ (Figure 9) conduisant à $\eta_{th} \approx 15\%$ (soit un rendement maximal théorique à 15% du rendement de Carnot). Les puissances de sortie des modules Seebeck placés sur des sources chaudes de $50-60^\circ\text{C}$ atteignent généralement quelques milliwatts (pour quelques cm^2), ce qui est très confortable pour alimenter un capteur autonome. Un avantage majeur de ces systèmes est de ne pas avoir d'élément mobile et donc pas d'effet de fatigue mécanique.



En considérant le dispositif standard en thermoélectricité constitué d'un module Seebeck et d'un radiateur (Figure 10a), et en supposant que l'air ambiant et la source chaude sont des sources infinies, le modèle équivalent peut se mettre sous la forme de la Figure 10b. Le modèle électrique du thermogénérateur est présenté Figure 10c.

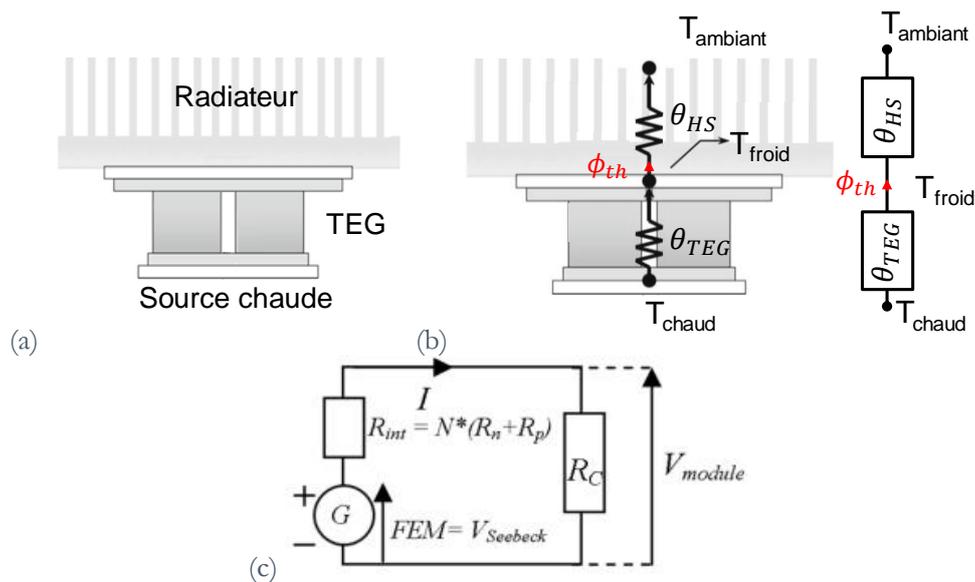


Figure 10 – (a) module thermoélectrique classique, (b) modèle thermique équivalent [7] et (c) modèle électrique équivalent [8]

La puissance de sortie du thermogénérateur sera maximisée si :

- La résistance thermique du radiateur est égale à la résistance thermique du module thermoélectrique (adaptation d'impédance thermique)
- La résistance électrique placée aux bornes du thermogénérateur est égale à celle du thermogénérateur (adaptation d'impédance électrique).

→ Gradient de températures

Plusieurs entreprises commercialisent des thermogénérateurs pour des applications de capteurs autonomes communicants et plutôt dédiés aux basses températures. Ces dispositifs pourraient être utilisés pour récupérer la chaleur issue de moteurs ou de canalisations (eau, circuits de refroidissement,...). Les coefficients Seebeck et les résistances internes sont récapitulés dans le Tableau 2:

Tableau 2 – Thermogénérateurs du commerce – application basses températures

Fabricant	Coefficient Seebeck (mV/K)	R _{in} serie (Ohm)	Dimensions (cm ²)
NEXTREME eTEGTM HV37	16	8	0.0714
HI-Z HZ-2	33	4	8.41
MICROPELT MPG-D751	140	300	0.114
THERMOLIFE	1060	280000	0.679
Everredtronics TEG31-2.8-1.2	22.73	0.3	9
Crystal H-127-10-05-L2	58	2.03	9
KRYOTHERM TGM-199-1.4-1.2	54.11	2.2	16

Les puissances récupérables en fonction du gradient thermique pour ces dispositifs sont présentées ci-dessous. A noter que les rendements de conversion de l'électronique ne sont pas pris en compte (50% comme premier ordre de grandeur). On retiendra qu'il faut au moins un gradient thermique de 2-3°C aux bornes du thermogénérateur pour que ces dispositifs soient viables; des puissances de sortie de l'ordre de 500µW-1mW sont alors atteignables.

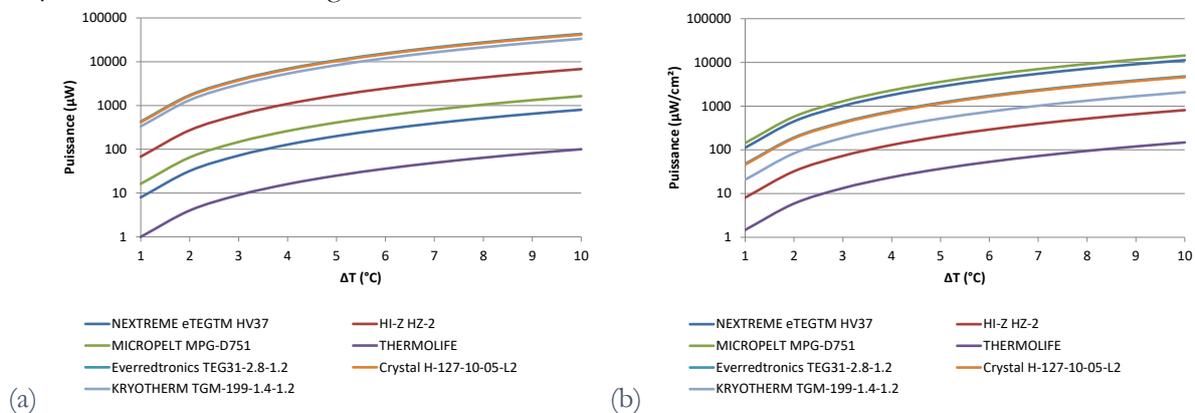


Figure 11 – (a) Puissances récupérables et (b) puissances récupérables par cm²

→ Variation de températures

Il est également possible de récupérer les variations de températures en couplant un module thermoélectrique à une grande capacité thermique. Ce principe a été développé à la base pour l'aéronautique (récupération d'énergie sur le cycle sol/vol) mais pourrait être adapté à d'autres cas d'application. Le dispositif est constitué d'une masse thermique en matériau à changement de phase (eau) et d'un module thermoélectrique Seebeck (Figure 12). Le système récupère le flux thermique entre la masse thermique et l'avion. Ce concept fut développé par EADS Innovation Works [9], [10] et testé dans des conditions réelles de vol. Avec 10mL d'eau comme masse thermique, le système a généré 35J en laboratoire et jusqu'à 24J en situation réelle de vol.

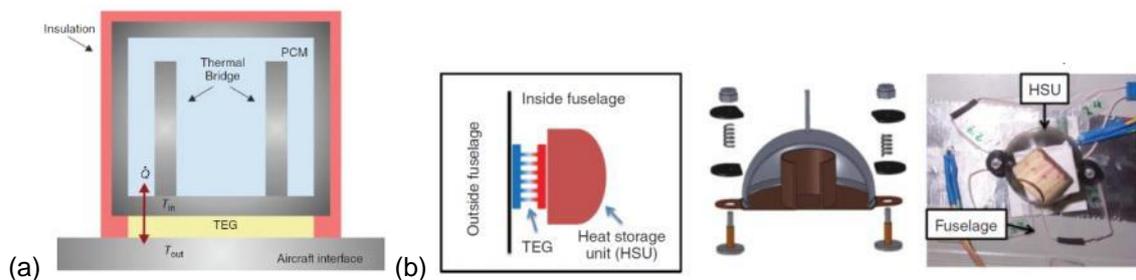


Figure 12 – (a) Récupération d'énergie thermique dynamique proposée par EADS et (b) Prototype

Le concept fut repris pour alimenter des capteurs de contraintes par Kiziroglou et al. [11], et Toh et al. [12] avec 23g d'eau comme masse thermique et des modules thermoélectriques Marlow TG12-2-5 (Figure 13). Une énergie de 105J sur une variation de température de +20°C à -21°C fut démontrée en laboratoire.

Des tests en vol sont prévus par Airbus pour alimenter des capteurs de contraintes autonomes et communicants.

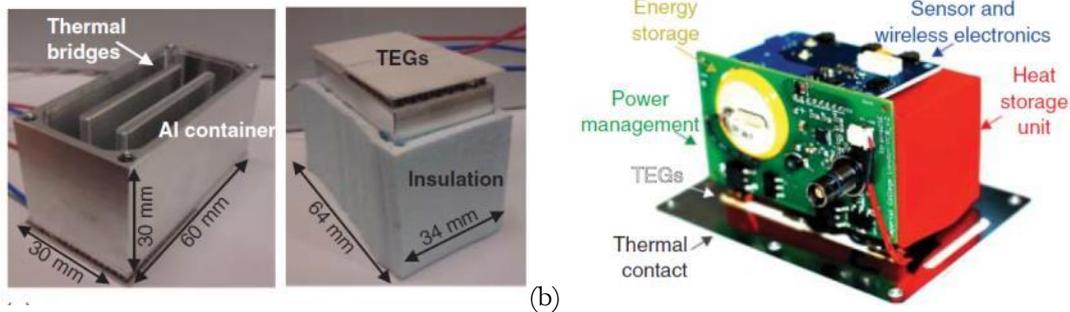


Figure 13 – Système de récupération d'énergie thermique dynamique proposé par (a) Kiziroglou et al. [11], et (b) Toh et al. [12]

e. Energie des écoulements d'air et d'eau

Comme évoqué Figure 1, les écoulements d'air et d'eau sont des sources d'énergie ambiantes puissantes. La puissance électrique récupérable à partir d'un écoulement d'air ou d'eau est donnée par l'équation:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A U^3 \quad (4)$$

avec ρ la densité du fluide, U la vitesse d'entrée du fluide, A la surface du récupérateur d'énergie et C_p son coefficient de puissance (rendement), qui est de l'ordre de 5-10% pour les systèmes de petites dimensions. Deux grandes familles de convertisseurs permettent de récupérer la puissance cinétique des fluides: (i) les turbines et (ii) l'effet "fluttering" (effet drapeau). Ces convertisseurs ont pour effet de transformer le mouvement du fluide en un mouvement relatif entre un stator et un rotor (turbine) ou entre une membrane et un support fixe (effet fluttering).

Ce mouvement peut ensuite être transformé en électricité à l'aide d'un convertisseur électromécanique classique: piézoélectrique, électromagnétique ou électrostatique.

→ Récupération d'énergie par turbines

La turbine est la solution la plus mûre de récupération d'énergie des mouvements fluides. Il existe deux grandes familles de turbines (Figure 14): (i) les turbines à axe horizontal et (ii) les turbines à axe vertical.

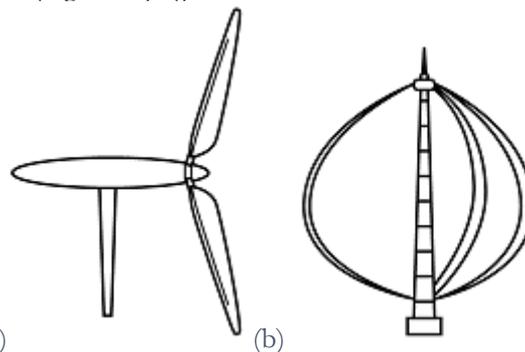


Figure 14 – (a) turbine à axe horizontal et (b) turbine à axe vertical

Les premières ont un rendement bien plus élevé que les secondes et particulièrement en petites puissances ; à noter cependant que ces turbines doivent être orientées dans le flux pour être efficaces. Les turbines à axe vertical peuvent quant à elles récupérer tout flux d'air orthogonal à leur axe de rotation; la contrepartie est leur rendement qui est plus faible.

Les résultats des microturbines de l'état de l'art sont récapitulés ci-après (Tableau 3). Les structures piézoélectriques ne sont pas mentionnées car peu d'informations sont données dans les articles et ne permettent pas de calculer les valeurs de C_p . Comme mentionné précédemment, les coefficients de puissance sont de l'ordre de 5-10%, permettant d'atteindre des puissances de sorties de plusieurs milliwatts avec des vitesses d'entrée de quelques m/s.

Tableau 3 – μ turbines - Récapitulatif

Ref	Conversion	Diamètre du rotor (cm)	Nombre de pales	Vitesse d'entrée (m/s)	Puissance de sortie (μ W)	Densité de puissance (μ W/cm ²)	C_p (%)
Holmes [13]	Emag	0.75	24	40	1100	2490	0.078
Rancourt [14]	Emag	4.2	4	5.5	2400	173	1.85
				11.8	130000	9383	9.5
Bansal [15]	Emag	2.0	12	4.8	25	8.0	0.14
				7	1000	318	1.9
				10	4300	1369	2.7
Xu [16]	Emag	7.6	4	3	6000	132	9.8
				4	13,500	298	9.3
Carli [17]	Emag	6.3	4	2.4	2000	64	9.3
				4.2	8000	257	6.9
				4.7	10000	321	6.2
Howey [18]	Emag	2.0	12	3	80	25	1.9
				7	2500	796	4.6
				10	4300	1369	2.7
Federspiel [19]	Emag	6.28	-	2.5	1300	42	4.5
				4	6185	200	5.2
				5	25500	823	11
Perez [CI14]	Estat	4.0	4	4	30	2.4	0.075
				10	200	16	0.032
Perez [JS7]	Estat	4.0	4	1.7	210	16	5.8
				2.4	300	24	2.9
				2.7	370	29	2.5
				3	450	36	2.2
Gasnier [CI23]	Emag	3.5	3	2	412	42.9	8.9
				3	1959	204	12.5

→ Systèmes de récupération d'énergie à base de fluttering

L'effet fluttering (effet drapeau) se produit lorsqu'une membrane est placée dans un flux d'air à une vitesse supérieure à la vitesse critique u_c . La Figure 15 présente les deux états de la membrane (a) lorsque la vitesse de l'air est inférieure à la vitesse critique et (b) lorsque cette vitesse est supérieure à la vitesse critique; la membrane se met alors en oscillations du fait des couplages fluide-structure. Ce mouvement relatif entre la membrane et un élément fixe attaché au support peut être utilisé pour transformer la puissance cinétique du fluide en électricité. Les trois types de convertisseurs électromécaniques ont également été implémentés.

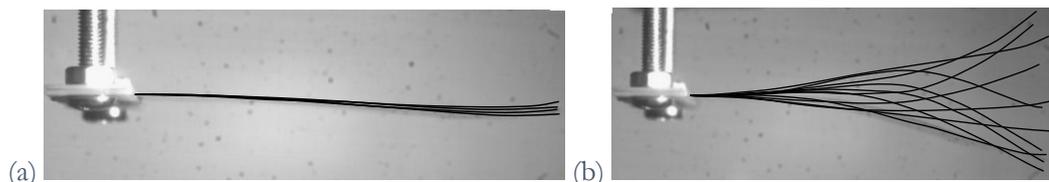


Figure 15 – Déplacement d'une membrane placée dans un flux d'air (a) lorsque la vitesse du fluide est inférieure à la vitesse critique et (b) lorsque sa vitesse est supérieure à la vitesse critique [JS7]

Les résultats des systèmes de récupération d'énergie exploitant l'effet fluttering de l'état de l'art sont récapitulés Tableau 4. Les puissances de sortie sont globalement plus faibles que celles des turbines. Il est par ailleurs difficile de calculer un coefficient de puissance dans ce cas puisque la surface apparente du

récupérateur d'énergie évolue avec la vitesse du fluide. Une puissance normalisée : $\bar{P} = \frac{P}{SU}$ est utilisée ici pour comparer les dispositifs avec P la puissance électrique produite, S, la surface de la membrane et U la vitesse d'entrée du fluide.

Tableau 4 – Fluttering - Récapitulatif

Ref	Conversion	Surface de l'élément flexible S (cm ²)	Epaisseur de l'élément flexible (μm)	U (m/s)	Puissance moyenne (μW)	Puissance par unité de surface (μW/cm ²)	Puissance normalisée (μW/cm ² /(m/s))
Kwon [20]	Piezo	60	200	15	4000	66.67	4.44
Erturk [21]	Piezo	25.81	381	9.3	10700	414.63	44.58
St Clair [22]	Piezo	1.56	127	12.9	840	535.03	41.48
Li [23]	Piezo	11.52	410	8	615	53.39	6.67
Dunnmon [24]	Piezo	5.16	250	27	2500	484.50	17.94
Bryant [25]	Piezo	25.81	381	7.9	2200	85.25	10.79
Akaydin [26]	Piezo	16.15	267	1.2	100	6.19	5.19
Humdinger [27]	Emag	8.4	-	7.5	5000	595	79
Fei [28]	Emag	300	200	3.1	1300	4.33	1.40
Zhu [29]	Emag	9	200	5	1600	177.78	35.56
Fei [30]	Emag	250	200	2.8	7000	28.00	10.00
Yang [31]	Tribo	0.6	25	≈10			
Perez [JS5]	E-stat	7.5	30	15	481	64.12	4.27
				30	2 112	281.66	9.39

f. Energie des vibrations

Les systèmes de récupération d'énergie vibratoire sont pour la plupart basés sur une architecture de système masse-ressort (m-k) du premier ordre (linéaire) amorti par des forces de frottements mécaniques (F_{mec}) liées aux pertes mécaniques du dispositif (air, encastrement, déformation plastique) et des forces électriques (F_{elec}) modélisant la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

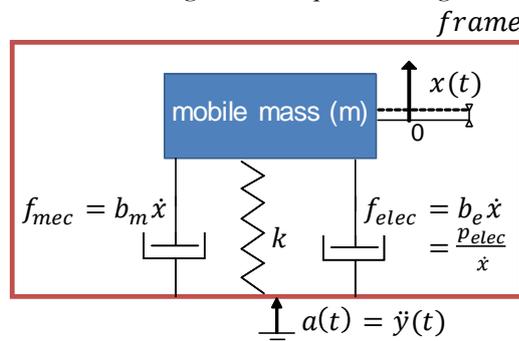


Figure 16 – Représentation basique d'un système de récupération d'énergie vibratoire (premier ordre)

Le système de récupération d'énergie est régi par le principe fondamental de la dynamique (PFD) et donc par l'équation différentielle $m\ddot{x} + kx + f_{mec} + f_{elec} = -m\ddot{y}$, où m est la masse mobile, k la raideur du ressort, x le déplacement relatif de la masse mobile par rapport au support et y le déplacement du support par

rapport au référentiel galiléen; y représente donc les vibrations ambiantes à récupérer. En supposant que les forces de frottement mécaniques et électriques sont visqueuses ($f_{elec} = b_e \dot{x}$ et $f_{mec} = b_m \dot{x}$), et en posant $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, $\xi_e = b_e / (2m\omega_0)$ et $\xi_m = b_m / (2m\omega_0)$, l'équation différentielle du PFD peut se simplifier en:

$$\ddot{x} + 2(\xi_e + \xi_m)\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{y} \quad (5)$$

La puissance instantanée du système de récupération d'énergie vibratoire vaut alors: $p_{elec} = f_{elec} \dot{x}$ et la puissance moyenne récupérée:

$$P_{elec} = \frac{mY^2 \xi_e \omega_0^3 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^6}{\left[2(\xi_e + \xi_m) \frac{\omega}{\omega_0}\right]^2 + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2} \quad (6)$$

P_{elec} est maximisée (P_{max}) lorsque la fréquence des vibrations à récupérer est égale à la fréquence propre du système de récupération d'énergie ($\omega = \omega_0$) et lorsque l'amortissement électrique est égal à l'amortissement mécanique ($\xi_e = \xi_m$): $P_{max} = mA^2 Q / (8\omega_0)$, en notant Q le facteur de qualité mécanique du système de récupération d'énergie ($Q = 1 / (2\xi_m)$).

Des exemples de récupérateurs d'énergie vibratoire sont présentés dans cette section dans le but de donner quelques ordres de grandeurs de puissances de sortie des systèmes électrostatiques, piézoélectriques et électromagnétiques de l'état de l'art. Vu la quantité d'articles sur le sujet, ce bilan n'est pas exhaustif mais il permet néanmoins de donner les grandes tendances et de comparer les technologies.

La figure de mérite utilisée pour comparer les différents systèmes sera la densité de puissance volumique normalisée (NPD) exprimée en $(\mu W/cm^3)/g^2$ et calculée selon la formule:

$$NPD[\mu W \cdot cm^{-3} g^{-2}] = \frac{P[\mu W]}{V[cm^3] \cdot (A_{cc}[g])^2} \quad (7)$$

où P est la puissance moyenne générée par le système de récupération d'énergie, V son volume en cm^3 et A_{cc} l'accélération en g .

→ [Conversion électrostatique](#)

Les systèmes électrostatiques exploitent une structure de capacité variable polarisée (Figure 17) pour convertir l'énergie mécanique de vibration en énergie électrique. La gestion d'énergie des dispositifs de récupération d'énergie électrostatique est a priori plus complexe que celle des systèmes piézoélectriques ou électromagnétiques du fait de la nécessité d'utiliser une source de polarisation. En effet, la capacité variable doit être chargée à plusieurs centaines de volts lorsque la capacité est maximale et déchargée à une tension encore plus élevée lorsqu'elle est minimale, pour que le récupérateur soit efficace. Ceci induit des pertes et nécessite d'utiliser des transistors et des circuits inductifs de grandes dimensions pour supporter ces niveaux de tension.

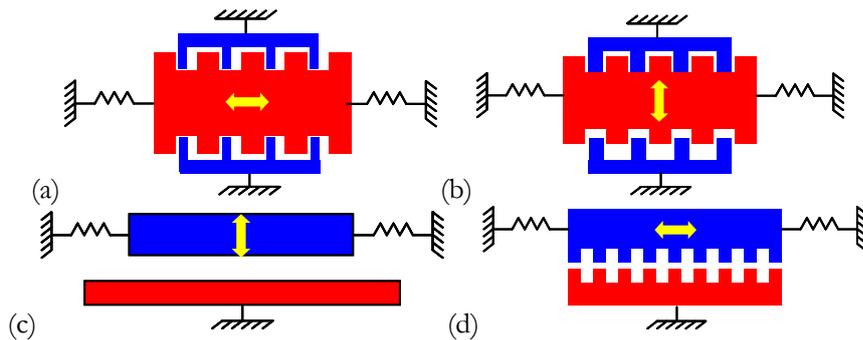


Figure 17 – Structure électrostatique (a) convertisseur dans le plan à entrefer variable (b) convertisseur dans le plan à chevauchement variable (c) convertisseur hors plan à entrefer variable (d) convertisseur dans le plan à surface variable

Cependant, l'utilisation d'électrets, qui sont des diélectriques chargés électriquement (équivalents des aimants en électrostatique), permet de polariser la capacité variable lors de la fabrication, simplifiant grandement le circuit de gestion d'énergie et le rapprochant de celui des récupérateurs piézoélectriques.

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples de récupérateurs d'énergie vibratoire à base de conversion électrostatique à électrets issus de l'état de l'art:

Tableau 5 – Récupérateurs d'énergie vibratoire électrostatiques

Ref	Principe	Volume (mm ³)	Freq. (Hz)	Acc (m/s ²)	Puissance (μW)	NPD (μW.cm ⁻³ .g ⁻²)
Yi [32]	Plan	0.014	1900	78.4	0.29	336
Tao [33]	Plan	540	125	2	0.12	5.56
Wang [34]	Hors-Plan	286	96	10	0.15	0.52
Tao [35]	Plan	120	78.5	0.5	1.2×10 ⁻³	4
Nguyen [36]	Plan	100	373-1088	10	3.4	34
Andrea [37]	Plan	150	179	0.3	0.0033	24.4
Chiu [38]	Hors-Plan	484	110	20	21	10.7
Kim [39]	Plan	48.6	191	1.2	0.035	50
Liu [40]	Plan	324	44.2	0.25	2.5×10 ⁻⁵	0.12
Sheu [41]	Plan	4.5	105	4.3	0.092	110.9
Boisseau [42]	Hors-plan	3640	50	1	50	1373
Matsumoto [43]	Plan	305	26-40	14	3	5
Yang [44]	Plan	39.4	110	25	0.35	1.42
Miki [45]	Plan	305	63	20	1	0.82
Hoffmann [46]	Plan	200	1300-1500	130	3.5	0.10
Tao [47]	Hors-Plan	144	95	4.2	0.95	37.4

Ces résultats sont à comparer avec les tableaux récapitulatifs des solutions piézoélectriques et électromagnétiques présentées ci-après. On notera globalement que les solutions électrostatiques ont des puissances et des densités de puissance (NPD) plus faibles que les systèmes piézoélectriques et électromagnétiques. Leurs avantages par rapport aux autres solutions sont: (i) la possibilité de faire des systèmes bas cout et (ii) la possibilité d'ajuster le couplage électromécanique en adaptant la tension de polarisation et de réaliser des structures MEMS fortement couplées.

→ Conversion électromagnétique

Les systèmes de récupération d'énergie électromagnétiques s'appuient sur la loi de Faraday pour transformer un mouvement relatif en électricité (Figure 18) : une variation de flux magnétique au travers d'une spire induit une force électromagnétique et l'apparition d'un courant dans la spire. Les dispositifs de récupération d'énergie électromagnétiques sont constitués d'aimants permanents en déplacement relatif par rapport à une bobine et sont majoritairement basés sur des structures de poutres ou de membranes vibrantes. Ces dispositifs sont assez difficiles à miniaturiser car la densité volumique d'énergie diminue avec la taille du système. Néanmoins, ce sont des systèmes stables et robustes qui sont moins sujets aux problèmes de fatigue mécanique, comme c'est notamment le cas pour les solutions piézoélectriques [48]; et ceci du fait du découplage entre la mécanique et le convertisseur électromagnétique.

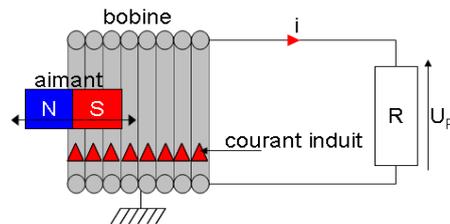


Figure 18 – Loi de Faraday – Système bobine-aimant

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples de récupérateurs d'énergie vibratoire à base de conversion électromagnétique:

Tableau 6 – Récupérateurs d'énergie vibratoire électromagnétiques

Ref	Volume (cm ³)	Freq.	Acc (m/s ²)	Puissance (μW)	NDP (μW.cm ⁻³ .g ⁻²)
Amirtharajah [49]	-	94	-	400	-
Li [50]	1	54	16.16	10	4
El-hami [51]	0.24	322	102	530	21
Ching [52]	1	110	95.5	830	9
Mizuno [53]	2.1	700	12.4	0.0004	10 ⁻⁴
Huang [54]	0.03	100	19.7	1.4	12
Glynne-Jones [55]	3.66	106	13	2800	450
Kulah [56]	2	25	-	0.004	-
Perez-Rodriguez [57]	0.25	400	63	1.44	10 ⁻¹
Beeby [58]	0.3	9500	1.92	0.021	2
Scherrer [59]	9	35	-	7000	-
Beeby [60]	0.15	52	0.59	58	111000
Wang [61]	0.1	121	14.7		-
Hadas [62]	45	34.5	3.1	3500	810
Serre [63]	0.8	380	29	55	8
Perpetuum PMG-17-100 [64]	135	100	0.25	1000	11800
Ferro Solutions VEH360 [65]	250	60	0.25	430	2800
Ferro Solutions VEH460 [65]	170	60	1	5000	2941
Lumedyne Technologies [66]	27	53	1	1000	3700
Cepnik [67]	10.8	50	10.3	13400	1160
Munaz [68]	9.047	6	5	4840	2140
Lee [69]	35	16	2	1520	1070

A noter: plusieurs systèmes ont été commercialisés, et notamment par les sociétés Perpetuum, FerroSolutions et Lumedyne Technologies. Globalement, les puissances de sortie atteignent plusieurs mW et sont largement compatibles avec les besoins des capteurs autonomes communicants. Une des difficultés

à gérer est la tension de sortie qui peut être assez faible, de l'ordre de quelques volts, pouvant induire beaucoup de pertes au moment du redressement.

→ Conversion piézoélectrique

L'effet piézoélectrique direct traduit l'aptitude de certains matériaux à se polariser sous l'application d'un effort mécanique (Figure 19a), tandis que l'effet piézoélectrique inverse traduit l'aptitude à se déformer sous l'effet d'un champ électrique appliqué. C'est l'effet piézoélectrique direct qui est utilisé pour la récupération d'énergie.

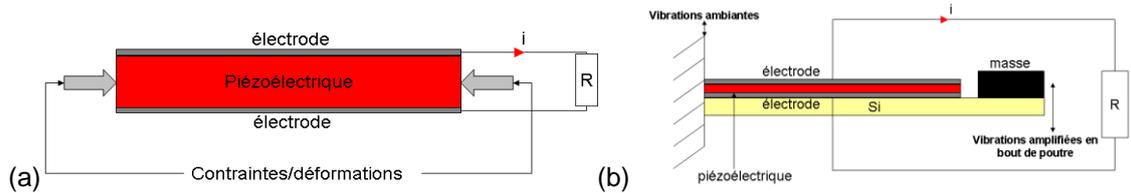


Figure 19 – (a) Convertisseur piézoélectrique et (b) Cantilever piézoélectrique

De nombreuses architectures ont été étudiées afin d'obtenir le meilleur couplage électromécanique possible. La forme la plus répandue repose sur l'utilisation d'une poutre encastrée-libre mise en oscillations sous l'effet d'une vibration mécanique (Figure 19b). Les récupérateurs d'énergie piézoélectriques présentent les plus grandes densités de puissance de l'état de l'art, atteignant 17mJ/cm³.

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux systèmes de récupération d'énergie vibratoire par conversion piézoélectrique de l'état de l'art:

Tableau 7 – Récupérateurs d'énergie vibratoire piézoélectriques

Ref	Volume (cm ³)	Freq.	Acc (m/s ²)	Puissance (μW)	NDP (μW.cm ³ .g ⁻²)
Roundy [70]	1	120	2,5	375	6000
Leland [71]	2,040	27	0,5	29,3	5745
Ng [72]	0,200	100	72,6	16,3	1.54
Erica [73]	6,250	2580	20,0	1800	72
Fang [74]	0.002	609	10,0	1,15	575
Leland [75]	3.675	160	-	650	-
Frank [76]	109.423	62	1,6	90000	32128
Marzencki [77]	0.005	196	4,0	0,0263	33
Renaud [78]	0.01	1800	12,0	40	2777
Goldschmidtboing [79]	2	200	25,0	400	32
Leland [80]	1	50	-	208	-
Huang [81]	0.01	100	19,7	1,44	37
Lefeuvre [82]	0.044	65	15	1100	11111
Elfrink [83]	0.027	429	1	1,8	6666
Elfrink [83]	0.027	419	10	67,9	2514
Ramadass [84]	0.012	80	3	3,75	3472
Kwon [85]	0.028	353	6,4	17	1482
Guyomar [86]	1.560	277	10	4000	2564
Mide Volture [87]	40.5	50	9.8	8000	205
Microstrain PVEH [88]	60.6	1000	15	30000	220
Gasnier [CI22]	4.6	1167	10	6800	1478
			30	36100	871
			80	135000	458

Ici encore, les puissances générées sont largement compatibles avec les besoins de capteurs autonomes communicants. La stabilité dans le temps des matériaux piézoélectriques soumis à des

contraintes élevées reste néanmoins à valider. Des dispositifs sont commercialisés par les sociétés : Mide Vulture, Microstrain et MicroGen.

g. Energie des chocs, contraintes et déformations

→ Récupération d'énergie des chocs

Les chocs mécaniques peuvent être exploités de 2 façons différentes: (i) par mise en oscillations d'un système masse-ressort ou (ii) par conversion directe:

○ Choc – mise en oscillations

Dans le premier cas, le choc entraîne la mise en oscillations d'un système masse-ressort dont la fréquence de résonance est grande devant l'inverse du temps caractéristique du choc. Cet effet peut être exploité pour convertir l'énergie du choc en électricité, tout en limitant la taille du dispositif de récupération d'énergie : la mise en oscillations permet de récupérer l'énergie du choc sur plusieurs cycles (Figure 20).

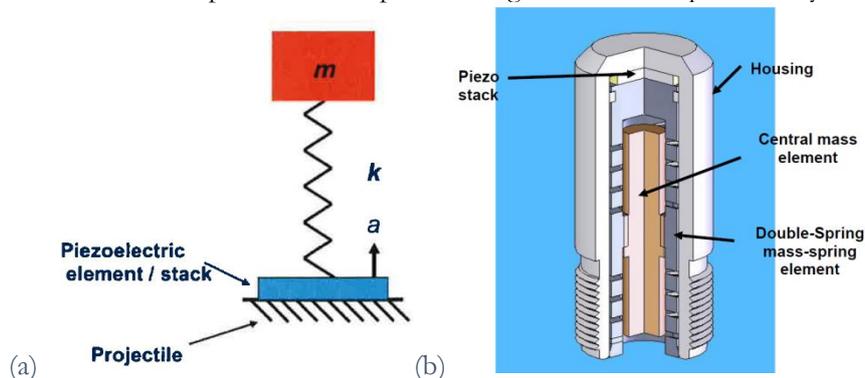


Figure 20 – Structure de récupération d'énergie des chocs proposée par Rastegar et al. [89] (a) Principe de base et (b) Schéma 3D du dispositif

○ Choc – conversion directe

Le choc peut également être directement converti en électricité sans utiliser de mise en oscillations d'un système masse-ressort. Ce type de solution est notamment étudié pour des applications automobiles, où il pourrait être utilisé comme système d'amortissement capable de générer de l'énergie (Figure 21).

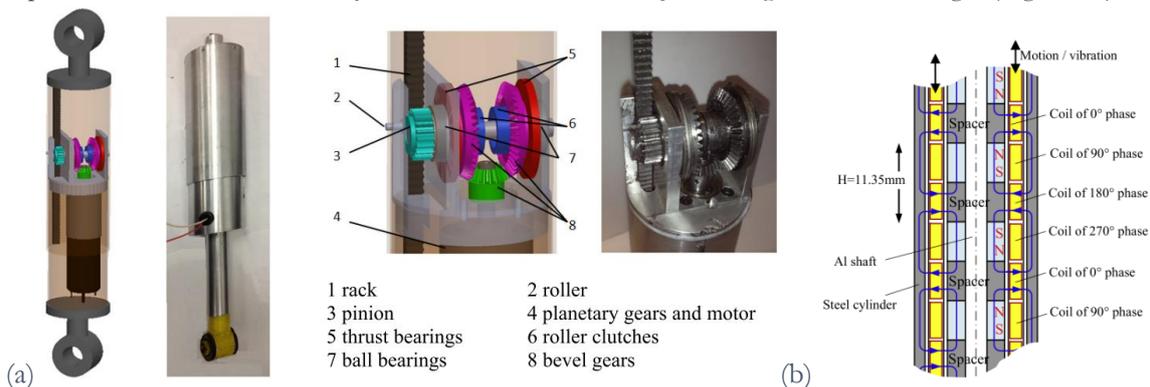


Figure 21 – (a) Système de récupération d'énergie des chocs (type amortisseur) proposé par Li et al. [90] et (b) Convertisseur électromagnétique de type générateur linéaire [91]

→ Récupération d'une pression – systèmes impulsifs

On parlera de système de récupération d'énergie impulsif lorsque toute l'énergie mécanique est récupérée en une seule fois, et typiquement lorsqu'un seuil de pression est dépassé. Ce principe est mis en place dans les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique pour interrupteurs autonomes communicants : la pression appliquée par l'utilisateur permet de faire varier le flux magnétique circulant à l'intérieur d'une bobine.

Les systèmes utilisant ce mode de fonctionnement mettent en œuvre des systèmes bistables et une inversion de flux pour maximiser la variation de flux dans la bobine ($d\Phi/dt$). Les densités d'énergie générées par ces dispositifs (Figure 22) sont récapitulées dans le Tableau 8 et sont dans une gamme allant de $100\mu\text{J}/\text{cm}^3$ à $380\mu\text{J}/\text{cm}^3$.

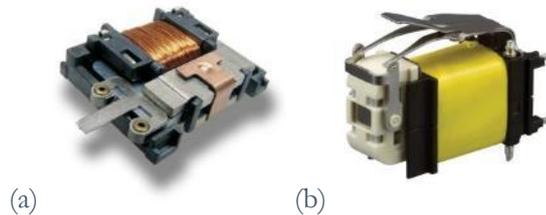


Figure 22 – Systèmes impulsionnels à conversion électromagnétique mis en œuvre dans des interrupteurs autonomes communicants (a) EnOcean et (b) Cherry

Tableau 8 – Solutions de récupération d'énergie impulsionnelles

Solution	Energie récupérée (aller) (μJ)	Volume du générateur (cm^3)	Densité d'énergie
EnOcean	350 μJ	$2.35 \times 1.94 \times 0.69 = 3.14$	$111\mu\text{J}/\text{cm}^3$
Cherry	540 μJ	$1.7 \times 1.17 \times 0.72 = 1.43$	$377\mu\text{J}/\text{cm}^3$

→ Récupération d'une pression – systèmes continus

Contrairement aux systèmes impulsionnels, les systèmes continus mettent en œuvre un système linéaire. Plusieurs principes de récupération d'énergie d'une pression ont été étudiés dans l'état de l'art.

○ Mise en rotation d'un générateur électromagnétique

La solution développée par Xie et al. [92] (Figure 23) consiste à transformer le mouvement linéaire en un mouvement de rotation d'un petit générateur. Cette idée a été proposée pour la récupération d'énergie de la marche, le dispositif étant placé dans la chaussure. Un système d'engrenages permet d'accroître la vitesse de rotation du générateur à partir d'un mouvement de translation basse fréquence. La puissance de sortie atteint de $0.81\text{W}@3\text{km/h}$ ($9.7\text{mW}/\text{cm}^3$) à $1.39\text{W}@5\text{km/h}$, soit une des meilleures densités de puissance de l'état de l'art.

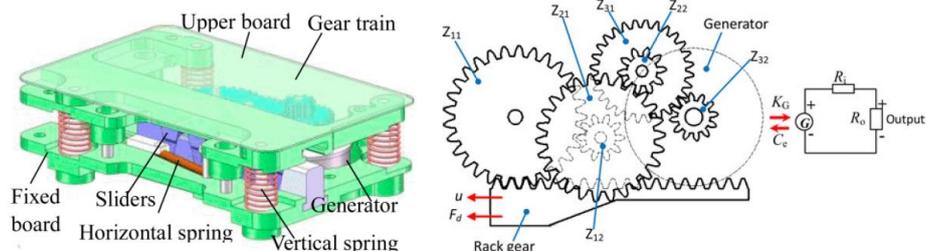


Figure 23 – Convertisseur électromécanique permettant de transformer un mouvement linéaire basse fréquence en un mouvement de rotation rapide d'un générateur électromagnétique [92]

○ Générateur linéaire

Les générateurs linéaires sont proches des moteurs à aimants permanents mis à plat. Ils permettent de transformer un mouvement linéaire en énergie électrique (Figure 24). Des preuves de concept ont notamment été proposées pour des amortisseurs de voiture.

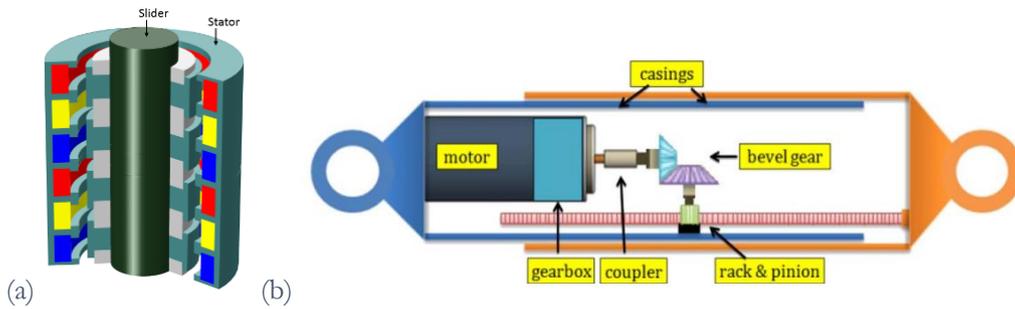


Figure 24 – Générateurs linéaires (a) générateur tubulaire [93] et (b) absorbeur de choc récupérant l'énergie [94]

o Conversion piézoélectrique directe

Les convertisseurs piézoélectriques sont basés sur l'utilisation d'un matériau piézoélectrique apte à convertir une contrainte ou une déformation en électricité. De nombreux matériaux présentent des propriétés piézoélectriques; il est cependant à noter que les matériaux piézoélectriques présentant de forts coefficients de couplages électromécaniques sont actuellement à base de plomb (PZT, PMN-PT) (Tableau 9).

Tableau 9 – Matériaux piézoélectriques et coefficients de couplages électromécaniques associés

Matériau	ϵ_{33}	d_{33} ($10^{-12}m/V$)	k_{33}^2 (coefficient de couplage)	E (GPa)
Quartz	4.5	2.31	-	-
Soft PZT	4100	620	53%	59
Hard PZT	1350	300	46%	76
PMN-PT	4200	2000	81%	108
PZN-PT	7256	2721	88%	99
AlN	10	6.8	10%	300
ZnO	11	12.3	21%	-
PVDF	13	9	3%	0.5

Par ailleurs, l'énergie maximum récupérée par un matériau piézoélectrique est fonction de sa contrainte de dépolarisation σ (typiquement 20% de la contrainte maximum) et de son coefficient de couplage k.

$$\frac{E_{cycle}}{V} [J/m^3] = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 k^2}{E} \quad (8)$$

Ainsi, pour du PZT, l'énergie maximum récupérable par cycle est de $11.6mJ/cm^3$. Quelques exemples de générateurs piézoélectriques ont été développés pour la récupération de l'énergie dans la chaussure, et notamment par Meier et al. [95], ou par le MIT [96] (Figure 25). Le premier produit de l'ordre de 10 à $20\mu J$ par cycle, et le second $1.3mJ$ sur l'élément PVDF et $8.4mJ$ sur l'élément PZT, par cycle [96].

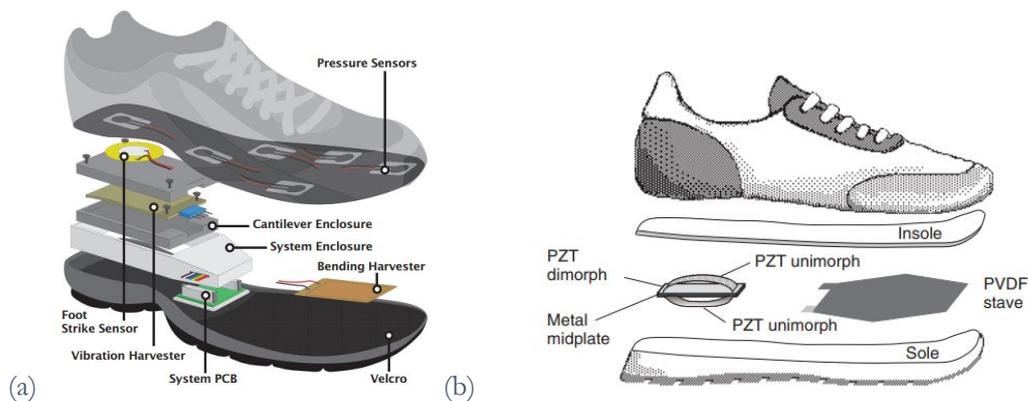


Figure 25 – Solutions proposées par (a) Meier et al. [95] et (b) par le MIT [96]

Ces modules piézoélectriques (plutôt rigides) peuvent être assemblés pour former des structures relativement flexibles. Nous citerons tout d'abord les modules MFC (Macro-Fiber Composite), piézocomposites développés à l'origine par la NASA, et constitués de fibres piézoélectriques encapsulées dans une matrice époxy. Les modules MFC présentent un coefficient de couplage k_{33}^2 de 16%, le plaçant au-dessus du PVDF et de l'AlN.

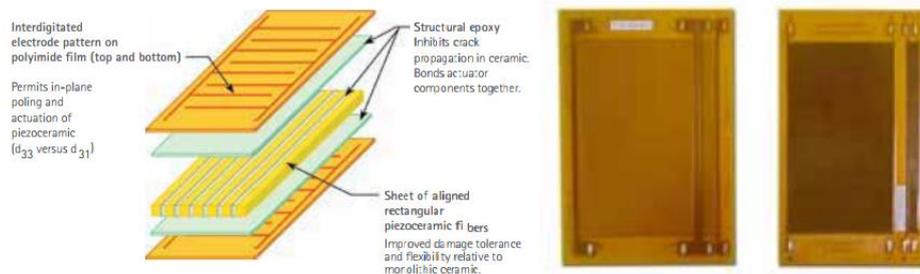


Figure 26 – Modules MFC (Macro-Fiber Composites)

h. Energie acoustique

Les systèmes de récupération d'énergie acoustique sont assez peu étudiés dans l'état de l'art du fait des puissances de sortie qui restent faibles et de problèmes de sélectivité en fréquence. Par ailleurs, ces systèmes ne sont pertinents que pour des environnements fortement bruités (>100dB).

L'énergie acoustique peut être convertie en énergie électrique à l'aide (i) de résonateur de Helmholtz (Figure 27a) ou (ii) de résonateur quart-d'onde (Figure 27b); couplés à un transducteur piézoélectrique ou électromagnétique. Ce résonateur acoustique a pour objectif d'amplifier l'onde acoustique incidente pour augmenter la puissance de sortie. Le résonateur de Helmholtz est constitué d'une cavité, assimilée à une cavité fermée, communiquant avec l'extérieur par l'intermédiaire d'un tube, appelé col du résonateur. Le résonateur quart-d'onde est simplement un tube ouvert d'un côté et fermé de l'autre et de longueur égale au quart de la longueur d'onde de l'onde acoustique à récupérer.

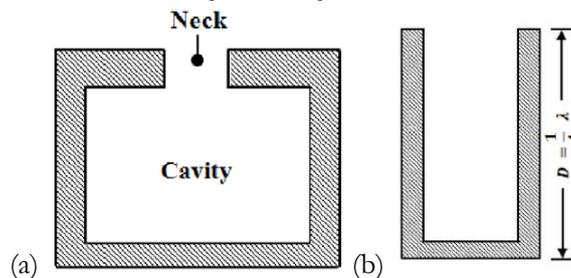


Figure 27 – (a) Résonateur de Helmholtz, (b) Résonateur quart-d'onde

Les récupérateurs d'énergie piézoélectriques sont pour la plupart basés sur un résonateur de Helmholtz dans lequel la paroi inférieure est remplacée par une membrane piézoélectrique. Les récupérateurs d'énergie électromagnétiques présentent quant à eux tous une structure de résonateur de Helmholtz. Un aimant est placé au fond de la cavité mobile en face d'une bobine. La bobine est en matériau diamagnétique, typiquement du cuivre (faible ρ , faible cout), et l'aimant en NdFeB pour sa forte aimantation.

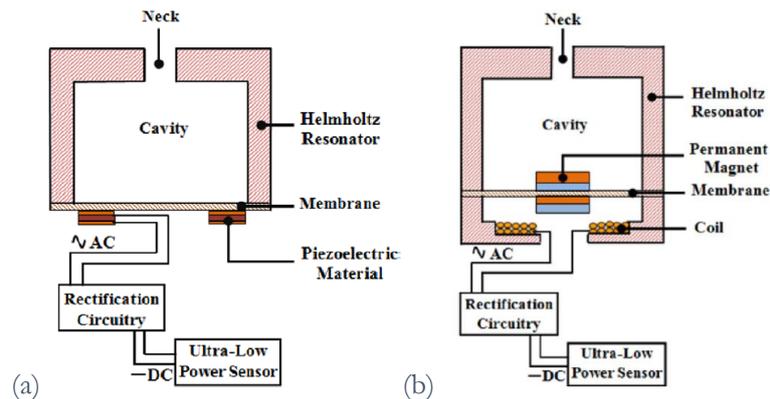


Figure 28 – (a) Conversion piézoélectrique et (b) conversion électromagnétiques

Plusieurs dispositifs ont été proposés dans l'état de l'art et notamment par :

- Li et al. [97] avec un récupérateur d'énergie acoustique sur une architecture de résonateur quart-d'onde dans lequel sont installés des bimorphes piézoélectriques en PZT. Le système mesure 42cm de long pour une surface d'entrée de 4cm×5cm et génère 1.148mW@100dB@199Hz et 12.6mW@110dB@199Hz
- Khan et al. [98] avec des aimants placés de part et d'autre de la membrane d'un résonateur de Helmholtz, vibrant au-dessus de la bobine. Le système mesure 14.7cm³ pour une puissance de sortie de 1.96mW@125dB@143Hz.

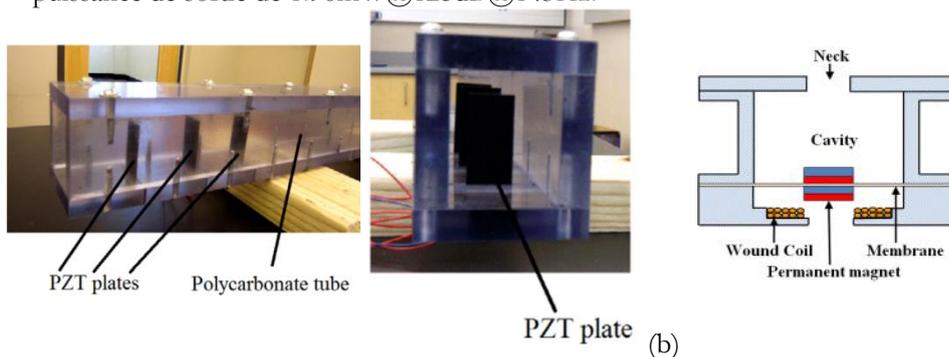


Figure 29 – Structures proposées par (a) Li et al. [97] et (b) Khan et al. [98]

Les systèmes de récupération d'énergie acoustique de l'état de l'art sont récapitulés dans le Tableau 10.

Tableau 10 – Récupération d'énergie acoustique - Récapitulatif

Ref	Conversion	Dimensions (cm ³)	dB	Fréquence	Tension de sortie (mV)	Puissance de sortie (μW)
Horowitz [99]	Piezo	2.445	149	13570	-	6×10 ⁻⁶
Shinoda [100]	Piezo	-	100	24000	-	11×10 ⁻⁶
Peng [101]	Piezo	735.652	100	1358	-	7.5
Kimura [102]	Piezo	-	100	16700	-	140×10 ⁻⁶
Liu [103]	Piezo	2.47	161	2640	-	30000
Tomioka [104]	Piezo	-	100	4920	-	52.8×10 ⁻⁶
Iizumi [105]	Piezo	-	100	4920	-	82.8×10 ⁻⁶
Matsuda [106]	Piezo	-	110	6280	-	0.68×10 ⁻⁶
Li [107]	Piezo	1500	110	146	1480	2.2
Li [97]	Piezo	840	110	199	15689	12690
Lallart [108]	Piezo	900	100	242	2000	55
Atrah [109]	Piezo	0.0055	100	3500	1.3	1.69×10 ⁻³
Wu [110]	Piezo	47.149	45	4200	17.7	40×10 ⁻³
Yang [111]	Piezo	3972.22	100	201	-	1430
Khan [98]	Emag	14.728	125	143	953	1960
Khan [112]	Emag	7.86	120	144	315	1500
Lai [113]	Emag	0.009	-	470	0.24	-

Ces résultats ont cependant été obtenus en laboratoire et chutent à quelques μW en conditions réelles du fait de la sélectivité en fréquence de ces dispositifs, avec des problématiques au final assez proches de celles des systèmes de récupération d'énergie vibratoire.

i. Bilans

La thématique de la récupération d'énergie est apparue au début des années 1990 et le nombre de travaux de recherche associés a augmenté rapidement depuis la seconde moitié des années 2000 (Figure 30).

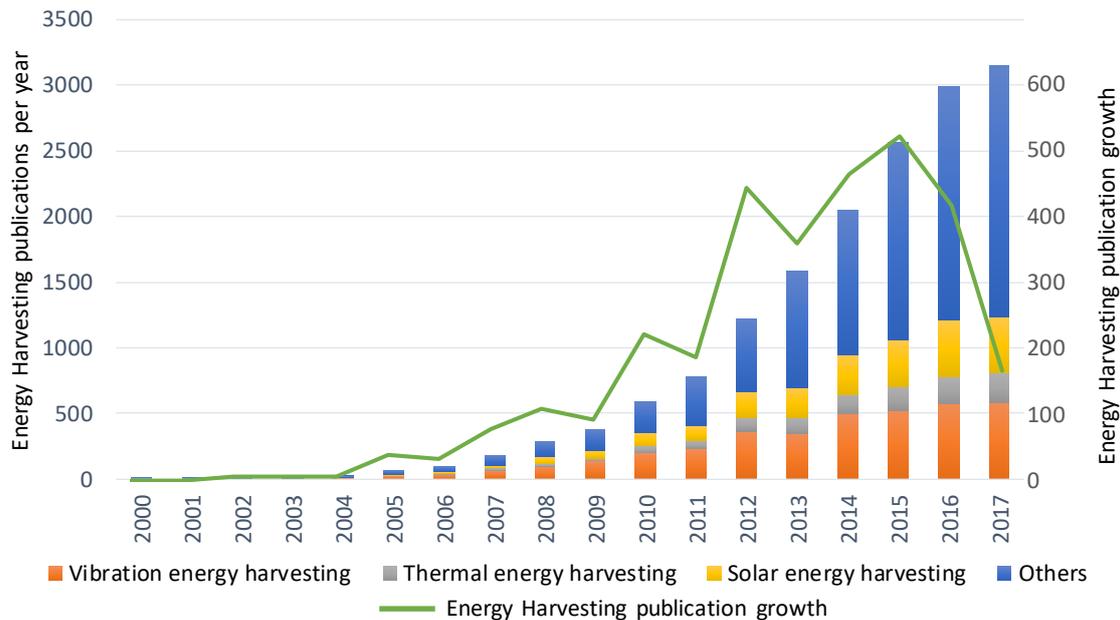


Figure 30 – Evolution du nombre de publications liées à la thématique "energy harvesting" par an (Web of Science [114])

Des dispositifs de récupération d'énergie sont d'ores et déjà commercialisés pour le solaire, le thermique ou le vibratoire; et de nombreuses opportunités de recherche et de développement existent pour améliorer les rendements de conversion, les puissances de sortie, la polyvalence ou la robustesse aux environnements sévères.

En bilan, on retiendra que les puissances de sorties des différentes solutions de récupération d'énergie présentées dans les sections précédentes sont d'ores et déjà compatibles avec l'alimentation de systèmes autonomes communicants, comme nous le verrons dans les paragraphes suivants.

3.2 Systèmes autonomes communicants et chaîne de récupération d'énergie

La récupération d'énergie s'inscrit dans un besoin d'autonomie des systèmes électroniques. Avant tout dimensionnement de récupérateur d'énergie, la première étape de développement d'un système autonome communicant reste l'optimisation de la consommation du dispositif électronique à alimenter. La consommation des fonctions "capteurs", "traitement de l'information" ou "envoi RF" peut facilement varier d'un facteur 1 à 10 en fonction des composants choisis et des lignes de codes implémentées dans le microcontrôleur.

Aussi, cette première étape permettra d'éviter un surdimensionnement du système de récupération d'énergie voire de remettre en cause une infaisabilité technique justifiée par une consommation trop importante et non optimisée de l'électronique à alimenter.

a. Analyse fonctionnelle

Les systèmes autonomes communicants doivent répondre à un besoin, interagissent avec leur environnement et suivent un cycle d'utilisation pouvant aller de la distribution au recyclage. L'analyse fonctionnelle est régulièrement mise en application dans nos projets de recherche de manière à identifier les fonctions et contraintes du système à développer en prenant en compte le cycle de vie du produit. L'exemple d'application choisi ici est celui du débitmètre autonome communicant pour l'agriculture.

→ Besoin fondamental

Le besoin fondamental du système est exprimé du point de vue de l'utilisateur qui, dans notre cas, est l'agriculteur (Figure 31). Les questions à se poser sont:

- A qui rend service le produit ?
- Sur quoi agit le système ?

- Dans quel but le système existe-il ?

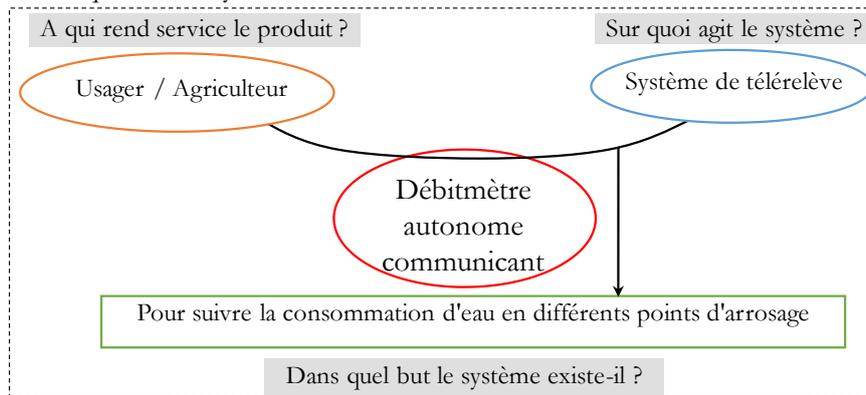


Figure 31 – Expression du besoin fondamental du système

→ Cycle d'utilisation

Plusieurs phases d'utilisation dans la vie du produit peuvent être identifiées (Figure 32); chacune de ces phases apportera des fonctions de services et des fonctions de contraintes.



Figure 32 – Cycle d'utilisation du produit

→ Environnement du produit, fonctions de service et fonctions contraintes

L'identification de l'environnement du produit, de ses fonctions de services (F_s) et de ses fonctions de contraintes (F_c) sont la base de l'analyse fonctionnelle. Cela permet de rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser des fonctions, en faisant abstraction des solutions techniques pouvant les réaliser. Cette étude permet ensuite de sélectionner les solutions techniques à privilégier suite aux étapes d'idéations et de brainstormings.

Appliqué au cas du débitmètre autonome pour l'agriculture, l'analyse fonctionnelle prend les formes suivantes:

- Identification de l'environnement du produit

Un exemple d'identification de l'environnement du produit est proposé ci-dessous.

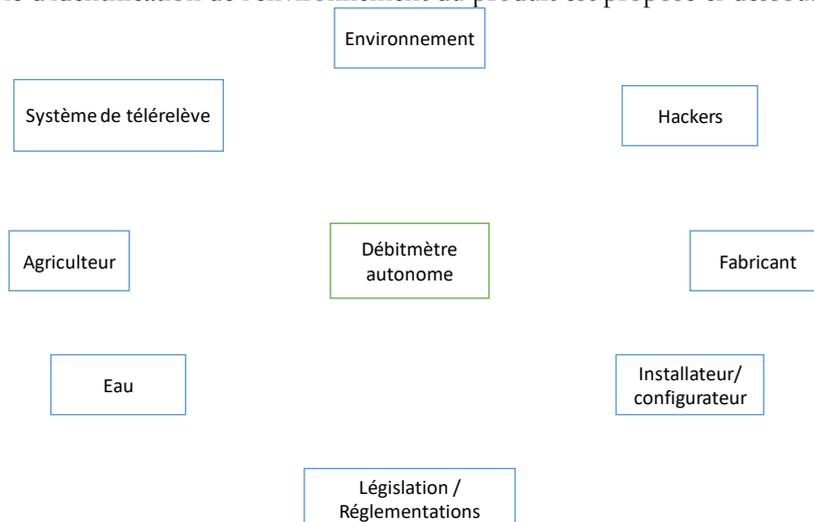


Figure 33 – Environnement du produit

- Fonctions de service (Fs)
- Le système possède deux fonctions de service : mesurer et configurer.

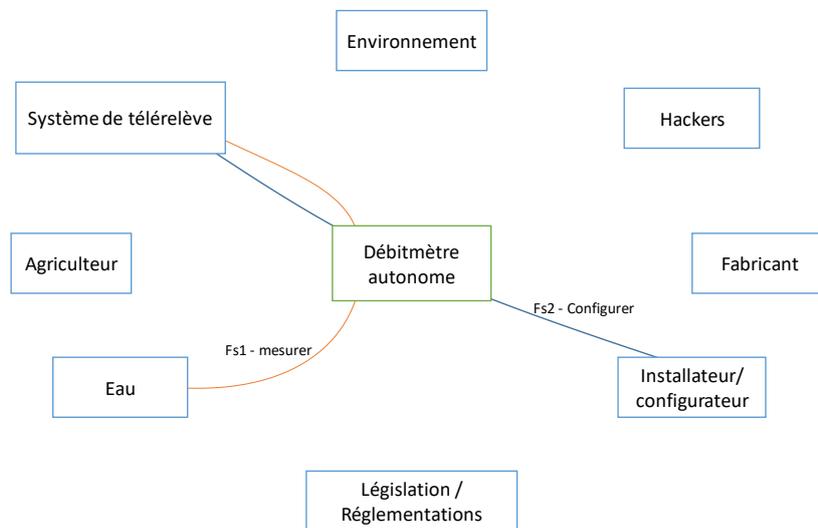


Figure 34 – Fonctions de services

- Fonctions de contraintes (Fc)
- Nous proposons également quelques fonctions de contraintes en lien avec l'environnement du produit ci-dessous:

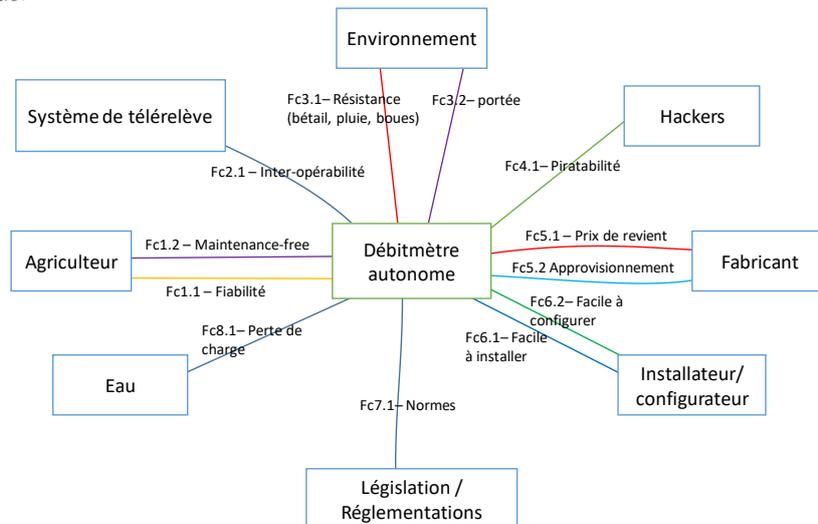


Figure 35 – Fonctions de contraintes

L'exemple choisi est celui du débitmètre autonome, mais un autre produit autonome communicant avec de la récupération d'énergie présenterait une analyse fonctionnelle similaire.

b. Systèmes autonomes communicants et besoins

La réduction de la consommation des fonctions électroniques, des capteurs, des microcontrôleurs et des puces et protocoles RF permettent aujourd'hui de développer des systèmes totalement autonomes mettant en œuvre une solution de récupération d'énergie.

→ Nœud-capteur autonome communicant

Un capteur autonome communicant (Figure 36a) peut être représenté sous la forme d'un système constitué de 4 éléments clés: (i) des capteurs, (ii) un microcontrôleur, (iii) un lien radio et (iv) une source

d'alimentation électrique; notre objectif en récupération d'énergie étant d'assurer l'alimentation de cet ensemble en utilisant l'énergie ambiante. De nombreux progrès ont été faits en matière de consommation des éléments constitutifs de ce capteur autonome. Aujourd'hui, quatre valeurs typiques de besoin énergétique peuvent être mises en avant (Figure 36b - Figure 36c):

- 1-5 μ W : la consommation en veille d'un microcontrôleur
- 500 μ W-1mW : la consommation d'un microcontrôleur en mode actif
- 50mW : le pic de puissance consommée par le capteur lors de l'envoi RF
- 50-500 μ J : la consommation énergétique totale demandée par un capteur autonome pour faire une mesure, la traiter et l'envoyer par RF avec des protocoles basse consommation (Bluetooth Low Energy, Zigbee Green Power)

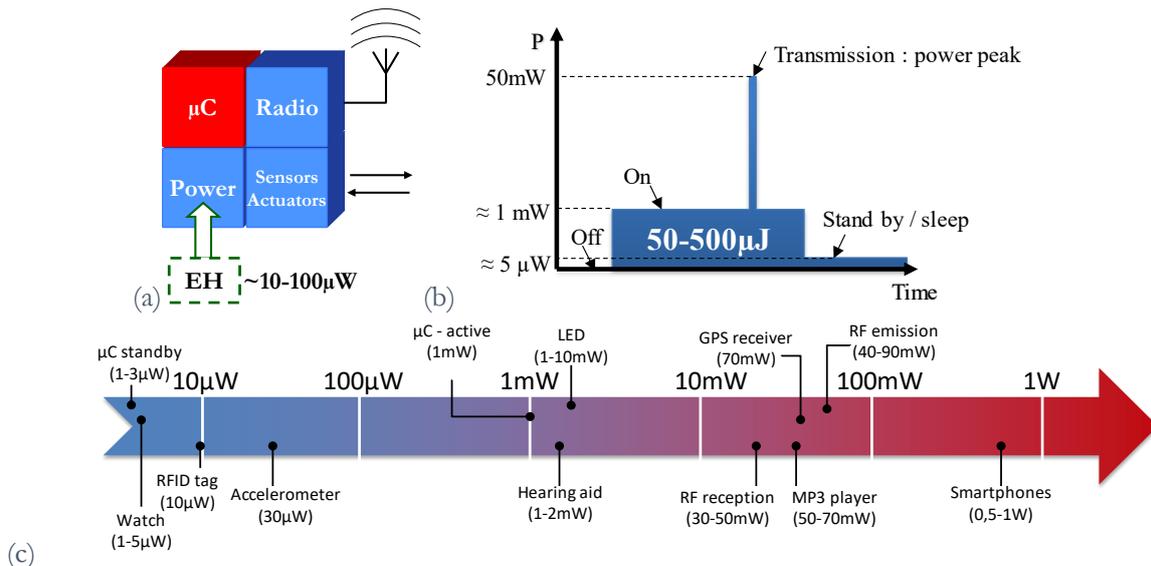


Figure 36 – (a) Capteur autonome, (b) consommation énergétique, (c) consommation électrique de dispositifs électroniques usuels

→ Approche asynchrone

La consommation d'un capteur autonome pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliwatts, à comparer aux quelques centaines de microwatts d'un récupérateur d'énergie, il est souvent nécessaire d'adopter un mode de fonctionnement intermittent avec stockage d'énergie pour pouvoir utiliser la récupération d'énergie comme source d'alimentation. Ce mode de fonctionnement intermittent peut être résumé en 3 étapes:

- (i) L'énergie ambiante est collectée grâce à un système de récupération d'énergie et stockée dans un buffer (capacité, supercapacité, batterie). Le capteur autonome est en veille voire totalement déconnecté (Figure 37a).
- (ii) Le capteur détecte qu'il y a suffisamment d'énergie dans le buffer. Il se réveille, effectue la mesure à l'aide des capteurs et la transmet (Figure 37b - Figure 37c)
- (iii) Le capteur se remet en veille, attendant un nouveau cycle de mesures (Figure 37d).

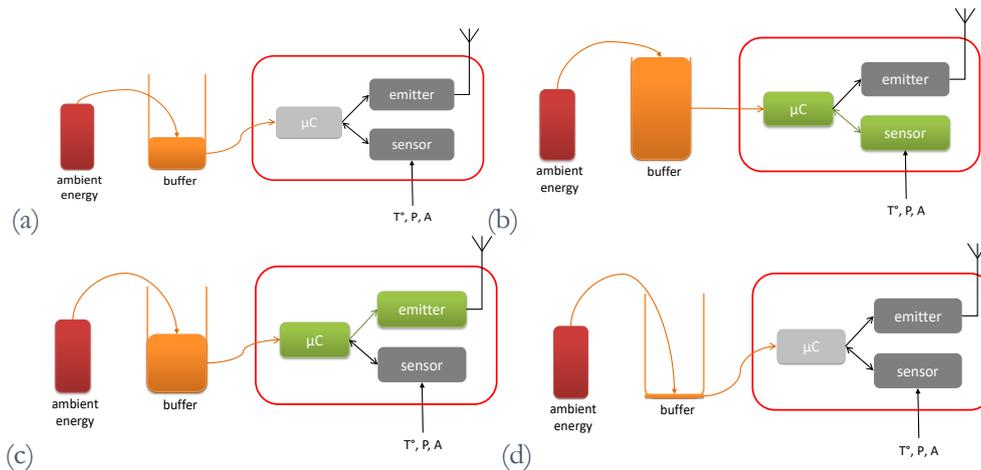


Figure 37 – Mode de fonctionnement asynchrone d'un système autonome communicant

c. Chaîne de récupération d'énergie

L'approche "système" de la récupération d'énergie peut être représentée sous la forme d'une chaîne de conversion d'énergie (Figure 38) dont l'objectif est d'alimenter une application à l'aide d'énergie ambiante. Chaque élément de cette chaîne est caractérisé par des rendements de conversion et des pertes et fait généralement l'objet de contraintes et de compromis.

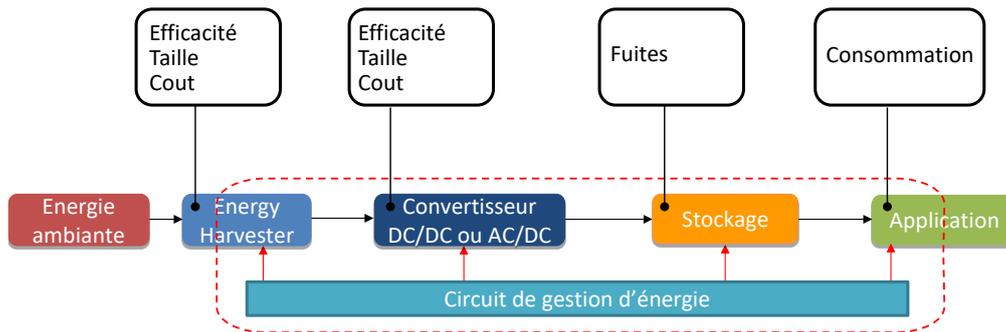


Figure 38 – Chaîne de récupération d'énergie

Mes travaux de recherche après la thèse se sont essentiellement concentrés sur les récupérateurs d'énergie électrostatiques et électromagnétiques et sur les circuits de gestion d'énergie. Par les thèses, les stages et les montages de projets, j'ai pu proposer de nouvelles thématiques de recherche dans mon département; notamment la récupération d'énergie des écoulements d'air et d'eau, l'utilisation de la triboélectricité pour améliorer la robustesse des structures électrostatiques à électrets et les électroniques de gestion d'énergie capables de démarrer à froid. Ces travaux sont présentés dans les paragraphes suivants:

3.3 Récupérateurs d'énergie à conversion électrostatique à électrets

La récupération d'énergie vibratoire à électrets était le sujet de ma thèse. J'ai poursuivi ces recherches après 2011 et notamment sur l'adaptation du convertisseur électrostatique à électrets à d'autres formes de récupération d'énergie, puis sur l'utilisation de la triboélectricité dans les deux thèses que j'ai encadrées. Le principe de fonctionnement et le modèle du convertisseur électrostatique à électrets sont le préambule de cette section.

a. Conversion électrostatique à électret - Modèle général

→ Electrets et fabrication

Les électrets sont des diélectriques dans un état de polarisation électrique quasi-permanent. Ce sont des dipôles électrostatiques, équivalents aux aimants permanents dans le domaine électrique. Les électrets peuvent être obtenus par orientation dipolaire ou par injection de charges (Figure 39).

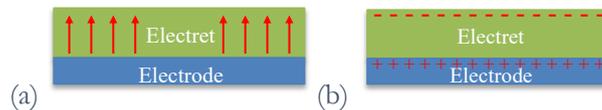


Figure 39 – Electrets obtenus par (a) orientation dipolaire, (b) injection de charges

A l'heure actuelle, les électrets sont essentiellement réalisés par décharge Corona triode (pointe – grille – plan) permettant de contrôler assez aisément le potentiel de surface du matériau à polariser (Figure 40).

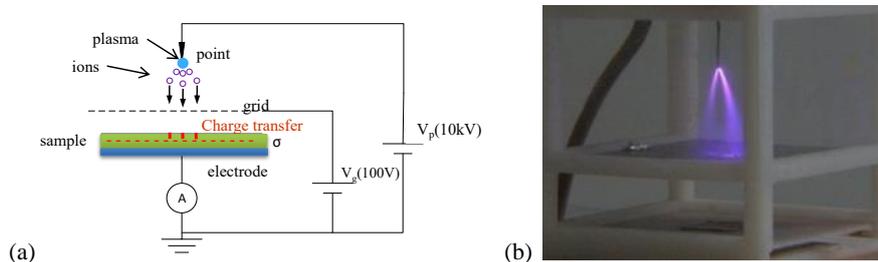


Figure 40 – Décharge Corona (a) schéma et (b) photo du plasma en bout de pointe

Un avantage de la décharge Corona est qu'elle peut être adaptée pour polariser des surfaces en anneau ou tout autre type de forme. La polarisation de structure annulaire a par exemple été utilisée pour charger le stator de turbines électrostatiques : la grille prend alors la forme d'un anneau placé entre la pointe et la surface annulaire à polariser (Figure 41) [115].

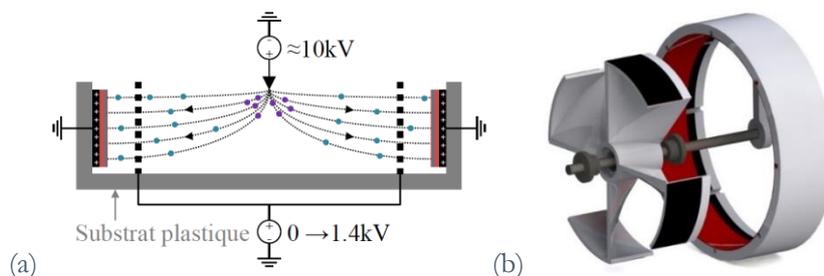


Figure 41 – Adaptation de la décharge corona à la polarisation de surface annulaire (a) principe et (b) mise en œuvre dans des turbines électrostatiques [115]

Les diélectriques ne sont malheureusement pas des isolants parfaits et des phénomènes de conduction de charges dans la matière ou en surface conduisent à une non-stabilité du potentiel de surface, qui est le paramètre le plus influant pour la conversion d'énergie électrostatique. Néanmoins, des matériaux tels que le $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ et le Téflon ont démontré une excellente stabilité dans notre laboratoire. Les mesures de potentiels de surface sur des échantillons pleine plaque ont montré que les électrets en $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ n'ont perdu que 4% de leur potentiel initial en 6.5 ans et ceux en Téflon 2% en 4 ans (Tableau 11). L'humidité, la température et les poussières restent cependant des éléments critiques pour la stabilité de ces matériaux chargés.

Tableau 11 – Stabilité des électrets en SiO₂/Si₃N₄ et en Téflon après plusieurs années

Matériaux	Constantes diélectriques	Rigidité diélectrique (V/μm)	Potentiels de surface stables typiques	Résultats après plusieurs années
SiO ₂ /Si ₃ N ₄ /HMDS	3,9/7,5	>500	100V-150V/0,5μm (10mC/m ²)	110V – 0,5μm/0,1μm => -4% en 6,5 ans
Teflon	2-2,1	Jusqu'à 250	500V/25μm (0,3mC/m ²)	500V – 25μm – 2% en 4 ans

→ Conversion électrostatique à électrets – convertisseurs et modèles équivalents

○ Convertisseurs électrostatiques à électrets

Les convertisseurs électrostatiques transforment un mouvement mécanique en électricité par le biais d'une variation de capacité. Plusieurs architectures capacitives peuvent être mises en œuvre; les quatre principales sont présentées ci-dessous:

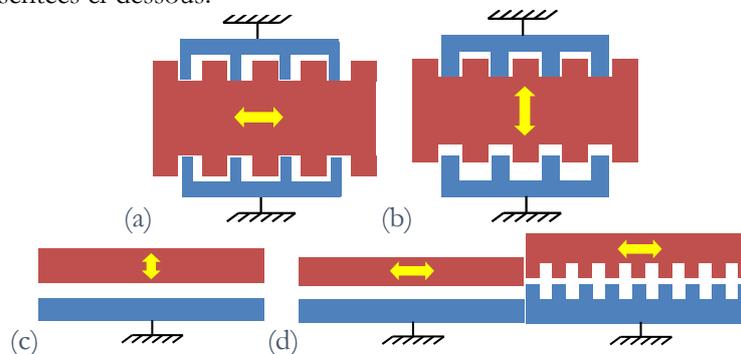


Figure 42 – Structures de récupération d'énergie électrostatique (a) in-plane gap closing, (b) in-plane overlap, (c) out-of-plane gap closing, (d) in-plane à variation de surface (pleine plaque et texturée)

Bien que chaque structure ait une fonction liant sa position et sa valeur de capacité qui lui est propre, le modèle de comportement macroscopique de ces systèmes reste le même et est détaillé dans la section suivante.

○ Modèles équivalents

Nous avons validé expérimentalement le modèle équivalent des convertisseurs électrostatiques à électrets dans [116] sur une structure de poutre encastrée-libre, et notamment l'impact que peuvent avoir les capacités parasites sur les tensions et les puissances de sortie de ces récupérateurs [117].

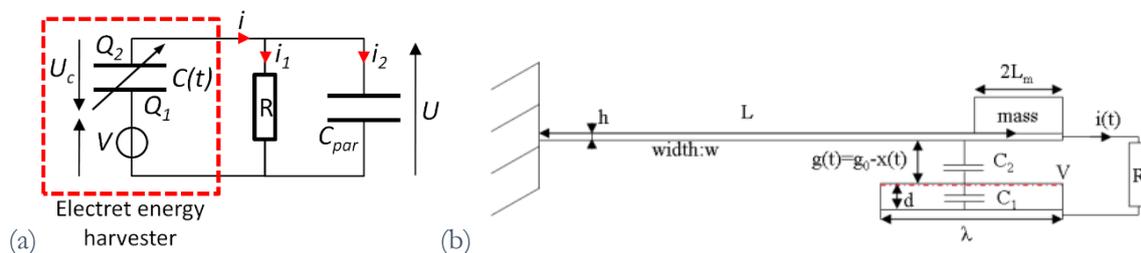


Figure 43 – (a) modèle électrique équivalent et (b) récupérateur d'énergie vibratoire à électrets de type poutre encastrée-libre

En négligeant l'impact des capacités parasites, le système est régi par le système d'équation (9). On note alors que les résultats expérimentaux ne concordent pas avec les résultats simulés, et notamment sur la partie négative du signal (Figure 44).

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx - \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{2}C(t)u_c^2\right) - mg = -m\ddot{y} \\ \frac{dQ_2}{dt} = \frac{V}{R} - \frac{Q_2}{RC(t)} \end{cases} \quad (9)$$

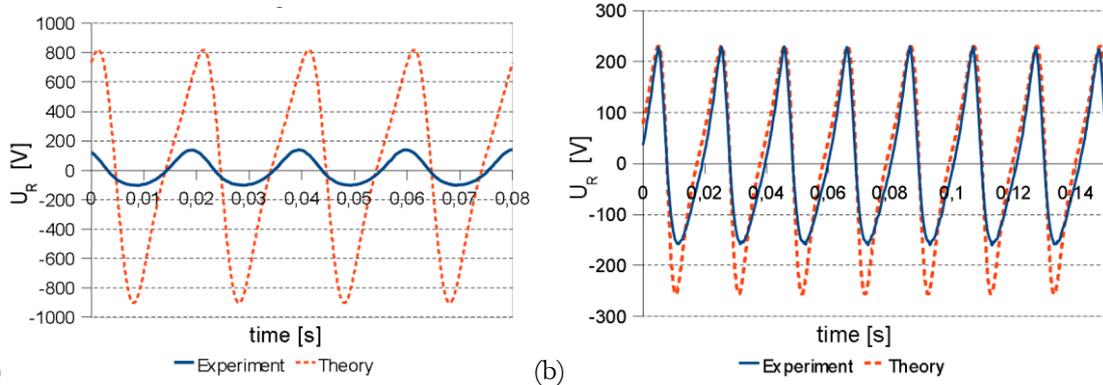


Figure 44 – Ecart considérable sur la tension de sortie lorsque les capacités parasites sont négligées (a) $R=2.2G\Omega$ et (b) $R=300M\Omega$

En prenant en compte les capacités parasites, il devient :

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_m\dot{x} + kx - \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{2}C(t)u_c^2\right) - mg = -m\ddot{y} \\ \frac{dQ_2}{dt} = \frac{1}{1+\frac{c_{par}}{C(t)}}\left(\frac{V}{R} - Q_2\left(\frac{1}{RC(t)} - \frac{c_{par}}{C(t)^2} \cdot \frac{dC(t)}{dt}\right)\right) \end{cases} \quad (10)$$

Avec :

$$p(t) = \frac{U^2}{R} = \frac{1}{R}\left(V - \frac{Q_2}{C(t)}\right)^2 \quad (11)$$

Les tests avaient alors montré une concordance parfaite entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux (Figure 45). Les capacités parasites ont donc un impact considérable sur les puissances récupérées par le dispositif et ce dès quelques pF. Les capacités parasites devront être minimisées dans les électroniques de gestion d'énergie et notamment au niveau du circuit inductif. Dans tous les cas, elles impacteront les rendements de conversion.

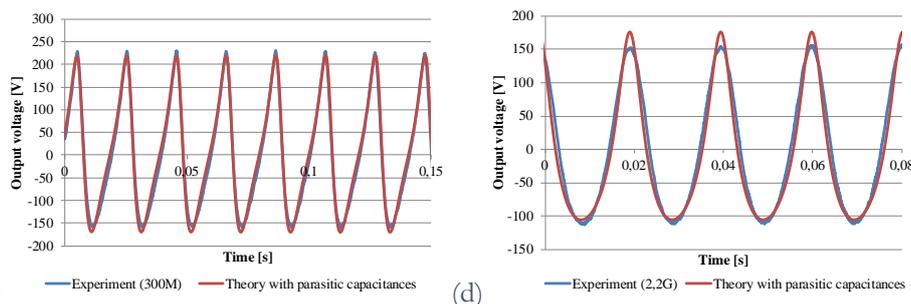


Figure 45 – validation expérimentale sur structure de poutre vibrante (a) sur $R=300M\Omega$ et (d) sur $R=2.2G\Omega$

→ Modèle électrique équivalent

Le modèle électromécanique du générateur électrostatique (Figure 46a) peut finalement être mis sous la forme d'un circuit électronique équivalent en vue de simuler son comportement lorsqu'il est associé à des circuits de gestion d'énergie (Figure 46b); la charge Z placée en sortie du modèle électrique peut alors être facilement remplacée par tout autre type de circuit (pont de diodes, SECE, ...).

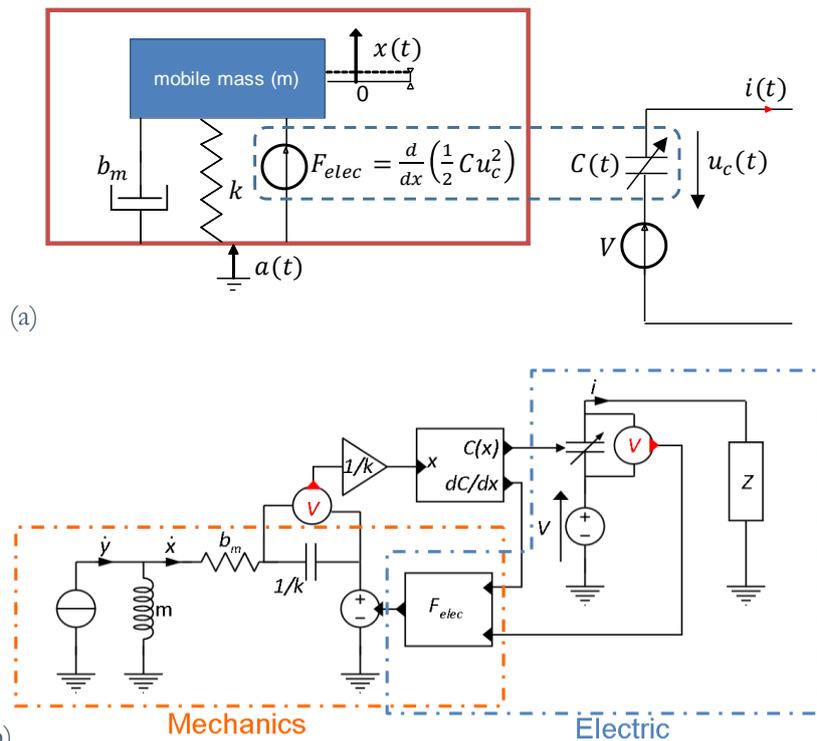


Figure 46 – (a) Modèle électromécanique et (b) modèle électrique équivalent

b. Electrets, texturation et stabilité

Une structure électrostatique in-plane à variation de surface a été développée dans le cadre de ma thèse puis dans le projet HBS visant à réaliser un récupérateur d'énergie MEMS adapté aux battements cardiaques pour alimenter un pacemaker autonome. Ces dispositifs nécessitent la mise en œuvre d'un électret texturé (Figure 47) de manière à maximiser la variation de capacité pour les petits déplacements (500µm-1mm). La stabilité des électrets texturés est un challenge; plusieurs solutions ont été proposées pour le résoudre et notamment par l'IMEC [118], l'université de Tokyo [119] et le CEA [CI3, CI6].

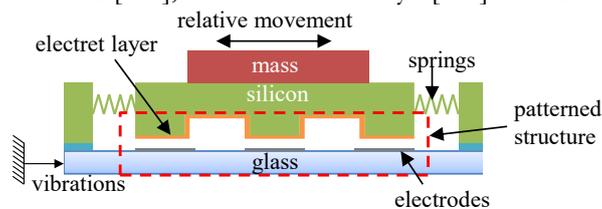


Figure 47 – récupérateur d'énergie mettant en œuvre un électret texturé proposé par le CEA

- Publications et Brevets associés :
- [CI3] – New DRIE-Patterned Electrets for Vibration Energy Harvesting
 - [CI6] – Stable DRIE-patterned SiO₂/Si₃N₄ electrets

→ Electrets structurés et stabilité

La solution retenue pour fabriquer des électrets texturés en SiO₂ stables a été proposée pendant ma thèse: le principe est de réaliser une couche continue d'électrets (SiO₂/Si₃N₄/HMDS) sur une surface crénelée de silicium gravé par DRIE, puis polarisée par décharge Corona (Figure 48).

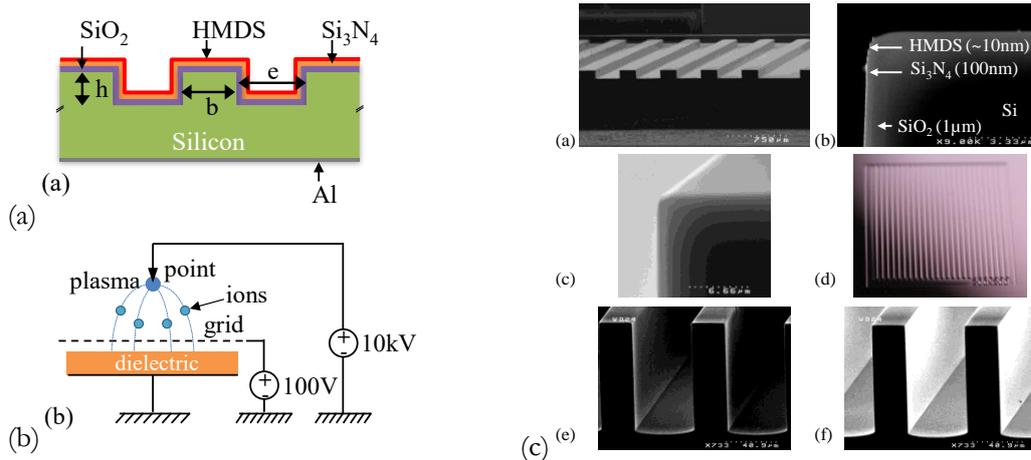


Figure 48 – Electrets structurés (a) schéma, (b) décharge corona et (c) images MEB détaillant les couches et la texturation

Nous avons poursuivi les développements de ces matériaux dans le cadre du projet HBS. L'excellente stabilité a été confirmée sur 450 jours (Figure 49a): aucune décroissance du potentiel de surface n'a été observée sur des électrets chargés à 120V ($\sigma=4\text{mC}/\text{m}^2$). Nous avons également validé la stabilité de ces matériaux en température (2H à 250°C - Figure 49b), aux rayons X (13.4mGray pendant 30 secondes) et aux champs magnétiques (7.5T pulsés pendant 1 minute – test IRM standard).

L'impact du pas de texturation sur la stabilité a également été testé jusqu'à $e \times b = 25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$: la chute du potentiel de surface est limitée à 1V (1%) après 450 jours, confirmant l'excellente performance de cette méthode de texturation.

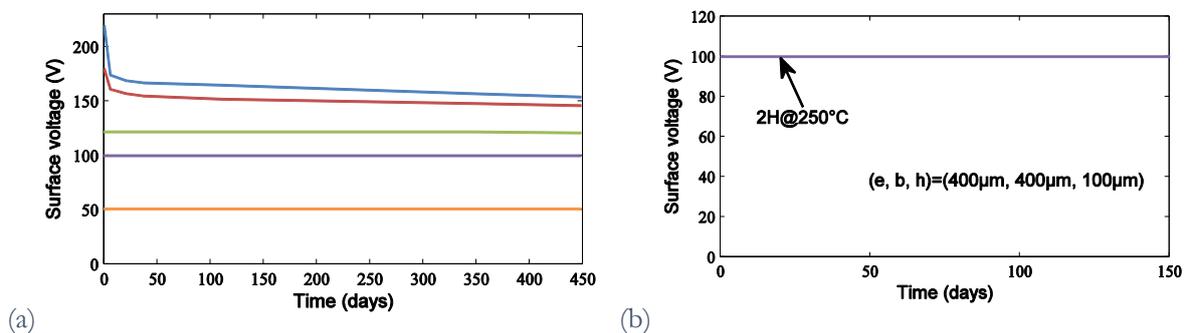


Figure 49 – (a) stabilité dans le temps et (b) stabilité après 2H à 250°C

→ Chargement pleine plaque

La décharge Corona triode (pointe-grille-plan) a une surface de chargement limitée à quelques cm^2 . Nous avons donc développé une méthode de chargement pour des wafers de 200mmØ en utilisant une décharge Corona multi-points (Figure 50a); et ce afin de rendre cette méthode compatible avec les procédés salle blanche. Une caractérisation surfacique du potentiel de surface des wafers montre que la méthode permet d'obtenir une excellente uniformité des électrets puisque 99.4% de la surface est chargée entre 100V et 110V (bords non pris en compte). Il est également à noter que le pas de texturation est différent d'un point à un autre, sans impacter le potentiel de surface final imposé par la grille.

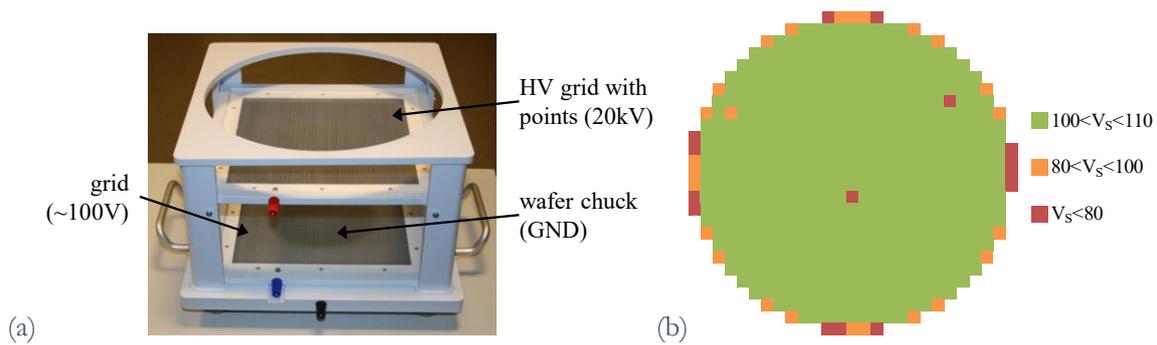


Figure 50 – Chargement pleine plaque (a) décharge Corona multi-pointe et (b) mapping du potentiel de surface sur un wafer 200mmØ après décharge Corona multi-pointes.

Mes activités de recherche sur les dispositifs électrostatiques ont par la suite porté sur des structures macroscopiques et notamment sur l'adaptation du convertisseur électrostatique à électrets à d'autres sources d'énergie ambiante que les vibrations : les gradients de température et les écoulements d'air à l'aide de microturbines et de membranes.

c. Récupération d'énergie thermique par bilames

Les travaux sur la récupération d'énergie des gradients thermiques en utilisant un bilame combiné à un convertisseur électrostatique à électrets ont démarré en 2012, dans le cadre du projet HEATec (FUI). L'objectif principal était d'étudier une alternative aux modules Seebeck en utilisant un bilame comme machine thermique. Un principe de fonctionnement équivalent à conversion piézoélectrique a également été proposé [CI8], [CI10].

- Publications et Brevets associés :
- [BR4] – Dispositif de conversion d'énergie thermique en énergie électrique
 - [JS3] – Semi-flexible bimetal-based thermal energy harvesters
 - [CI8] – Piezoelectric and electrostatic bimetal-based thermal energy harvesters
 - [CI10] – SPICE modelling of a coupled piezoelectric-bimetal heat engine for autonomous Wireless Sensor Nodes (WSN) power supply

→ Concept

Les bilames sont constitués d'un empilement de deux métaux de coefficients de dilatation thermique différents (CTE). Les bilames plats se courbent sous l'effet d'une augmentation ou d'une diminution de la température (Figure 51a), et se comportent donc comme des actionneurs thermiques. Les bilames incurvés (Figure 51b) sont des structures fortement non-linéaires passant très rapidement d'un état bas à un état haut sous l'effet d'une augmentation de la température et vice versa, mais avec une hystérésis (Figure 51c).

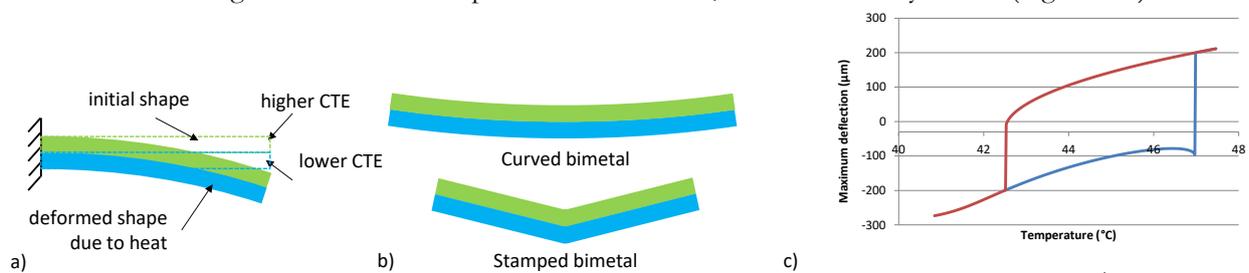


Figure 51 – (a) Bilames plats, (b) bilames incurvés et poinçonnés et (c) cycle d'hystérésis

Ainsi, placé entre une source chaude et une source froide, le bilame incurvé se transforme en machine thermique capable de convertir un gradient thermique en oscillations mécaniques (Figure 52) qui peuvent

être transformées en électricité à l'aide de n'importe quel type de convertisseur électromécanique (piézoélectricité, électromagnétisme, électrostatique).

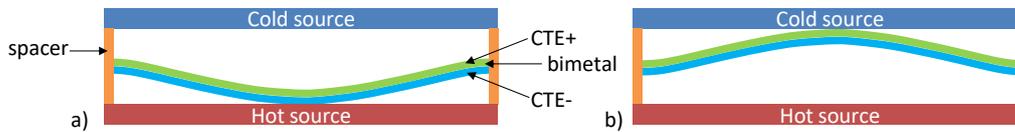


Figure 52 – Machine thermique à base de bilames (a) état bas et (b) état haut

Nous fûmes les premiers à proposer une solution à convertisseur électrostatique à électrets: la structure précédente est légèrement modifiée avec l'ajout de couches d'électrets placées entre le bilame et la surface chaude, et entre le bilame et la surface froide, formant deux convertisseurs d'énergie.

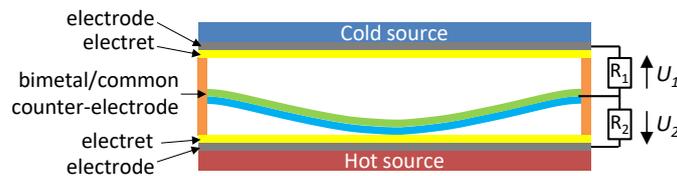


Figure 53 – Machine thermique à base de bilames et conversion électrostatique à électrets

→ [Prototypes et puissances de sortie](#)

Les bilames les plus efficaces pour ces convertisseurs sont constitués d'INVAR (Fe-Ni36% - $CTE=2 \times 10^{-6}$) et de B72M (Mn-Cu18%-Ni10% - $CTE=26.4 \times 10^{-6}$). Ils mesurent $3\text{cm} \times 1\text{cm}$ et font $115\mu\text{m}$ d'épaisseur. Les formes de ces bilames à l'état haut et à l'état bas sont présentés Figure 54. La température de déclenchement bas-haut est de 47°C et celle de déclenchement haut-bas de 42.5°C .

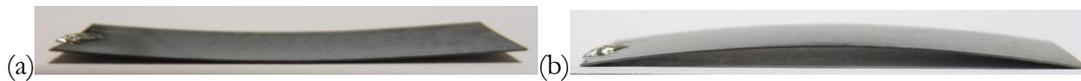


Figure 54 – Bilame thermique seul (a) état bas, (b) état haut

Plusieurs architectures mettant en œuvre ce principe ont été proposées:

La première [JS3] est réalisée en plaçant le bilame entre deux surfaces en acier flexibles (Figure 55). L'électret est en Téflon FEP de $25\mu\text{m}$ d'épaisseur, polarisé par décharge Corona. Le bilame est recouvert d'une couche de parylène-C de $1\mu\text{m}$ d'épais pour éviter le contact électret/métal destructeur pour l'électret. L'ensemble est placé sur une plaque chauffante à 60°C . Un ventilateur s'est révélé indispensable pour assurer un gradient thermique suffisant dans le dispositif; la température mesurée sur la plaque froide est de 36°C . Un exemple de tensions de sortie est représenté Figure 55e, chaque pic correspondant à un passage haut-bas ou bas-haut du bilame. La fréquence d'oscillations est comprise entre 1 et 3Hz. Les tensions atteignent plusieurs centaines de volts et la puissance de sortie est de $13.46\mu\text{W}$ avec deux électrets chargés à -500V .

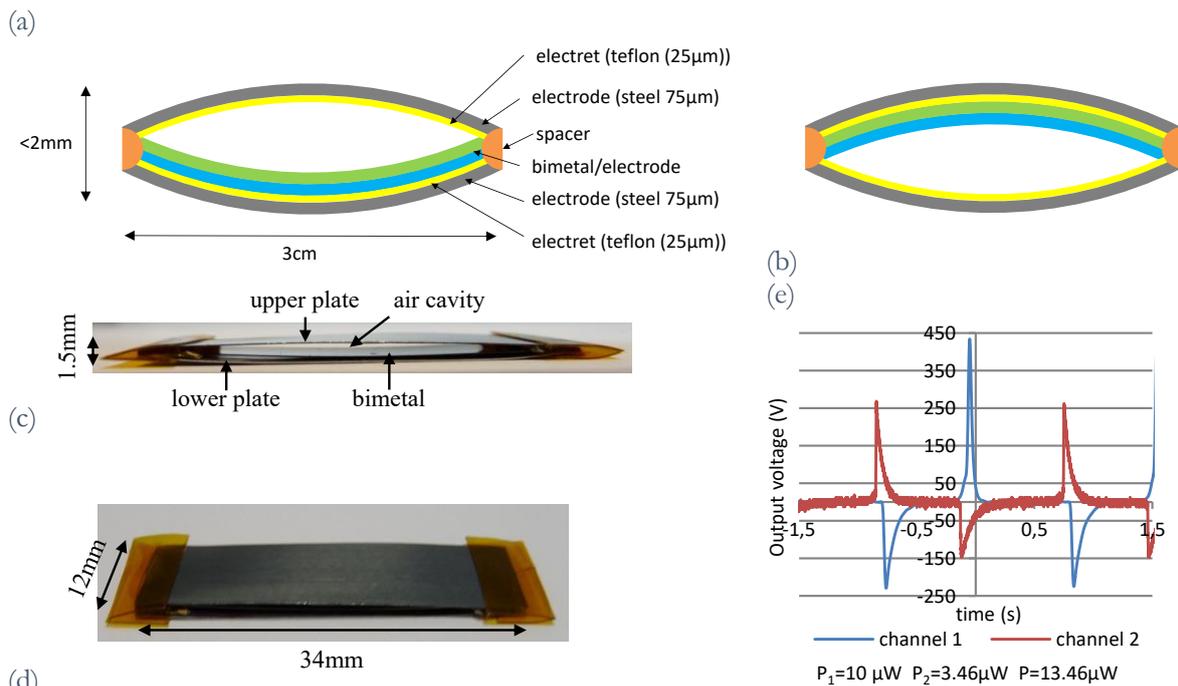


Figure 55 – Prototype semi-flexible (a) schéma – état bas, (b) schéma – état haut, (c) prototype – vue de coté, (d) prototype – vue isométrique, (e) tension de sortie

Un radiateur fut par la suite ajouté pour supprimer la convection forcée; le point chaud fut également décalé et réduit en surface pour ce même objectif (Figure 56). Placé sur une surface chaude de 75° , la puissance de sortie atteint $6.4\ \mu\text{W}$ avec un électret de 875V (Figure 56d).

Il est intéressant de noter le bon couplage que permet la conversion électrostatique à électret dans ce dispositif, et plus généralement dans les dispositifs de petites dimensions. La Figure 56e montre l'impact du potentiel de surface de l'électret sur la fréquence de commutation du bilame et sur la puissance de sortie: passé 600V , la puissance de sortie stagne. L'augmentation de l'énergie récupérée par cycle est compensée par une fréquence de commutation plus basse.

On notera finalement que le dispositif de récupération d'énergie avec radiateur permet de récupérer de l'énergie thermique sur une gamme de température de l'ordre de 20°C (Figure 56f).

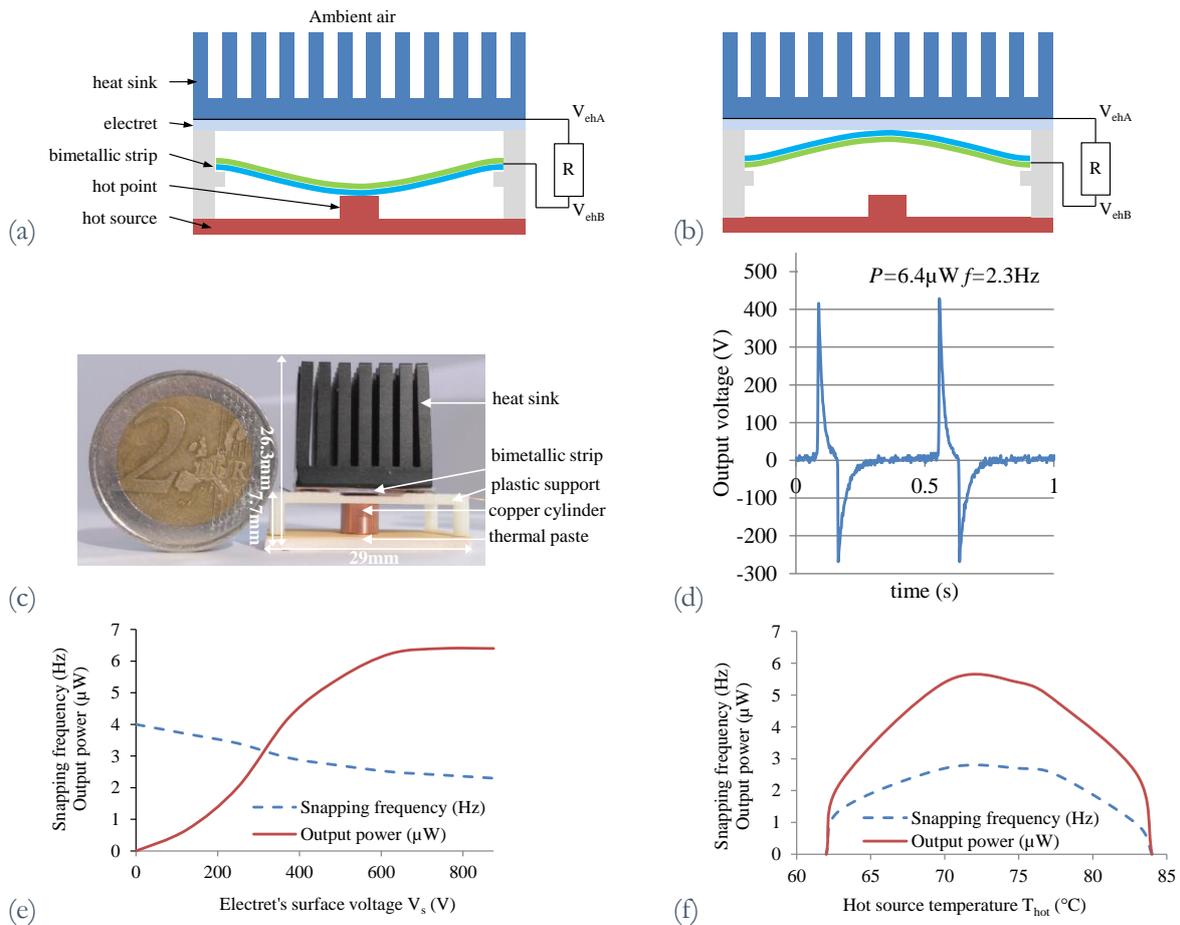


Figure 56 – Design amélioré fonctionnant sans convection forcée (a) état bas et (b) état haut. (c) prototype, (d) tensions de sortie, (e) fréquence d'oscillations et puissance de sortie en fonction du potentiel de l'électret et (f) fréquence d'oscillations et puissance de sortie en fonction de la température de la source chaude

d. Récupération d'énergie des flux d'air – fluttering & microturbines

Les écoulements d'air sont une source d'énergie ambiante dont les densités de puissances peuvent atteindre plusieurs dizaines de mW/cm^2 . Nous avons proposé d'utiliser la conversion électrostatique à électrets pour transformer la puissance cinétique des flux d'air en électricité. Deux concepts ont été étudiés, le fluttering et les microturbines, et réalisés dans le cadre de la thèse de Matthias Perez.

- Publications et Brevets associés :
- [BR9] – Convertisseur électrostatique
 - [JS5] – An electret-based aeroelastic flutter energy harvester
 - [JS7] – A cm scale electret-based electrostatic wind turbine for low-speed energy harvesting applications
 - [JS12] – Aeroelastic flutter energy harvesters self-polarized by triboelectric effects
 - [CI11] – Electret-based aeroelastic harvester and its self-starting battery-free power management circuit
 - [CI14] – Design and performance of a small-scale wind turbine exploiting an electret-based electrostatic conversion
 - [CI20] – Triboelectret-based aeroelastic flutter energy harvesters
 - [CI21] – A triboelectric wind turbine for small-scale energy harvesting

→ Fluttering

○ Concept

Le fluttering (effet drapeau) est une instabilité aérodynamique qui apparaît lorsqu'une structure flexible est placée dans un écoulement. Néanmoins, cet effet n'apparaît qu'à partir d'une certaine vitesse $U_{critique}$ à partir de laquelle des effets d'aspiration de la membrane et de contre-réaction du film conduisent à des oscillations (Figure 57).

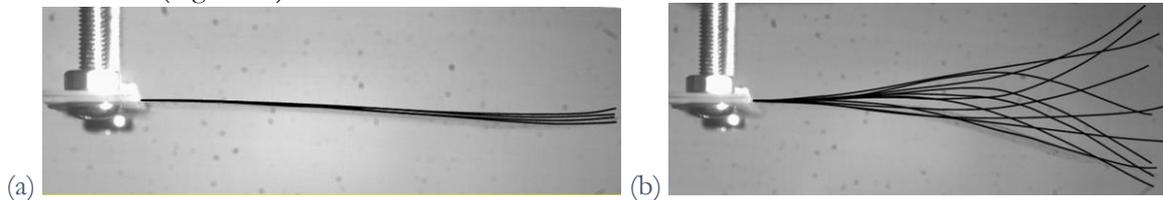


Figure 57 – Fluttering – passage de l'état stable à l'état instable (a) $U < U_{critique}$ et (b) $U > U_{critique}$

Ainsi, en combinant ce phénomène d'instabilité aérodynamique à un convertisseur à électret, il est possible de convertir l'énergie cinétique d'un écoulement en énergie électrique. Le schéma de l'un des prototypes développés dans la thèse de Matthias Perez est présenté Figure 58 avec deux convertisseurs électrostatiques à électrets placés de part et d'autre de la membrane; ce dispositif fut le premier de l'état de l'art à combiner des effets de fluttering aux convertisseurs électrostatiques à électrets.

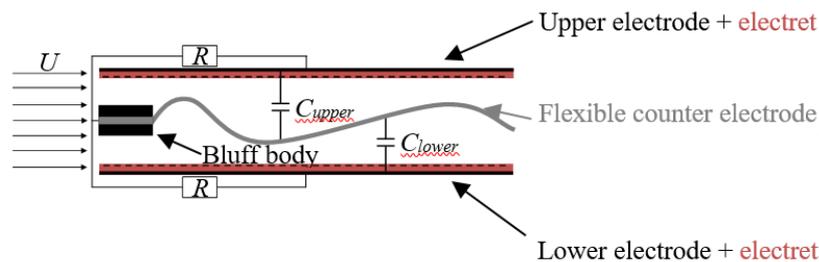


Figure 58 – Convertisseur électrostatique pour la récupération d'énergie des flux d'air

○ Prototypes et puissances de sortie

Un prototype réalisé avec une membrane PVDF de $25\mu\text{m}$ d'épaisseur a permis d'étendre le modèle d'ondulation d'un film non-confiné au cas confiné mis en œuvre dans notre système (Figure 59); et notamment le fait que la position de la membrane selon l'axe y peut être modélisée par une onde qui se propage de fréquence temporelle f et de longueur d'onde λ combinée à une enveloppe spatiale croissante $A(x)$ (équation (12)).

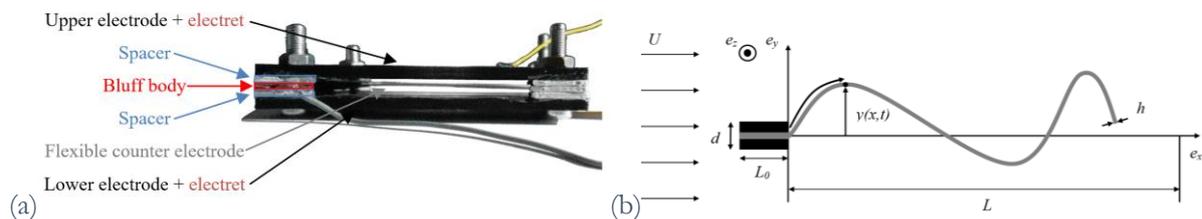


Figure 59 – (a) prototype et (b) modèle mécanique de la membrane

$$y(x, t) = A(x, U) \sin\left(2\pi\left(f(U)t + \frac{x}{\lambda(U)}\right)\right) \quad (12)$$

La fréquence d'oscillation f augmente et la longueur d'onde spatiale λ diminue lorsque la vitesse du fluide en entrée U augmente (Tableau 12). Les vitesses de démarrage (cut-in speed) sont néanmoins élevées ($>12.5\text{m/s}$) et dues à l'utilisation d'une structure confinée.

Tableau 12 – Etat de la membrane confinée en fonction de la vitesse d'entrée

U (m/s)	f (Hz)	λ/L	L_i/L	$A/L(1)$	Superposition des différents états de la membrane
10	74		1	0.030	
12.5	105	0.7	0.55	0.040	
15	156	0.6	0.35	0.051	
20	247	0.475	0.225	0.063	
25	323	0.425	0.2	0.067	
30	406	0.425	0.2	0.067	

Couplée aux deux convertisseurs à électrets, la membrane produit jusqu'à 2.1mW à 30m/s, avec une polarisation de $V=650V$ (Figure 60a). Les tensions aux bornes des deux convertisseurs sont en opposition de phase (Figure 60b) comme attendu; l'asymétrie entre les tensions positives et les tensions négatives s'explique par les effets des capacités parasites (Section 3.3.a). Il est également intéressant de noter que la puissance de sortie est globalement proportionnelle à V^2 : en fait, cette proportionnalité est vérifiée pour les petites valeurs de V ; une dérive est observée pour les fortes valeurs de V et s'explique par des phénomènes de couplages électromécaniques (Figure 60c).

Finalement, il apparait que la fréquence d'oscillations de la membrane est globalement proportionnelle à la vitesse d'entrée du fluide (Figure 60d), montrant que ces dispositifs pourraient également être utilisés en débitmètres avec un mode de fonctionnement proche des débitmètres à vortex.

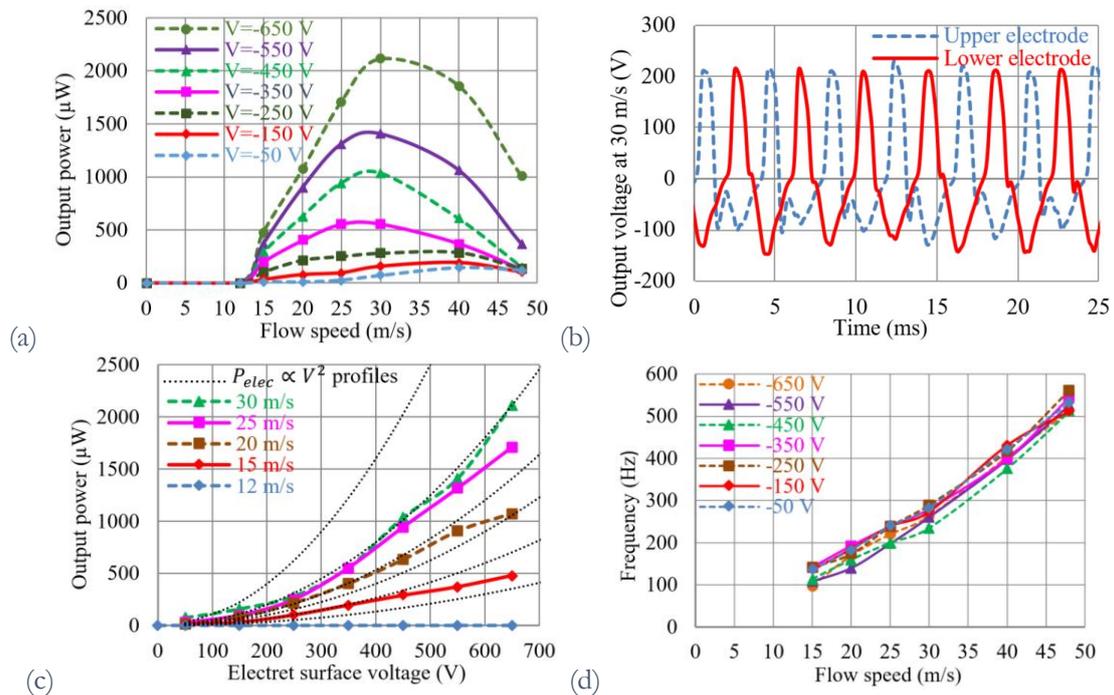


Figure 60 – (a) puissance de sortie en fonction du débit d'entrée et du potentiel des électrets, (b) exemple de tensions en sortie des deux convertisseurs, (c) puissance de sortie en fonction du potentiel de surface de l'électret (V) et du flux d'entrée (U)

o [Ajout des effets triboélectriques](#)

Le contact intermittent entre la membrane et les parois peut être utilisé pour polariser les électrets par triboélectricité et ainsi améliorer la robustesse du dispositif en recréant des charges tout au long de sa durée de vie. Ce principe a été testé sur des structures semi-confinées et confinées (Figure 61a - Figure 61b) avec des membranes en Téflon FEP et des parois en cuivre. Il s'avère tout d'abord que le potentiel atteignable par triboélectricité seule reste largement inférieur à ce qu'il est possible d'obtenir par décharge Corona (Figure 61c). Par exemple pour du Téflon FEP de $25\mu\text{m}$ d'épaisseur, le maximum atteint par triboélectricité est de 300V alors qu'il est plutôt de 600V par décharge Corona, paramètre impactant au carré la puissance de sortie. Finalement, ces expériences sur les dispositifs à fluttering triboélectriques ont mis en exergue l'apport d'une texturation des électrodes sur les puissances de sortie, avec un gain estimé de 3 par rapport à la configuration pleine plaque (Figure 61d).

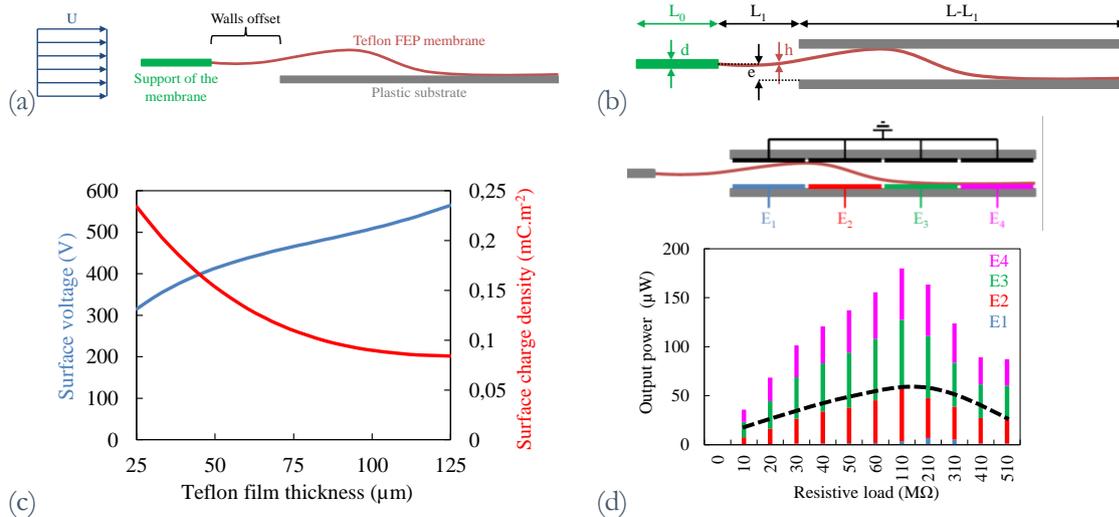


Figure 61 – structure triboélectrique (a) semi-confinée et (b) confinée; (c) potentiel de surface atteint par triboélectricité en fonction de l'épaisseur de téflon et (d) texturation des électrodes pour améliorer les performances – en noir la puissance récupérée dans une configuration "pleine plaque" avec E1, E2, E3, E4 connectée ensemble

Le fonctionnement du système est donc vérifié. Néanmoins, du fait des tensions de polarisation plus faibles qu'en décharge Corona, les puissances maximales obtenues sur les systèmes triboélectriques sont de $35 \mu W/cm^2$ à comparer aux $280 \mu W/cm^2$ des structures électrostatiques à électrets. Une possibilité serait de combiner les deux phénomènes i.e. partir d'une structure polarisée par décharge Corona et bénéficier des effets triboélectriques pendant son fonctionnement.

→ Microturbines électrostatiques

La seconde option pour convertir l'énergie cinétique d'un fluide en électricité est d'utiliser une turbine, qui peut être combinée à la conversion électrostatique à électrets.

○ Concept

Le récupérateur d'énergie (Figure 62a - Figure 62b) est constitué d'une turbine axiale sur laquelle sont placés N électrets en périphérie. Cette turbine tourne à l'intérieur d'un anneau recouvert d'un ensemble de $2N$ électrodes reliées deux à deux par des résistances. N convertisseurs électrostatiques sont donc formés autour de la turbine. Une configuration "slot effect" a été retenue pour simplifier la récupération de l'énergie: aucun contact électrique n'est pris sur la partie en rotation. Cette configuration est représentée Figure 62c, en détail Figure 62d et son fonctionnement est régi par l'équation (13).

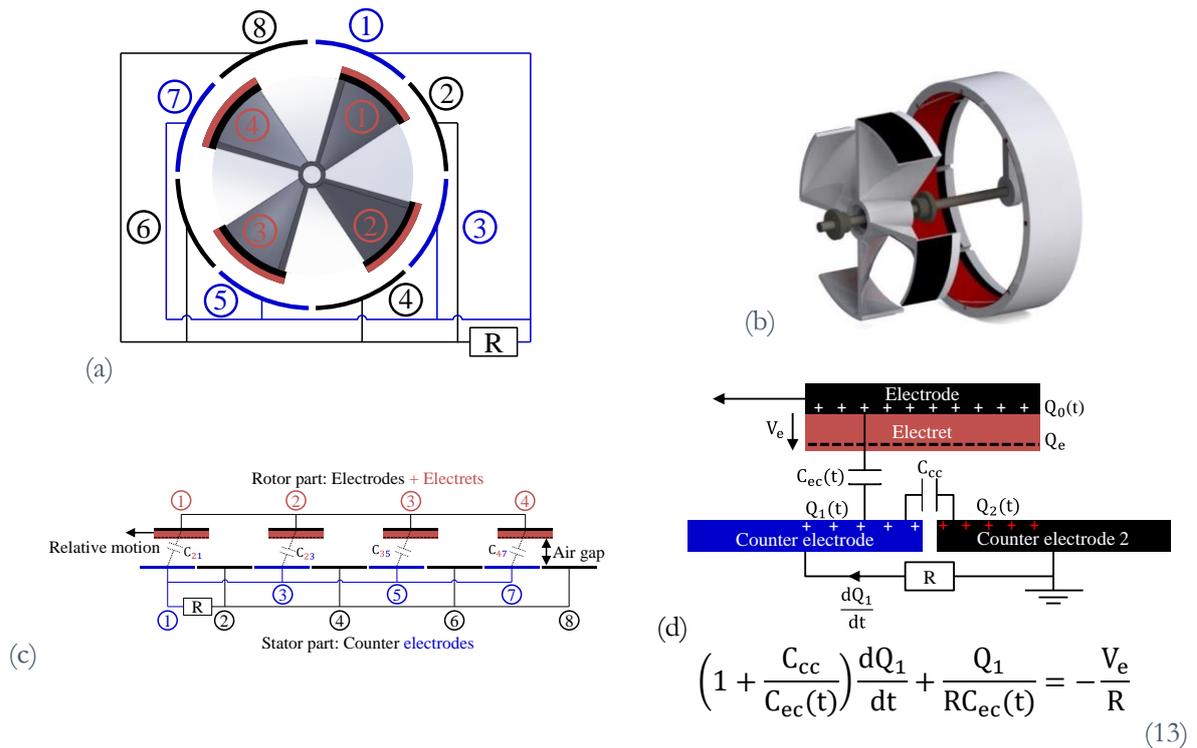


Figure 62 – Turbine électrostatique à électrets (a) Schema pour N=4, (b) CAO 3D, (c) Modèle plan équivalent et (d) configuration "slot-effect" et équation électrique associée

o [Modélisation et optimisation](#)

Le convertisseur électrostatique a été modélisé par éléments finis dans le but de calculer les variations de capacité en fonction du nombre d'électrodes et de contre-électrodes (Figure 63a - Figure 63b). Comme attendu, l'augmentation du nombre d'électrodes entraîne une diminution de la variation de capacité du fait de l'accroissement des capacités parasites liées aux effets de bords (Figure 63c). Cet effet est accru avec l'augmentation du gap d'air entre le rotor et le stator, confirmant l'intérêt d'avoir des gaps d'air réduits entre la partie fixe et la partie mobile. Néanmoins, augmenter le nombre d'électrodes permet de multiplier le nombre de variations de capacités par tour et donc la fréquence électrique du convertisseur (Figure 63d).

Le nombre optimum d'électrodes obtenu par simulations est N=8.

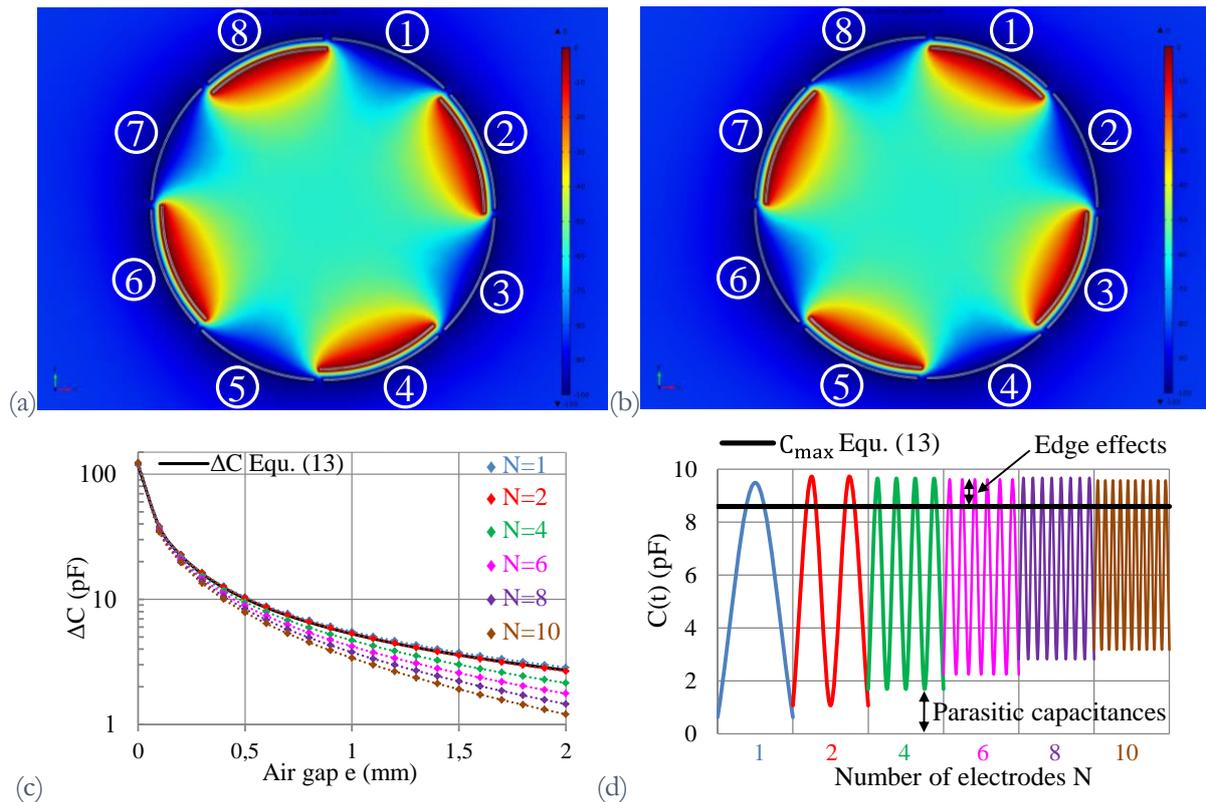


Figure 63 – Simulations éléments finis du convertisseur électrostatique $N=4$ (a) capacité minimale pour les électrodes impaires (et maximale pour les électrodes paires) et (b) capacité maximale pour les électrodes impaires (et minimale pour les électrodes paires). (c) Variation de capacité en fonction du gap d'air pour différentes valeurs de N et (d) évolution de la variation de capacité en fonction du nombre d'électrodes pour une rotation complète ($R=20\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $e_c=127\mu\text{m}$, $\epsilon_c=2.1$, $e=600\mu\text{m}$)

o Prototype et puissances de sortie

Un prototype de turbine électrostatique de diamètre 40mm et à 4 pales a été réalisé. La profondeur de la turbine est fixée à 10mm; les pales sont vrillées d'un angle de 20° . Les électrets sont en Téflon FEP de $127\mu\text{m}$ d'épaisseur polarisés à 1400V par décharge Corona. Le gap d'air entre les électrets et les contre-électrodes est estimé à $e=600\mu\text{m}$. Plusieurs configurations de convertisseurs électrostatiques avec $N=2, 4, 6$ et 8 électrodes mobiles ont été testées. La configuration $N=6$ s'avère être la plus performante; $95\mu\text{W}$ sont produits à 1.5m/s et jusqu'à 1.8mW à 10m/s . Le coefficient de puissance atteint 5.8% à 1.7m/s et diminue avec la vitesse d'entrée. Ceci est lié au fait que la vitesse de rotation de la turbine est proportionnelle à la vitesse d'entrée; la puissance de sortie du convertisseur électrostatique qui est proportionnelle à la fréquence de rotation est donc elle-même proportionnelle à la vitesse d'entrée. Par contre, la puissance théorique pouvant être extraite d'un fluide est proportionnelle à U^3 . Ceci explique pourquoi le coefficient de puissance est élevé en petites vitesses et décroche lorsque U augmente, avec une puissance théoriquement proportionnelle à U^3 , mais limitée par la puissance maximale du convertisseur proportionnelle à U .

On notera qu'en électromagnétisme, cette puissance de sortie serait proportionnelle à la vitesse d'entrée au carré.

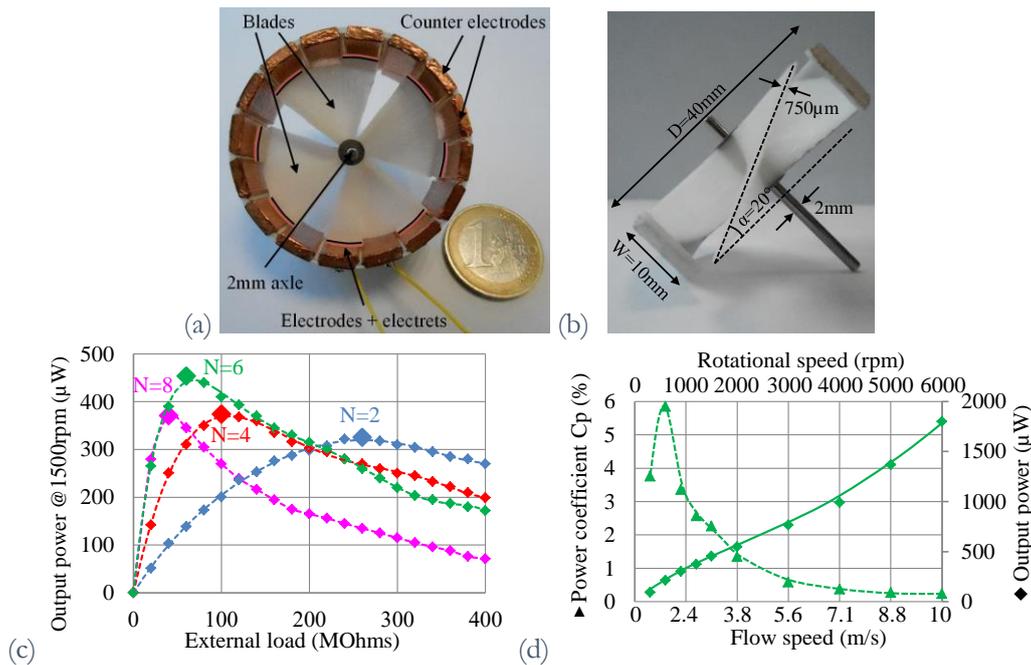


Figure 64 – Prototype (a) vue de face et (b) vue de coté. (c) puissance de sortie en fonction de la charge R pour $V=1400V$ et $U=3m/s$ et (d) Puissance de sortie et coefficient de puissance en fonction de la vitesse d'entrée U pour $N=6$

Parmi les μ turbines de l'état de l'art, cette solution présente la vitesse de démarrage (cut-in speed) la plus faible et un coefficient de puissance en faibles vitesses ($<2m/s$) parmi les meilleurs. Comme évoqué précédemment, ces performances chutent avec l'augmentation de la vitesse et liées au convertisseur électrostatique lui-même.

Tableau 13 – Performances de la μ turbine électrostatique à électrets comparées à l'état de l'art [JS7]

Ref	Conversion	\varnothing (cm)	Pales	U (m/s)	Puissance moyenne (μW)	Densité de puissance ($\mu W/cm^2$)	Efficacité C_{ptot} (%)
[13]	Emag	0.75	24	40	1,100	2,490	0.078
[14]	Emag	4.2	4	5.5	2,400	173	2.1
				11.8	130,000	9,383	11
[15]	Emag	2.0	12	4.8	25	8.0	0.14
				7	1000	318	1.9
				10	4,300	1369	2.7
[16]	Emag	7.6	4	3	6,000	132	9.8
				4	13,500	298	9.3
[17]	Emag	6.3	4	2.4	2,000	64	9.3
				4.2	8,000	257	6.9
				4.7	10,000	321	6.2
[18]	Emag	2.0	12	3	80	25	1.9
				7	2,500	796	4.6
				10	4,300	1369	2.7
[CI23] (CEA)	Emag	3.5	3	2	412	42.9	8.9
				3	1959	204	12.5
[CI14] (CEA)	Estat	4.0	4	4	30	2.4	0.075
				10	200	16	0.032
[JS7] (CEA)	Estat	4.0	4	1.5	95	7.5	3.8
				1.7	210	17	5.8
				2.3	300	24	3.4
				3	450	36	2.3
				5.6	770	61	0.59
				10	1800	143	0.24

o Mise en œuvre de la triboélectricité

Pour des raisons équivalentes à celles évoquées pour l'étude de la conversion triboélectrique des dispositifs de type fluttering, nous avons étudié la possibilité de combiner des effets triboélectriques aux turbines.

Des membranes en téflon FEP de 50µm d'épaisseur ont été ajoutées en périphérie du rotor de manière à générer des charges par contact glissant sur les électrodes en cuivre. La force centrifuge permet de maintenir le contact entre les membranes et les électrodes dès lors que la turbine entre en rotation. Par ailleurs, ce principe permet de simplifier la fabrication des turbines électrostatiques en réduisant les contraintes de précision sur le gap entre les électrets et les électrodes des turbines présentées dans les sections précédentes.

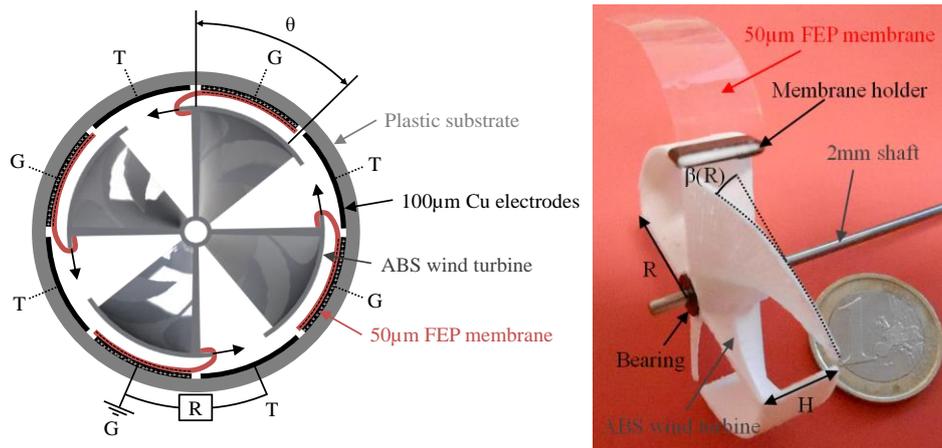


Figure 65 – Mise en oeuvre de la triboélectricité sur des turbines électrostatiques (a) schéma et (b) prototype

Plusieurs rotors de diamètres $D=40\text{mm}$, de profondeur $h=10\text{mm}$, d'angles de vrillage $\beta(R)$ compris entre 20° et 40° et avec $N=0, 1$ ou 2 membranes triboélectriques ont été testées. Nous avons tout d'abord validé le phénomène de polarisation de la membrane FEP à 300V . Ensuite, il apparaît que l'ajout de membranes a tendance à accroître la vitesse de démarrage, passant de 1m/s à 4m/s (Figure 66a). De plus, la friction des membranes sur le stator a également pour effet de réduire la vitesse de rotation de la turbine passant de $7300\text{tr/min}@10\text{m/s}$ sans membrane à $3700\text{tr/min}@10\text{m/s}$ avec 1 membrane et $1200\text{tr/min}@10\text{m/s}$ avec 2 membranes.

Au final, les meilleurs résultats obtenus sont de $1\mu\text{W}$ à 4m/s , $130\mu\text{W}$ à 10m/s et $550\mu\text{W}$ à 20m/s (Figure 66b).

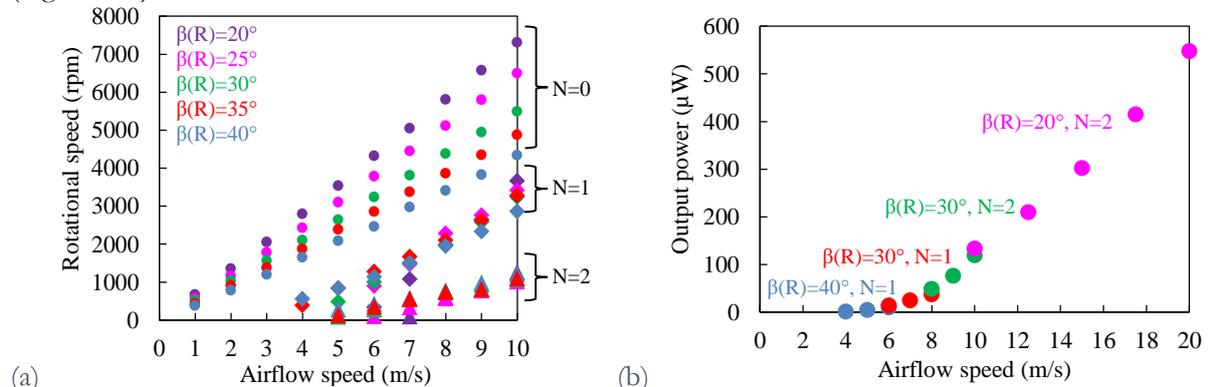


Figure 66 – (a) impact des membranes sur la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse d'entrée U et (b) puissances de sortie maximales entre 0 et 20m/s

e. Utilisation de liquides pour la conversion électrostatique à électrets

En axe de recherche amont, j'avais également proposé la possibilité d'utiliser un fluide se déplaçant dans une cavité pour récupérer l'énergie des mouvements vibratoires basse fréquence. Le mouvement de ce fluide crée une variation de permittivité et donc de capacité, qui se traduit par la génération d'une tension aux bornes du convertisseur électrostatique à électrets (Figure 67a).

Un prototype a été réalisé pendant la thèse de Matthias Perez et des premières puissances de sortie obtenues (Figure 67b). Ces dernières restent cependant limitées à quelques centaines de nW (Figure 68).

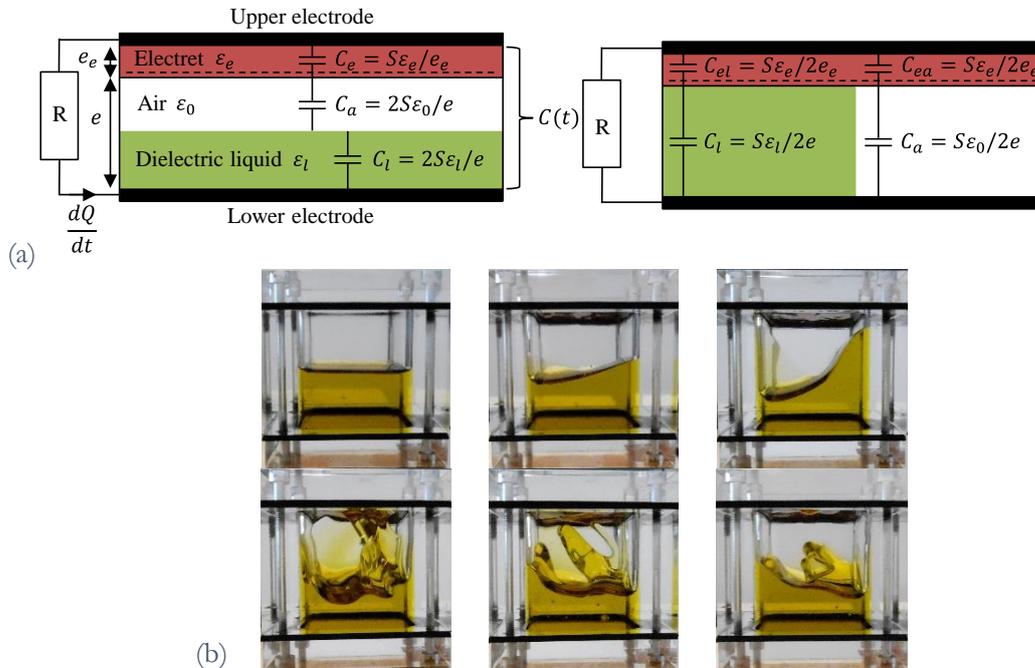


Figure 67 – (a) principe de fonctionnement du convertisseur à mouvement de fluides et (b) prototype

Nous avons également noté une forte décharge de l'électret lorsqu'il était plongé dans un liquide (Figure 68). Ces solutions ont été mises en standby suite à ces résultats, mais pourraient être réétudiées en mettant en œuvre des effets triboélectriques.

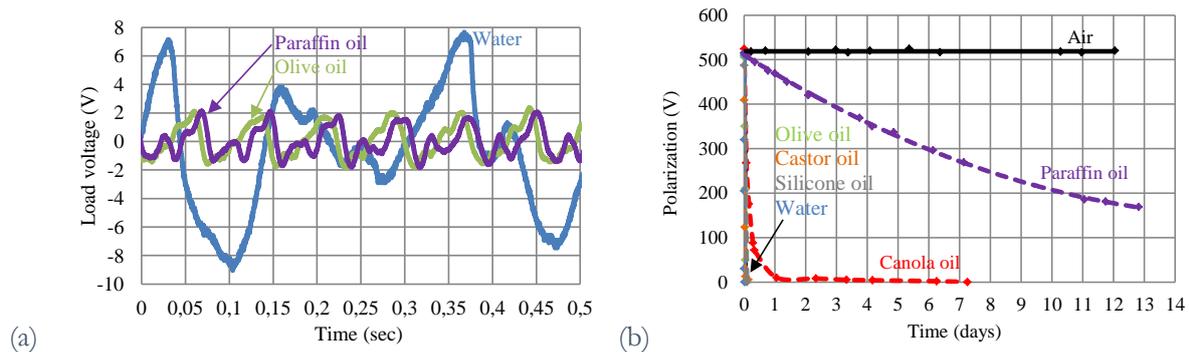


Figure 68 – (a) tensions de sortie avec différents liquides et (b) décharge de l'électret plongé dans le liquide

3.4 Récupérateurs d'énergie à conversion électromagnétique

Plusieurs systèmes de récupération d'énergie mécanique à base de conversion électromagnétique ont également été développés depuis 2011, dans le cadre de thèses, de projets industriels ou de projets européens. Le conversion électromagnétique a notamment été mise en œuvre pour de la récupération d'énergie d'écoulements d'eau, de chocs induits par la course à pied puis de chocs de 20'000G. La modélisation du fonctionnement de la conversion électromagnétique et de son impact sur le système mécanique introduisent cette section.

a. Conversion électromagnétique - Modèle général

Le premier modèle pour la récupération d'énergie vibratoire à conversion électromagnétique a été proposé par William et Yates en 1996 [120]. Le modèle simplifié considérait uniquement le principe fondamental de la dynamique pour décrire le comportement du système. L'extraction d'énergie électrique par la bobine était modélisée par un amortissement électrique en $b_e \dot{x}$.

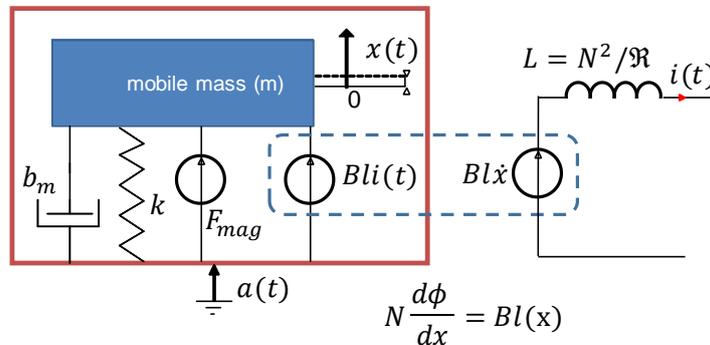


Figure 69 – Modèle d'un générateur électromagnétique

Pour modéliser plus finement ce type de générateur, il est nécessaire de prendre en compte le circuit électrique. Ainsi, le modèle purement mécanique proposé par William & Yates devient un modèle couplé régi par deux équations différentielles:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_m\dot{x} + F_{mag} + F_{elec} + F_{ressort} = -m\ddot{y} \\ e(t) = -\frac{L}{R} \frac{de}{dt} - \frac{Nd(\phi)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad \text{Avec : } \begin{cases} F_{mag} = \frac{dW_{mag}}{dx} \\ F_{elec} = \frac{p_{elec}}{\dot{x}} = \frac{Nd\phi}{dx} \cdot i(t) \end{cases} \quad (14)$$

- La composante $F_{mag} = \frac{dW_{mag}}{dx}$ apparaît en présence de circuits ferromagnétiques et sera nulle dans le cas d'un dispositif sans fer, ce qui est le cas le plus courant. Pour déterminer cette valeur, il sera par exemple possible d'utiliser les éléments finis en résolution multi-statique.
- La composante $F_{elec} = \frac{p_{elec}}{\dot{x}}$ correspond à la puissance électrique extraite du système.
- Le paramètre $\frac{d(\phi)}{dx}$ nécessitera également l'utilisation des éléments finis pour être déterminé précisément. $\frac{Nd(\phi)}{dx}$ pourra être modélisé par une constante notée Bl dans des cas simples (bobine/aimant); Bl(x) dans le cas général. Bl est appelé coefficient de transduction électrodynamique.

Ce modèle peut par la suite être transformé en circuit électrique équivalent, les forces étant équivalentes à des sources de tension pilotées, et permettant de placer tout type de charge en sortie du récupérateur d'énergie (Figure 70).

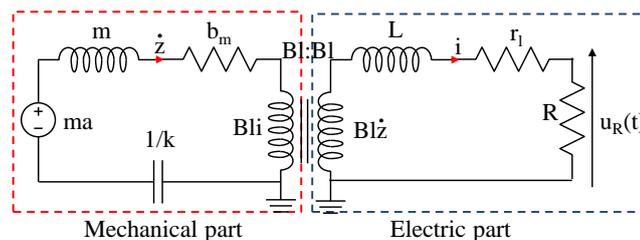


Figure 70 – Modèle électrique équivalent d'un récupérateur d'énergie électromagnétique basique (bobine/aimant combiné à un système masse ressort linéaire)

b. Récupération d'énergie des écoulements d'eau

La récupération d'énergie des écoulements d'eau est une thématique de recherche que j'ai impulsée au département Systèmes, tout d'abord avec un stage (U. Blandin), puis avec deux projets européens et finalement avec un projet industriel. Le premier dispositif a été conçu pour l'agriculture (H2020 GateOne), pour alimenter des débitmètres pour des réseaux d'irrigation. Le lecteur fera le lien avec l'analyse fonctionnelle proposée Section 3.2a. La contrainte majeure était d'avoir une perte de charge faible, inférieure à 0.1bars à 30L/min. Le système a par la suite été adapté aux réseaux d'eau chaude et d'eau froide (DHCS) et qualifié sur le réseau de Montpellier (H2020 InDeal).

- Publications et Brevets associés :
 - [JS14] – Cm-Scale Axial Flow Water Turbines for Autonomous Flowmeters: an Experimental Study
 - [CI18] – Water flow energy harvesters for autonomous flowmeters

→ Concept

Le dispositif de récupération d'énergie des écoulements d'eau proposé exploite une turbine à axe horizontal (Figure 71a). Des aimants de polarités alternées sont placés sur la périphérie du rotor (Figure 71b). Des bobines placées à l'extérieur de la canalisation convertissent la variation de flux induite par le mouvement des aimants en électricité. Le choix de la turbine à axe horizontal a été fait pour minimiser les pertes de charges. Un cône en entrée permet d'accélérer le fluide, d'augmenter la vitesse de rotation de la turbine et d'accroître la puissance de sortie.

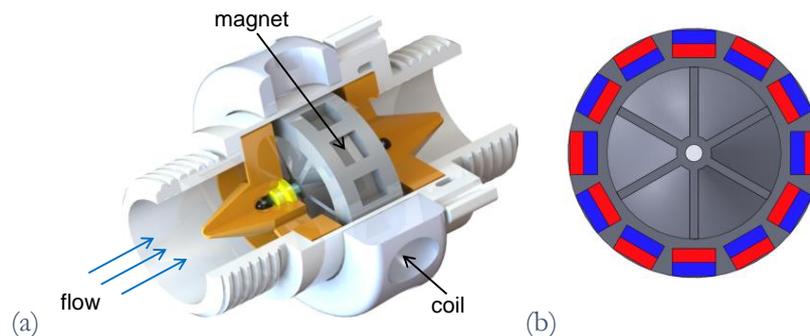


Figure 71 – Récupérateur d'énergie des écoulements d'eau pour l'agriculture (a) concept et (b) distribution des aimants en périphérie du rotor

→ Modèle et rendement de conversion

Le comportement de la turbine est régi par l'équation de Bernoulli avec extraction d'énergie, équation traduisant la conservation de l'énergie le long d'une ligne de courant:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 + \frac{P_{tot}}{Q} = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 \quad (15)$$

Avec: Q , le débit volumique du fluide, P_{tot} la puissance extraite du fluide, p_1 et p_2 les pressions en amont et en aval de la turbine (énergie due au travail des forces de pression), v_1 et v_2 les vitesses du fluide en amont et en aval de la turbine (énergie cinétique), et z_1 et z_2 les altitudes du fluide avant et après la turbine (énergie potentielle de gravité).

Dans le cas d'une turbine placée à l'horizontal, dans une canalisation de section constante ($v_1=v_2$), l'équation se simplifie en :

$$P_{tot} = Q(p_2 - p_1) = Q\Delta P \quad (16)$$

La performance aérodynamique d'une turbine est caractérisée par son coefficient de puissance C_p , correspondant à son rendement mécanique i.e. le ratio entre la puissance mécanique fournie ($P_{mech} = T\omega$) et la puissance extraite du fluide ($Q\Delta P$).

$$C_p = \frac{P_{mech}}{Q\Delta P} = \frac{T\omega}{Q\Delta P} \quad (17)$$

Il est souvent difficile de mesurer le couple produit par une turbine. Aussi, nous utiliserons plutôt un coefficient de puissance total $C_{p_{tot}}$ correspondant au rendement électro-mécanique complet de la turbine:

$$C_{p_{tot}} = \frac{P_{elec}}{Q\Delta P} \quad (18)$$

Avec P_{elec} la puissance électrique en sortie du convertisseur électromagnétique.

→ [Implémentation et résultats expérimentaux](#)

Le diamètre d'entrée est de 20mm. Le nombre et la forme des pales ont été optimisés expérimentalement : une quarantaine de turbines ont été qualifiées entre 0 et 20L/min (Figure 72a) et la meilleure d'entre elle a été intégrée dans un prototype (Figure 72b). Un exemple de tension de sortie de 3 bobines adjacentes à 10L/min est représenté Figure 72c.

Le récupérateur d'énergie démarre dès 1.2L/min et produit 5.7mW à 10L/min et 25.2mW à 20L/min après étage de conversion: l'énergie est délivrée sur une batterie NiMH de 2.4V à l'aide d'un circuit BQ25504 dont la fonction MPPT est ajustée à 50% de la tension en circuit ouvert. La puissance délivrée sur la batterie en fonction du débit est représentée Figure 72d.

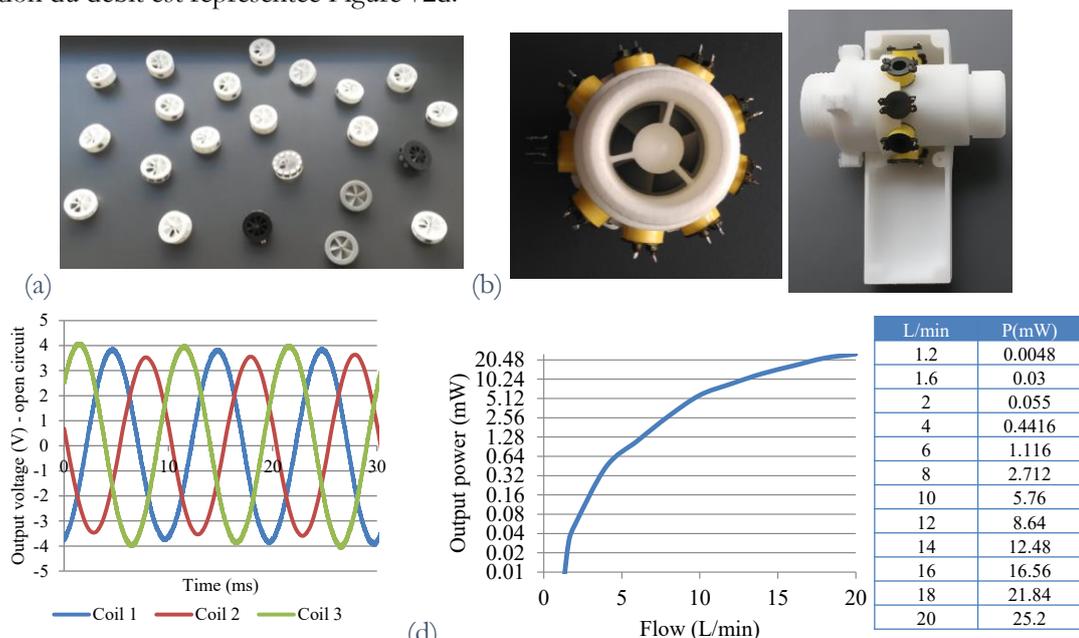


Figure 72 – (a) turbines testées, (b) prototype, (c) résultats expérimentaux – tension de sortie à 10L/min en circuit ouvert et (d) puissance de sortie en fonction du débit

La perte de charge induite par ce dispositif est inférieure à 0.05bar à 30L/min, ce qui était à l'époque la plus faible perte de charge obtenue dans l'état de l'art pour des systèmes de récupération d'énergie des écoulements d'eau. Cette perte de charge est par ailleurs équivalente à celles des débitmètres à turbines (coefficient de perte de charge singulière $K_{EH}=3.94$).

→ [Adaptation aux réseaux d'eau chaude et d'eau froide \(DHCS – District Heating and Cooling Systems\)](#)

Ce concept a par la suite été repris pour des applications de capteurs autonomes pour les réseaux d'eau chaude et d'eau froide, dans le cadre du projet H2020 InDeal. La section d'entrée est passée à 40mm; les débits d'eau étant compris entre 25L/min (1.5m³/h) et 150L/min (9m³/h).

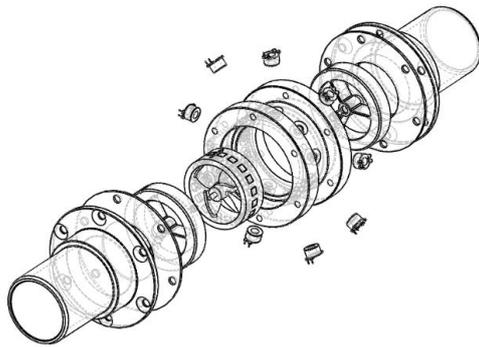


Figure 73 – Dispositif adapté aux réseaux d'eaux chaudes et d'eau froide (a) CAO éclatée et (b) prototype

Ce dispositif a été testé en laboratoire puis sur le réseau d'eau chaude de la ville de Montpellier (Figure 74a). Des éléments ferromagnétiques ont été ajoutés au centre des bobines pour mieux canaliser les lignes de flux et accroître les puissances de sortie. Le récupérateur d'énergie produit de 3.25mW@25L/min à 500mW@150L/min (Figure 74b).

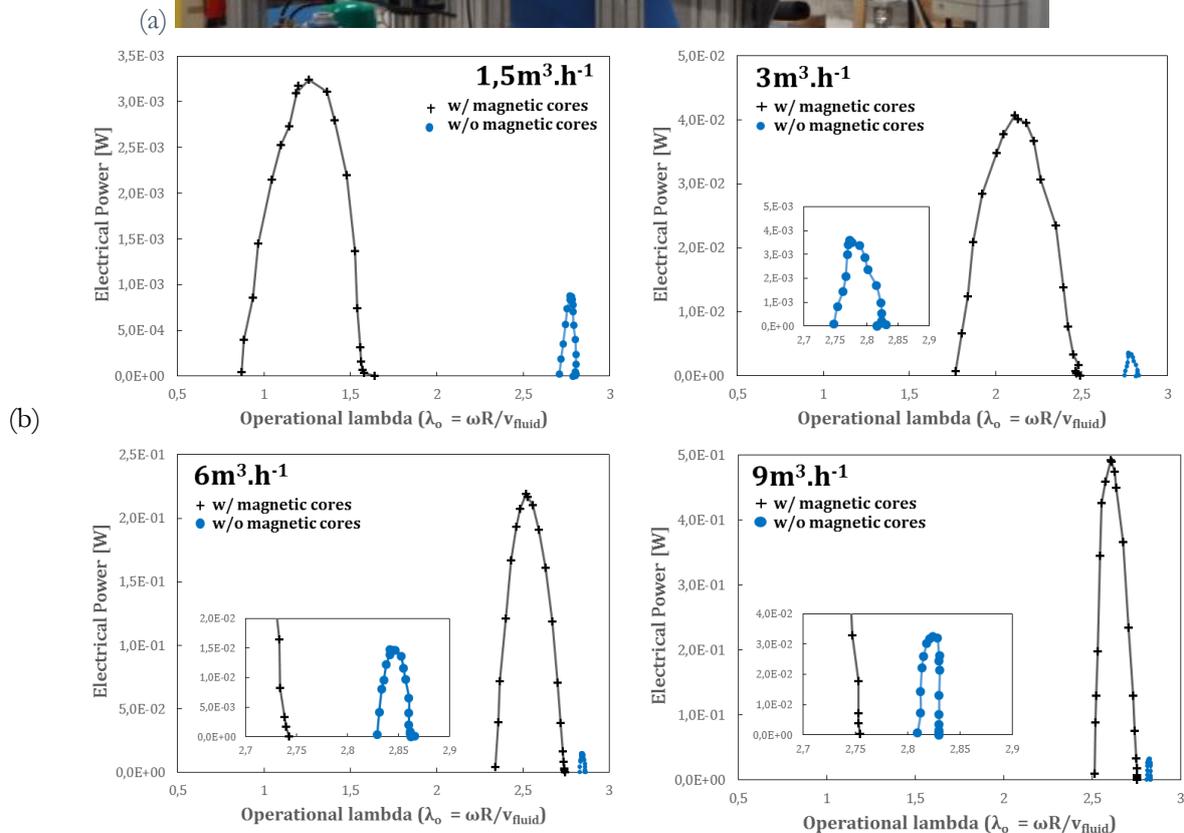
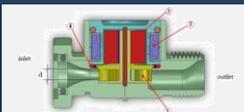
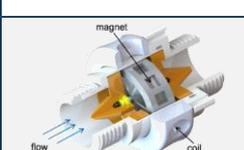


Figure 74 – (a) tests sur le réseau d'eau chaude de la ville de Montpellier et (b) puissance de sortie en fonction du débit d'entrée

→ Positionnement par rapport à l'état de l'art

Les deux dispositifs développés par le CEA présentent les pertes de charges induites les plus faibles de l'état de l'art de par le choix de la turbine à axe horizontal (Tableau 14). Les puissances produites, de l'ordre de 0.5mW à 25mW pour le DN20 et de 3.5mW à 500mW pour le DN40 ouvrent de belles perspectives pour l'alimentation de capteurs communicants placés sur les réseaux d'eau.

Tableau 14 – Récupération des écoulements d'eau – positionnement par rapport à l'état de l'art

Référence	Figure	Diamètre d'entrée	Type	Perte de charge maximum	Puissance de sortie
[121]		~10mm	Axe vertical	N.A	60mW @ 5 l.min ⁻¹
[122]		~15mm	Axe vertical	N.A	300mW @ 19 l.min ⁻¹
[123]		~15mm	Axe vertical	2,2bars @ 20 l.min ⁻¹	720mW @ 20 l.min ⁻¹
[124] Commercial (Bosch Junkers)		~10mm	Axe vertical	N.A	265mW @ 5 l.min ⁻¹
[CI18] (CEA)		20mm	Axe horizontal	<0.05bars @ 30 l.min ⁻¹	25.2 mW @ 20 l.min ⁻¹
[125]		12,7mm	Axe horizontal	N.A	4mW @ 14 l.min ⁻¹
[JS14] (CEA)		41,5mm (DN40)	Axe horizontal	<0.06bars @ 150 l/min	550mW @ 150 l.min ⁻¹

c. Systemes basse fréquence et application à la récupération d'énergie biomécanique

L'idée d'exploiter l'énergie mécanique de la personne a été proposée très rapidement pour résoudre le problème d'autonomie énergétique des dispositifs électroniques nomades (MP3, capteurs, smartphones!). Nous nous sommes positionnés sur la récupération d'énergie biomécanique pour alimenter des vêtements connectés (capteurs communicants) avec la startup CityzenSciences et avec des applications dans le domaine du sport, de la santé et du suivi des situations à risques (pompiers). Les besoins en puissance du vêtement connecté sont de l'ordre de 10mW. Plusieurs dispositifs basse fréquence adaptés à la récupération d'énergie biomécanique inertielle ont été réalisés dans cet objectif. Ces travaux ont été conduits dans le cadre de la thèse de Matthias Geisler, que j'ai encadrée avec Simon Perraud (Directeur de thèse - CEA LITEN). Un état de l'art complet des solutions de récupération d'énergie sur la personne est par ailleurs proposé dans la thèse de Matthias Geisler [126].

- Publications et Brevets associés :
- [JS10] – Human-motion energy harvester for autonomous body area sensors
 - [JS11] – Looped energy harvester for human motion
 - [CI19] – Scaling effects in a non-linear electromagnetic energy harvester for wearable sensors

→ Système résonant 1D

○ Concept

Le premier dispositif étudié est un générateur électromagnétique 1D constitué d'un assemblage d'aimants de polarités alternées et placé à l'intérieur d'un corps amagnétique autour duquel des bobines sont enroulées. Des aimants répulsifs cylindriques sont positionnés en extrémité du tube remplissant une fonction de ressorts non-linéaires sans contact (Figure 75). Ce format de générateur a été étudié à plusieurs reprises dans la littérature, mettant en avant son intérêt pour la récupération d'énergie des vibrations basses fréquences (<50Hz). Les travaux réalisés dans la thèse de Matthias Geisler se sont positionnés sur une optimisation de ce système pour l'application "course à pieds".

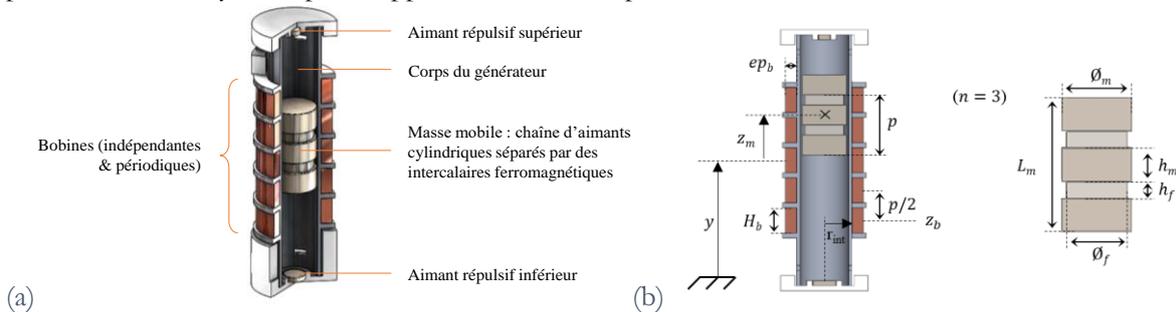


Figure 75 – Système résonant 1D (a) concept et (b) paramètres

○ Modèle du générateur

- Principe fondamental de la dynamique

Le comportement mécanique du générateur est décrit par la seconde loi de Newton (19):

$$m\ddot{z}_m + (b_e(z_m, \dot{z}_m) + b_m)\dot{z}_m - F_{rep}(z_m) = -m\ddot{y} \quad (19)$$

Avec : F_{rep} , la force magnétique répulsive des aimants; b_e , l'amortissement électrique lié au couplage électromécanique et c_m , l'amortissement mécanique.

- Couplage électromagnétique ($F_e = b_e \dot{z}_m$)

La force électromotrice e_s induite dans chaque spire vaut : $e_s = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi}{dz_m} \dot{z}_m$, l'amortissement électrique correspondant à l'extraction d'énergie électrique par les bobines vaut alors : $F_e = b_e \dot{z}_m = \frac{e_s^2}{R_{tot} \dot{z}_m} = \frac{1}{R_s} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z_m}\right)^2 \dot{z}_m \Leftrightarrow b_e = \frac{1}{R_{tot} \dot{z}_m} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z_m}\right)^2$.

Le paramètre $\Phi(z, r)$ est simulé par éléments finis et interpolé par une fonction sinusoïdale (Figure 76) :

$$\Phi(z, r) = \Phi_{max}(r) \sin\left(\frac{2\pi}{p}(z - z_m) + \alpha\right) \quad (20)$$

Avec p , la période spatiale magnétique et α un paramètre de phase égal à 0 ou $\pi/2$ en fonction du nombre pair ou impair d'aimants.

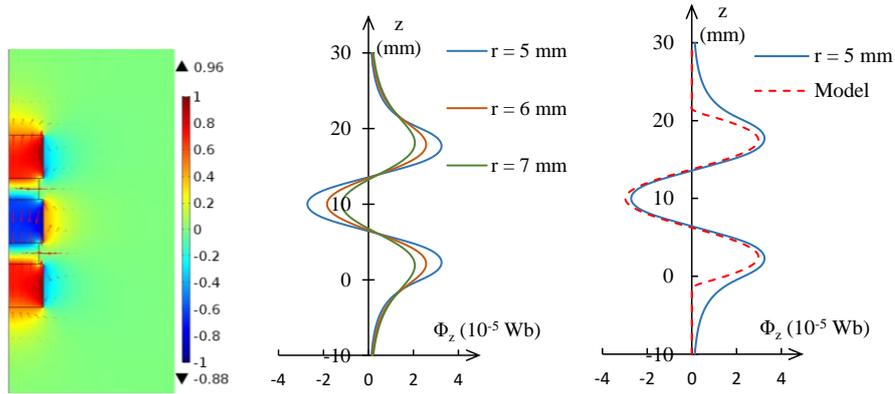


Figure 76 – (a) Simulation de $\Phi(z, r)$, (b) valeurs de $\Phi(z, r)$ et (c) interpolation par une fonction sinusoidale pour un empilement de 3 aimants de dimensions $8\text{mm}\varnothing \times 5\text{mm}$

Le flux moyen selon r est obtenu par intégration de $\Phi(z, r)$ sur r :

$$\Phi_{\text{max,ave}} = \frac{1}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}}} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \Phi_{\text{max}}(r) dr \quad (21)$$

La f.e.m par bobine est obtenue par dérivation du flux par rapport au temps de l'intégrale de $\Phi(z, r)$ sur la bobine à N tours de longueur l_c :

$$\begin{aligned} e_b(z_m, \dot{z}_m) &= -\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{z_c - \frac{l_c}{2}}^{z_c + \frac{l_c}{2}} \Phi(z) \frac{N}{l_c} dz \right) \\ &= -2 \frac{N}{l_c} \Phi_{\text{max,ave}} \cos\left(\frac{2\pi}{p}(z_c - z_m) + \alpha\right) \sin\left(\frac{\pi l_c}{p}\right) \dot{z}_m \end{aligned} \quad (22)$$

Au final:

$$p_e = b_e \dot{z}_m^2 = \sum_{\text{coils}} \frac{u_{c,i}^2}{R_c + R_l} = \sum_{\text{coils}} b_{e,i} \dot{z}_m^2 \quad (23)$$

Et :

$$b_e(z_m) = n_{c,\text{eff}} \frac{1}{R_c + R_l} \left(2 \frac{N}{l_c} \Phi_{\text{max,ave}} \sin\left(\frac{\pi l_c}{p}\right) \right)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{p}(z_c - z_m) + \alpha\right) \quad (24)$$

Avec $n_{c,\text{eff}}$, le nombre effectif de bobines voyant la variation de flux induite par la chaîne d'aimants.

- Ressort magnétique (F_{rep})

La force de répulsion entre deux aimants est obtenue par l'équation (25) issue des modèles ESCM ("equivalent surface current model") dont les paramètres sont explicités Figure 77.

$$\begin{aligned} F_{\text{rep}}(\text{gap}) &= \mu_0 \pi R_1 R_2 M_{s,1} M_{s,2} \int_0^\infty J_1(\varepsilon R_1) J_1(\varepsilon R_2) [e^{-\varepsilon(\text{gap}+H_1)} + e^{-\varepsilon(\text{gap}+H_2)} \\ &\quad - e^{-\varepsilon \text{gap}} - e^{-\varepsilon(\text{gap}+H_1+H_2)}] \varepsilon^{-1} d\varepsilon \end{aligned} \quad (25)$$

Symbole	Description
R_1 (resp. R_2)	Rayon de l'aimant 1 (resp 2)
H_1 (resp. H_2)	Hauteur de l'aimant 1 (resp 2)
$M_{s,1}$ (resp $M_{s,2}$)	Aimantation à saturation de l'aimant 1 (resp 2)
J_1	Fonction de Bessel du premier ordre : $J_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(1+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+1}$

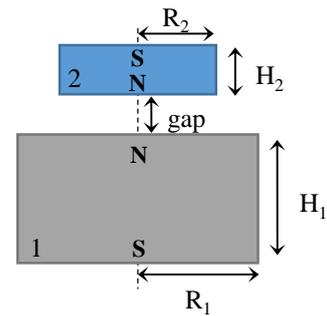


Figure 77 – Répulsion magnétique entre deux aimants

Ce modèle a été validé par éléments finis sur un aimant seul et sur la chaîne complète (Figure 78) :

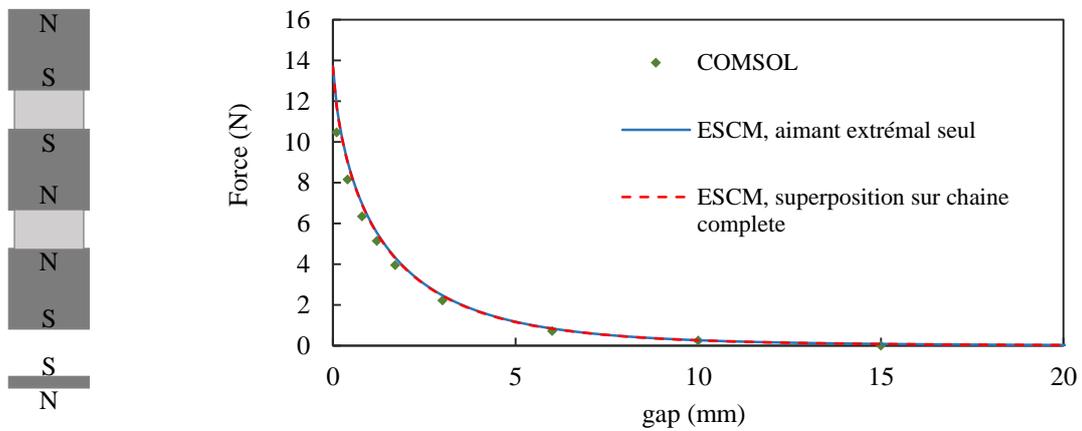
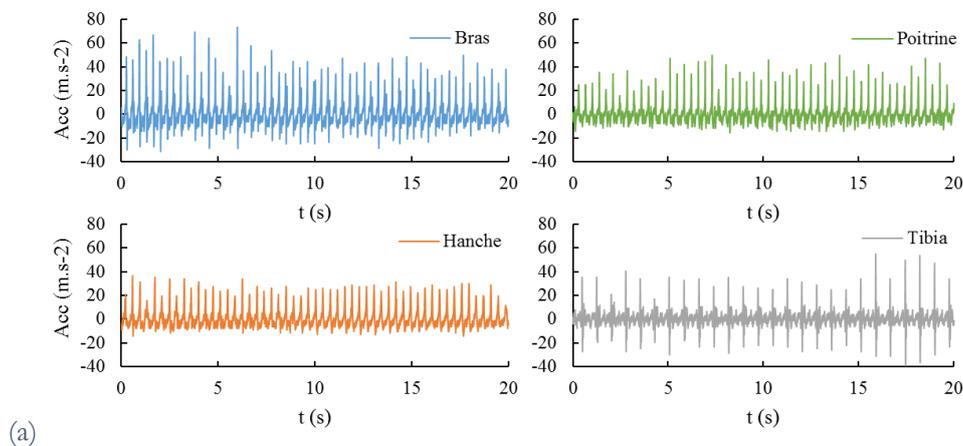
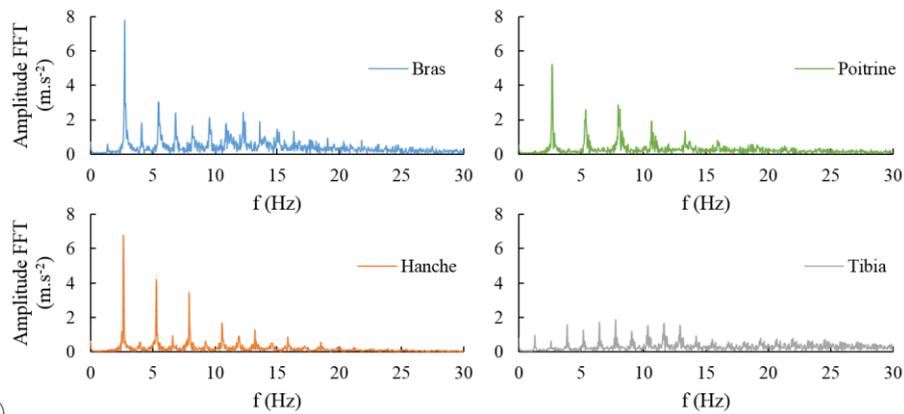


Figure 78 – Validation du modèle ESCM pour la modélisation de la force de répulsion entre deux aimants.

o [Caractérisation des vibrations lors de la course à pieds et démarche d'optimisation](#)

Le modèle du générateur prend comme donnée d'entrée l'excitation mécanique \ddot{y} issue de la course à pieds. Une série de mesures a été réalisée en différents points du corps sur tapis roulant. Les signaux temporels montrent des pics d'accélération d'amplitudes comprises entre 2G et 8G et correspondant aux impacts des pas. La fréquence des impacts est de l'ordre de 2.7Hz.





(b)
Figure 79 – Etude de l'accélération le long des membres, lors de la course à pied (6.4 km/h).
(a) Mesures temporelles en différents points du corps et (b) FFT correspondantes

Les paramètres de ce générateur sont optimisés pour maximiser la puissance de sortie pour ces accélérations d'entrée en combinant les simulations éléments finis à l'équation de comportement (19), et en suivant la démarche proposée Figure 80.

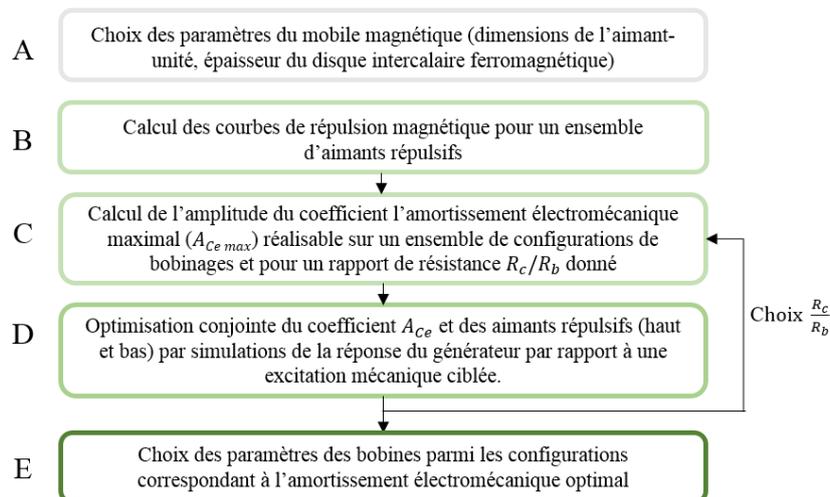


Figure 80 – Démarche d'optimisation du récupérateur non-linéaire

o Prototype et résultats expérimentaux

Un prototype de la taille d'une pile AA a été réalisé à partir d'un mobile magnétique constitué de 3 aimants de polarités alternées en NdFeB-N45 ($B_r \approx 1.4T$) (Figure 81). Les bobines sont constituées de 2800 tours. L'emplacement le plus favorable est le bras, lié au fait (i) que l'accélération \dot{y} est la plus forte et (ii) que l'optimisation a été réalisée pour cet emplacement. La puissance récupérée varie entre 4.34 mW (à 4 km/h) et 7.35 mW (à 8 km/h), correspondant à une densité de puissance comprise entre 482 et 817 $\mu W.cm^{-3}$.

Les tensions de sortie atteignent de l'ordre de 15V aux bornes des doubleurs parallèles (Figure 81d). Combiné à une électronique de gestion passive de type doubleur de tension + capacité, le générateur a permis d'alimenter un accéléromètre Bluetooth Low Energy avec envoi de l'information sur un smartphone à 25Hz.

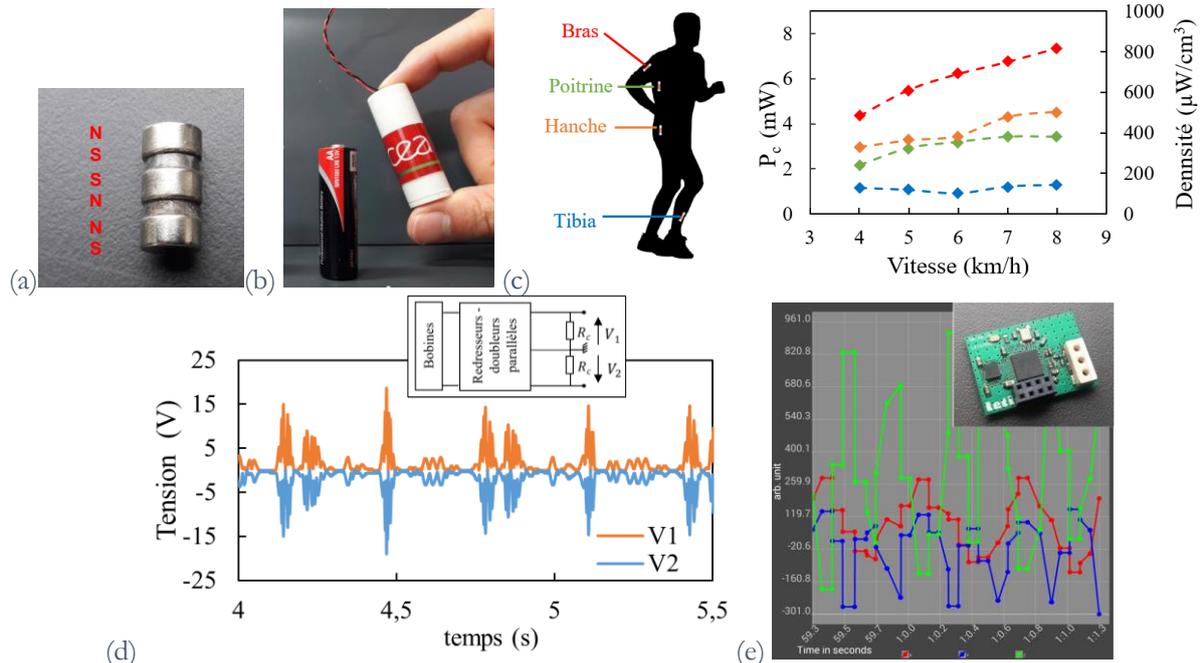


Figure 81 – Prototype: (a) mobile magnétique, (b) ensemble, (c) caractérisation sur plusieurs endroits du corps, (d) exemple de tensions de sortie aux bornes des redresseurs doubleurs parallèles et (e) alimentation d'un accéléromètre Bluetooth Low Energy à 25Hz.

o Positionnement par rapport à l'état de l'art

Comparée à l'état de l'art des solutions de récupération d'énergie inertielles pour des applications biomécaniques, la solution que nous avons proposée se démarque assez nettement, validant l'approche et la méthode d'optimisation mises en œuvre (Tableau 15 et Figure 82).

Tableau 15 – Positionnement de la solution par rapport à l'état de l'art

Ref.	Vol. (cm ³)	Dir.	Masse mobile (10 ⁻³ kg)	Position	Excitation	P _c (mW)	Densité de puissance (μW.cm ⁻³)
Büren	0.5	1D	1.37	Jambe	Marche	0.035	70
Saha	9.6	1D	27	Sac à dos	Course (pas 2.7 Hz)	1.86	193
Bowers	3*	3D	2*	Poche	Course (14,5 km/h)	1.44	500
Romero	2	2D	5.7*	Cheville	Course (8 km/h)	0.54	270
Berdy	7.7	1D	7.7	Veste	Course (11.3 km/h)	0.363	47
Ylli	15.7	1D	12*	Chaussure	Course (6 km/h)	0.84	53
Liu	6.3	1D	1.23	Main	Agité main (6.7 Hz, 1.8g)	0.65	104
Zhang	26	1D	45	Sac à dos	Course (10 km/h)	14.8	570
Halim	6.5	1D	4.36	Main	Agité main (2g)	2.15	330
Wang	98	1D	56*	Jambe	Course (8 km/h)	10.66	109
Salauddin	30.4	1D	10.2	Main	Agité main (6 Hz, 0.5g)	2.92	96.1
Générateur « pile AA » (R_c=2.7 kΩ)	9	1D	5.7	Bras	Course (8 km/h), charge résistive	7.35	817

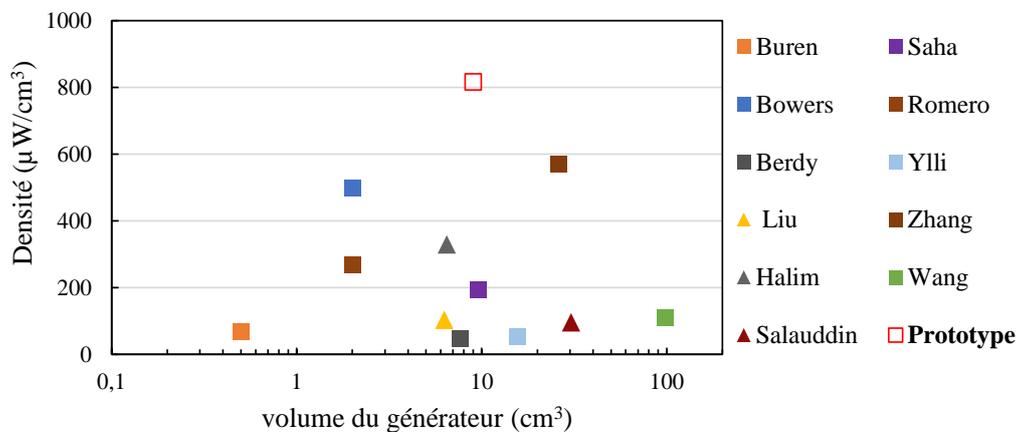


Figure 82 – Comparaison des densités de puissance des récupérateurs d'énergie inertiels testés sur l'activité humaine. Les deux types d'excitation mécanique – générateur porté durant la course à pied ou agité manuellement – sont respectivement représentés par des carrés et des triangles.

○ [Scaling et impact sur les puissances de sortie](#)

L'impact de la réduction des dimensions de ce dispositif sur les puissances générées a été analysé par simulations. Un facteur d'échelle k est appliqué à l'ensemble des dimensions, le cas $k=1$ correspondant aux dimensions du dispositif présenté précédemment (Figure 83a). Le cas d'application reste le bras et l'excitation, la course à pieds. Les paramètres du générateur sont optimisés pour chaque dimension. Il s'avère que les puissances produites suivent une loi de comportement en $k^{6.1}$, diminuant donc bien plus rapidement que le volume du système (Figure 83b).

Ces éléments viennent conforter le fait que les solutions électromagnétiques sont plutôt adaptées aux systèmes centimétriques: en réduisant toutes les dimensions de moitié, il ne reste que 100μW de disponible.

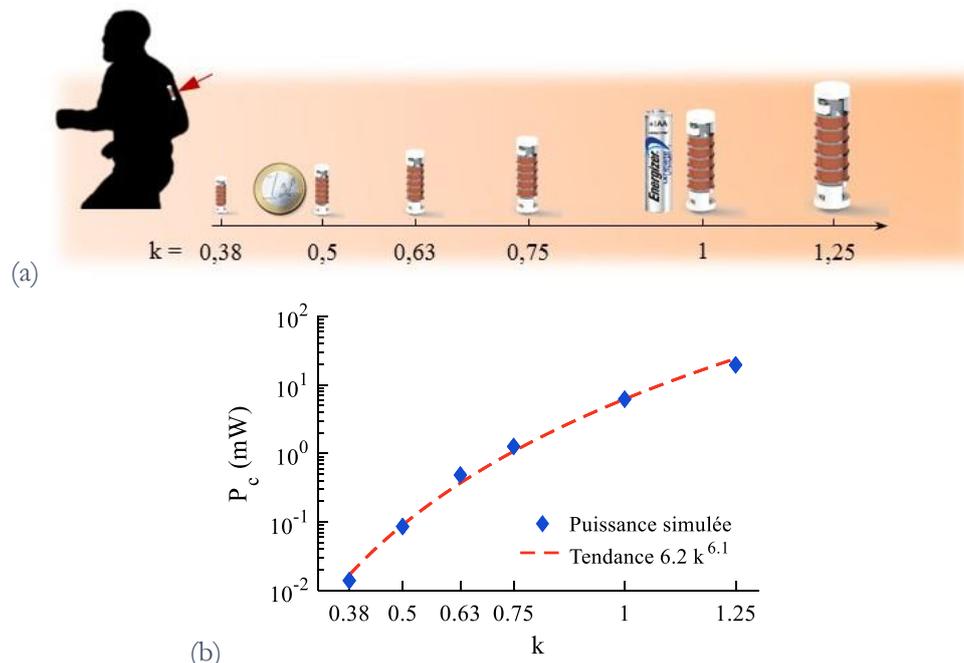


Figure 83 – (a) Scaling et (b) impact sur les puissances de sortie

→ Système 2D

Un second prototype électromagnétique a été proposé dans la thèse de Matthias Geisler dans le but d'exploiter les mouvements de balancier des membres plutôt que les chocs et vibrations et de résoudre les deux limites du système précédent à savoir (i) la limite en déplacement de la masse mobile et (ii) le caractère unidirectionnel du générateur réduisant la partie utile de l'excitation biomécanique.

○ Concept – générateur inertielle toroïdal

Le générateur est constitué d'une bille magnétique mobile placée dans un tube formant une trajectoire fermée. Des bobines sont enroulées autour du tube pour collecter les variations de flux induites par l'aimant en mouvement. Un rail ferromagnétique est ajouté autour du tube de manière à orienter la bille magnétique et maximiser la variation de flux qu'elle induit (Figure 84).

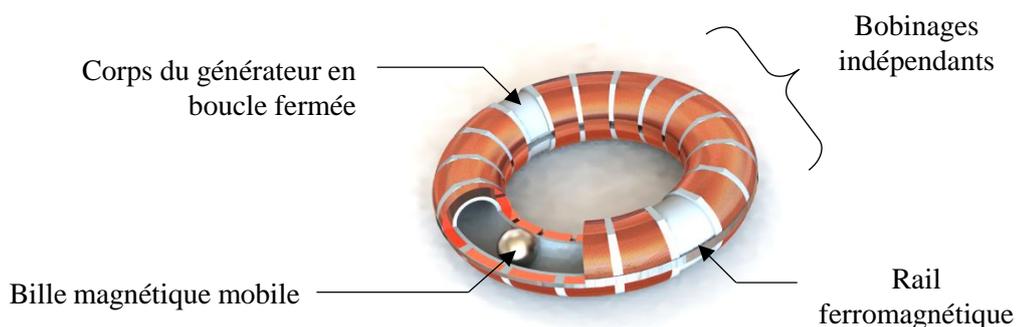


Figure 84 – Générateur inertielle toroïdal

○ Modèle et dimensionnement

Le générateur peut se modéliser sous la forme d'une masse ponctuelle m se déplaçant selon une trajectoire circulaire sous l'effet des mouvements de l'utilisateur. La masse mobile m est repérée par sa position angulaire θ dans le repère du générateur $\langle 0, \vec{e}_x, \vec{e}_y \rangle$ et régie par l'équation du mouvement :

$$\ddot{\theta} = -\left(\frac{b_e + b_m}{m}\right)\dot{\theta} + \frac{1}{r_m}\left(a_x \sin(\theta) - a_y \cos(\theta) + \frac{g}{r_m} \sin(\theta + \varphi)\right) - \ddot{\varphi} \quad (26)$$

Avec φ l'angle de rotation entre \vec{e}_x et la verticale gravitationnelle \vec{e}_g ; et (a_x, a_y) les composantes de l'accélération perçues par le générateur et mesurées dans le repère relatif $\langle 0, \vec{e}_x, \vec{e}_y \rangle$. Les amortissements électriques et mécaniques b_e et b_m sont supposés constants ici.

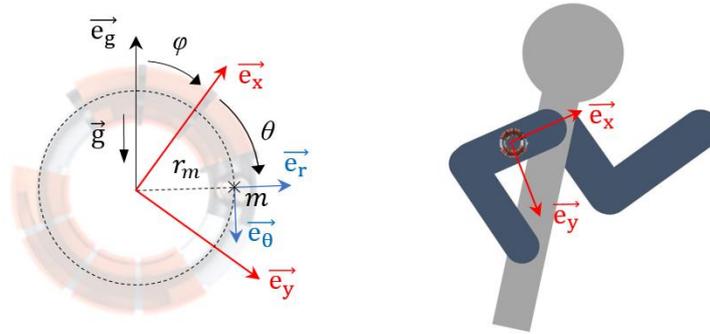


Figure 85 – Paramètres du modèle de générateur rotationnel à masse ponctuelle excentrée

La puissance électrique extraite vaut alors :

$$p_e = b_e (r_m \dot{\theta})^2 \quad (27)$$

Les données d'entrée (a_x, a_y, φ) sont mesurées à l'aide d'une centrale inertielle 9 axes placée sur le bras de la personne lors de la course à pieds (Figure 86) et permettent d'optimiser le générateur et notamment le rayon et l'amortissement électrique lié au couplage électromécanique.

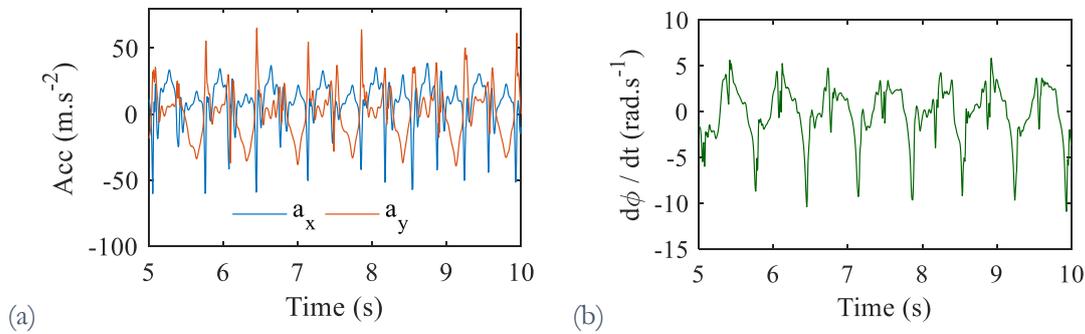


Figure 86 – mesures des données d'entrée à l'aide d'une centrale inertielle 9 axes (a) a_x, a_y et (b) $d\varphi/dt$

o Prototype et résultats expérimentaux

Un prototype de générateur toroïdal de rayon 2.5cm a été fabriqué. Une bille magnétique en NdFeB N35 et de diamètre $\varnothing 8$ mm a été utilisée; les autres caractéristiques du système sont récapitulées dans le Tableau 16.



Figure 87 – Montage du prototype

Tableau 16 – Paramètres du prototype

Rayon r_b	2.5cm	Nombre de bobines	16
Diam. interne	8.6mm	Diam. fil de cuivre	62 μ m
Diam. externe	13mm	Nombre de tours / bobine	1000
Diam. bille mobile	8mm	Résistance / bobine	200 Ω
Masse de la bille mobile	2g	Largeur du rail ferromag.	1.5mm
Volume global	21cm ³	Epaisseur du rail ferromag.	200 μ m
Masse globale du générateur	40g		

La puissance électrique en sortie du générateur est comprise entre 3mW@4km/h sur le poignet et 4.8 mW@8 km/h sur le bras. La puissance de 2 à 5 mW produite par le générateur est intéressante compte tenu de la masse mobile réduite utilisée ($m = 2$ g).

En terme de positionnement par rapport à l'état de l'art, on notera que les récupérateurs inertiels d'énergie biomécanique avec une masse mobile équivalente produisent globalement des puissances inférieures au milliwatt.

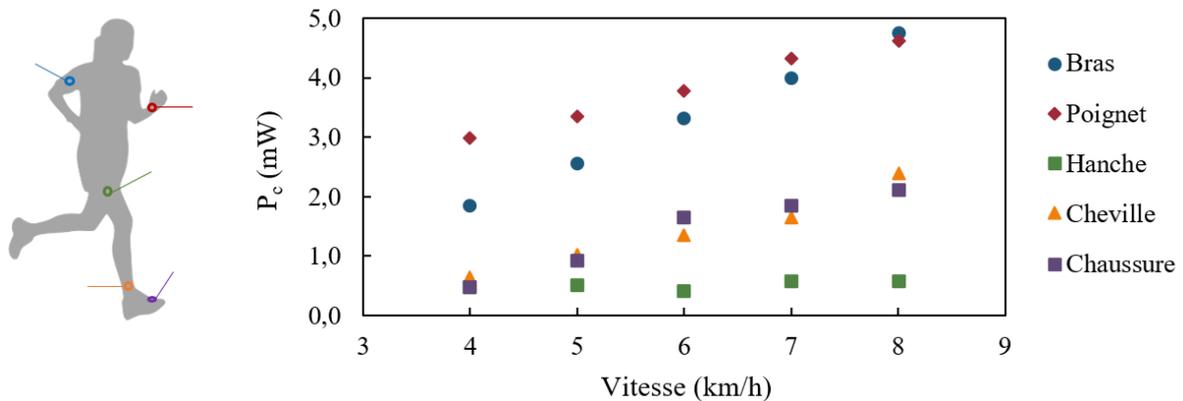


Figure 88 – Puissance de sortie du générateur en fonction de la vitesse de course et de l'emplacement

Les puissances produites par les deux récupérateurs d'énergie biomécanique à conversion électromagnétique (2mW – 7.35mW) sont dans des ordres de grandeurs compatibles avec les besoins du vêtement connecté (10mW); la fréquence de mesure pourrait être réduite pour diminuer sensiblement la consommation et s'approcher des puissances générées. L'autre possibilité est d'utiliser deux générateurs biomécaniques pour atteindre la dizaine de milliwatts.

d. Récupération d'énergie des chocs

Les récupérateurs d'énergie biomécanique exploitent les chocs induits par la course à pieds; nous passons ici à une échelle supérieure avec un choc de plus de 20000G à récupérer, et qui intervient au moment du tir d'un obus. Développé dans le cadre d'un projet industriel, le récupérateur d'énergie devait produire

200mJ en 150ms (1.33W moyen) à partir d'un choc caractérisé par un pic de 22700G et une durée de 10ms (Figure 89).

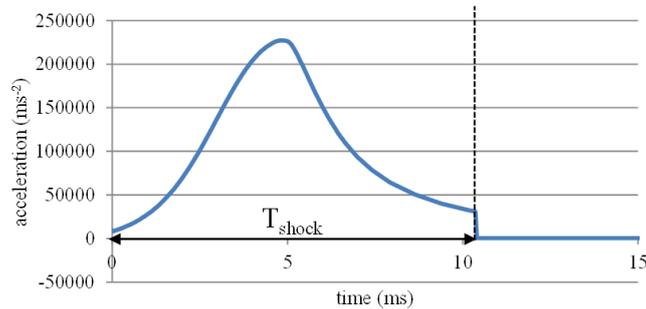


Figure 89 – Caractéristiques du choc

- Publications et Brevets associés :
 - [C117] – 20000G shock energy harvesters for gun-fired munition

→ Concept

Le concept que nous avons choisi est proche de celui de Rastegar [127], sauf que la conversion électromagnétique a été privilégiée pour des raisons de coûts et de robustesse suite à des premiers essais sur des actionneurs piézoélectriques (Rastegar et al. ont proposé une solution piézoélectrique).

Le principe de fonctionnement du dispositif constitué d'un système masse-ressort couplé à un convertisseur électromagnétique est présenté Figure 90. Durant la phase de tir, le récupérateur d'énergie est soumis à un choc de 20000G+, la masse est projetée vers le socle du générateur. Le ressort stocke l'énergie mécanique sous forme élastique, et la libère juste après le choc sous la forme d'oscillations mécaniques qui sont transformées en énergie électrique par le convertisseur électromagnétique (bobine – aimant). L'utilisation d'oscillations mécaniques permet de convertir l'énergie en plusieurs cycles ce qui limite la taille du convertisseur électromagnétique.

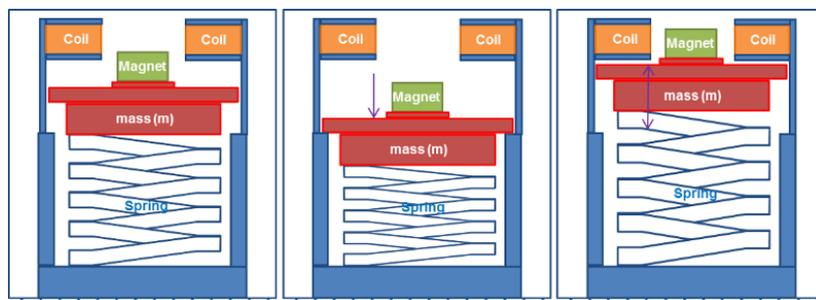


Figure 90 – Récupération d'énergie du choc – concept mis en oeuvre

→ Modèle et dimensionnement

Le dispositif peut être modélisé par le schéma de la Figure 91a, par le jeu d'équations différentielles couplées de la Figure 91b ou encore par le modèle électrique équivalent de la Figure 91c. L'avantage de la dernière méthode est de permettre de simuler différentes architectures de conversion d'énergie électrique en sortie de la bobine. Le couplage électromagnétique est représenté par un transformateur de rapport de conversion $B_1:B_2$, le paramètre B_1 étant déterminé expérimentalement.

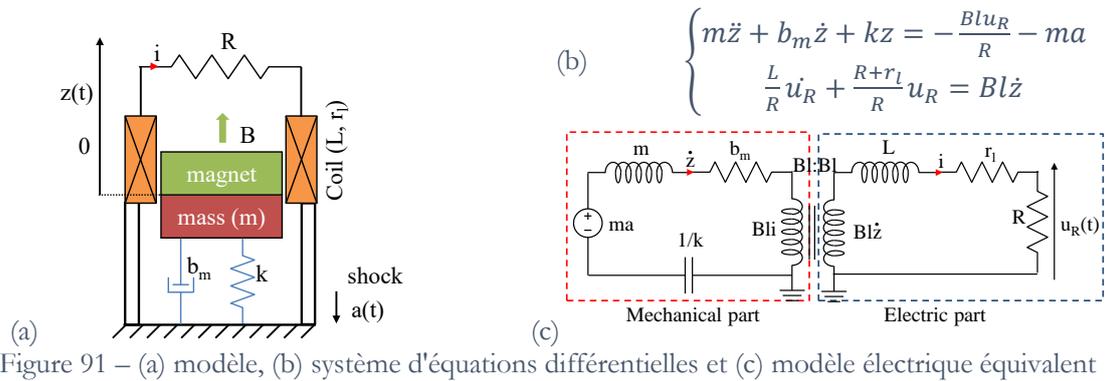


Figure 91 – (a) modèle, (b) système d'équations différentielles et (c) modèle électrique équivalent

Le dimensionnement a été réalisé pour une cible énergétique de 200mJ en 150ms. Le paramètre le plus important est la fréquence du système masse-ressort, de manière à ce que l'accélération de 20000G+ soit perçue comme un choc mettant le système masse-ressort en oscillations. Ainsi, la fréquence mécanique du système masse-ressort doit être grande comparée à la fréquence du choc. Néanmoins, cette fréquence doit être assez petite pour induire suffisamment d'amplitude de mouvement de l'aimant selon l'axe vertical. Les simulations ont montré que la fréquence propre optimale était de 299Hz. Le mouvement de la masse mobile a été limité à +/-8mm à l'aide de butées pour limiter la taille du dispositif et éviter des problèmes de flambage (buckling). Des butées "molles" ont été utilisées pour éviter les phénomènes de rebond et assurer que la masse soit en butée $z(t)=z_{\max}$ juste après le choc.

Les simulations ont également permis de déterminer la masse mobile optimale $m=130g$ et la raideur du ressort $k=460kN/m$.

→ [Prototype et résultats expérimentaux](#)

Le convertisseur électromagnétique est constitué d'un aimant NdFeB et d'une bobine de 600 tours; le paramètre Bl est déterminé expérimentalement et vaut $Bl=3.44$.

Un ressort à double hélice a été choisi pour assurer une bonne stabilité de l'ensemble et limiter les effets de flambage, dimensionné pour une contrainte maximum de 1GPa, et réalisé en acier.

Le système complet mesure $117cm^3$ et pèse 370g (Figure 92a et Figure 92b) et fut testé dans un obus en novembre 2013. Les tensions et énergies de sortie sont présentées Figure 92c: 140mJ ont été générés en 150ms. La puissance moyenne juste après le choc est de 4.83W, correspondant à une densité de puissance de $41.3mW/cm^3$, l'une des plus élevées de l'état de l'art [128].

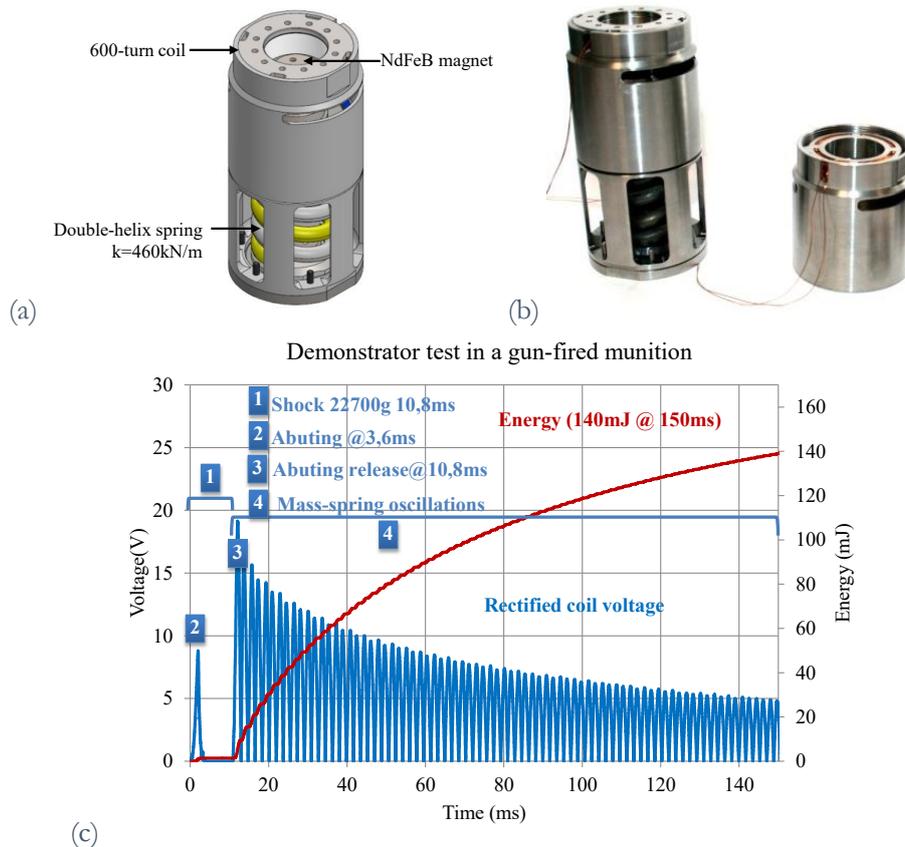


Figure 92 – (a) CAO du dispositif, (b) prototype et (c) résultats expérimentaux – conditions réelles de tir

3.5 Récupérateurs d'énergie à conversion piézoélectrique

La conversion piézoélectrique est le dernier type de convertisseur électromécanique utilisé en récupération d'énergie, et probablement celui qui a été le plus mis en œuvre dans les recherches sur le vibratoire. Nous proposons ci-après un système vibratoire développé pour des applications aéronautiques avec tests en environnement réel. La conversion piézoélectrique ouvre la voie aux récupérateurs d'énergie vibratoire s'auto-adaptant à leur environnement (tuning de fréquence et amortissement variable) ainsi qu'à leur miniaturisation sans perte en densité de puissance. C'est également ce convertisseur qui sera mis en œuvre dans la thèse à venir sur la transmission d'énergie et d'informations au travers de parois métalliques (acoustique). Comme précédemment, un modèle général du fonctionnement des récupérateurs d'énergie à conversion piézoélectrique est proposé en préambule.

a. Modèle général – conversion piézoélectrique et récupération d'énergie vibratoire

Les récupérateurs d'énergie vibratoire piézoélectriques se présentent généralement sous la forme d'une poutre encastrée libre sur laquelle est déposée ou rapportée une céramique piézoélectrique (Figure 93a). Le modèle du générateur à conversion piézoélectrique est présenté Figure 93b [129]:

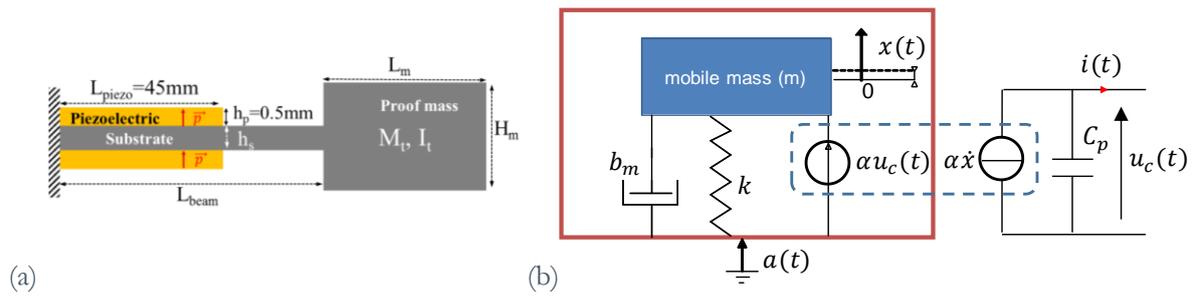


Figure 93 – (a) générateur piézoélectrique classique et (b) modèle électromécanique

En appliquant le principe fondamental de la dynamique et les équations de la piézoélectricité, le système d'équation régissant ce récupérateur d'énergie est :

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + b_m\dot{x}(t) + kx(t) - \alpha u_c(t) = -ma(t) & [PFD] \\ i(t) = \alpha\dot{x}(t) - C\dot{u}(t) & [piezoélectricité] \end{cases} \quad (28)$$

avec C , la capacité de la couche de matériau piézoélectrique et α un coefficient réduit de conversion électromécanique.

α est lié au coefficient de couplage électromécanique k_p du générateur piézoélectrique avec :

$$k_p^2 = \frac{\alpha^2}{kC_p + \alpha^2} \quad (29)$$

De la même manière que les autres convertisseurs, ce modèle peut être remis sous la forme d'un circuit électrique équivalent avec la mécanique au primaire et l'électrique au secondaire, pour simuler différentes topologies de gestion d'énergie.

b. Récupérateur d'énergie vibratoire pour applications aéronautiques

Ces modèles ont d'ailleurs été mis en œuvre dans un projet de récupération d'énergie vibratoire en environnements sévères (120°, 20G) pour des applications aéronautiques.

- Publications et Brevets associés :
 - [CI23] – A 120°C-20G Compliant Vibration Energy Harvester for Aeronautic Environments

→ Concept et prototype

Le récupérateur d'énergie vibratoire proposé est un bimorphe piézoélectrique en PZT-5A (Figure 94a - Figure 94b) dont la fréquence de résonance est ajustée à 1167Hz pour extraire l'énergie d'une vibration issue d'une rotation à 70000 tr/min. Le dispositif a été simulé et optimisé par éléments finis en autorisant une contrainte maximale de 10MPa à 20G à l'encastrement pour éviter les phénomènes de dépolarisation sur le long terme (Figure 94c - [48]). Le prototype est fabriqué par électroérosion; les éléments piézoélectriques sont collés de part et d'autre du cantilever.

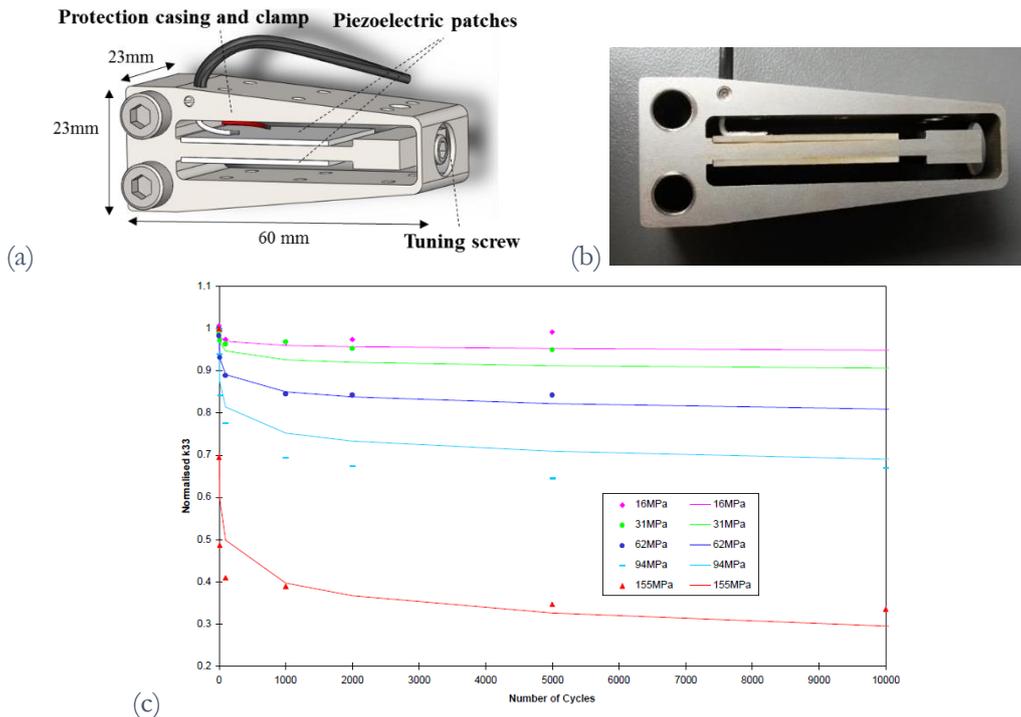


Figure 94 – Récupérateur d'énergie piézoélectrique (a) concept, (b) prototype et (c) cyclage du PZT-5A et impact sur ses coefficients de couplage [48]

→ Résultats expérimentaux

Le récupérateur d'énergie a été testé en enceinte climatique à 90°C et à 120°C. La puissance de sortie n'est pas impactée par la température jusque 90°C; elle chute ensuite de 85% de 90°C à 120°C. A 90°C, le récupérateur d'énergie piézoélectrique génère : 6.8mW@1G, 36.1mW@3G, 70.7mW@5G et 135mW@8G à 1167Hz (Figure 95). La puissance maximale atteinte est de 250mW à 1145Hz à 8G d'accélération.

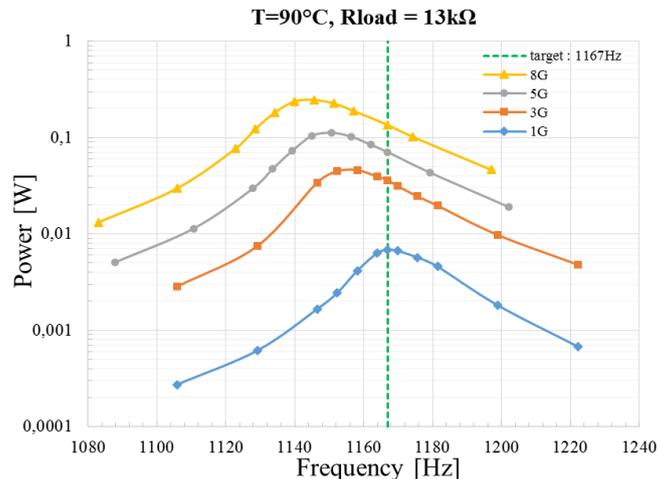


Figure 95 – Puissances de sortie du récupérateur d'énergie à 90°C

→ Tests en conditions réelles

Le récupérateur d'énergie a ensuite été testé en environnement réel en vue d'alimenter un système de mesure d'accélération 3 axes (AMS) pour des applications de SHM des moteurs d'avion. Un circuit implémentant l'extraction synchrone (SECE) avec démarrage à froid est combiné au générateur piézoélectrique pour recharger une capacité alimentant le système de mesure. Le fonctionnement de l'ensemble avec remontée des informations capteur est validée, comme présenté Figure 96.

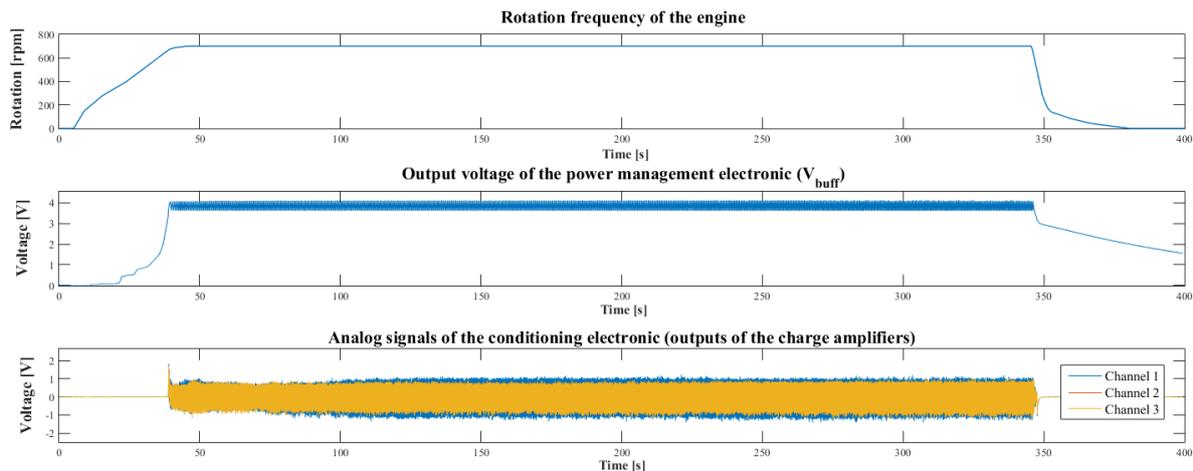


Figure 96 – mesures en conditions réelles (a) fréquence de rotation du moteur, (b) tension de sortie de l'électronique de gestion et (c) tensions de sortie des capteurs, proportionnelles aux accélérations mesurées.

Ce générateur piézoélectrique est le premier de l'état de l'art à être compatible avec les environnements sévères de l'aéronautique (20G, 120°C) et à avoir été testé dans des conditions réelles avec son électronique de gestion et l'alimentation d'une application capteur.

3.6 Systèmes mécaniques

Le système mécanique a un impact important sur le comportement des récupérateurs d'énergie vibratoire. Il a par exemple été démontré que l'utilisation de ressorts non-linéaires permettaient d'accroître la bande passante des dispositifs. Nous avons voulu étudier l'impact de ressorts non-linéaires sur des vibrations réelles. Les effets non-linéaires apparaissent très rapidement sur les cantilevers encastrés-guidés; nous avons cherché à ajuster cette non-linéarité pour maximiser les puissances de sortie des récupérateurs d'énergie.

a. Ressorts non-linéaires en H

Nous avons proposé un nouveau design de ressort dont le coefficient de non-linéarité peut être aisément ajusté et permettant d'optimiser les récupérateurs d'énergie à une vibration donnée en jouant sur leur non-linéarité. Les effets non-linéaires des ressorts surviennent en grandes déformations et sont généralement modélisés par une raideur F_K dépendant de la déformation (x) et fonction de la raideur linéaire k_0 :

$$F_K(x) = k_0 + k_{nl}(x) = k_0 + k_3x^3 + o(x^4) \quad (30)$$

Notre objectif est ici de pouvoir optimiser la valeur de k_3 pour maximiser la puissance de sortie des récupérateurs d'énergie vibratoire.

- Publications et Brevets associés :
 - [JS2] - Nonlinear H-shaped springs to improve efficiency of vibration energy harvesters

→ Concept

Les poutres encastrées-guidées sont des ressorts régulièrement utilisés dans les MEMS et en récupération d'énergie. Ces ressorts présentent une non-linéarité forte essentiellement due à des effets d'élongation de la poutre. Pour ajuster ces effets non-linéaires, nous ajoutons un ressort en série avec l'élongation de la poutre pour rendre l'ensemble plus souple. Ce ressort doit bloquer toute les rotations et deux translations, ce qui a conduit au concept du ressort en H (Figure 97). La frontière encastrée de la poutre encastrée-guidée est remplacée par 4 poutres encastrées-guidées.

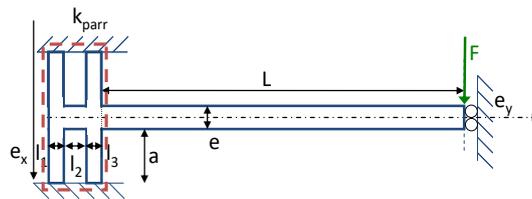


Figure 97 – Ressort en H permettant d'ajuster les effets non-linéaires

→ Modèle et simulations

Les effets non-linéaires sont essentiellement dus à la tension et à l'élongation. Ainsi, au premier ordre (linéaire), la structure en H n'impacte pas la raideur du ressort; par contre, ils interviennent comme un ressort en série avec la raideur non-linéaire (ordre 3) de la poutre encastree-guidée (Figure 98) avec :

$$k_{parr} = \frac{Eb}{a^3}(2l_1^3 + 2l_3^3), \quad k_{tens} = \frac{Ebe}{L}, \quad k_0 = \frac{Ebe^3}{L^3} \quad (31)$$

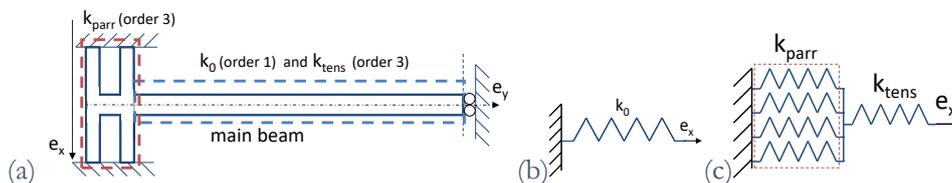


Figure 98 – (a) modèle du ressort en H, (b) modèle à l'ordre 1 (linéaire) et (c) à l'ordre 3 (non-linéaire)

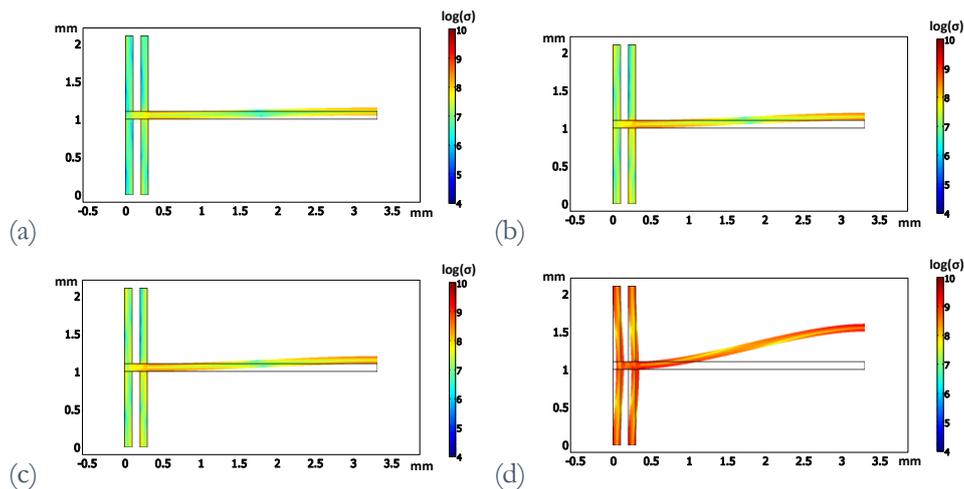
Ainsi :

$$k_3 = \frac{1}{2L^2} \left(\frac{k_{tens} k_{parr}}{k_{parr} + k_{tens}} \right) = k_0 \frac{\alpha}{2e^2} \quad (32)$$

D'où :

$$F_{ka}(x) = k_0 x \left(1 + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{x}{e} \right)^2 \right) \text{ with } \alpha \in [0,1] \quad (33)$$

Ce modèle est validé par éléments finis sous Comsol Multiphysics (Figure 99a). L'écart entre le modèle analytique et les éléments finis est de 8% dans le pire des cas (Figure 99b).



a (m)	k_0 (FEA) (N.m ⁻¹)	k_3 (FEA) (N.m ⁻³)	α (FEA)	k_{tens} (N.m ⁻¹)	k_{parr} (N.m ⁻¹)	k_0 (theory) (N.m ⁻¹)	k_3 (theory) (N.m ⁻³)	α (theory)	difference on k_3
1×10^{-4}	130.7	6.50×10^9	1	1.31×10^6	5.24×10^8	131	6.53×10^9	1	1%
2×10^{-4}	130.4	6.30×10^9	0.96	1.31×10^6	6.55×10^7	131	6.42×10^9	0.98	2%
3×10^{-4}	130.0	5.90×10^9	0.9	1.31×10^6	1.94×10^7	131	6.14×10^9	0.94	4%
4×10^{-4}	130.0	5.40×10^9	0.84	1.31×10^6	8.19×10^6	131	5.65×10^9	0.86	4%
5×10^{-4}	129.8	4.90×10^9	0.76	1.31×10^6	4.19×10^6	131	4.99×10^9	0.76	2%
6×10^{-4}	129.5	4.20×10^9	0.64	1.31×10^6	2.43×10^6	131	4.25×10^9	0.64	1%
7×10^{-4}	129.2	3.60×10^9	0.56	1.31×10^6	1.53×10^6	131	3.53×10^9	0.54	2%
8×10^{-4}	129.0	3.00×10^9	0.46	1.31×10^6	1.02×10^6	131	2.87×10^9	0.44	4%
9×10^{-4}	128.9	2.50×10^9	0.36	1.31×10^6	7.19×10^5	131	2.32×10^9	0.36	8%
10×10^{-4}	128.7	2.00×10^9	0.32	1.31×10^6	5.24×10^5	131	1.87×10^9	0.28	7%

(e)

Figure 99 – Validation du modèle par éléments finis. Déformations et contraintes de Von Mises pour $(L, b, e, l_1, l_2, a) = (3\text{mm}, 1\text{mm}, 100\mu\text{m}, 100\mu\text{m}, 100\mu\text{m}, 1\text{mm})$ (a) $x=50\mu\text{m}$, (b) $x=100\mu\text{m}$, (c) $x=250\mu\text{m}$ and (d) $x=500\mu\text{m}$ et (e) comparaison entre modèle analytique et résultats de simulations par éléments finis

→ Utilisation de ressorts non-linéaires et impact sur les puissances de sortie

Les ressorts non-linéaires modifient fortement le comportement des récupérateurs d'énergie vibratoire. Nous nous intéressons ici à l'impact que peut avoir l'utilisation de ressorts non-linéaires sur des vibrations réelles. Des modèles Simulink permettant de simuler les puissances de sortie à partir de vibrations mesurées ont été réalisés pour les récupérateurs linéaires et non-linéaires (Figure 100):

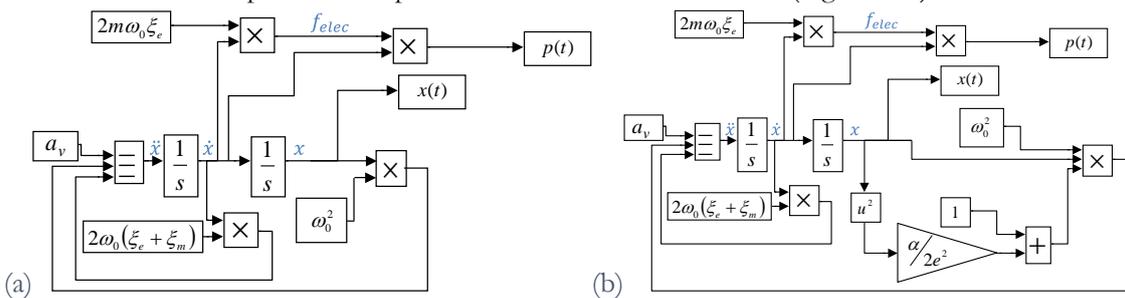


Figure 100 – Modèles Simulink pour (a) les récupérateurs linéaires et (b) les récupérateurs non-linéaires

Un processus d'optimisation nous permet ensuite de déterminer les paramètres f_0, ξ_e, α , maximisant la puissance de sortie pour le cas linéaire et pour le cas non-linéaire. Appliquées à un moteur de voiture à 3000tr/min, caractérisé par les vibrations présentées Figure 101, les simulations montrent l'impact considérable que peut avoir l'utilisation de ressorts non-linéaires sur les puissances de sorties, avec un gain de l'ordre de 50%, passant de $483.57\mu\text{W/g}$ à $717.75\mu\text{W}$ (Figure 102). Ceci est cohérent avec de précédents résultats de l'état de l'art [130].

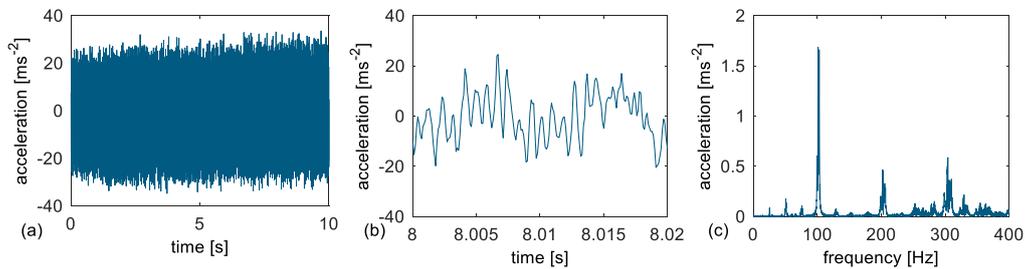


Figure 101 – Vibrations sur un moteur de voiture à 3000tr/min : (a) temporel (b) zoom entre 8 et 8.02s et (c) FFT – spectre vibratoire

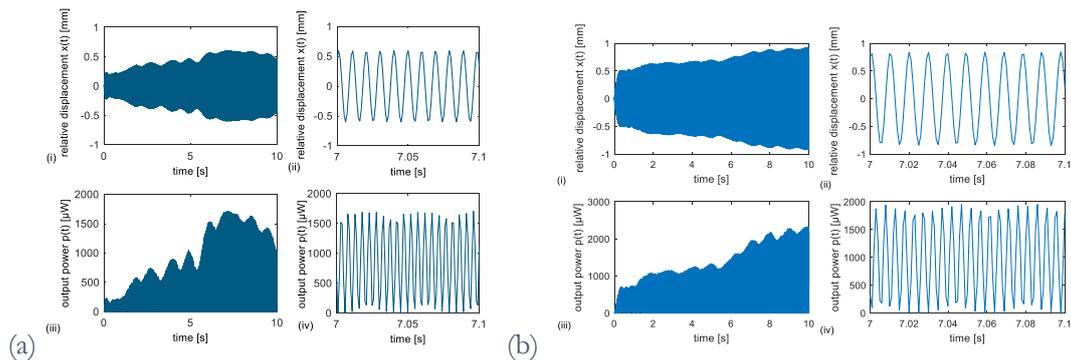


Figure 102 – Déplacement relatif (i) et zoom (ii); puissance de sortie pour $m=1g$ (iii) et zoom (iv) pour (a) un système de récupération d'énergie linéaire et (b) un système de récupération d'énergie non-linéaire

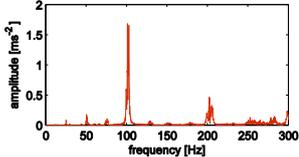
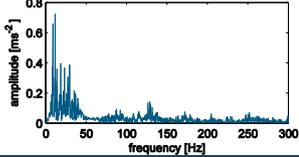
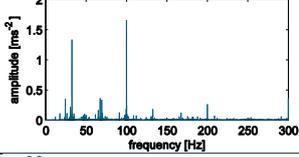
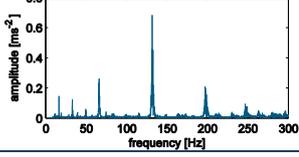
Les puissances de sortie des récupérateurs linéaires et non-linéaires ont également été simulées sur d'autres vibrations réelles : (i) un escalier, avec une personne descendant les marches, (ii) une perceuse et (iii) un moteur de voiture à 2000 tr/min. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 17. Il s'avère que les ressorts non-linéaires permettent d'améliorer significativement la puissance récupérée pour l'escalier; sur la perceuse, les ressorts non-linéaires n'ont quasiment aucun effet; et finalement, sur le moteur de voiture à 2000tr/min, les ressorts linéaires affichent les mêmes performances.

Il est intéressant de noter que les meilleurs résultats sont obtenus sur le moteur à 3000tr/min qui présente un spectre assez similaire à celui du moteur à 2000tr/min. Ceci confirme la nécessité de simuler les systèmes de récupération d'énergie sur des mesures temporelles, la FFT et son effet de moyenne ne permet pas de déterminer l'impact qu'aura l'utilisation de ressorts non-linéaires.

Ces résultats de simulation confirment l'intérêt que peuvent avoir les structures non-linéaires pour certaines applications, mais il est difficile d'en faire une règle générale.

La prochaine étape sera de réaliser des structures de récupération d'énergie avec ressorts en H pour valider les simulations.

Tableau 17 – Puissances récupérées simulées pour des récupérateurs linéaires et non-linéaires à partir de vibrations réelles

Vibrations	Acceleration (FFT)	Optimum pour les systèmes linéaires (m=1g)	Optimum pour les systèmes non-linéaires (m=1g)
Moteur de voiture à 3000tr/min		$f_0=102.2$ Hz $\xi_e=0.0089$ $P=483.57\mu\text{W}$	$f_0=98.77$ Hz $\xi_e=0.00539$ $\alpha/(2e^2)=1.56 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$ $P=717.75 \mu\text{W}$
Escalier – personne descendant les marches		$f_0=11.7$ Hz $\xi_e=0.0093$ $P=80\mu\text{W}$	$f_0=7.93$ Hz $\xi_e=0.0165$ $\alpha/(2e^2)=5.144 \times 10^3 \text{ m}^{-2}$ $P=100 \mu\text{W}$
Perceuse		$f_0=99.99$ Hz $\xi_e=0.0051$ $P=70.6\mu\text{W}$	$f_0=99$ Hz $\xi_e=0.052$ $\alpha/(2e^2)=4.74 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$ $P=71.1 \mu\text{W}$
Moteur de voiture à 2000tr/min		$f_0=131.84$ Hz $\xi_e=0.0065$ $P=26.92 \mu\text{W}$	$f_0=131.84$ Hz $\xi_e=0.0065$ $\alpha/(2e^2)=0 \text{ m}^{-2}$ $P=26.92 \mu\text{W}$

b. Système masse-ressort à faible débattement vertical

Mes recherches m'ont finalement conduit au développement de nouveaux ressorts pour les structures électrostatiques à électrets, et notamment pour le projet HBS visant à réaliser des récupérateurs d'énergie des battements cardiaques.

- Publications et Brevets associés :
 - [BR3] - Système masse-ressort à faible débattement transverse

→ Concept

Une grande partie des structures électrostatiques à électrets dans le plan est constituée de 2 plaques en vis-à-vis avec un système de ressorts réalisés dans la plaque supérieure pour former un système masse ressort résonant (Figure 103a). Pour atteindre de faibles fréquences de résonance et avoir un débattement suffisant de la masse, il est généralement nécessaire d'utiliser un ressort formé d'une succession de bras (Figure 103b); la raideur du ressort selon l'axe z réduit alors fortement, ce qui conduit à un enfoncement de la masse mobile pouvant amener à un collage électrostatique de l'ensemble. La solution que nous avons proposée (Figure 103c) consiste à ajouter un cadre de rigidification autour des ressorts pour accroître la raideur dans l'axe z et limiter l'enfoncement de la masse mobile.

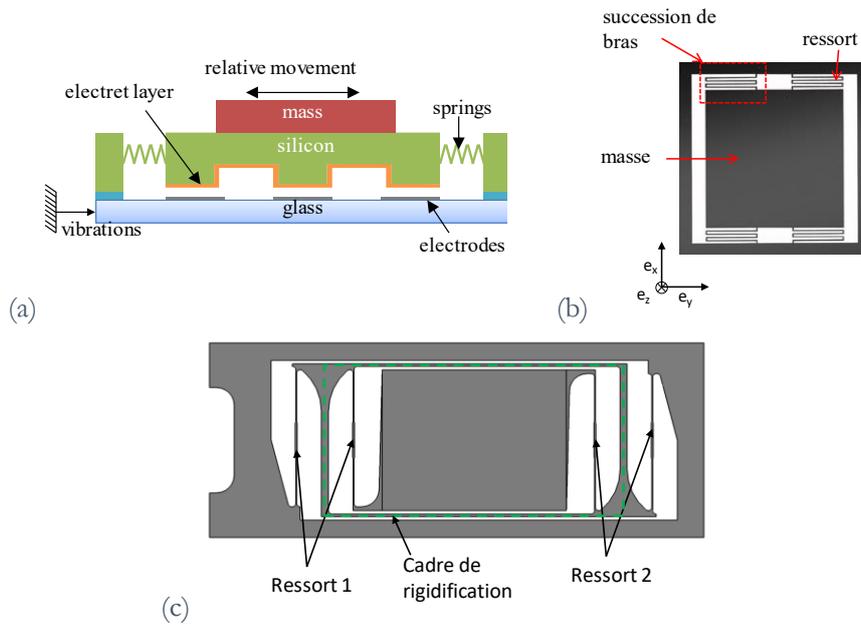
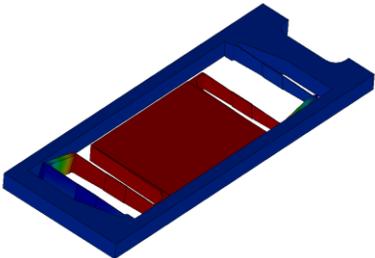
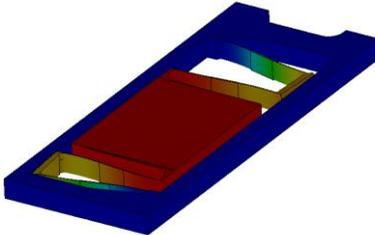
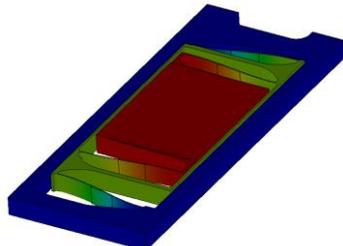


Figure 103 – (a) positionnement du problème, (b) exemple de ressort formé par une succession de bras et (c) solution proposée à base de cadre de rigidification

→ Simulations et réalisation

Cette structure a été conçue sous Solidworks et simulée par éléments finis. Pour une raideur selon e_x et une fréquence de résonance (95.5Hz) identiques, la structure sans cadre de rigidification présente une raideur selon e_z de 64N/m à comparer aux 8333N/m de la structure avec cadre de rigidification. Ainsi, soumises à une force $F_z=10mN$, la première s'enfoncera de 156 μm quand la seconde s'enfoncera seulement de 1.2 μm (Tableau 18).

Tableau 18 – Comparaison des raideurs selon e_z et des fréquences de résonance avec et sans cadre de rigidification

	Sans cadre de rigidification	Avec cadre de rigidification
Enfoncement selon z avec 10mN appliqués au centre 	 $k=64N/m$	 $k=8333N/m$
Fréquence de résonance	 $f_0=95.4Hz$	 $f_0=95.6Hz$

Les structures ont ensuite été réalisées en silicium (Figure 104a); une masse mobile a été ajoutée sur la partie centrale pour réduire la fréquence de résonance à 17Hz (Figure 104b et Figure 104c). Le fonctionnement de l'ensemble a finalement été validé sur pot vibrant.

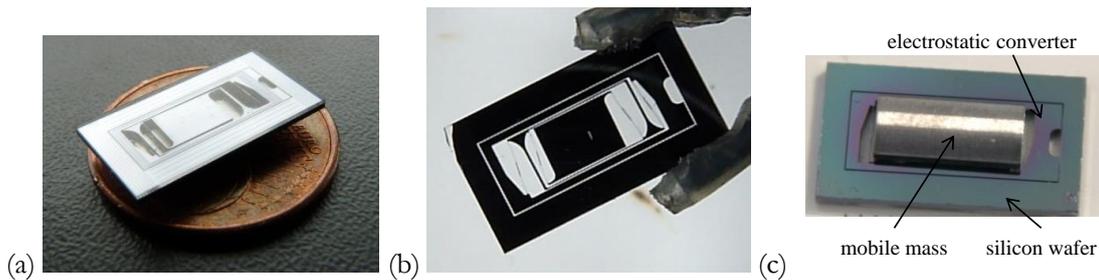


Figure 104 – (a) structure réalisée, (b) 2nd mode de résonance et (c) structure finale

3.7 Électroniques de gestion d'énergie

Comme évoqué Section 3.2, l'énergie issue d'un système de récupération d'énergie est rarement utilisable telle quelle (tension trop élevée, trop basse, puissance trop faible pour alimenter en direct le capteur autonome,...). Aussi, une électronique de gestion est indispensable pour exploiter au mieux l'énergie brute issue du récupérateur d'énergie.

Les circuits de gestion d'énergie peuvent être passifs (pont de diodes, doubleur de tension) ou actifs (Buck, Boost, Buck-boost,...) implémentant des modes de conversion DC/DC classiques (PWM) ou non-linéaires (SECE, SSHI,...). Les rendements de conversion dépendent fortement de l'architecture choisie et des composants mis en œuvre. Sont présentés dans cette section sur les électroniques de gestion (i) des blocs basse consommation et notamment la fonction "comparateur à hystérésis" qui a été implémentée dans nombre de nos circuits, (ii) des électroniques de gestion d'énergie capables de démarrer à froid, sans batterie et (iii) des topologies de conversion non-linéaires compatibles avec l'extraction d'énergie de récupérateurs piézoélectriques en parallèle.

a. Blocs basse consommation en électronique discrète – Comparateur à hystérésis

→ De l'intérêt des transistors MOS à déplétion pour la récupération d'énergie

Les MOS à déplétion sont des transistors normally-on, passant tant que $V_{gs} < V_{gs,th}$. Ils permettent de réaliser 3 fonctions intéressantes pour la récupération d'énergie et notamment (i) de bypass piloté pour des circuits de démarrage (Figure 105a), (ii) de limiteur de tension (Figure 105b) ou (iii) de limiteur de courant (Figure 105c).

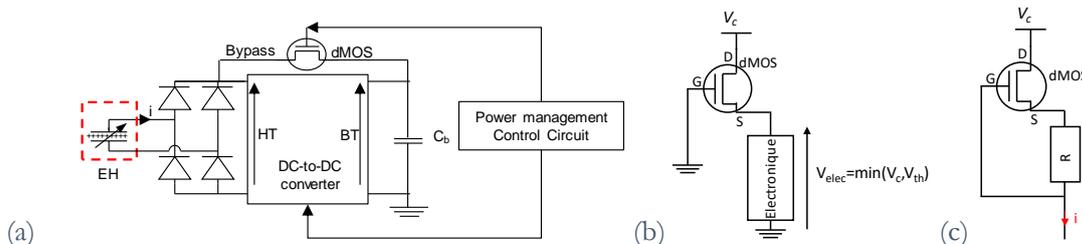


Figure 105 – (a) bypass piloté pour des circuits de démarrage, (b) limiteur de tension et (c) limiteur de courant

→ Comparateur à hystérésis – Exemple d'implémentation

La fonction "comparateur à hystérésis" est une fonction extrêmement intéressante pour la récupération d'énergie permettant de connecter une charge, un capteur, lorsque la capacité buffer a stocké suffisamment d'énergie pour assurer la mesure et son envoi par RF puis de déconnecter cette charge lorsque la tension aux bornes de la capacité est redevenue trop basse.

Plusieurs architectures de comparateurs à hystérésis ont été développées et mises en œuvre dans nos projets de recherche. La solution proposée ci-dessous est basée sur l'utilisation de MOS à déplétion en limiteur de tensions.

- Publications et Brevets associés :
 - [BR1] – Circuit de comparaison d'une tension à un seuil et conversion d'énergie électrique

U_{in} est par exemple la tension aux bornes de la capacité buffer dont il faut connaître l'état de charge. Le principe de base est d'utiliser le comparateur auto-alimenté présenté Figure 106a et dont le fonctionnement est décrit Figure 106b. U_{dmos} est limité par la tension de seuil du MOS à déplétion ($V_{gt,th}$) et vaut $U_{dmos} = \min(U_{in}, V_{gt,th})$. Deux inverseurs CMOS alimentés par U_{in} et connectés à la source du MOS à déplétion se comportent comme un buffer commutant à $2 \times V_{gt,th}$.

L'hystérésis est obtenue en rebouclant la sortie du buffer CMOS à son entrée (Figure 106c). Des diodes peuvent être également ajoutées pour décaler les seuils de commutation. La consommation de ce circuit est comprise entre 50 et 100nA.

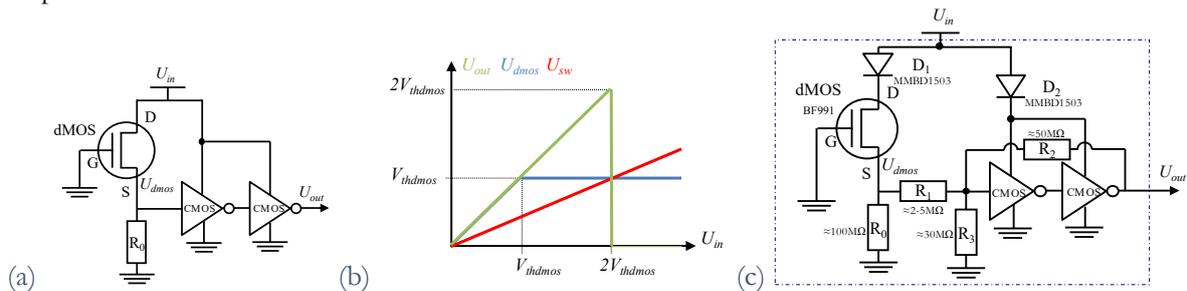


Figure 106 – (a) Détecteur de tension à base de MOS à déplétion, (b) principe de fonctionnement et (c) comparateur à hystérésis

→ [Mise en œuvre de la fonction "comparateur à hystérésis" dans l'alimentation de capteurs autonomes](#)

La fonction "comparateur à hystérésis" ultra basse consommation a été utilisée pour alimenter des capteurs autonomes à partir de deux systèmes de récupération d'énergie développée par l'ESYCOM : un système de récupération d'énergie vibratoire MEMS à électrets (Figure 107a) et un dispositif de transmission de puissance sans-fil à 2.4GHz (Figure 107b). Dans les deux cas, nous avons démontré le fonctionnement de l'ensemble récupération d'énergie + électronique de gestion permettant d'alimenter un capteur autonome communicant avec mesure de la température et envoi de l'information par RF.

- Publications et Brevets associés :
- [JS6] – A nonlinear MEMS electrostatic kinetic energy harvester for human-powered biomedical devices
 - [JS9] – A batch-fabricated electret-biased wideband MEMS vibration energy harvester with frequency-up conversion behavior powering a UHF wireless sensor node
 - [CI15] – Low-frequency MEMS electrostatic vibration energy harvester with corona-charged vertical electrets and nonlinear stoppers
 - [CI16] – Low-frequency and ultra-wideband MEMS electrostatic vibration energy harvester powering an autonomous wireless temperature sensor node

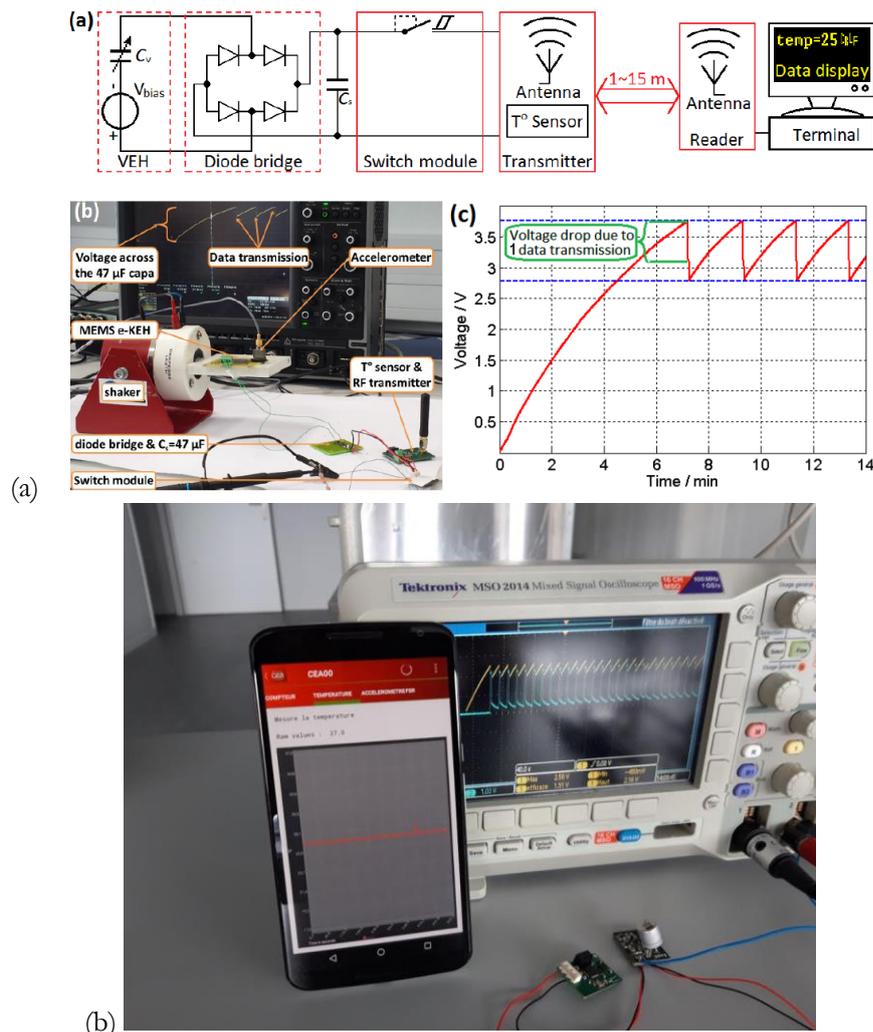


Figure 107 – Application du comparateur à hystérésis(a) aux récupérateurs d'énergie électrostatiques développés par l'ESYCOM et (b) aux systèmes de transmission de puissance sans fil développés par l'ESYCOM

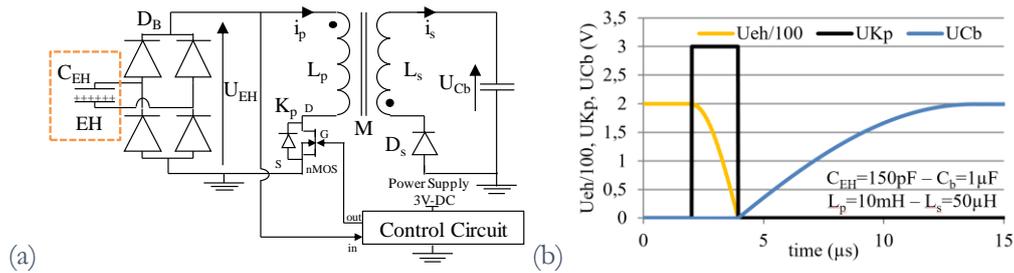
b. Architectures non-linéaires & démarrage à froid

La récupération d'énergie permet d'envisager le développement de capteurs autonomes sans batterie. Comme mentionné au début de cette section, les circuits de gestion d'énergie actifs présentent un intérêt fort pour la récupération d'énergie et notamment pour les récupérateurs mécaniques à conversion électrostatique ou piézoélectrique. Un problème se pose donc lors du démarrage à froid de l'électronique des systèmes sans batterie ; car comment piloter des transistors et alimenter des fonctions logiques si aucune source d'énergie, de tension, n'est présente dans le système.

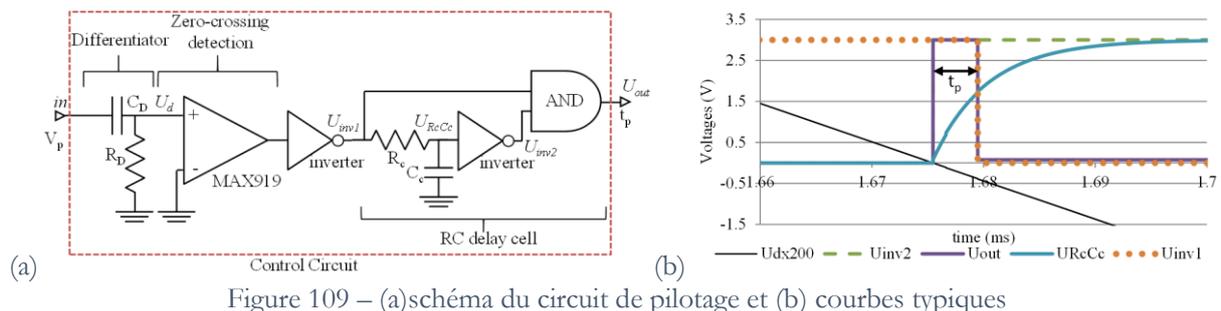
- Publications et Brevets associés :
- [JS4] – An autonomous piezoelectric energy harvesting IC based on a synchronous multi-shot technique
 - [CI9] – Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters
 - [CI11] – Electret-based Aeroelastic Harvester and its Self-starting Battery-free Power Management Circuit
 - [CI21] - A triboelectric wind turbine for small-scale energy harvesting

→ Architecture proposée et principe de fonctionnement

L'extraction synchrone (SECE - Synchronous Electric Charge Extraction) est une technique de conversion d'énergie non-linéaire permettant d'accroître la puissance de sortie des récupérateurs d'énergie électrostatiques à électrets ou piézoélectriques [131], [132]. Cette méthode consiste à extraire complètement l'énergie stockée dans la capacité du récupérateur d'énergie dès lors qu'il atteint son maximum de tension. L'énergie est ensuite transférée vers une capacité buffer C_b au travers d'un circuit inductif (buck, buck-boost, flyback...). Nous privilégions dans notre laboratoire la topologie flyback adaptée pour les grands rapports de conversion entre l'entrée et la sortie, et pouvant atteindre 100:1 en électrostatique (300V en entrée – 3V en sortie). La topologie flyback et les courbes typiques de l'extraction synchrone SECE sont présentées Figure 108.



Implémenter l'extraction synchrone avec un convertisseur flyback implique l'utilisation d'un circuit de gestion d'énergie ("Control Circuit") dont l'objectif sera de détecter le maximum de tension du récupérateur et de piloter la fermeture du transistor au primaire K_p . Un exemple de mise en œuvre de ce circuit de gestion est présenté Figure 109a et les courbes temporelles associées Figure 109b.



Pour gérer le démarrage à froid, la solution que nous avons proposée consiste à commuter entre un mode de fonctionnement passif (pont de diode – capacité) et un mode de fonctionnement actif (SECE) à base de convertisseur flyback dès que suffisamment d'énergie a été stockée dans une capacité de démarrage C_s (Figure 110a).

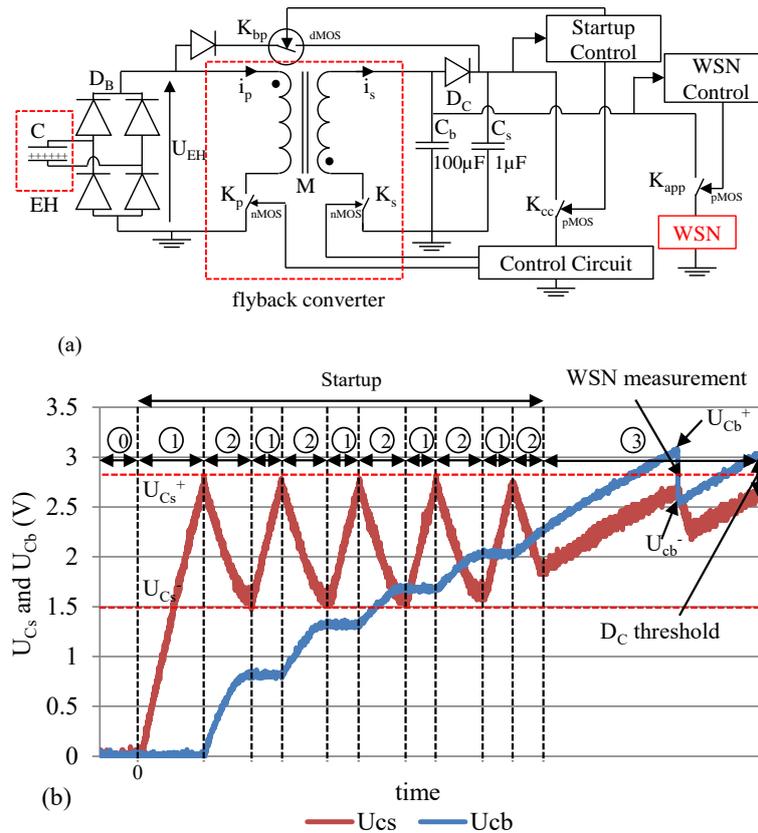


Figure 110 – Architecture auto-démarrante (a) schéma et (b) principe de fonctionnement – tensions U_{C_s} et U_{C_b} en fonction du temps

Ce circuit utilise deux capacités: (i) C_s (1-5 μ F) qui alimente le circuit de gestion d'énergie et (ii) C_b (100 μ F-1mF) qui alimente le capteur autonome. C_s et C_b sont reliées par la diode D_c . Un MOS à déplétion (K_{bp}) permet de bypasser le convertisseur flyback lors du démarrage à froid pour recharger C_s . Ensuite, le circuit est capable d'alternier entre un mode de fonctionnement actif et un mode de fonctionnement passif en fonction de la tension U_{C_s} aux bornes de la capacité C_s : cette commutation est pilotée par un comparateur à hystérésis (Startup Control).

Le fonctionnement du circuit peut être résumé en 5 étapes; les tensions aux bornes de C_s et C_b sont présentées Figure 110b:

- Etat 0 – Etat 0 énergie : au début, il n'y a pas d'énergie dans le système, K_{bp} est fermé, K_{cc} est ouvert, K_{app} est ouvert. $U_{C_b}=0$ et $U_{C_s}=0$.
- Etat 1 – circuit passif pont de diodes peu efficace : le récupérateur d'énergie commence à fonctionner. Comme K_{bp} est fermé et K_{cc} ouvert, le convertisseur flyback est bypassé par K_{bp} . L'énergie produite va directement dans C_s : U_{C_s} augmente.
- Etat 2 – circuit actif SECE à convertisseur flyback : dès qu' U_{C_s} atteint $U_{C_s}^+$, "Startup Control" ouvre K_{bp} et ferme K_{cc} . Le circuit de gestion d'énergie est alimenté par C_s et la conversion SECE au travers du flyback démarre. L'énergie est dirigée vers U_{C_b} . Comme C_s ne reçoit plus d'énergie du récupérateur d'énergie alors qu'elle alimente le circuit de gestion d'énergie, sa tension décroît jusqu'à atteindre $U_{C_s}^-$. Le circuit "Startup Control" rebascule à l'état 1 (pont de diode) pour recharger C_s . L'alternance entre l'état 1 et l'état 2 se poursuit jusqu'à ce que U_{C_b} atteigne $U_{C_s} + V_{thDc}$ (tension de seuil de la diode D_c).
- Etat 3 – fin du démarrage. Le circuit de gestion d'énergie reste en mode SECE actif, maximisant l'extraction d'énergie du récupérateur. K_{cc} reste fermé, K_{bp} ouvert.

- Mesure (WSN measurement). Quand U_{Cb} atteint U_{Cb}^+ , la fonction "WSN control" qui est également un comparateur à hystérésis ferme K_{app} pour alimenter le capteur autonome qui réalise sa mesure et la transmet. K_{app} est à nouveau ouvert dès que U_{Cb} atteint U_{Cb}^- .

La consommation de l'électronique de gestion, avec démarrage et pilotage des transistors du convertisseur flyback, est inférieure à $1\mu A$ avec des composants discrets, ce qui reste très inférieur aux puissances classiquement récupérées par nos dispositifs.

→ [Application aux convertisseurs piézoélectriques et électrostatiques à électrets](#)

Ce circuit a été testé et validé sur de nombreux récupérateurs d'énergie mécanique à conversion électrostatique ou piézoélectrique, et notamment des structures de poutres encastree-libre à électrets (Figure 111), de simples buzzers piézoélectriques actionnés à la main, des récupérateurs d'énergie des flux d'air électrostatiques à fluttering ou microturbine ou encore de systèmes de récupération d'énergie thermiques à bilames.

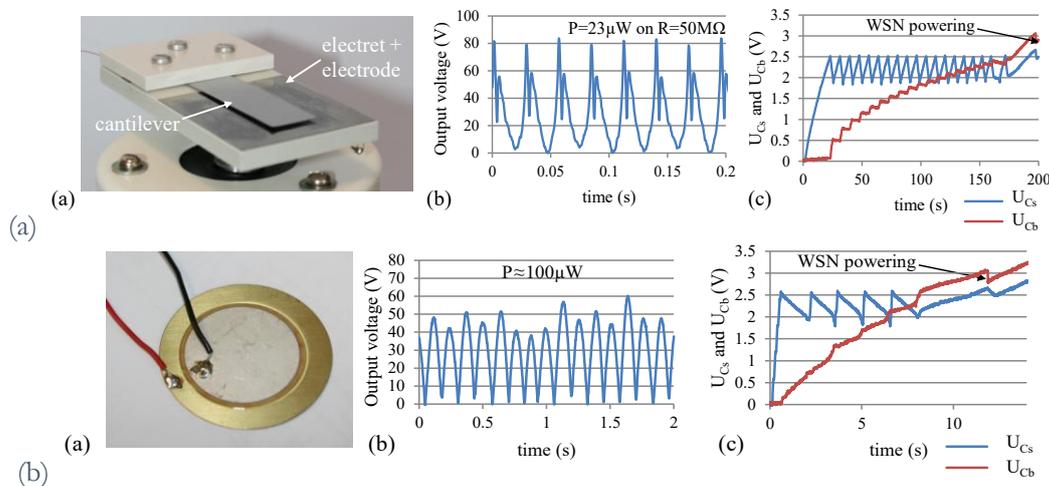
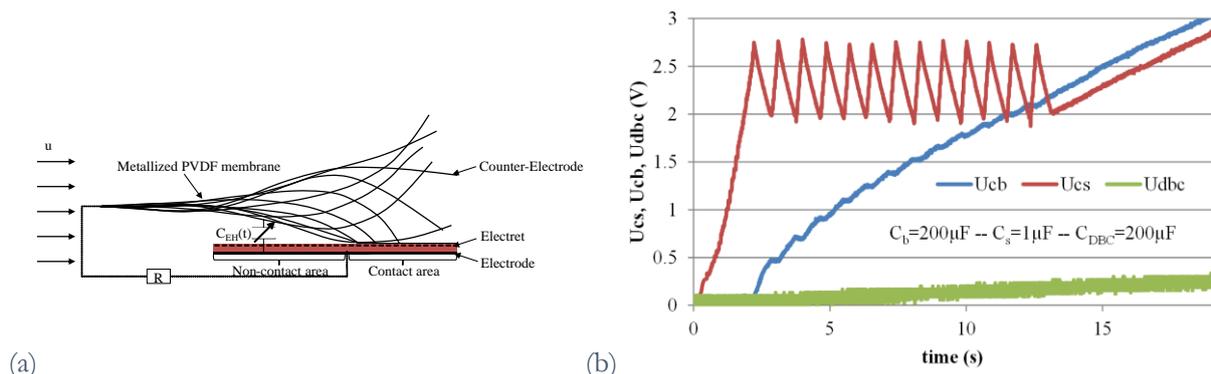


Figure 111 – validation du fonctionnement du circuit sur récupérateurs d'énergie vibratoire (a) électrostatiques à électrets et (b) piézoélectriques

La topologie non-linéaire SECE a par ailleurs un réel intérêt par rapport aux circuits passifs simples de type pont de diodes – capacité (DBC – Diode Bridge Capacitor), comme le montre la Figure 112. Les deux circuits ont été testés sur un récupérateur aéroélastique semi-confiné à $U=7m/s$ (Figure 112a) avec la même capacité de stockage ($C_{DBC}=C_b=200\mu F$). En configuration DBC, la capacité buffer atteint seulement $U_{DBC}=0.25V$ en 19s, ce qui correspond à 150 fois moins d'énergie que ce qui est obtenu avec le circuit SECE avec démarrage à froid (U_{Cb} , U_{Cs}).

Ces résultats montrent également l'intérêt du démarrage à deux capacités permettant de démarrer très rapidement la conversion active en utilisant une petite capacité (C_s) pour alimenter le circuit de pilotage de l'électronique active.

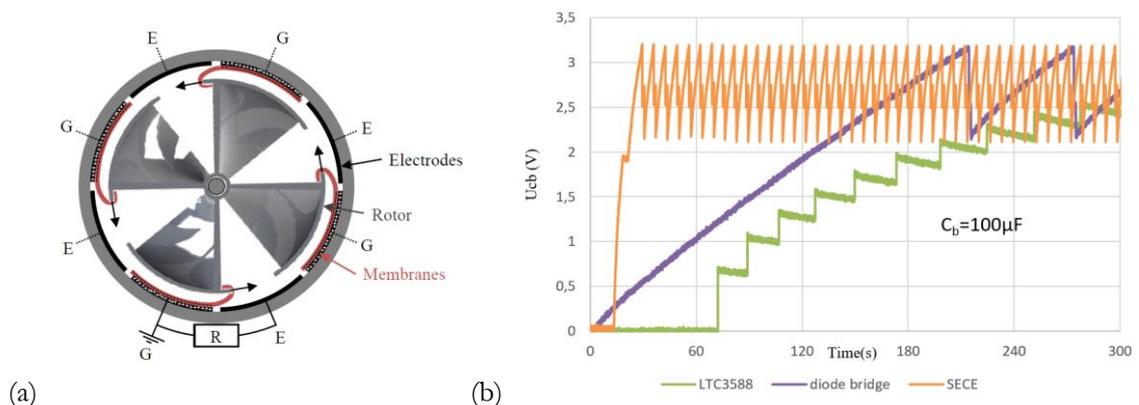


(a) convertisseur aéroélastique semi-confiné et (b) tensions aux bornes d'une capacité de stockage de $200 \mu F$ en configuration DBC (diode bridge capacitor) et SECE (Synchronous electric Charge Extraction) - $U = 7 \text{ m/s}$

Il est finalement à noter l'intérêt de l'extraction synchrone pour les structures électrostatiques par rapport aux composants du commerce dédiés à la récupération d'énergie. Testés sur une turbine triboélectrique (Figure 113a), les circuits de gestion d'énergie affichent des performances très différentes: la Figure 113b présente la tension U_{Cb} (capacité de stockage) rechargée par la turbine triboélectrique et alimentant un capteur basse consommation avec 3 électroniques de gestion différentes : (i) l'extraction synchrone SECE, (ii) le circuit LTC3588 et (iii) un pont de diode. Chaque décroché de U_{Cb} correspond à l'alimentation asynchrone du capteur.

Passée la phase de démarrage (3min 37s pour le pont de diode – 30s pour l'extraction synchrone), le circuit "pont de diode" permet d'envoyer une trame toute les 60 secondes et le circuit SECE toutes les 6 secondes; le circuit LTC3588 envoie sa première trame au bout de 8 minutes et est donc surclassé par les deux circuits précédents.

Nous confirmons ici, une fois de plus, les gains apportés par l'extraction synchrone et par les circuits actifs de manière plus générale par rapport aux circuits passifs.



(a) turbine triboélectrique et (b) tests de différentes électroniques de gestion d'énergie sur ce convertisseur – chaque décroché de U_{Cb} correspond à l'alimentation asynchrone d'un capteur.

→ Implémentation dans un ASIC de gestion d'énergie

Le principe de fonctionnement à deux capacités a par la suite été implémenté dans un ASIC de gestion d'énergie dans la thèse de Pierre Gasnier (Figure 114). Une approche hybride avec composants de puissance externes et fonctions logiques intégrées a été mise en œuvre de façon à rendre cet ASIC compatible avec les récupérateurs piézoélectriques et électrostatiques dont les tensions de sorties peuvent atteindre plusieurs centaines de volts.

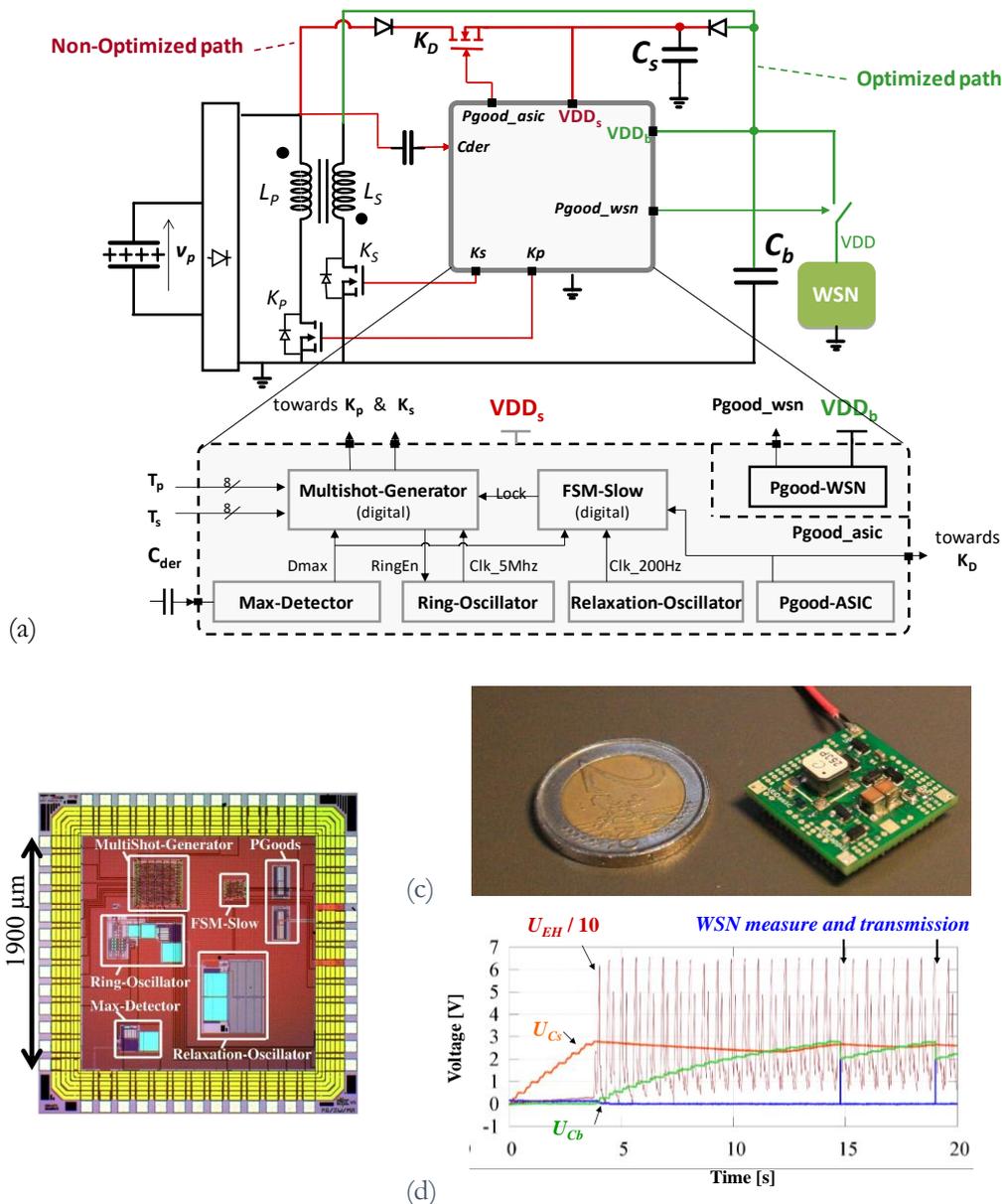


Figure 114 – (a) Fonctionnement de l'ASIC, (b) ASIC, (c) intégration avec composants discrets et (d) validation du fonctionnement sur générateur piézoélectrique

Une innovation intéressante a également été implémentée dans cet ASIC : l'extraction d'énergie synchrone multi-coups (MS-SECE pour Multi-Shot Synchronous Electric Charge Extraction) permettant de réduire la taille des éléments inductifs en transférant l'énergie du primaire vers le secondaire en plusieurs fois; au lieu d'une seule fois dans l'extraction SECE classique (Figure 114).

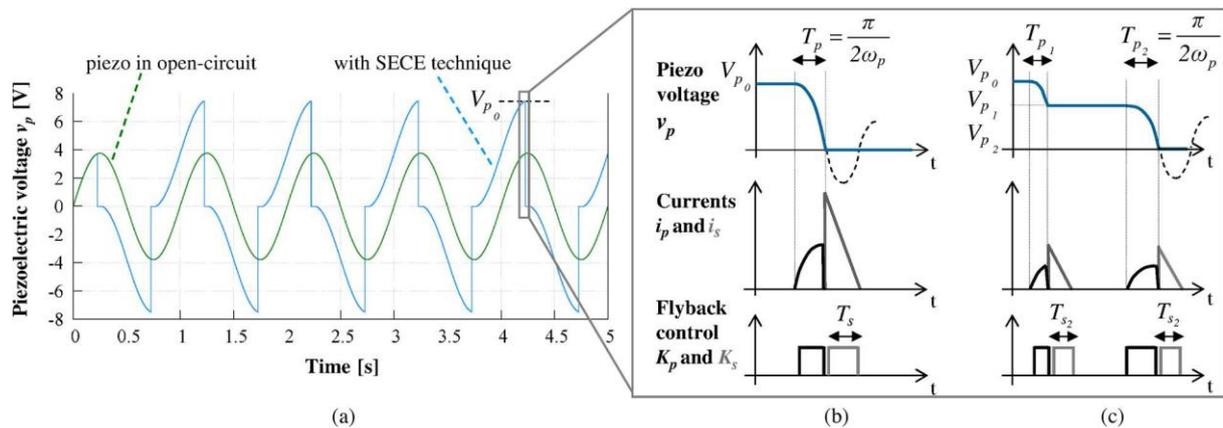


Figure 115 – Implémentation de l'extraction d'énergie dite MS-SECE (a) simulations EldoD de l'extraction synchrone sur un récupérateur piézoélectrique, (b) zoom sur un transfert SECE classique et (c) zoom sur un transfert SECE en 2 coups (MS-SECE, N=2)

En considérant la figure de mérite : $FOM = \frac{E_{out}\eta_{max}}{V_{coil}}$, avec E_{out} l'énergie de sortie par décharge, η_{max} le rendement de conversion maximal et V_{coil} le volume de l'élément inductif, le gain de l'extraction synchrone multi-coups par rapport à l'état de l'art est très net (Figure 116).

Ref.	Process	Static power consumption [input power range]	Tolerated harvester's voltage	Maximum end-to-end efficiency η_{max}	Figure of Merit $FOM = E_{out} \cdot \eta_{max} / V_{coil}$	Extraction techniques and additional functions
				$V_{coil} = \text{volume of the magnetic component}$		
This work	0.35 μm CMOS	$\geq 1\mu\text{W}$ [4 μW - 1mW]	$> 200\text{ V}$ (limited by off-chip components)	61% @ $V_{ps} = 40\text{V}$ $V_{coil} = 125\text{ mm}^3$	54,7 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$	MS-SECE (and SECE), self-start, autonomous
[11] Hehn, 2012	0.35 μm CMOS (20V option)	$\geq 4\mu\text{W}$ [5,7 μW - N.A.]	$\leq 20\text{ V}$ (limited by technology)	85% @ $V_{ps} = 12,8\text{V}$ $V_{coil} = 630\text{ mm}^3$	1,8 $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$	SECE self-start, autonomous
[13] Ramadass, 2010	0.35 μm CMOS	$\geq 2\mu\text{W}$ [N.A. - N.A.]	$\leq 5\text{ V}$ (limited by technology)	87% @ $V_{rect} = 2,5\text{V}$ $V_{coil} = \text{N.A.}$	N.A.	SSHI and Bias flip rectifier
[6] Stanzione, 2013	TSMC 0,25 BCD (60V option)	N.A. [25 μW - 1,6mW]	$\leq 60\text{ V}$ (limited by technology)	88,7% @ $V_{rect} = 20\text{V}$ $V_{coil} = \text{N.A.}$	N.A.	MPPT-DC, self-start, autonomous
[14] LTC3588 (Linear Technology)	N.A.	$\geq 1,35\mu\text{W}$ [10 μW - 300mW]	$\leq 20\text{ V}$ (limited by technology)	90% @ $V_{rect} < 20\text{V}$ $V_{coil} = \text{N.A.}$	N.A.	No MPPT, self-start, autonomous
[26] Romani, 2014	Discrete components	N.A. [N.A. - N.A.]	$\leq 20\text{ V}$ (limited by discrete components)	88% @ $V_{ps} = 8\text{V}$ $V_{coil} \geq 655\text{ mm}^3$	$\leq 2\text{ }\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$	SECE self-start, autonomous

Figure 116 – Extraction MS-SECE comparée à l'état de l'art

c. Architectures non-linéaires pour récupérateurs d'énergie en parallèle

La parallélisation des récupérateurs d'énergie pour accroître la puissance globale générée ou pour réaliser des systèmes large bande est régulièrement proposée. Cependant, peu de circuits de gestion d'énergie efficaces capables de récupérer l'énergie de dispositifs en parallèle ont été proposés.

Nous avons développé une architecture de gestion d'énergie pour récupérateurs piézoélectriques mettant en œuvre une extraction SECE au travers d'une topologie flyback.

- Publications et Brevets associés :
 - [C112] – Synchronous Electric Charge Extraction for multiple piezoelectric energy harvesters

→ Concept

Le circuit généralement mis en œuvre pour implémenter la technique SECE avec un convertisseur flyback est présenté Figure 117a. Pour rendre ce circuit compatible avec deux récupérateurs d'énergie en entrée, l'inductance au primaire L_p et le transistor au primaire ont été intervertis et la masse placée au centre

des deux. Des diodes (D_9, D_{10}) ont été ajoutées de manière à ce que les circuits de pilotage observent uniquement la tension de leur récupérateur respectif.

Le principe de fonctionnement est équivalent à celui du système unitaire : dès que l'un des récupérateur d'énergie atteint son maximum de tension, son énergie est transférée vers la capacité de stockage C_b au travers du flyback. L'autre récupérateur d'énergie reste en circuit ouvert pendant cette décharge, attendant le moment où il atteindra à son tour son maximum de tension. Cette topologie nécessite d'avoir un circuit de détection par récupérateur mais permet de mutualiser l'inductance couplée et la capacité de stockage.

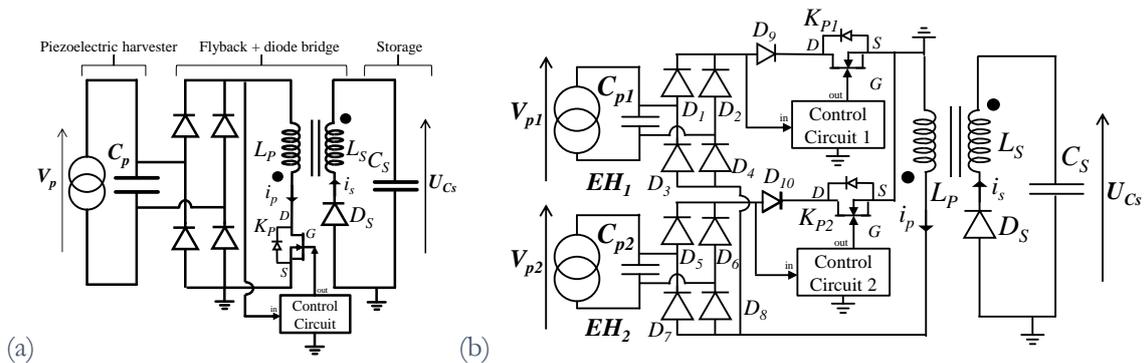


Figure 117 – (a) Architecture flyback classique pour un récupérateur et (b) Architecture flyback implémentant la technique SECE sur deux récupérateurs piézoélectriques

→ Mise en œuvre

Les circuits de gestion d'énergie sont proches de ceux développés pour la version unitaire avec un dérivateur, un comparateur et une cellule à retard permettant de générer un pulse de durée contrôlée précisément pour piloter les NMOS au primaire (Figure 118).

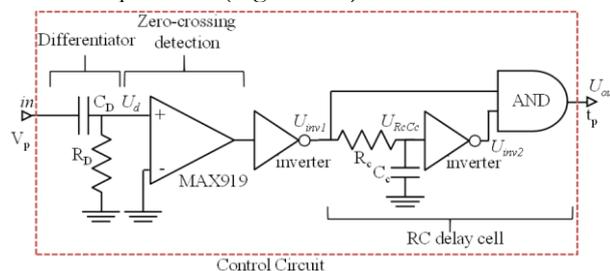


Figure 118 – Circuit de détection et de pilotage des MOS K_{p1} au primaire

→ Simulations PSpice et résultats expérimentaux

Le circuit est simulé sous Orcad Capture (PSpice) avec deux récupérateurs d'énergie de tensions et de fréquences différentes, validant le fonctionnement de l'ensemble avec transfert d'énergie à chaque détection du maximum de tension (Figure 119).

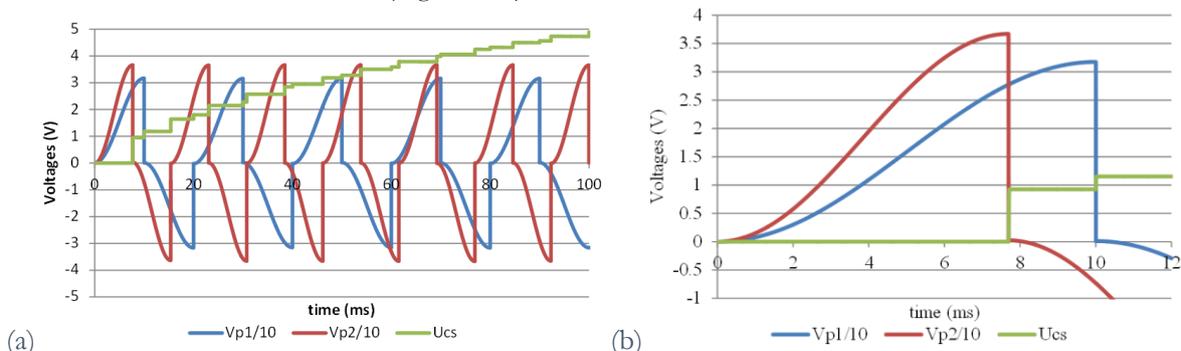


Figure 119 – Simulations sous PSpice (a) vue d'ensemble et (b) focus sur deux transferts d'énergie, avec : $V_{p1[oc]}=16V$ ($V_{p1[SECE]}=32V$), $C_{p1}=20nF$, $f_{p1}=50Hz$, $V_{p2[oc]}=18V$ ($V_{p2[SECE]}=36V$), $C_{p2}=40nF$, $f_{p2}=65Hz$

Le circuit a ensuite été réalisé et testé sur deux récupérateurs d'énergie piézoélectriques de fréquences, de tensions et de capacités différentes : $C_{p1}=5.8\text{nF}$, $V_{p1[\text{SECE}]}=34\text{V}$, $f_{p1}=36\text{Hz}$ and $C_{p2}=17.6\text{nF}$, $V_{p2[\text{SECE}]}=24\text{V}$, $f_{p2}=47\text{Hz}$.

Les composants utilisés sont récapitulés dans le Tableau 19.

Tableau 19 – Composants électroniques utilisés pour ce circuit

Composant	Valeur/Reference	Composant	Valeur/Reference
Inductance couplée	Würth LT3748 (750311911) avec $L_p=1.0\text{mH}$ et $L_s=28\mu\text{H}$ ($m=6$)	D_s	FDS9926A avec G connectée à la masse
D₁-D₁₀	MMBD1503	K_p	BSP130
C_s	940 μF	Comparateur	MAX919
Porte AND	SN74LVC1G08	C_D	0.25pF
Inverseur	SN74AUP2G04	R_D	20M Ω

La détection du maximum de tension et du transfert d'énergie à cet instant sont validés (Figure 120a). Il est à noter en particulier que la décharge de l'un ne provoque pas la décharge de l'autre. Le circuit SECE est comparé au circuit pont de diode capacité (DBC) avec 1 ou 2 générateurs piézoélectriques (EH1, EH2) connectés (Figure 120b). Le circuit SECE permet de récupérer 5 fois plus d'énergie que le circuit passif pont de diodes – capacité sur les 25 secondes de test, montrant un intérêt très net de cette solution pour les récupérateurs d'énergie piézoélectriques.

La consommation de l'électronique de gestion d'énergie est de 1.15 $\mu\text{A}@3\text{V}$ par récupérateur d'énergie (environ 2% de la puissance récupérée).

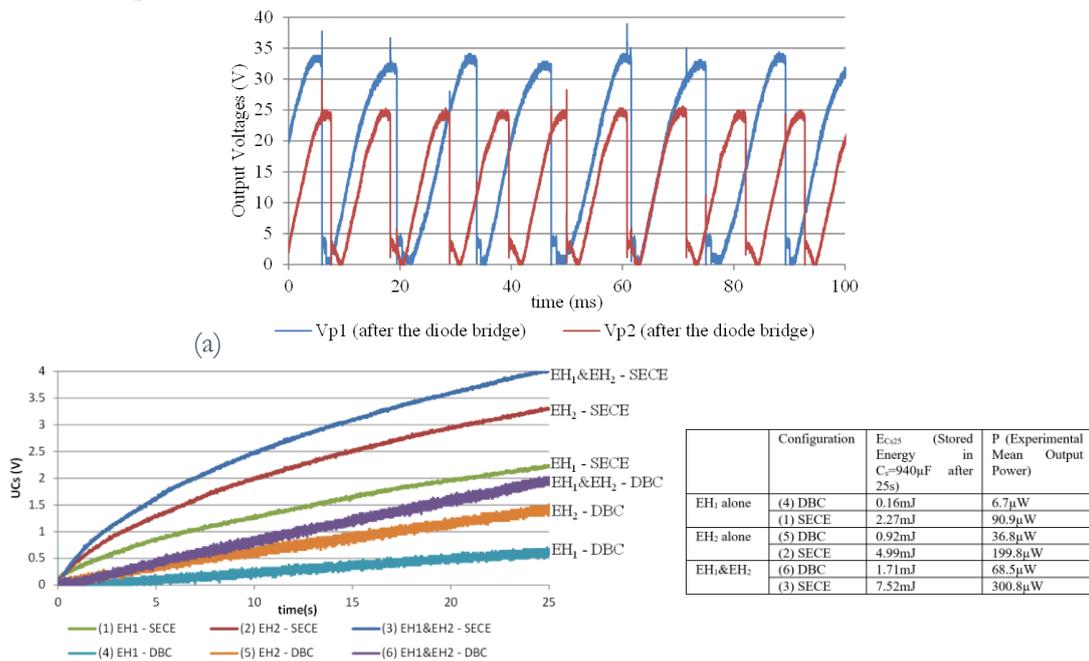


Figure 120 – (a) détection du maximum de tension sur les deux générateurs piézoélectriques et (b) énergie récupérée dans la capacité de stockage C_s avec 1 ou 2 piézos et le circuit SECE ou le circuit pont de diode – capacité (DBC)

→ Démarrage à froid

Le démarrage à froid peut être mis en œuvre de la même manière que pour le circuit unitaire, ce que nous avons vérifié expérimentalement. Une capacité de démarrage C_s combinée à des MOS à déplétion permettant de bypasser le convertisseur Flyback ont été ajoutés sur la carte électronique (Figure 121a).

Le temps de démarrage pour atteindre 3.5V sur une capacité de $C_b=100\mu\text{F}$ est de 10s avec le récupérateur EH1 seul, de 9s avec le récupérateur EH2 seul et de 3s seulement avec les deux récupérateurs ensemble, validant le démarrage à froid du circuit.

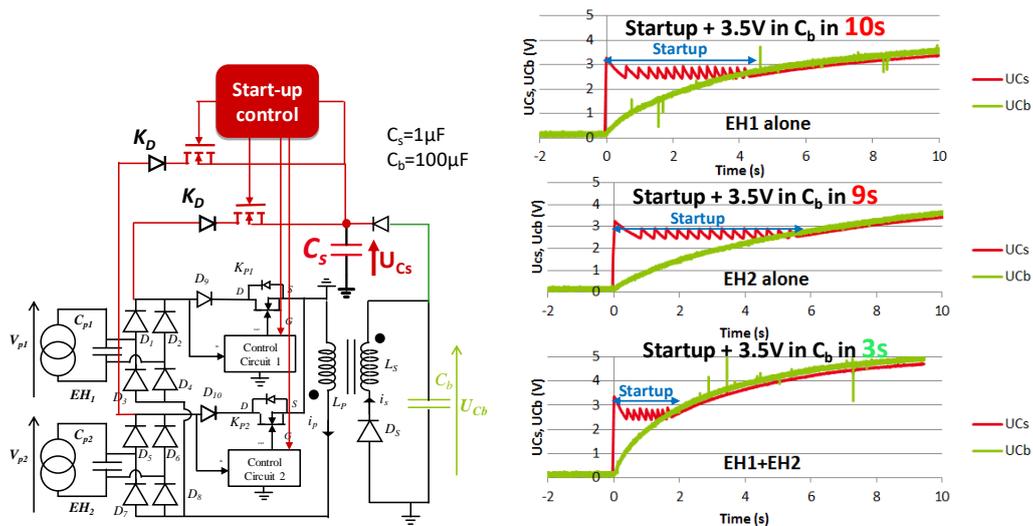


Figure 121 – (a) mise en œuvre de l'électronique avec démarrage à froid et (b) temps de démarrage avec EH1 seul, EH2 seul et EH1+EH2

3.8 Conclusions

Nous avons présenté une multitude de systèmes de récupération d'énergie et leurs électroniques de gestion associées. Les besoins et les contraintes des projets nous ont naturellement conduits vers des systèmes macroscopiques du fait des puissances demandées, généralement comprises entre 100µW et quelques mW.

Pour la récupération d'énergie mécanique, les trois grands principes de conversion ont été mis en équation et adaptés à différents types d'énergies à récupérer (écoulements d'air et d'eau, gradients de températures, vibrations):

Les solutions électromagnétiques bénéficient des décennies de développement sur les moteurs et les alternateurs. Les aimants permanents, base de la conversion électromagnétique, présentent donc un niveau de maturité technologique élevé et une robustesse aux environnements sévères (température, humidité, poussière...) éprouvée. Cependant, comme nous l'avons démontré, la réduction des dimensions dégrade très fortement les densités de puissance de ces solutions.

Les solutions piézoélectriques ouvrent la voie à des densités de puissance extrêmement élevées; même en petites dimensions. Les développements sur les matériaux fortement couplés (PZN-PT, PMN-PT) permettront de concevoir des structures à larges bandes passantes grâce au tuning de fréquence. La robustesse des matériaux piézoélectriques de type PZT-5A a été éprouvée; celle des matériaux fortement couplés sera également à qualifier.

Les solutions électrostatiques permettent finalement de réaliser des dispositifs macroscopiques bas cout ou des structures MEMS fortement couplées. La triboélectricité que nous avons commencé à étudier est une voie très intéressante pour améliorer la robustesse de ces récupérateurs d'énergie et notamment en environnements sévères.

En matière de gestion d'énergie, il est intéressant de noter que les architectures électroniques développées pour la piézoélectricité sont compatibles avec les dispositifs électrostatiques à électrets et notamment la décharge synchrone. Les gains obtenus avec cette méthode de conversion par rapport aux circuits passifs de type "pont de diode – capacité" sont par ailleurs beaucoup plus élevés en électrostatique qu'en piézoélectricité. On notera également le gain que peuvent apporter des électroniques dédiées que ce soit en circuit discret ou en ASIC par rapport à des solutions commercialisées.

Finalement, la plupart des dispositifs que nous avons présentés ont permis l'alimentation de capteurs sans-fil communicants, validant la faisabilité de chaînes complètes de récupération d'énergie, de l'énergie ambiante au système autonome.

4 Perspectives de Recherche

La récupération d'énergie est une thématique fascinante combinant plusieurs facettes de la Physique (matériaux, mécanique, magnétisme, électronique). Démarrée au CEA dans les années 2000, elle a permis de développer des collaborations internes (MEMS, matériaux, ASICs, Systèmes) et externes (partenaires privés et institutionnels) qui se sont toujours révélées passionnantes et riches d'enseignements. Du modèle analytique à la réalisation et à la caractérisation de prototypes, en passant par les simulations éléments finis ou les modèles électriques équivalents, elle m'aura permis de progresser sur une multitude de sujets tels que l'électromagnétisme, les convertisseurs d'énergie, l'électronique basse consommation, la mécanique...

Aussi, je souhaite continuer à faire progresser cette thématique au CEA, poursuivre les encadrements de stagiaires, thésards et post-doctorants ainsi qu'accroître les collaborations privées et académiques et les transferts de technologie vers l'industrie. La récupération d'énergie a un potentiel de développement fort pour les années à venir, mais présente plusieurs challenges à relever tels que le prix de revient industriel et la robustesse à 10 ou 20 ans, qui ouvrent de nombreuses perspectives de recherche. Ces dix années de recherche au CEA me conduisent aux constats suivants:

4.1 Vers une démocratisation de la récupération d'énergie...

L'avènement de l'IoT et la multiplication des systèmes communicants ouvrent de belles perspectives à la récupération d'énergie. Les limites que nous percevons aujourd'hui, limitant son adoption, sont (i) la robustesse et (ii) le coût, et notamment par rapport à la pile ; si bien qu'aujourd'hui, seules les solutions photovoltaïques et électromagnétiques pour interrupteurs autonomes ont réellement percé. De nombreux champs de recherche et d'opportunités d'améliorations restent donc encore ouverts pour permettre la démocratisation de la récupération d'énergie, que ce soit au niveau du récupérateur, de l'électronique de gestion ou du système électronique à alimenter.

En termes de domaines d'application, les capteurs industriels ou environnementaux, la domotique, l'aéronautique, le ferroviaire ou l'automobile restent des secteurs stratégiques dont les potentiels de transfert industriel sont les plus grands.

4.2 Vers des systèmes plus robustes

L'amélioration de la robustesse des systèmes de récupération d'énergie est probablement le premier axe de recherche à pousser pour favoriser l'adoption des récupérateurs d'énergie et notamment pour leur assurer une durée de vie supérieure à 10 ans.

Pour l'électrostatique, la triboélectricité et les circuits de type « Bennett » permettront de résoudre le problème de durée de vie des électrets ; en particulier dans les environnements sévères (poussières, chaleur, humidité). La triboélectricité reste un phénomène encore mal compris et difficilement reproductible ; des études avancées sur les matériaux avec analyse des phénomènes d'échange et de piégeage de charges pourraient permettre d'améliorer les propriétés triboélectriques des diélectriques utilisés.

Pour la récupération d'énergie vibratoire, l'accroissement de la bande passante des dispositifs reste sans aucun doute le sujet prioritaire à traiter. La piézoélectricité, offrant la possibilité d'ajuster le module d'Young du matériau par l'application d'un champ électrique ou d'une charge, fait clairement partie de la solution. Il est également possible d'imaginer des solutions utilisant un ressort de raideur ajustable, et typiquement à base de matériaux piézoélectriques, dans une structure de récupération d'énergie électromagnétique. Le développement de circuits de gestion d'énergie basse consommation et robustes permettant d'ajuster en temps réel la fréquence de résonance des systèmes de récupération d'énergie vibratoire est également un challenge à relever. A noter qu'une étude avancée de la robustesse dans le temps des matériaux piézoélectriques fortement couplés (PMN-PT, PZN-PT) sera également à mener pour valider les capacités de tuning de fréquence offertes par ces matériaux tout au long de la durée de vie du système.

Finalement, l'électromagnétisme demeure une valeur sûre pour développer des systèmes robustes ; un des avantages de ces solutions est d'avoir des matériaux déjà qualifiés pour des secteurs industriels exigeants tels que l'énergie, l'automobile ou l'aéronautique. Aussi, les convertisseurs électromagnétiques et l'adaptation de leurs principes à la récupération des diverses sources d'énergie ambiantes resteront un de mes principaux axes de recherche pour la suite.

4.3 Systèmes bas cout et environnements sévères comme axe de démarcation

Le positionnement de la récupération d'énergie par rapport aux piles et notamment en matière de prix de revient industriel est toujours délicat, qui plus est avec l'accroissement continu des densités d'énergie des piles et batteries. Les deux axes de recherche permettant de positionner plus facilement la récupération d'énergie par rapport à la pile sont de mon point de vue :

- (1) De travailler sur des concepts bas cout ; on pensera notamment aux principes mis en œuvre dans les interrupteurs autonomes (EnOcean, ZF). Dans les deux cas, le principe de fonctionnement est assez simple, mais astucieux, et peu de pièces sont nécessaires, ce qui limite le prix de revient de la solution.
- (2) De travailler sur des systèmes adaptés aux environnements sévères (température, humidité), là où les piles et batteries ont toujours des difficultés à se positionner. Certains aimants peuvent supporter des températures de 200-230° tout en conservant des champs rémanents de plus de 1.25T (NdFeB 40AH) et permettraient donc de développer des systèmes hautes températures en mettant en œuvre une conversion électromagnétique. Bien évidemment, ces développements devront être complétés par la réalisation d'électroniques de gestion d'énergie robustes en températures. Des premières actions ont été menées dans notre laboratoire sur la récupération d'énergie des écoulements d'air pour des applications aéronautiques; nous poursuivrons ces recherches et les adapterons à d'autres applications.

4.4 Récupération d'énergie RF et transmission de puissance sans fil

La transmission de puissance sans fil et la récupération d'énergie RF sont des sujets sur lesquels je souhaite me positionner pour la suite. Ceci est déjà le cas avec le co-encadrement de la thèse sur la transmission d'énergie aux travers de parois métalliques et le stage sur la téléalimentation de capteurs en moyenne portée, co-encadrée par les équipes d'antennistes du département "Systèmes". D'autres solutions de transmissions de puissance sans fil mettant en œuvre des champs magnétiques basse fréquence (Electrodynamic Wireless Power Transmission) ouvrent également des perspectives intéressantes pour l'alimentation de capteurs et actionneurs au travers de parois conductrices, et avec des applications pour le biomédical par exemple [133].

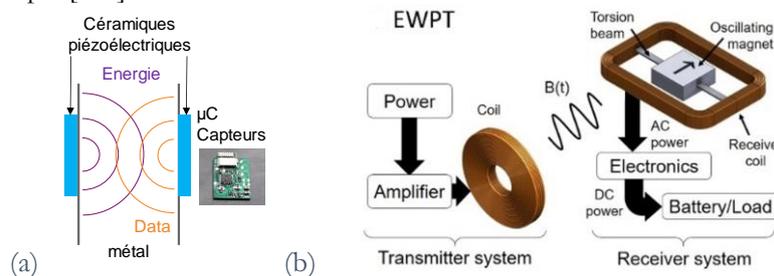


Figure 122 – (a) transmission d'énergie au travers de parois métalliques et (b) principe de la transmission d'énergie par champs magnétiques basse fréquence (EWPT) [133]

Les circuits de gestion d'énergie développés pour la récupération d'énergie piézoélectriques ou électromagnétiques pourraient être appliqués à ce nouveau domaine de recherche ; par exemple pour accroître les rendements de conversion et les portées.

Les tests réalisés avec l'ESYCOM ont montré que la récupération d'énergie RF à 2.4GHz était compatible avec de l'alimentation de capteurs à proximité de la source (<1m); travailler à plus basses fréquences permettrait d'augmenter les portées de ce type de solution. Le développement d'ASIC de gestion d'énergie permettra d'améliorer les rendements de conversion, et contribuera également à l'augmentation des portées effectives.

4.5 Vers des systèmes miniaturisés

La réduction de la consommation des composants et des fonctions électroniques permettra de réduire la taille des systèmes de récupération d'énergie. Aujourd'hui, les besoins des capteurs sont encore dans une gamme de 100µW à quelques mW, nécessitant des systèmes de récupération d'énergie de quelques centimètres cube. A terme, la réduction des besoins énergétiques des capteurs autonomes permettra aux

dispositifs millimétriques de prendre le relais. Des premières études ont été menées sur la récupération d'énergie électrostatique dans le cadre du projet HBS et seront relancées sur les systèmes piézoélectriques, et notamment avec des matériaux sans plomb (AlN, BCZT, KNN). Les solutions électromagnétiques sont probablement plus difficilement compatibles avec la réduction des dimensions, comme nous l'avons montré dans la thèse de Matthias Geisler [CI19].

La miniaturisation des récupérateurs d'énergie doit être complétée par une miniaturisation des électroniques de gestion et notamment des composants inductifs. Les premières solutions que nous avons proposées (techniques MS-SECE) pourront être complétées par l'utilisation de transistors GaN afin de monter en fréquence (1MHz-5MHz) et de réduire la taille des convertisseurs d'énergie. Les technologies GaN sont par ailleurs en phase de développement dans les départements silicium du LETI.

4.6 Applications aux domaines des capteurs et à la fonctionnalisation des surfaces

Rattaché au laboratoire LAIC (Autonomie et Intégration des Capteurs) traitant de sujets comme la mécatronique, l'intégration de capteurs ou le développement de surfaces sensibles et fonctionnalisées, je suis convaincu que les compétences acquises en récupération d'énergie peuvent être mises en œuvre dans les axes de recherche de ces thématiques ; notamment en modélisation et simulations de systèmes multiphysiques, en matériaux ou encore en électronique de gestion d'énergie ou d'acquisition de données.

Des premières actions de valorisation de mes acquis en récupération d'énergie ont été lancées avec le LTM sur l'impact du potentiel de surface sur les temps de glaciation de gouttes d'eau à la surface de diélectriques [JS13]; et sur la modélisation de relais électromagnétiques à aimants permanents avec un de nos partenaires industriels.

Un de mes objectifs sera de réitérer ces actions de valorisation et d'accroître mes domaines de recherche avec pour dénominateur commun les couplages multiphysiques (électronique, magnétisme, mécanique, acoustique, ...), dont l'énergie et ses principes de conversion sont généralement le point de départ.

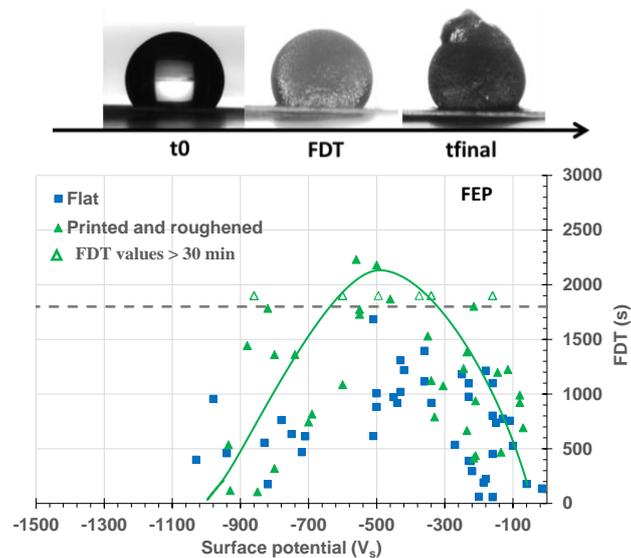


Figure 123 – Impact du potentiel de surface sur les temps de glaciation [JS13]

5 Bibliographie

- [1] A. Thomason, «srpnet.com.» [En ligne]. Available: srpnet.com.
- [2] «logiciel PVGIS.» [En ligne]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [3] S. Vignati, Solutions for Indoor Light Energy Harvesting, 2012.
- [4] D. Technologies, RF Energy Harvesting for the Low Energy Internet of Things, 2015.
- [5] E. Adegoke, «RF Power Density Measurements for RF Energy Harvesting in Automobile Factories.» *Proc. Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2015.
- [6] R. Duggirala et al., «Radioisotope micropower generator for CMOS self-powered sensor microsystems.» *Proc. PowerMEMS*, pp. 133-136, 2004.
- [7] J. Bierschenk, «Optimized Thermoelectrics For Energy Harvesting Applications.» chez *Energy Harvesting Technologies*, Springer, 2009, p. Chapitre 12.
- [8] T. Caroff, E. Rouviere et J. Willemin, «Thermal Energy Harvesting.» chez *Energy Autonomous Micro and Nano Systems*, Wiley, 2013.
- [9] D. Samson, «Aircraft-specific thermoelectric generator module.» *J. Electron. Mater.*, 2009.
- [10] A. Elefsiniotis, «Investigation of the performance of thermoelectric energy harvesters under real flight conditions.» *J. Electron. Mater.*, 2013.
- [11] M. Kiziroglou, «Design and fabrication of heat storage thermoelectric harvesting devices.» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014.
- [12] T. Toh, «A dual polarity, cold-starting interface circuit for heat storage energy harvesters.» *Sens. Actuators, A: Physical*, 2014.
- [13] A. Holmes, G. Hong et K. Pullen, «Axial flux permanent magnet machines for micropower generation.» *J. MEMS*, vol. 14, pp. 54-62, 2005.
- [14] D. Rancourt, A. Tabesh et L. Frechette, «Aerodynamics and Electromagnetic Power Generation.» *Proc. PowerMEMS*, 2007.
- [15] A. Bansal, D. Howey et A. Holmes, «Cm-scale air-turbine and generator for Energy harvesting from low-speed flows.» *Proc. Transducers*, 2009.
- [16] F. J. Xu, F. G. Yuan, J. Z. Hu et Y. Qiu, «Design of a miniature wind turbine for powering wireless sensors.» *Proc. SPIE 7647*, pp. 1-9, 2010.
- [17] D. Carli, D. Brunelli, D. Bertozzi et L. Benini, «A high-efficiency wind-flow energy harvester using micro turbine.» *Proc. Speedam*, 2010.
- [18] D. Howey, A. Bansal et A. S. Holmes, «Design and performance of a centimetre-scale shrouded wind turbine for energy harvesting.» *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, 2011.
- [19] C. Federspiel et J. Chen, «Air-powered sensor.» *Proc. Sensors*, pp. 22-25, 2003.
- [20] S. Kwon, «A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting.» *Applied Physics Letters*, vol. 97, p. 164102.
- [21] A. Erturk, «On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems.» *Applied Physics Letters*, vol. 96, 2010.
- [22] D. St Clair, A. Bibo, V. Sennakesavababu, M. Daqaq et G. Li, «A scalable concept for micropower generation using flow-induced self-excited oscillations.» *Applied Physics Letters*, vol. 96, 2010.
- [23] S. Li, J. Yuan et H. Lipson, «Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering.» *Journal of Applied Physics*, vol. 109, 2011.
- [24] J. Dunmon, S. Stanton, B. Mann et E. Dowell, «Power extraction from aeroelastic limit cycle oscillations.» *Journal of Fluids and Structures*, 2011.
- [25] M. Bryant et E. Garcia, «Modeling and Testing of a Novel Aeroelastic Flutter Energy Harvester.» *J. Vib. Acoust.*, 2011.
- [26] H. Akaydin, N. Elvin et Y. Andreopoulos, «The performance of a self-excited fluidic energy harvester.» *Smart Mater. Struct.*, 2012.
- [27] [En ligne]. Available: <http://www.humdingerwind.com/>.
- [28] F. Fei et W. Li, «A Fluttering-to-Electrical Energy Transduction System for Consumer Electronics Applications.» *Proc. Robotics and Biomimetics*, 2009.

- [29] D. Zhu, S. Beeby, J. Tudor, N. White et N. Harris, «A Novel Miniature Wind Generator for Wireless Sensing Applications,» *Sensors*, 2010.
- [30] F. Fei, J. Mai et W. Li, «A wind-flutter energy converter for powering wireless sensors,» *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012.
- [31] Y. Yang, «Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Wind Energy and as Self-Powered Wind Vector Sensor System,» *ACS Nano*, vol. 7, n° 110, 2013.
- [32] L. Yi, B. Zeynep et P. Donald, «A hybrid electrostatic micro-harvester incorporating in-plane overlap and gap closing mechanisms,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 25, n° 1035027, 2015.
- [33] K. Tao, «Sandwich-structured two-dimensional MEMS electret power generator for low-level ambient vibrational energy harvesting,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 228, pp. 95-103, 2015.
- [34] F. Wang et e. al., «Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme,» *Sensors and Actuators A: Physical*, n° 1211, pp. 131-137, 2014.
- [35] K. Tao, «A three-dimensional electret-based micro power generator for low-level ambient vibrational energy harvesting,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 24, 2014.
- [36] S. Nguyen, «Bistable springs for wideband micro electromechanical energy harvesters,» *Applied Physics Letters*, vol. 102, 2013.
- [37] C. Andrea, «An electret-based energy harvesting device with a wafer-level fabrication process,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 23, n° 1114010, 2013.
- [38] Y. Chiu, «Flat and robust out-of-plane vibrational energy harvester,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 23, n° 1015012, 2013.
- [39] S. Kim, «2D vibration based MEMS energy harvester,» *Proc. Renewable Energies and Power Quality*, 2012.
- [40] S. Liu, «Sandwich structured electrostatic/electrets parallel-plate power generator for low acceleration and low frequency vibration energy harvesting,» *Proc. MEMS*, pp. 1277-1280, 2012.
- [41] G. Sheu, «Development of a low-frequency electrostatic comb-drive energy harvester compatible to SoC design by CMOS process,» *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 70-76, 2011.
- [42] S. Boisseau, «Cantilever-based electret energy harvesters,» *Smart Materials and Structures*, 2011.
- [43] K. Matsumoto, «Vibration-powered battery-less sensor node using MEMS electret generator,» *Proc. PowerMEMS*, pp. 134-137, 2011.
- [44] B. Yang, «A MEMS rotary comb mechanism for harvesting the kinetic energy of planar vibrations,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, 2010.
- [45] D. Miki, «Large-amplitude MEMS electret generator with nonlinear spring in MEMS,» *Proc. MEMS*, pp. 176-179, 2010.
- [46] D. Hoffmann, «Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, n° 1094001, 2009.
- [47] T. Kao, «Out-of-plane electret-based MEMS energy harvester with the combined nonlinear effect from electrostatic force and a mechanical stopper,» *J. Micromech. Microeng.*, 2015.
- [48] M. Cain, M. Stewart et M. Gee, «Degradation of Piezoelectric Materials, NPL Report CMMT(A) 148,» National Physical Laboratory, 1999.
- [49] R. Amirharajah, «Self-powered signal processing using vibration-based power generation,» *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1998.
- [50] W. Li, «A micromachined vibration induced power generator for low power sensors of robotic systems,» *Proc. World Automation Congress*, 2000.
- [51] M. El-Hami, «Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator,» *Sensors and Actuators A*, vol. 92, pp. 335-342.
- [52] N. Ching, «A laser-micromachined vibrational to electrical power transducer for wireless sensing systems,» *Sensors and Actuators A*, pp. 97-98, 2002.
- [53] M. Mizuno, «Investigation of a resonance microgenerator,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 209-216.
- [54] W. Huang, «Design and fabrication of a vibrational micro-generator for wearable MEMS,» *Proc. Eurosensors*, 2003.
- [55] P. Glynne-Jones, «An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems,» *Sensors and Actuators A*, pp. 344-349, 2004.

- [56] H. Kulah, «An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations,» *Proc. MEMS*, 2004.
- [57] A. Perez-Rodriguez, «Design of electromagnetic inertial generators for energy scavenging applications,» *Proc. Eurosensors*, 2005.
- [58] S. Beeby, «Micromachined silicon generator for harvesting power from vibrations,» *Proc. Transducers*, 2005.
- [59] S. Scherrer, «Energy scavenging device in LTCC materials,» *Proc. WMED*, 2005.
- [60] S. Beeby, «A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting,» *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 1257-1265, 2007.
- [61] P.-H. Wang, «Design, fabrication and performance of a new vibration based electromagnetic micro power generator,» *Microelectronics J*, 2007.
- [62] Z. Hadas, «Electromagnetic Vibration Power Generator,» *Proc. Int Symp Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2007.
- [63] C. Serre, «Design and implementation of mechanical resonators for optimised inertial electromagnetic generators,» *Microsys. Technol.*, vol. 17, p. 653–658, 2008.
- [64] Perpetuum. [En ligne]. Available: <https://perpetuum.com/>.
- [65] F. Solutions. [En ligne]. Available: <http://www.ferrosi.com/>.
- [66] L. Technologies. [En ligne]. Available: <http://lumedynetechnologies.com/>.
- [67] C. Cepnik, «Effective optimization of an electromagnetic energy harvester through direct computation of the electromagnetic coupling,» *Sensors and Actuators A*, vol. 167, 2011.
- [68] A. Munaz, «A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet,» *Sensors and Actuators A*, 2013.
- [69] B. Lee, «Low frequency driven electromagnetic energy harvester for self-powered system,» *Smart Mater. Struct.*, 2012.
- [70] S. Roundy, «Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion,» 2003.
- [71] E. Leland, «A self-powered wireless sensor for indoor environmental monitoring,» *Symposium*, 2004.
- [72] T. Ng, «Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005.
- [73] M. Ericka, «Energy harvesting from vibration using a piezoelectric membrane,» *J. Phys. IV France*, 2005.
- [74] H. Fang, «A MEMS-based piezoelectric power generator for low frequency vibration energy harvesting,» *Chin. Phys. Lett.*, 2006.
- [75] E. Leland, «Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload,» *Smart Mater. Struct.*, 2006.
- [76] J. Frank, «Low-cost vibration power harvesting for industrial wireless sensors,» *Proc. DOE Sensors & Automation Annual Portfolio Review*, 2006.
- [77] M. Marzencki, «Design and fabrication of piezoelectric micro power generators for autonomous microsystems,» *Proc. DTIP*, 2005.
- [78] M. Renaud, «Piezoelectric harvesters and MEMS technology: Fabrication, modeling and measurements,» *Proc. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2007.
- [79] F. Goldschmidtböing, «Optimization of resonant mechanical harvesters in piezopolymer-composite technology,» *Proc. PowerMEMS2007*, 2007.
- [80] E. Leland, «Design of a MEMS passive, proximity-based AC electric current sensor for residential and commercial loads,» *Proc. PowerMEMS*, 2007.
- [81] M. Huang, «A silicon MEMS micro power generator for wearable micro devices,» *J. Chin. Inst. Eng.*, 2007.
- [82] E. Lefeuvre, «A comparison between several approaches of piezoelectric energy harvesting,» *Journal of Physics*, 2005.
- [83] R. Elfrink, «First Autonomous Wireless Sensor Node Powered by a Vacuum-Packaged Piezoelectric MEMS Energy Harvester,» *Proc. International Electron Devices Meeting*, 2009.
- [84] Y. Ramadass, «An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor,» *Proc. ISSCC*, 2009.

- [85] D. Kwon, «A Single-Inductor AC-DC Piezoelectric Energy-Harvester/Battery-Charger IC Converting $\pm(0.35$ to 1.2V) to (2.7 to 4.5V),» *Proc. ISSCC*, 2010.
- [86] D. Guyomar, «Piezoelectric energy harvesting circuit using a synchronized switch technique,» *Proc. SMEBA*, 2004.
- [87] M. Volture. [En ligne]. Available: <https://www.mide.com/collections/vibration-energy-harvesting-with-protected-piezoes>.
- [88] Microstrain, 2015. [En ligne]. Available: http://files.microstrain.com/PVEH_Datasheet_Rev_1.01f.pdf.
- [89] J. Rastegar, R. Murray, C. Pereira et H. Nguyen, «Novel Piezoelectric-Based Energy-Harvesting Power Sources for Gun-Fired Munitions,» chez *Defense Technical Information Center*, 2007.
- [90] Z. Li, L. Zuo, J. Kuang et G. Luhrs, «Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier,» *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 025008, 2012.
- [91] L. Zuo et e. al., «Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions,» *Smart Materials and Structures*, vol. 19, n° %14, 2010.
- [92] L. Xie et M. Cai, «An In-Shoe Harvester With Motion Magnification for Scavenging Energy From Human Foot Strike,» *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 20, n° %16, 2015.
- [93] N. Paudel, «Modeling Linear Motors or Generators in COMSOL Multiphysics,» [En ligne]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-linear-motors-or-generators-in-comsol-multiphysics/>.
- [94] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin et Y. Qin, «Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests,» *IEEE Transactions on vehicular technologies*, vol. 62, n° %13, 2013.
- [95] R. e. a. Meier, «A Piezoelectric Energy-Harvesting Shoe System for Podiatric Sensing,» *Proc. Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.
- [96] N. Shenck et J. Paradiso, «Energy Scavenging with shoe-mounted piezoelectrics,» *IEEE Micro*, 2001.
- [97] B. Li, «Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator,» *Smart Mater. Struct.*, 2013.
- [98] F. Khan, «Electromagnetic-based acoustic energy harvester,» *Proc. INMIC*, 2013.
- [99] S. Horowitz, «A MEMS acoustic energy harvester,» *J. Micromech. Microeng.*, 2006.
- [100] S. Shinoda, «Lead zirconate titanate acoustic energy harvester proposed for microelectromechanical system/IC integrated systems,» *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010.
- [101] X. Peng, «A wideband acoustic energy harvester using a three degree-of-freedom architecture,» *Appl. Phys. Lett.*, 2013.
- [102] S. Kimura, «Acoustic energy harvester fabricated using sol/gel lead zirconate titanate thin film,» *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011.
- [103] F. Liu, «Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator,» *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008.
- [104] S. Tomioka, «Lead zirconate titanate acoustic energy harvesters with dual top electrodes,» *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001.
- [105] S. Iizumi, «Lead zirconate titanate acoustic energy harvesters utilizing different polarizations on diaphragm,» *Proc. Eng.*, 2011.
- [106] T. Matsuda, «Helmholtz resonator for lead zirconate titanate acoustic energy harvester,» *J. Phys. Conf. Ser.*, 2013.
- [107] B. Li, «Harvesting low-frequency acoustic energy using quarter-wavelength straight-tube acoustic resonator,» *Appl. Acoust.*, 2013.
- [108] M. Lallart, «Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices,» *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010.
- [109] H. Atrah, «Simulation of acoustic energy harvester using helmholtz resonator with piezoelectric backplate,» *Proc 2nd Int. Cong. Sound Vib.*, 2013.
- [110] L. Wu et e. al., «Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal,» *Appl. Phys. Lett.*, 2009.
- [111] A. Yang, «High-efficiency broadband acoustic energy harvesting using Helmholtz resonator and dual piezoelectric cantilever beams,» *Rev. Sci. Instrum.*, 2014.
- [112] F. Khan, «Acoustic-based electrodynamic energy harvester for wireless sensor nodes application,» *Int. J. Mater. Sci. Eng.*, 2013.
- [113] T. Lai, «Design and fabrication of acoustic wave actuated microgenerator for portable electronic devices,» *Proc. DTIP MEMS & MOEMS*, 2008.

- [114] «Web of Science.» [En ligne]. Available: <https://apps.webofknowledge.com>.
- [115] M. Perez, Micro-récupération d'énergie des écoulements d'air par conversion électrostatique, Thèse - Université Grenoble Alpes (UGA), 2017.
- [116] S. Boisseau et al., «Cantilever-based electret energy harvesters,» *Smart Materials and Structures*, 2011.
- [117] S. Boisseau, G. Despesse, T. Ricart, E. Defay et A. Sylvestre, «Cantilever-based electret energy harvesters,» *Smart Materials and Structures*, vol. 20, 2011.
- [118] V. Leonov, «Patterned Electret Structures and Methods for Manufacturing Patterned Electret Structures.» Brevet 2011/0163615, 2011.
- [119] Y. Naruse, N. Matsubara, K. Mabuchi, M. Izumi et S. Suzuki, «Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion,» *IOP Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009.
- [120] C. Williams et R. Yates, «Analysis of a micro-electric generator for microsystems,» *Sensors Actuators A*, pp. 8-11, 1996.
- [121] E. Zenerino, J. Girardello, D. Boero, A. Tonoli et M. Chiaberge, «Trade-off Analysis and Design of a Hydraulic Energy Scavenger,» chez *Smart Actuation and Sensing Systems - Recent advances and future challenges*, InTech, 2012.
- [122] P. Becker, B. Folkmer, R. Goepfert, D. Hoffmann, A. Willmann et Y. Manoli, «Energy autonomous wireless water meter with integrated turbine driven energy harvester,» chez *Proc. PowerMEMS*, 2013.
- [123] D. Hoffmann, A. Willmann, R. Gopfert, P. Becker, B. Folkmer et Y. Manoli, «Energy harvesting from fluid flow in water pipelines for smart metering applications,» chez *Proc. PowerMEMS*, 2013.
- [124] N. Mohammad, Energy harvesting from hydraulic and vibration energy sources, Politecnico de Torino, 2014.
- [125] K. Adamski, J. Adamski, L. Urbaniak, J. Dziuban et R. Walczak, «3D Printed Miniature Water Turbine With Integrated Discrete Electronic Elements For Energy Harvesting And Water Flow Measurement,» chez *Proc. PowerMEMS*, 2017.
- [126] M. Geisler, Récupération d'énergie mécanique pour vêtements connectés autonomes, Thèse - Université Grenoble Alpes, 2017.
- [127] J. Rastegar et al., «Energy-Harvesting Power Sources for Gun-Fired Munitions,» chez *Proc. SPIE 8035*, 2011.
- [128] S. Moss et al., «Scaling and power density metrics of electromagnetic vibration energy harvesting devices,» *Smart Materials and Structures*, 2015.
- [129] A. Brenes, E. Lefeuvre et C.-S. Yoo, «Experimental validation of wideband piezoelectric energy harvesting based on frequency-tuning synchronized charge extraction,» *Proc. PowerMEMS*, 2017.
- [130] S. Burrow, L. Clare, A. Carella et D. Barton, «Vibration energy harvesters with non-linear compliance,» *Proc. SPIE 6928, 692807, Active and passive smart structures and integrated systems*, 2008.
- [131] E. Lefeuvre et al., «Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction,» *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, n° 110, pp. 865-876, 2005.
- [132] A. Badel et al., «Single crystals and nonlinear process for outstanding vibration-powered electrical generators,» *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 53, n° 14, p. 673-684, 2006.
- [133] N. Garraud et al., «Extending the range of wireless power transmission for bio-implants and wearables,» *Proc. PowerMEMS*, 2018.

Résumé

Les objets connectés sont un marché en plein essor. Leur but : ajouter plus d'intelligence, de connectivité, de simplicité d'utilisation aux objets de notre quotidien, aux capteurs industriels, aux compteurs d'eau, d'électricité.... Un des verrous majeurs de ces objets connectés reste l'autonomie énergétique. Ce challenge peut cependant être relevé grâce à la récupération et à la transformation en électricité de l'énergie présente dans l'environnement du dispositif à alimenter, et plus communément appelée "récupération d'énergie".

Après un état de l'art des différentes solutions de récupération d'énergie ambiante (photovoltaïque, thermoélectrique...), ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches synthétise les résultats de sept années de recherche sur la récupération d'énergie adoptant une approche "Système", allant du récupérateur d'énergie à l'application basse consommation en passant par l'électronique de gestion. La majeure partie des dispositifs proposés sont des systèmes de récupération d'énergie mécanique (vibrations, chocs, écoulements d'air et d'eau) réalisés dans le cadre de thèses ou de partenariats avec des acteurs privés ou institutionnels. La démarche de conception mise en œuvre passe par la mise en place de modèles analytiques couplés (multiphysiques), de simulations par éléments finis et par la réalisation et la caractérisation de prototypes. Les perspectives de ces travaux et de la récupération d'énergie plus généralement sont proposées à la fin de ce mémoire.

Abstract

The functionalization of ordinary objects with embedded electronic systems is a fast-growing trend, commonly referred to as the Internet of Things. Aimed at adding intelligence, connectivity, simplicity to everyday objects, industrial sensors, flows or electricity meters, one of their main bottleneck remains the energy autonomy. This challenge can be addressed by exploiting the ambient energy around the device to supply and by turning it into electricity. This is more commonly referred to as "energy harvesting".

After introducing energy harvesting solutions such as photovoltaic cells or thermoelectricity, this Accreditation to Direct Research thesis synthesizes the results of seven years of research on energy harvesting adopting a "system" vision (energy scavenger, power management circuit, low-power electronic application). Most of the devices proposed are mechanical energy harvesters (vibrations, shocks, air and water flows) developed during PhD theses or partnerships with private or institutional actors. The energy harvesters' design involves multiphysics analytical and finite element models and the fabrication and the characterization of prototypes. The perspectives of these works and more generally of energy harvesting are proposed at the end of the thesis.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Guylaine Poulin-Vittrant, Noureddine Boubaddi et Lionel Petit pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon Habilitation à Diriger des Recherches. Merci également à Skandar Basrour, Danick Briand, membres du Jury, et Sébastien Grondel, président du Jury, pour votre participation à ma soutenance. Je vous remercie pour vos remarques et pour les échanges que nous avons eus lors de la soutenance, sur la récupération d'énergie, l'autonomie des systèmes, et sur les perspectives de mes activités de recherche.

Comme évoqué dans le préambule, les résultats présentés dans ce mémoire sont avant tout le fruit d'un travail d'équipe et n'auraient pas été possibles sans les doctorants, les électroniciens, les mécaniciens, le management, les BizDevs et les équipes support du Département Systèmes et d'autres départements du CEA et notamment DTNM, DACLE et DCOS. Je tiens à leur exprimer ma profonde gratitude pour ces 10 années de recherches et pour les (au moins) 10 années de recherche à venir.

Un grand merci à mes collègues du Département Systèmes pour les projets que nous avons menés ensemble, pour les échanges dans des domaines variés comme l'électronique analogique ou embarquée, les matériaux, les logiciels de modélisation, la piézoélectricité, l'électromagnétisme ou encore la mécanique, et qui sont sans aucun doute une des forces du Département Systèmes.

Merci à mes collègues de bureau, Pierre, Sébastien, Jérôme, Elisabeth, Ghislain, Jean-Jacques pour cette ambiance de travail stimulante et conviviale; et à mes responsables, Stéphanie, Emmanuelle, Thierry, Sébastien pour l'avoir rendue motivante et favorisant le travail en équipe.

Un grand merci également aux partenaires industriels et académiques avec lesquels tous ces projets de recherche ont été menés et qui ont permis de développer la thématique de la récupération d'énergie, des preuves de concept jusqu'au transfert vers l'industrie.

Je tiens finalement à remercier ma famille pour avoir toujours été là. Merci pour vos conseils et vos encouragements et pour m'avoir permis d'accomplir ce grand objectif. Finalement, merci à Marie pour son soutien et pour tous ses conseils dans la dernière ligne droite.