

Table des matières

Introduction générale

Introduction générale	15
-----------------------------	----

Chapitre 1

1. Introduction.....	20
2. L'émergence des systèmes autonomes communicants sans fil	20
2.1.1. More Moore : la réduction de la consommation électrique des composants	20
2.1.2. More than Moore : l'apport de nouvelles fonctions	22
2.1.3. L'intelligence ambiante : une combinaison de 4 tendances	22
2.2. Enjeux des réseaux de capteurs sans fil	24
2.3. Applications des réseaux de capteurs communicants sans fil	24
2.3.1. La surveillance de l'environnement pour son étude	24
2.3.2. La surveillance pour interagir avec l'environnement	25
2.3.3. La surveillance de structures mécaniques et d'appareils industriels	26
3. L'intérêt des systèmes autonomes communiquant sans fil pour la surveillance de structures mécaniques	26
3.1. Systèmes de mesure de SHM: état des pratiques.....	27
3.1.1. Actionneurs/capteurs magnétostrictifs	27
3.1.2. Fibre optique.....	27
3.1.3. Actionneurs/capteurs piézoélectriques.....	28
3.2. Vers des réseaux de capteurs miniaturisés autonomes	28
3.2.1. Structures des réseaux de capteurs	28
3.2.2. Le problème des réseaux câblés.....	29
3.2.3. Faisabilité de microsystèmes autonomes.....	29
4. La problématique énergétique des microsystèmes autonomes pour SHM	30
4.1. Evaluation des besoins	31
4.2. Quelles sources d'énergie ?	32
4.2.1. Sources finies : stockage électrochimique	32
4.2.2. La récupération de l'énergie ambiante	33
4.2.3. Vibrations	34
4.2.4. Gradients de température	35
4.2.5. Rayonnement radiofréquence.....	35
4.2.6. Rayonnement solaire.....	36
4.3. Le stockage tampon de l'énergie récupérée.....	37

5. Quelles stratégies énergétiques pour l'autonomie énergétique d'un capteur destiné à la surveillance d'une structure aéronautique ?.....	38
5.1. Intérêts dans la problématique industrielle aéronautique.....	38
5.2. Cahier des charges du projet AUTOSSENS.....	39
5.2.1. Contexte de ce travail	39
5.2.2. Contraintes d'encombrement et d'environnement.....	40
5.2.3. Contraintes générales sur la source d'énergie	40
5.2.4. Contraintes générales sur le stockage de l'énergie.....	41
5.3. Architecture de base d'un microsystème autonomes destiné à la surveillance d'une structure aéronautique.....	42
5.4. L'intérêt de la technologie MEMS pour intégrer l'énergie avec le capteur	43
5.5. L'énergie vibratoire disponible dans l'environnement capteur	44
5.6. Pré-dimensionnement du dispositif de stockage tampon.....	45
6. Conclusion et objectifs/défis de cette thèse	45

Chapitre 2

1. Introduction.....	48
2. Conversion des vibrations mécaniques en énergie électrique.....	48
2.1. Principe des générateurs inertiels.....	48
2.2. Energie disponible.....	49
2.3. Mécanismes de transduction.....	50
2.3.1. Electromagnétique	51
2.3.2. Electrostatique	51
2.3.3. Piézoélectrique.....	51
2.3.4. Autres méthodes.....	51
2.3.5. Résumé et choix de la transduction piézoélectrique.....	52
3. Générateurs piézoélectriques	52
3.1. Principe de fonctionnement	52
3.1.1. L'effet piézoélectrique	52
3.1.2. Equations constitutives	53
3.2. Matériaux piézoélectriques.....	54
3.3. Les générateurs piézoélectriques macroscopiques et miniatures	55
3.4. Les générateurs piézoélectriques intégrés en technologie silicium	56
4. Conception d'un générateur piézoélectrique pour récupérer les vibrations de structures aéronautiques	58
4.1. Contraintes initiales	58
4.2. Le choix d'un dispositif résonant.....	59
4.3. Choix du matériau piézoélectrique	60
4.4. Choix technologique pour l'intégration de la couche piézoélectrique	61
4.5. Modélisation du générateur pour la conception.....	61

4.5.1.	Modèles de la littérature	62
4.5.2.	Description du modèle développé.....	62
4.6.	Design choisi.....	65
5.	Fabrication du générateur piézoélectrique.....	66
5.1.	Présentation globale du procédé.....	66
5.2.	Discussion sur les étapes clés de fabrication.....	68
5.2.1.	Gravure KOH.....	68
5.2.2.	Collage.....	69
5.2.3.	Gravure LASER.....	71
6.	Caractérisation : performances et discussion	74
6.1.	Protocole expérimental de caractérisation.....	74
6.2.	Validation du modèle.....	75
6.2.1.	Construction du modèle.....	75
6.2.2.	Comparaison simulation/expérience	76
6.3.	Performances du dispositif	76
6.3.1.	Faibles accélérations (0,1g et 0,2g).....	76
6.3.2.	Fortes accélérations (0,3g à 0,5g)	77
6.3.3.	Déphasage entre les poutres.....	79
7.	Comparaison à la littérature et discussion	80
7.1.1.	Figures de mérite.....	80
7.1.2.	Réponse en fréquence	81
7.1.3.	Comparaison et discussion	82
8.	Synthèse et conclusion du chapitre.....	83

Chapitre 3

1.	Introduction.....	86
1.1.	Supercondensateurs.....	86
1.1.1.	Condensateur à double couche électrochimique.....	86
1.1.2.	Supercondensateurs pseudo-capacitifs et supercondensateurs hybrides.....	89
1.1.3.	L'autodécharge.....	90
1.2.	Etat de l'art de l'intégration de micro-supercondensateurs sur silicium.....	91
1.2.1.	Dépôt / croissance du matériau d'électrode.....	91
1.2.2.	Encapsulation de l'électrolyte : vers le composant complet.....	95
2.	Etude technologique préliminaire.....	97
2.1.	Structure générale des composants.....	97
2.2.	Technologies explorées et résultats	98
2.2.1.	Méthode de dépôt par jet d'encre.....	98
2.2.2.	Méthode de dépôt par électrophorèse	99
2.3.	Conception basée sur la méthode de dépôt par sérigraphie dans des cuves enterrées	99
3.	Procédé de fabrication et développements technologiques.....	101

3.1.	Dépôt du matériau d'électrode.....	101
3.1.1.	Procédé complet.....	101
3.1.2.	Photolithographie sur motifs 3D profonds	102
3.1.3.	Dépôt du matériau d'électrode.....	103
3.2.	Encapsulation de l'électrolyte liquide.....	106
3.2.1.	Procédé d'encapsulation simple.....	107
3.2.2.	Limitations du procédé en un temps.....	112
3.2.3.	Description du procédé d'encapsulation en deux temps	112
4.	Caractérisations électrochimiques des microsupercondensateurs	114
4.1.	Etudes sur les électrodes	114
4.1.1.	Capacité surfacique	Erreur ! Signet non défini.
4.1.2.	Effet de la microstructure	116
4.1.3.	Perspectives sur les micro-supercondensateurs.....	118
4.2.	Caractérisation de l'encapsulation.....	119
4.2.1.	Herméticité – encapsulation simple	119
4.2.2.	Caractérisation d'un composant complet (encapsulation en deux temps).....	120
5.	Conclusion.....	121

Chapitre 4

1.	Introduction.....	124
2.	Rappel des éléments constitutifs du microsystème autonome AUTOSENS et de notre démonstrateur.....	124
3.	Validations expérimentales par assemblage d'un démonstrateur simple et représentatif	125
3.1.	Alimentation d'une diode par le microgénérateur au travers d'un étage AC/DC et DC/DC	125
3.2.	Alimentation d'une diode par un micro-supercondensateur chargé	127
4.	Modélisation système pour explorer son autonomie	128
4.1.	Choix du support de modélisation	128
4.2.	Modèle du générateur piézoélectrique	129
4.2.1.	Modélisation VHDL-AMS du générateur piézoélectrique dans la littérature	129
4.2.2.	Procédure et résultats	130
4.2.3.	Limitations et alternatives	131
4.3.	Modèle du micro-supercondensateur.....	132
4.3.1.	Autodécharge	132
4.3.2.	Modèles de supercondensateurs dans la littérature.....	133
4.3.3.	Construction du modèle et validation sur composant commercial.....	134
4.4.	Simulation VHDL-AMS générateur et supercondensateur.....	138
5.	Conclusion.....	142

Conclusion générale

Conclusion générale.....	145
--------------------------	-----

Annexes

1. Modèle éléments finis / SPICE	153
1.1. Script de lancement.....	153
1.1. Modèle.....	154
2. Calcul de la capacité surfacique attendue.....	159
3. Calcul de la distance ionique moyenne.....	160
4. Code VHDL-AMS du supercondensateur.....	162

Bibliographie

1. Références chapitre 1	166
2. Références chapitre 2.....	169
3. Références chapitre 3.....	174
4. Références chapitre 4.....	177

Abréviations

AC/DC – Alternating Current/Direct Current, redressement d'un signal alternatif

CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, technologie de fabrication de composants électroniques

CMS – Composant Monté en Surface

DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency, agence de recherche militaire publique des Etats-Unis d'Amérique

DC/DC – Direct Current /Direct Current, régulation de tension ou adaptation de charge

DRIE – Deep Reactive Ion Etching

EDLC – Electrochemical Double Layer Capacitor

FEA (ou FEM) – Finite Elements Analysis (ou Finite Elements Modeling)

GSM – Global System for Mobile communications, norme de télécommunication numérique pour la téléphonie

LiPON – Lithium phosphorus oxynitride

LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition

MEB – Microscope Electronique à Balayage

MEMS – Micro ElectroMechanical system

MPPT – Maximum Power Point Tracking, recherche du point de fonctionnement générant le plus de puissance

RF – RadioFréquence

RIE – Reactive Ion Etching

RMS – Root mean square, valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal

SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

SHM – Structural Health Monitoring, surveillance de santé de structures

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System, norme de télécommunication numérique pour la téléphonie

WSN – Wireless Sensor Network, réseau de capteurs sans fil

L'accélération des vibrations sera exprimée dans ce travail en multiples de l'accélération de la pesanteur g , avec $1g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Elle est exprimée en amplitude crête à crête conformément aux recommandations des auteurs de l'ouvrage de synthèse sur la récupération d'énergie à partir de vibrations [9 du chapitre II]. Toutes les puissances et tensions électriques sont données en valeur RMS.

Rapport-Gratuit.com

Introduction générale

Deux tendances se dégagent dans l'industrie micro-électronique mondiale, caractérisées par deux expressions autour de la loi de Moore (qui décrit la complexité croissante des circuits intégrés) : *More Moore* et *More than Moore*. *More Moore* désigne la miniaturisation continue des composants électroniques, conformément à la loi de Moore, qui apporte plus de puissance de calcul, de débit de données, tout en réduisant sensiblement la consommation électrique. *More than Moore* désigne l'apport récent de fonctionnalités nouvelles à la filière silicium : micro-capteurs (détection de gaz, de protéines, de température, de pression...) ou microsystèmes électromécaniques MEMS (interrupteurs RF, actionneurs, micro-moteurs...). Les efforts de recherche sur l'intégration d'éléments hétérogènes (encapsulation performantes, empilement 3D...) a permis la convergence de ces deux tendances, laquelle offre de nombreuses opportunités d'applications innovantes, au premier rang desquelles l'intelligence ambiante

L'**intelligence ambiante** est un concept né à la fin des années 1990 pour la décennie 2010-2020 [1],[2], à mesure que l'informatique se détache de la conception d'ordinateur (clavier, souris, unité centrale, souris...). Connu sous le nom de « Informatique Ubiquitaire », « Systèmes Pervasifs » ou encore « Ordinateur évanescent », le concept désigne un système d'information ou d'ordinateur qui change : d'une activité de traitement exclusivement centrée sur l'utilisateur, l'informatique devient interface entre "objets communicants" et personnes, et entre personnes. Aujourd'hui, l'explosion de l'informatique diffuse (internet des objets, calcul distribué, objets communicants...) semble porter l'émergence de l'intelligence ambiante.

Les réseaux de surveillance autonomes, constitués de microsystèmes communiquant sans fil, sont une forme d'intelligence ambiante qui a suscité un nombre croissant de travaux au cours de la dernière décennie. Ils offrent une amélioration significative des applications de surveillance existant (surveillance en milieux inaccessibles par exemple) ou ouvrent de nouvelles possibilités, comme les réseaux mobiles et reconfigurables *ad hoc*. Cependant **la question de l'énergie est centrale** dans ces réseaux puisque les microsystèmes sont autonomes, et disposent donc de ressources très limitées. En effet, en dépit de l'amélioration continue de la capacité des micro-batteries et de la réduction de la consommation électrique des éléments du nœud, l'énergie embarquée s'épuise soit parce qu'elle a été consommée, soit par autodécharge, au mieux au bout de 3 à 4 ans.

Une solution pertinente consiste à **recupérer l'énergie disponible dans l'environnement du microsystème pour l'alimenter**. Cette stratégie est née de la convergence des courants *More Moore* et *More than Moore* : le *More Moore* a permis de faire fonctionner des microsystèmes (capteurs, processeurs, émetteurs) avec une puissance de plus en plus réduite (de l'ordre du microwatt), tandis que le *More than Moore* permet de transformer l'énergie présente dans l'environnement (sous formes diverses : lumière, chaleur, vibrations, radiation...) en électricité. La puissance récupérée est certes faible en l'état actuel de la technologie, mais elle augmente avec les efforts de recherche : elle est suffisante aujourd'hui pour faire fonctionner des microsystèmes très simples dans des conditions idéales (environnement très riche en énergie), elle suffira demain à alimenter des microsystèmes plus complexes dans des situations plus

défavorables – mais plus réalistes. La récupération d'énergie dans l'environnement du microsysteme autonome est une prolongation naturelle du concept d'intelligence ambiante puisque c'est un degré supplémentaire d'interaction du microsysteme avec son environnement, et un pas de plus vers son autonomie totale.

Ce travail de thèse de doctorat fait partie du projet AUTOSSENS, cofinancé par la FRAE¹ et le CNRS. Démarré en Mai 2007, le projet a pour objectif de concevoir et intégrer un microsysteme de récupération et de gestion de l'énergie pour l'alimentation de capteurs embarqués. La collaboration d'Airbus a donné une application cadre : la surveillance de santé de structure aéronautique. Les briques technologiques devront être développées au LAAS, avec l'appui de la centrale technologique (salle blanche et équipement de la filière silicium, salle de caractérisation, outils de simulation).

Nous avons identifié 2 développements nécessaires pour permettre le fonctionnement de microsystemes autonomes de surveillance en réseau, et ce seront les 2 objectifs principaux de cette thèse :

1. La conception et le développement d'un procédé de fabrication d'un dispositif de **récupération d'énergie à partir de vibration basse fréquence et basse amplitude** compatible avec la technologie silicium
2. La conception et le développement d'un procédé de fabrication d'un **micro-supercondensateur** compatible avec la technologie silicium, pour le stockage de l'énergie récupérée.

Le mémoire sera construit en 4 chapitres : le **premier chapitre vise à situer ce travail de thèse dans la problématique de l'autonomie énergétique des microsystemes autonomes** utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil dédiés à la surveillance de santé de structures aéronautiques, et à identifier les développements nécessaires. Dans une première partie nous regarderons les facteurs qui ont permis la faisabilité des réseaux de capteurs sans fil, puis les enjeux généraux de cette technologie. Dans un second temps, nous identifierons les enjeux de la surveillance de santé de structures mécaniques puis – après avoir dressé un état de l'art des méthodes utilisées à ce jour – nous mettrons en évidence les bénéfices attendus des réseaux de capteurs autonomes dédiés à cette application. Dans la troisième partie de ce chapitre nous situerons la problématique de l'énergie dans ces microsystemes autonomes (besoins et ressources), puis dans la quatrième partie nous identifierons les sources ambiantes d'énergie dans l'application du projet AUTOSSENS (à savoir les structures aéronautiques), et les problèmes liés à la collecte et au stockage de cette énergie. Enfin, la dernière partie identifie, à partir du cahier des charges du projet, les problèmes spécifiques que nous allons explorer dans cette thèse.

Le **second chapitre** détaille le développement du **dispositif de récupération d'énergie à partir de vibration**. La première partie fait un état de l'art des techniques de récupération, prolongé dans une seconde partie en se concentrant sur la transduction piézoélectrique pour cerner les verrous

¹ Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, constituée notamment d'Airbus, Safran, Thalès, EADS, du CEA, du CNRS, de l'ONERA et de l'ISAE.

technologiques actuels. La troisième partie présente la conception de notre dispositif (contraintes et modélisation), puis le procédé de fabrication est présenté dans une quatrième partie (présentation globale et étape clés). Une cinquième partie présente la caractérisation des dispositifs fabriqués et leur confrontation au modèle puis aux autres dispositifs de la littérature, afin d'évaluer si les objectifs ont été atteints et quelle a été notre contribution à la communauté de la récupération d'énergie. La sixième et dernière partie fait une synthèse du chapitre.

Le **troisième chapitre** rapporte le développement du **micro-supercondensateur intégré sur silicium**. La première partie du chapitre dresse l'état de l'art sur l'intégration des supercondensateurs sur silicium et identifie les limites actuelles. La seconde partie détaille la conception de notre composant, dont le procédé de fabrication est présenté dans la troisième partie (fabrication du micro-supercondensateur et encapsulation hermétique). Les composants fabriqués sont caractérisés dans une quatrième partie (capacité, qualité de l'encapsulation), et comparés aux objectifs et à la littérature.

Le **quatrième** et dernier chapitre présente la **construction d'un système autonome complet**, puisant son énergie à partir des vibrations récupérées par notre dispositif et la stockant dans notre micro-supercondensateur. La première partie présente la validation expérimentale de l'alimentation (d'abord par un micro-générateur piézoélectrique fabriqué, puis par un micro-supercondensateur) d'un système très basse consommation simple, développé pour l'occasion. La seconde partie présente les efforts de modélisation du générateur piézoélectrique et du supercondensateur, afin de faire un premier bilan énergétique et valider l'architecture, et pour que les briques développées puissent être intégrés dans d'autres applications et que les autres éléments du système puissent être optimisés dans des travaux futurs.

Chapitre 1

L'autonomie énergétique d'un capteur
destiné à la surveillance d'une structure
aéronautique

1. Introduction

Les développements actuels en électronique, microsystèmes et réseaux offrent des possibilités nouvelles de surveillance et d'interaction avec l'environnement, décrites sous l'expression d'*intelligence ambiante* : des réseaux de capteurs sans fil légers, mobiles et reconfigurables *ad hoc* observent leur environnement et interagissent avec celui-ci (directement ou donnent les informations à une unité ou un utilisateur qui agit). Dans ces réseaux de capteurs, l'énergie est une question centrale, qui limite leur utilisation dans certaines applications. Aussi le projet AUTOSENS qui sert de cadre à ce travail de thèse (avec comme application la surveillance de structures aéronautiques) vise la conception et la fabrication de microsystèmes de récupération et de stockage de l'énergie puisée dans l'environnement du capteur et servant à l'alimenter. Ce premier chapitre situe les développements qui seront entrepris dans ce travail ; il est organisé en 5 parties :

1. Dans une première partie nous regarderons les facteurs qui ont permis la **faisabilité des réseaux de capteurs sans fil**, ainsi que les **enjeux** généraux de cette technologie.
2. Dans un second temps, nous identifierons les enjeux de la **surveillance de santé de structures mécaniques** puis – après avoir dressé un état de l'art des méthodes utilisées à ce jour – nous mettrons en évidence les bénéfices attendus des réseaux de capteurs autonomes dédiés à cette application.
3. Dans la troisième partie de ce chapitre nous situerons la **problématique de l'énergie** dans ces réseaux de capteurs (besoins et ressources) appliqués à la surveillance de santé de structures.
4. Dans la quatrième partie nous identifierons les sources ambiantes d'énergie et les stratégies de récupération dans l'application de surveillance de santé de structures aéronautiques concernées dans le **projet AUTOSENS** et les **problèmes liés à la collecte et au stockage de cette énergie** pour établir les objectifs de cette thèse.

2. L'émergence des systèmes autonomes communicants sans fil

2.1.1. *More Moore : la réduction de la consommation électrique des composants*

Depuis le début de l'industrie microélectronique, la miniaturisation des composants électroniques a permis une **réduction continue de la consommation électrique des composants**, à tel point que, alors que les processeurs devenaient de plus en plus complexes (loi de Moore²), leur consommation électrique est restée sensiblement égale. On peut facilement constater cette tendance en observant

² La Loi de Moore a été exprimée en 1975 par Gordon Moore, un des trois fondateurs d'Intel, en posant que le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans. Entre 1971 et 2001, la densité des transistors a doublé chaque 1,96 année.

l'évolution concourante du nombre de transistors, de la fréquence de fonctionnement et de la consommation électrique des processeurs Intel entre 1994 et 2008. Nous avons reporté ces données dans le Tableau 1, et nous en avons tiré un indice de consommation d'un transistor au sein des processeurs Intel, normalisé par sa fréquence de fonctionnement, et dont l'évolution est présentée dans la Fig. 1.

Processeur	Fréquence [MHz]	Consommation [W]	Finesse de gravure [nm]	Date de sortie	Nombre de transistors
Pentium (P5C)	75	8	600	10/1994	3.3 millions
Pentium (P55C)	200	18	350	10/1996	4.5 millions
Pentium II (Klamath)	300	43	350	05/1997	7.5 millions
Pentium II (Deschute)	400	24.3	250	01/1998	7.5 millions
Pentium III (Katmai)	600	42.8	250	05/1999	9.5 millions
Pentium III (Coppermine)	800	27.2	180	10/1999	9.5 millions
Pentium III (Tualatin)	1200	29.9	130	06/2000	9.5 millions
Pentium IV (Willamette)	1500	57.9	180	11/2000	42 millions
Pentium IV (Northwood)	2200	57.1	130	01/2002	55 millions
Pentium IV (Prescott)	3600	115	90	02/2004	125 millions
Core 2 Duo (Conroe)	1800	65	65	08/2006	291 millions
Core 2 Duo (Wolfdale)	3000	65	45	01/2008	731 millions

Tableau 1 - évolution du nombre de transistors, de la fréquence de fonctionnement et de la consommation électrique des processeurs Intel entre 1994 et 2008, d'après les données constructeur.

L'amélioration de l'efficacité énergétique de l'électronique a rendu possible le fonctionnement de systèmes (microprocesseurs, mémoires) avec une très faible puissance. Une évaluation de la consommation de microsystèmes (capteurs, microprocesseur, émetteur RF) est présentée en section 4.1 .

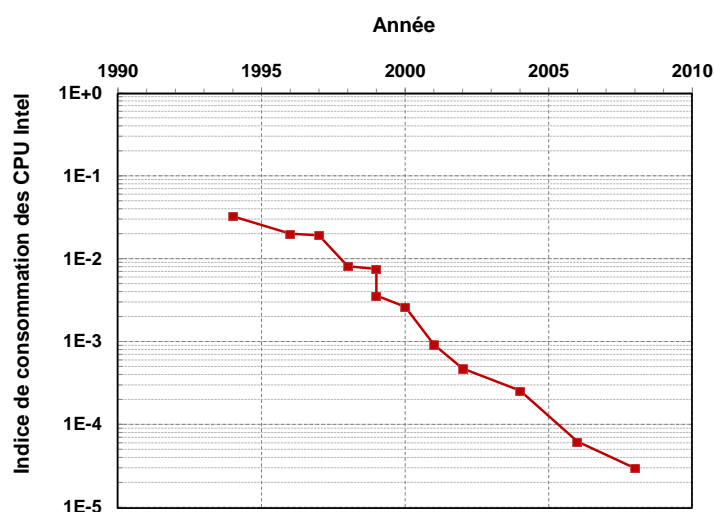


Fig. 1 - Evolution de l'indice³ de consommation des processeurs Intel entre 1994 et 2008.

³ Consommation globale/(fréquence de fonctionnement * nombre de transistors)

2.1.2. *More than Moore : l'apport de nouvelles fonctions*

Cette exceptionnelle amélioration des technologies microélectroniques (typiquement CMOS) a été complétée par l'apparition et le développement de procédés technologiques nouveaux permettant l'usinage en surface et en volume du silicium. A la fin des années 80, le micromoteur rotatif sur puce de Tai et Muller [1] constitue un fait marquant que beaucoup tenteront de reproduire comme un passeport pour entrer dans le domaine des MEMS. Ainsi est né dans les années 80 le concept de MEMS (micro electromechanical system) aux États-Unis ou Microsystème en Europe. Aujourd'hui, l'offre des MEMS englobe des domaines variés comme la défense (micro-amorces), le médical (micro-pompes, micro-valves), l'électronique (micro-relais, buses imprimantes jet d'encre), les télécommunications (accéléromètres, magnétomètres, gyroscopes dans les téléphones et les consoles de jeu, micro-miroirs pour vidéoprojecteurs ou le transfert de données optique) ou l'automobile (capteurs pour correction de trajectoires, gestion de l'Airbag, capteurs de pression des pneus).

2.1.3. *L'intelligence ambiante : une combinaison de 4 tendances*

Les années 2000 marquent un tournant pour les MEMS avec l'émergence d'un concept nouveau, appelé *intelligence ambiante* qui se situe au carrefour de quatre axes de progrès :

- (i) **L'évolution de la technologie silicium** avec une réduction de la taille et de la consommation électrique des composants électroniques (à performance équivalente), qui permet de faire des microsystèmes consommant moins d'un microwatt (cf. paragraphe 2.1.1).
- (ii) **L'apport des fonctionnalités MEMS** qui, avec le concours d'une résolution de photolithographie toujours plus fine, permet de concevoir et fabriquer des objets fonctionnels (capteurs/actionneurs) extrêmement compacts et donc peu invasifs. Aujourd'hui les niveaux d'intégration des MEMS sont de plus en plus poussés et les microsystèmes sont de plus en plus complexes et hétérogènes [2].
- (iii) **L'évolution de l'informatique et des réseaux** qui depuis la naissance du concept de l'ordinateur en 1960 [3] ont fait des progrès spectaculaires : il est possible de concevoir des réseaux reconfigurables *ad hoc*, dont les nœuds sont mobiles, avec des liaisons tolérantes aux fautes.
- (iv) **L'évolution du stockage de l'énergie** qui a été largement miniaturisé grâce à des densités d'énergie en très forte augmentation depuis l'apparition dans les années 1990 des accumulateurs Li-ion : les valeurs atteintes sont aujourd'hui autour de 550 Wh.l⁻¹, 250 Wh.kg⁻¹[4].

Née alors l'idée que l'on peut intégrer dans des volumes extrêmement réduits (<mm³) des fonctionnalités sensorielles, électroniques, des moyens de calculs et des moyens de communication afin de créer des ambiances intelligentes à partir de capteurs communiquant. La première preuve de concept de réseau de capteurs communiquant sans fil remonte au milieu des années 90 : le projet LWIM (Low-

power Wireless Integrated Microsensor) a été développé par la DARPA⁴ et l'UCLA [5]. Il s'agissait d'un géophone équipé d'un capteur de transmission radiofréquence et d'un microcontrôleur.

Le concept qui a fait date et qui a inspiré nombreuses réflexions et travaux en intelligence ambiante est le *Smart Dust* [5] – littéralement poussière intelligente – lancé en 1997 par le professeur Pister au BSAC (Berkeley Sensor and Actuator Center) de l'Université de Berkeley qui avait pour objectif de concevoir et fabriquer des capteurs microscopiques pour la surveillance d'un champ d'opération militaire (champ de bataille ou plus tristement surveillance d'une population civile). L'idée initiale très ambitieuse était d'intégrer dans 1mm³ un capteur, son alimentation électrique, l'électronique et un moyen de communication optique (bidirectionnelle) et un microprocesseur.

Les Fig. 2 et Fig. 3 illustrent le caractère ambitieux et innovant du *Smart Dust* en 1997. Il est à noter aussi le volume de la batterie qui représente plus de 80 % du volume total. Nous verrons que des progrès ont eu lieu dans l'augmentation de la densité d'énergie des batteries (voir paragraphe 4.2.1) mais que cela reste un point limitant à la miniaturisation des nœuds du réseau de capteurs sans fil.

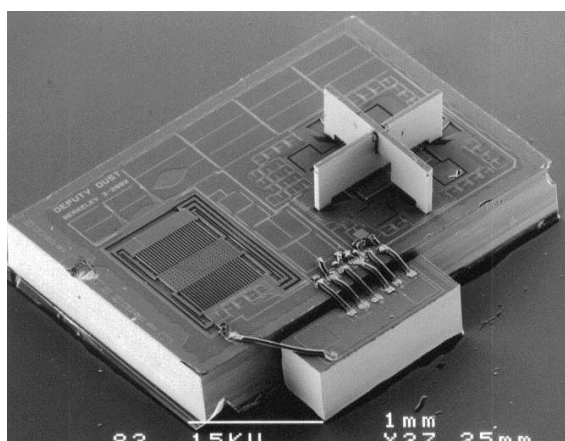


Fig. 2 – capteur et électronique du système Smart Dust [5]

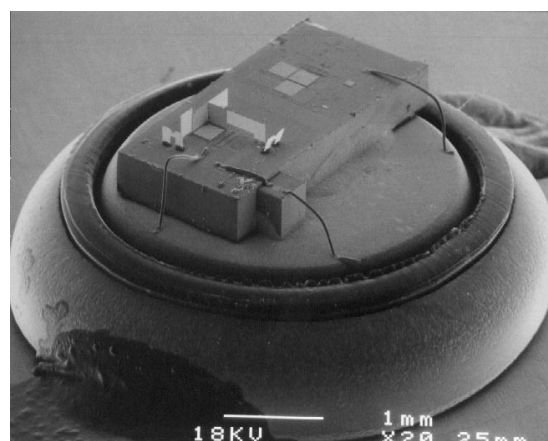


Fig. 3 – Smart Dust monté sur une pile bouton Lithium : l'alimentation électrique occupe 80 % du volume du système. [5]

Depuis le concept du *Smart Dust* en 1997, la technologie des capteurs sans fil a beaucoup évolué. Les modules (ou nœuds) deviennent de plus en plus petits et les durées de vie prévues augmentent. Aujourd'hui, le marché a été investi par l'industrie et des modules produits par Crossbow [6], DustNetwork [7], MeshNetics [8], Accsense [9], Millenia [10], Ember [11] ou Microstrain [12] exploitant des protocoles de transmission radio (bluetooth, bande ISM) sont disponibles.

⁴ Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense, organisme de recherche militaire américain, équivalent de la DGA en France.

2.2. Enjeux des réseaux de capteurs sans fil

A ce jour, l'une des applications les plus répandues de ces systèmes autonomes est le réseau de capteurs sans fil (ou WSN⁵) : de nombreux capteurs autonomes sont répartis sur la zone à surveiller, où ils recueillent les données pertinentes de leur environnement (température, présence de gaz toxique, vibration...) et la transmettent enfin à l'utilisateur ou à un système dédié de diagnostic automatique [13].

Les enjeux sociétaux et économiques des réseaux de capteurs sans fil sont d'importance puisqu'ils portent sur l'intégration de « l'intelligence » autour de l'Homme et de son environnement dans de nombreux domaines d'application : la santé, l'environnement, la sécurité (civile ou militaire), l'alimentation, le transport (maritime et terrestre), l'aéronautique et l'espace ou l'habitat. Ainsi, des avancées importantes ont été faites ces dernières années sur les aspects *réseaux* (sécurisation des données échangées, tolérance aux fautes de transmission, tolérance à la mort d'un ou de plusieurs nœuds, configuration *ad hoc*) ainsi que sur les technologies d'intégration et d'assemblage du capteur (capteur lui-même entouré de l'électronique, de l'énergie et du module de communication). Les applications typiques de réseau de capteurs sans fil requièrent que chaque nœud du réseau soit de petite taille, endurant vis-à-vis de son environnement (température, vibrations, humidité, agressions chimiques) et d'une durée de vie importante (supérieure à 10 ans). Ainsi, **l'alimentation énergétique et la gestion de l'énergie électrique est une question centrale dans la conception de réseaux de capteurs**. La trop faible densité d'énergie des stockages électrochimiques limite la durée de vie des réseaux déployés ou impose une opération de maintenance parfois périlleuse (milieux difficilement accessibles, risque de perturber l'environnement de mesure). Des stratégies d'organisation du réseau pour minimiser les transmissions RF (voir par exemple [14]), d'optimisation des composants et de limitation de la fréquence et de la précision des mesures sont parfois mises en place mais elles n'apportent qu'une économie limitée des ressources énergétiques embarquées. **Nous reviendrons à la section 4 sur cette problématique de l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs sans fil car elle est la motivation centrale de cette thèse.**

2.3. Applications des réseaux de capteurs communicants sans fil

A court terme, trois grands domaines applicatifs paraissent d'intérêt pour les réseaux de capteurs autonomes :

2.3.1. La surveillance de l'environnement pour son étude

L'illustration la plus récurrente est la surveillance des évolutions météorologiques et physiques, comme le suivi de l'évolution d'un glacier [15] ou du permafrost d'une montagne [16]. Ce sont des applications où les capteurs doivent être dans un emplacement fragile et inaccessible, et où des réseaux câblés – bien que techniquement possibles – auraient été particulièrement difficiles et économiquement

⁵ Wireless Sensor Network

absurdes. Un réseau de capteurs autonomes sans fil permet un déploiement techniquement plus abordable, donc économiquement pertinent.

2.3.2. La surveillance pour interagir avec l'environnement

Cette application découle du concept d'**intelligence ambiante**. Les réseaux de capteurs autonomes sont capables de deux configurations interdites aux réseaux de capteurs câblés : le réseau de capteurs en mouvement les uns par rapport aux autres et le réseau de capteurs déployés dans l'urgence ou disséminés. Ces situations ont été les premiers moteurs de l'émergence de la recherche sur les réseaux de capteurs autonomes, notamment le concept de *Smart Dust* [5]. Une application caractéristique d'un réseau de capteur dont les nœuds sont en mouvement les uns par rapport aux autres est issue des projets NEST [14] et PinPTR [17] : les chercheurs ont pu localiser avec précision la position d'un tireur isolé en utilisant le retournement temporel à partir des données acoustiques captées par les nœuds sur le terrain (voir Fig. 4 et Fig. 5). Les capteurs, d'abord fixes dans le projet PinPTR, sont attachés aux casques des soldats déployés sur le champ d'opération dans le projet NEST. Le système (Fig. 4) est alimenté par un stockage électrochimique (batterie) qui occupe 90 % du volume du nœud, ce qui illustre la problématique de l'énergie dans l'autonomie des microsystèmes autonomes. Au-delà du bénéfice économique et industriel, l'abaissement des coûts et de la difficulté de déploiement que permettent les réseaux de capteurs autonomes de surveillance peuvent avoir un bénéfice humain marquant, comme le projet (financé par la DARPA) de remplacement de champs de mines anti-personnel par des capteurs disséminés ⁶[18].

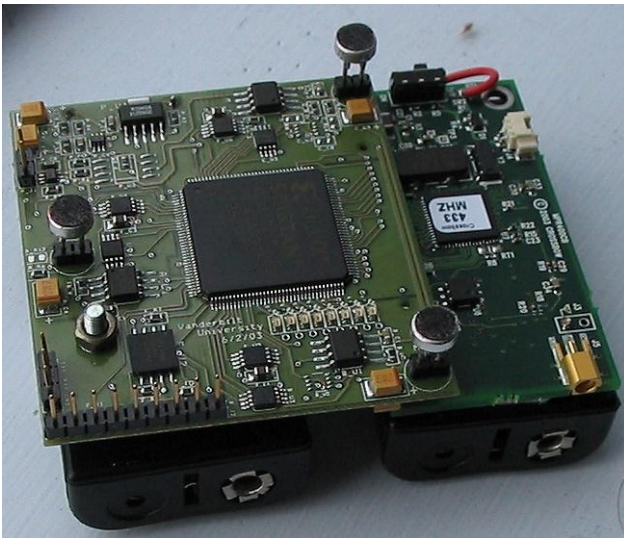


Fig. 4 - capteur pour réseau de localisation de tireur isolé, d'après [19]. L'alimentation électrique (en noir sous la carte) occupe près de 90 % du volume du nœud.



Fig. 5 - reconstitution à partir des données recueillies et localisation du tireur, d'après [19].

⁶ Le projet a réussi la détection de blindés et de troupes d'infanterie, avec une précision suffisante pour envisager sérieusement le remplacement des mines anti-personnel.

2.3.3. La surveillance de structures mécaniques et d'appareils industriels

Dans la plupart des cas, la maintenance des appareils industriels (machines-outils, véhicules) et des structures mécaniques subissant des chocs ou des vibrations est effectuée de deux façons : les révisions sont programmées sur une estimation statistique de durée de fonctionnement sans panne (maintenance préventive systématique), et les réparations lorsque la panne est avérée (maintenance corrective). Ce mode opératoire a trois défauts majeurs :

- les maintenances correctives (palliatives et curatives) sont coûteuses puisqu'une partie au moins de l'élément en panne est endommagé,
- les révisions doivent être programmées fréquemment – et cela est particulièrement le cas sur les systèmes devant assurer un très haut niveau de sûreté de fonctionnement, comme les avions – pour éviter les défaillances coûteuses, parfois en vies humaines
- cette méthode procure un niveau de fiabilité insatisfaisant puisqu'elle se fonde sur une estimation de la survenue de la prochaine panne en se basant sur des considérations statistiques. Ainsi, la fatigue exceptionnellement précoce d'une structure (par exemple la combinaison de défauts de fabrication et d'une exposition à de très violentes turbulences) pourrait mener à la rupture d'un élément avant la date de la révision programmée, même si celles-ci sont très fréquentes, et entraîner des réparations coûteuses et – dans certaines applications – de possibles pertes de vies humaines.

Les réseaux de capteurs devraient permettre de détecter et prévoir automatiquement la panne, et donc de remplacer le couple maintenance systématique/maintenance corrective par une maintenance conditionnelle⁷ ou prévisionnelle⁸. Le contexte de ce travail de thèse se situe dans cette catégorie d'application puisque il s'agit de détecter les endommagements et prévoir la maintenance de structures aéronautiques. Nous étudierons dans la prochaine section ce que les réseaux de capteurs autonomes communicants peuvent apporter à la surveillance de structures mécaniques.

3. L'intérêt des systèmes autonomes communiquant sans fil pour la surveillance de structures mécaniques

⁷ Calque de l'anglais *conditional maintenance*, l'expression « maintenance conditionnelle » désigne la maintenance subordonnée à l'état — en anglais *condition* — du matériel (une expression équivalente en anglais est d'ailleurs *condition-based maintenance*). La définition de la norme européenne est : « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent » (extrait norme NF EN 13306 X 60-319).

⁸ La maintenance prévisionnelle (aussi appelée « maintenance prédictive » par calque de l'anglais *predictive maintenance*, ou encore « maintenance anticipée ») est, selon la norme NF EN 13306 X 60-319, une « maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ».

3.1. Systèmes de mesure de SHM⁹: état des pratiques

Il existe de nombreux types de capteurs pouvant être utilisés pour surveiller la santé d'une structure. Les technologies les plus représentées dans la littérature sont les émetteurs/capteurs magnétostrictifs, piézoélectrique et les fibres optiques, dont nous allons brièvement présenter le principe.

3.1.1. Actionneurs/capteurs magnétostrictifs

Les actionneurs/capteurs magnétostrictifs sont constitués d'un matériau ferromagnétique dont les dimensions changent légèrement lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. Ainsi une variation périodique du champ magnétique appliquée à un élément magnétostrictif collé à une structure induit des vibrations dans la structure. Le même élément sert de capteur puisque des vibrations induisent une déformation du matériau et donc une modification du champ induit qui peut être mesurée et analysée. Un défaut est détecté en comparant la vibration « retour » dans la structure à la vibration « retour » enregistrée dans la structure saine (appelée « healthy baseline » dans la littérature). De nombreux travaux sur la surveillance de santé de structure ont été réalisés avec des actionneurs/capteurs magnétostrictifs, notamment sur des conduites [20] ou sur des ailes d'avion pour y détecter des ruptures mécaniques ou des attaques de corrosion près des rivets [21].

3.1.2. Fibre optique

La fibre optique est également utilisée dans la surveillance de santé de structure. La fibre est enchâssée dans le matériau à surveiller et est parcourue par un faisceau lumineux dont on mesure les variations de phase, d'intensité et de longueur d'onde. Les variations d'intensité témoignent d'un défaut puisque la déformation de la fibre altère la quantité de lumière qui la traverse. Les variations de phase résultent d'un phénomène similaire sauf que ce sont des interférences consécutives à une déformation qui modifient la phase du signal. Enfin, le suivi des variations de longueur d'onde, aussi appelé mesure à réseau de Bragg (FBG pour Fiber Bragg Grating en anglais), repose sur des fibres optiques qui contiennent de petites sections à l'intérieur du câble où le cœur de la fibre a été gravé avec une série de lignes également espacées qui agissent comme des miroirs partiellement réfléchissant. Le réseau de Bragg permet qu'une bande très étroite de longueur d'onde de la lumière se reflète jusqu'à la source optique. La contrainte au niveau des réseaux induite par une déformation entraînera un décalage de la longueur d'onde réfléchie, et ce décalage peut être mesuré. Parmi les nombreux travaux de la littérature basés sur la fibre optique pour le SHM, Lee *et al.* [22] ont étudié l'application de ce type de capteurs aux structures aéronautiques.

⁹ Structural Health Monitoring, surveillance de santé des structures.

3.1.3. Actionneurs/capteurs piézoélectriques

Les actionneurs/capteurs piézoélectriques sont les dispositifs les plus étudiés dans la littérature. Leur fonctionnement est proche des actionneurs/capteurs magnétostrictifs sauf qu'ils reposent sur le couplage tension/contrainte (là où les éléments magnétostrictifs reposent sur le couplage champ magnétique/contrainte). Les deux principales méthodes de détection de défauts à partir de ces dispositifs sont la mesure d'impédance mécanique et la propagation d'ondes. La première méthode exploite le lien direct entre l'impédance mécanique¹⁰ d'une structure (qu'on veut surveiller) et l'impédance électrique d'un élément piézoélectrique collé à cette structure (qu'on peut mesurer), montré en 1994 par Liang *et al.* [23]. Une étude a notamment été conduite par Giurgiutiu *et al.* en 2004 [24] et applique cette méthode à la détection de défauts sur des structures aéronautiques. Les méthodes basées sur la propagation d'ondes exploitent la très grande sensibilité des ondes de Lamb (un type d'onde élastique) aux défauts (dislocations et délaminations).

De nombreux algorithmes ont été développés autour de cette méthode de détection mais tous requièrent une grande base de données de références auxquelles comparer les mesures, ce qui est un handicap sérieux au déploiement de cette technique sur des capteurs petits et nombreux, surtout lorsque le volume disponible ou l'autonomie est une variable critique. Des méthodes ne nécessitant pas de base de références ont été développées en réponse à ce problème à partir de 2005 [25], basées sur le retournement temporel. Le défaut de ces méthodes est qu'elles requièrent de grosses ressources de calcul et ne sont pas – en l'état actuel de la technologie – adaptée à de petits nœuds.

3.2. Vers des réseaux de capteurs miniaturisés autonomes

3.2.1. Structures des réseaux de capteurs

La localisation des défauts détectés passe par une triangulation des données enregistrées par les capteurs, et cela est permis par la mise en réseau de ces capteurs selon une architecture simple illustrée par les Fig. 6 et Fig. 7. Dans le cas d'un réseau direct, un événement est détecté par un ou plusieurs capteurs, qui transmettent leur mesure à l'aide d'un protocole courte portée de nœud en nœud jusqu'à un puits qui transmet les données recueillies à l'utilisateur à travers une connexion plus longue portée. Dans le cas d'un réseau organisé en clusters, des puits sont placés plus densément et communiquent de proche en proche jusqu'à la transmission à l'utilisateur.

¹⁰ Produit de l'impédance acoustique (rapport de la pression acoustique sur la vitesse de déplacement locale d'une onde acoustique dans un milieu) et de la section du composant considéré.

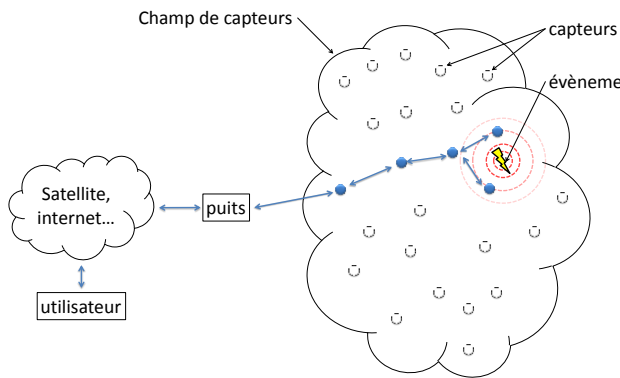


Fig. 6 - Architecture générale d'un réseau de capteurs direct.

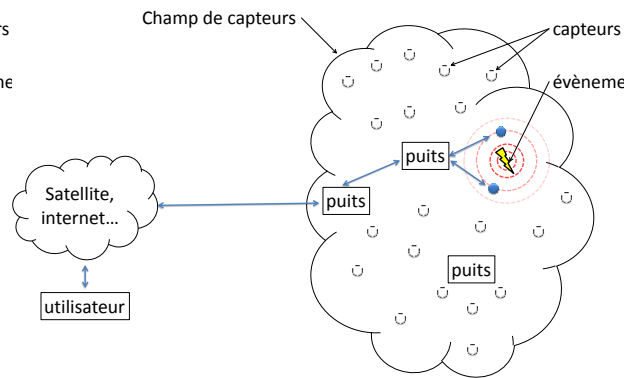


Fig. 7 - Architecture générale d'un réseau de capteurs organisé en clusters.

3.2.2. Le problème des réseaux câblés

De nombreuses études de systèmes de SHM ont déjà montré l'aptitude des réseaux de capteurs décrits précédemment à détecter et localiser un défaut de structure en temps réel. Néanmoins la nécessité de câbler les capteurs (à la fois pour la collecte d'information et pour l'alimentation électrique) est une contrainte particulièrement pénalisante dans l'aéronautique. En effet un avion de type "Short Range" (comme l'Airbus A320) compte entre 50 et 100 kg de câblage pour alimenter les capteurs. Par comparaison, l'avion pèse à vide 35 à 40 tonnes parmi lesquelles 1,5 tonnes seront relatives à l'ensemble des câblages (puissance des équipements, données, fixations).

Parallèlement à la problématique de masse, les réseaux câblés posent un problème de temps et de complexité d'installation.

3.2.3. Faisabilité de microsystèmes autonomes

Comme présenté dans la section 2.1.3, le concours de quatre tendances technologiques (la miniaturisation des composants électroniques et la réduction de la consommation électrique induite, l'apparition de capteurs microscopiques dont la consommation électrique est également très réduite, l'évolution de l'informatique et des réseaux, et la miniaturisation des dispositifs de stockage électrochimique) a rendu possible l'apparition de microsystèmes autonomes. Un cinquième facteur, lié à la réduction générale de la consommation des composants électroniques (à performances égales) permet d'envisager des réseaux de capteurs autonomes : l'amélioration très importante des communications sans fil courte portée et basse consommation. Une comparaison des protocoles les plus couramment utilisés est présentée dans les Fig. 8 et Fig. 9. On y constate l'existence de protocoles offrant un débit et une portée réduits mais nécessitant seulement quelques mW lors de la phase de transmission.

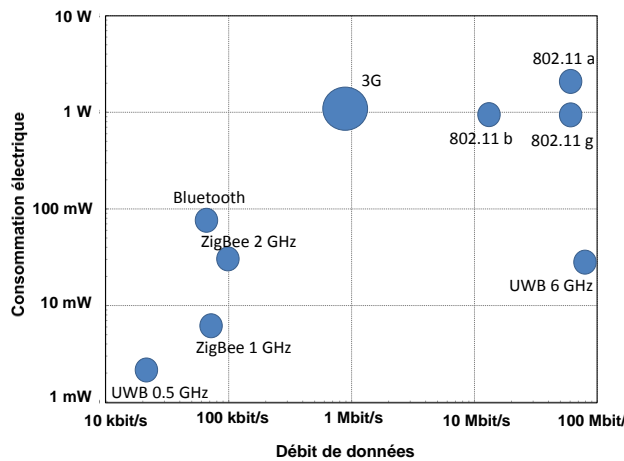


Fig. 8 - consommation des différents protocoles de communication radio par rapport au débit de donnée. D'après [26].

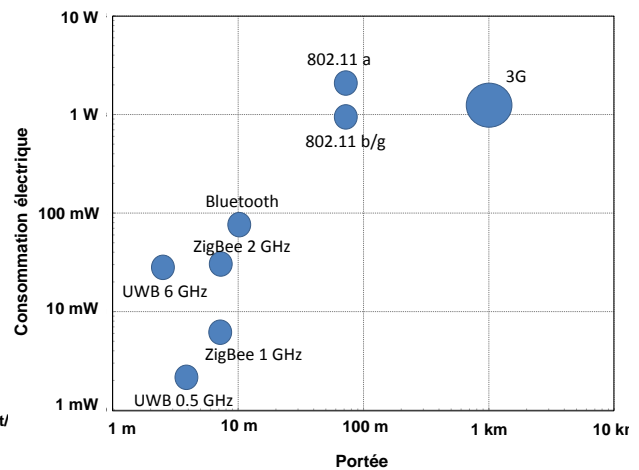


Fig. 9 - consommation des différents protocoles de communication radio par rapport à la portée du transfert. D'après [26].

Ainsi, un réseau de capteurs distribués en grand nombre car peu encombrants et communiquant sans fil est envisageable pour réaliser des acquisitions de données en grand nombre permettant alors une meilleure résolution des mesures et une flexibilité du système plus importante puisque certains nœuds pourraient être remplacés si défaillants par les proches voisins par exemple ou pourront être déconnectés si les besoins de résolution sont moindres. Un autre avantage important réside dans la facilité d'installation ainsi que dans la localisation de l'installation qui pourra être identifiée à tout instant.

La conception de réseaux de capteurs autonomes communiquant sans fil impose la problématique de l'autonomie énergétique. Dans la prochaine section, nous étudierons les besoins et les ressources disponibles pour bien situer les défis techniques à relever.

4. La problématique énergétique des microsystèmes autonomes pour SHM

Nous avons compris que l'énergie électrique et sa gestion est un point clé pour la conception d'un réseau de capteurs sans fil autonomes, et nombreux sont les travaux qui tentent de proposer des solutions technologiques et architecturales pour améliorer l'autonomie. La section qui suit propose un résumé des avancées dans ce domaine avant de présenter les stratégies envisageables pour apporter des réponses à l'autonomie d'un capteur pour une application SHM.

4.1. Evaluation des besoins

Suite au développement continu de composants électroniques basse consommation, il est intéressant d'analyser la consommation électrique respective des différents éléments d'un nœud, ainsi que la puissance moyenne totale requise. Cela permet notamment d'estimer l'énergie nécessaire au fonctionnement sur une période de temps donnée, ou inversement d'estimer la durée de vie d'un nœud à partir de l'énergie embarquée. Il faut cependant rappeler ici que **l'énergie requise est très dépendante de l'application** (type de capteur, fréquence et précision des mesures, fréquence des échanges radio) et que **nous nous contenterons de donner des ordres de grandeur, et d'établir des tendances.**

Il y a des opérations de base qu'un nœud devra pouvoir accomplir : relever des données, les envoyer à un serveur central ou un concentrateur de données, et gérer les éléments qui accomplissent ces tâches et leur approvisionnement en énergie. Plusieurs travaux ont ainsi cherché à établir la consommation d'un nœud réduit à sa plus simple expression (un accéléromètre, un capteur de température, un microcontrôleur et un émetteur RF). En gardant à l'esprit le choix de composants ultra basse consommation, Lallart [27], Marzencki [28], O'Mathùna [29] et Mascarenas [30] ont arrêté les éléments présentés dans le Tableau 2, le Tableau 3, le Tableau 4 et le Tableau 5 ci-dessous. Il apparaît que si la consommation des capteurs et du microcontrôleur peut être jugulée, la consommation du module de transmission RF est déterminante dans le budget énergétique final. Ce total (somme des coûts énergétiques de tous les composants pour un cycle) oscille entre 13 et 690 μJ alors que les fonctions assurées sont les mêmes (mais pas la précision des mesures dont sont capables les capteurs choisis), et monte à 2 029 μJ pour la mesure d'impédance. Cela souligne encore la forte dépendance de la consommation électrique vis-à-vis de l'application ciblée.

Nature	Modèle	Consommation active	Consommation en veille	Energie 1 cycle
Accéléromètre 3 axes	ADX1345 (AnalogDevice)	270 μW @ 1.8 V	3,6 μW @ 1.8 V	0,46 μJ
Capteur température	TMP35 (AnalogDevice)	135 μW @ 2.7 V	1,35 μW @ 2.7 V	0,135 μJ
Emetteur/récepteur RF	EM9201 (EM electronics)	12 mW @ 1 V	3 μW @ 1 V	46,5 μJ
Microcontrôleur	EM6919 (EM electronics)	3,6 μW @ 0.9 V	0,58 μW @ 0.9 V	0,064 μJ

Tableau 2 - Consommation électrique des différents éléments d'un nœud ultra basse consommation, d'après [27].

Nature	Modèle	Consommation active	Consommation en veille	Energie 1 cycle
Accéléromètre 3 axes	LIS3LV02DQ(ST Micro)	1296 μW @ 2.16 V	2,16 μW @ 2.16V	2,59 μJ
Capteur température	AD 7814(AnalogDevice)	675 μW @ 2.7 V	1,16 μW @ 2.7 V	0,02 μJ
Emetteur/récepteur RF	nRF24L01(NordicSemicon)	98,8 μW @ 1.9 V	1,71 μW @ 1.9 V	9,88 μJ
Microcontrôleur	EM6607 (EM electronics)	2,7 μW @ 1.5 V	0,15 μW @ 1.5 V	0,054 μJ

Tableau 3 - Consommation électrique des différents éléments d'un nœud ultra basse consommation, d'après [28].

Nature	Modèle	Consommation active	Consommation en veille	Energie 1 cycle
Accéléromètre	-	2 178 μ W	-	43,6 μ J
Capteur température	-	29 μ W	-	0,006 μ J
Emetteur/récepteur RF	EM2024 (EM electronics)	63,16 mW	18 μ W	246 μ J
Microcontrôleur	AT128L (ATmega)	20 mW	-	400 μ J

Tableau 4 - Consommation électrique des différents éléments d'un nœud ultra basse consommation, d'après [29].

Nature	Modèle	Consommation active	Consommation en veille	Energie 1 cycle ¹¹
Mesure d'impédance	AD5933 (Analogdevice)	33 mW	2,31 μ W	660 μ J
Emetteur/récepteur RF	XBee 2,4 GHz	148,5 mW	33 μ W	742 μ J
Microcontrôleur	AT128L (ATmega)	31,35 mW	16,5 μ W	627 μ J

Tableau 5 - Consommation électrique des différents éléments d'un nœud ultra basse consommation, d'après [30].

4.2. Quelles sources d'énergie ?

4.2.1. Sources finies : stockage électrochimique

L'alimentation électrique des capteurs s'est d'abord appuyée sur des accumulateurs électrochimiques (piles Ni-Mh, batteries Li, Li-ion ou Li-Polymère¹²) car ils sont commercialement disponibles, performants (la densité d'énergie et de puissances peut atteindre 0,9 MJ.kg⁻¹ (250 Wh.kg⁻¹) et 340 W.kg⁻¹ pour les plus performants). Les solutions de stockage de l'énergie utilisées dans les autres travaux sur des modules de réseaux de capteurs autonomes sont :

- les batteries Li-ion ou Li-Po. De récents efforts de miniaturisation ont permis l'utilisation de ces dispositifs présentant une grande densité d'énergie pour alimenter des nœuds requérant une grande quantité d'énergie. Tous les projets articulés autour des nœuds Waspote de Libelium [31] utilisent ce type de sources, et leur autonomie annoncée est de 1 an¹³.
- les piles Ni-Mh, dont le principal avantage est le coût mais qui souffre d'une autodécharge très rapide.
- les piles Métal-air, qui restituent de l'énergie électrique par oxydation du métal par l'atmosphère à laquelle il est exposé. Ce type de pile offre une grande densité d'énergie (362 Wh/kg [32]) mais il souffre d'une autodécharge très rapide. Ce type de batterie n'est pas rechargeable en l'état, mais des modifications le permettent ; la charge de ce type de pile n'a un rendement que de 50 % pour les systèmes Zinc-air.
- les piles alcalines, qui ont une autodécharge limitée (par rapport aux piles Ni-Mh qui les remplacent parfois) mais ce sont des batteries primaires (non rechargeables).

¹¹ Estimations à partir des puissances moyennes et rapports cycliques.

¹² Les batteries Li-ion et Li-Polymère diffèrent par la nature de leur électrolyte : il est sous forme de gel pour les batteries Li-Polymère.

¹³ Avec une consommation de 9 mA en fonctionnement, de 62 μ A en veille et de 0,7 μ A en hibernation.

Le Tableau 6 liste quelques un des plus récents réseaux de capteurs autonomes et la source d'énergie qui les alimente.

Réf.	Type de mesures	Communication	Nœud	Source d'énergie
[33]	Humidité, température, pression, ensoleillement	Zigbee	Wasp mote	Batterie Li-Po
[34]	-	Zigbee, 2,4 GHz RF	Wasp mote	Batterie Li-Po
[35]	Présence (sonde effet Hall)	Zigbee	Squidbee	Batterie Li-Po
[36]	Pression, humidité, température	GPRS	-	Ni-Mh
[37]	Luminosité, température	GPRS	TinyNode	Supercondensateur, batterie Li-Po, pile Ni-Mh

Tableau 6 - Réseau de capteurs autonomes et leur source d'énergie

Néanmoins, ces méthodes d'alimentation s'avèrent parfois insuffisantes pour certaines applications : le remplacement ou la recharge d'un grand nombre de piles, dans un milieu hostile, sont souvent économiquement injustifiés voire impossibles. La durée de vie de dispositifs ainsi alimentés est directement liée à la quantité de charges initialement stockées dans la pile et donc à sa taille : il existe alors un compromis entre les dimensions du dispositif et sa longévité.

La finitude des réservoirs électrochimiques mène à une double limitation de l'utilisation des nœuds autonomes : soit par **épuisement par la consommation** du microsystème (trop faible densité d'énergie du réservoir électrochimique), soit par **épuisement par autodécharge**. Cette seconde limitation rend les progrès éventuels dans la réduction de la consommation électrique des nœuds du réseau inutile puisque même avec une consommation nulle le réservoir serait épuisé en quelques années (au mieux).

4.2.2. La récupération de l'énergie ambiante

La diminution considérable de la consommation électrique des différents éléments d'un nœud (capteur, électronique d'acquisition, de stockage et de transmission des données) qui a d'abord permis l'alimentation de ces capteurs « temporairement » autonomes par des réservoirs électrochimiques finis (batteries, piles, supercondensateurs), a désormais rendu envisageable **d'alimenter le système en captant l'énergie disponible de son environnement immédiat**.

Le principal avantage de la récupération d'énergie est la continuité de l'alimentation électrique : en théorie, elle dure tant qu'il y a de l'énergie dans l'environnement. La comparaison entre les réservoirs finis d'énergie (stockage électrochimique) et l'énergie disponible dans l'environnement ambiant est faite par Roundy *et al.* [38]; elle est rappelée dans Fig. 10. Il y apparaît que les réservoirs électrochimiques, même s'ils ne sont que très peu ou pas utilisés, perdent l'énergie emmagasinée au départ à cause de phénomène d'autodécharge. Cette autodécharge représente 30 % de la charge totale par mois pour un stockage Ni-Mh contre 2-3 % par mois pour un stockage Lithium [29]. Ces phénomènes sont spécifiques à chaque système de stockage et dans tous les cas ils ne sont pas envisageables pour des systèmes dont on veut éviter la maintenance à long terme.

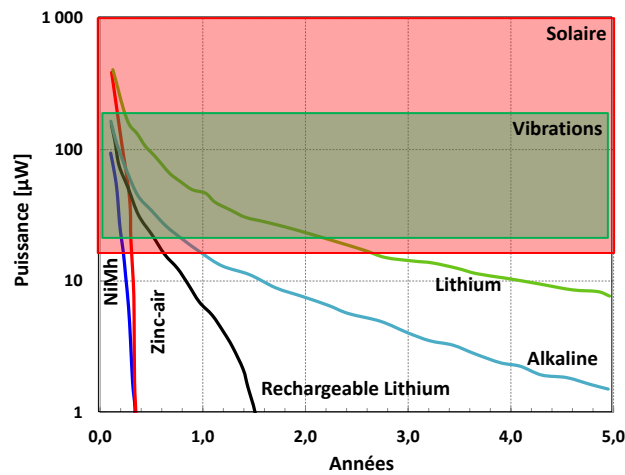


Fig. 10 - Comparaison de la puissance disponible au cours des années selon la source d'énergie, d'après [38].

La récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes est un domaine en pleine expansion et largement exploré par les chercheurs : entre 2005 et 2009, 10 articles de synthèse [39-48], analysant 483 dispositifs conçus et fabriqués par les dizaines d'équipes mobilisées sur le sujet, ont été publiés. Les énergies récupérées sont principalement les vibrations (vibrations, chocs, mouvements), le rayonnement solaire et les gradients de température ; la répartition est présentée dans la Fig. 11¹⁴.

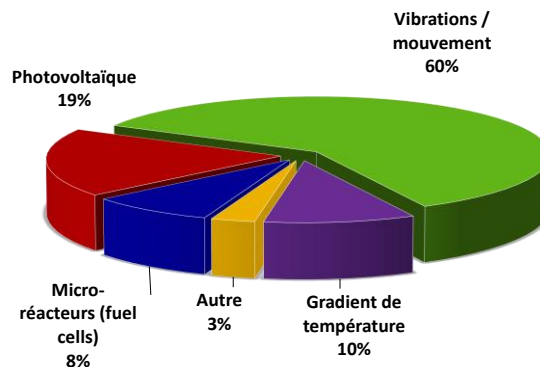


Fig. 11 – Nature des sources d'énergie pour microsyntèmes autonomes dans les 10 articles de synthèse publiés entre 2005 et 2009. La récupération d'énergie à partir des vibrations domine, notamment parce que c'est une source très courante aux abords d'une activité « humaine » (au sens large : trafic routier, machines, mouvements).

Pour estimer la viabilité de cette stratégie, il est intéressant de regarder quelle puissance est disponible et dans quelles conditions. En effet, puisque l'énergie est récupérée dans l'environnement immédiat du capteur, la puissance récupérée est extrêmement dépendante de l'application.

4.2.3. Vibrations

L'énergie vibratoire fait l'objet d'intenses travaux de recherche puisque c'est une forme d'énergie présente en quantité significative aux abords de toutes les activités humaines. La puissance disponible

¹⁴ On notera cependant que la recherche sur les modules photovoltaïques est essentiellement portée par des dispositifs macroscopiques dédiés à la production résidentielle d'énergie : elle n'apparaît donc pas dans ces articles de synthèse.

varie donc très fortement avec la proximité et nature de la source des vibrations. Celle-ci est estimée à environ 10 à 200 $\mu\text{W}.\text{cm}^{-3}$ [44]. Le Tableau 7 compare des systèmes de SHM alimentés par récupération d'énergie présentés dans l'article de synthèse de Park *et al.* [49]. Les conditions énergétiques considérées sont à chaque fois irréaliment favorables, ce qui permet « artificiellement » l'alimentation des nœuds.

Réf.	Méthode	Dimensions	Puissance récupérée	Conditions
[50]	Electromagnétique	Environ ¹⁵ 400 cm^3	2,5 mW	Vibrations extrêmement amples (164 m.s^{-2} @ 102 Hz)
[51]	Piézoélectrique	Environ 700 cm^3	Alimentation d'un module <i>Telos</i>	Mesure de vibrations sur une pompe d'un pétrolier
[52]	Piézoélectrique	-	1 W ¹⁶	Le module de récupération n'est pas fabriqué, il est seulement discuté au vu de la consommation du nœud

Tableau 7 – réseaux de capteurs générant leur énergie à partir de vibrations, et appliqués au SHM, d'après [49].

4.2.4. Gradients de température

L'utilisation des gradients de température pour l'alimentation des microsystèmes autonomes a essentiellement été réservée aux applications exploitant l'énergie humaine (wearable autonomous systems). Les travaux de Starner *et al.* [53] sont encore la référence pour l'estimation de la puissance récupérable sur un être humain (voir Tableau 8), et la plupart des articles étudient les cellules thermoélectriques pour un gradient de 5 K. Il est en effet nécessaire de considérer l'écart de température lors de la mesure du rendement de la cellule puisque ceux-ci sont très fortement liés : une même cellule peut donner 25 $\text{mW.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ pour un écart de 70 K, et seulement 1,7 $\text{mW.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ pour un écart de 5 K), ce qui dénote d'une grande dégradation des performances à bas gradient.

Réf.	Puissance utile	Conditions
[40]	0.16 $\mu\text{W.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 5$ K) 10 $\text{mW.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 220$ K)	Soleil direct (sans nuages, en extérieur) à 100 mW/cm^2 .
[47]	25 $\text{mW.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 70$ K) 1,7 $\text{mW.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 5$ K)	laboratoire
[43]	De 14 $\mu\text{W.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 5$ K) à 60 $\mu\text{W.K}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ($\Delta T = 5$ K)	laboratoire

Tableau 8 - Bilan de l'énergie utile qui peut être extraite avec des cellules thermoélectriques d'après les articles de synthèse dédiés à l'alimentation des microsystèmes autonomes.

4.2.5. Rayonnement radiofréquence

Les équipes cherchant à alimenter des microsystèmes autonomes se sont intéressées au rayonnement radiofréquence en tant qu'énergie récupérable à cause de la grande densité d'émetteurs présents au sol (GSM, UMTS, FM, Wifi par exemple). Cependant l'énergie récupérable est très faible et nécessite soit un capteur de grande surface, soit que le capteur soit très proche de la source. Yeatman *et al.* [54] rappelle

¹⁵ Estimation à partir des données présentée dans l'article.

¹⁶ Consommation du nœud de mesure et traitement des données pour la détection de défauts dans les structures

qu'un champ électrique de 1 V.m^{-1} ne permet pas de récupérer plus de $0,26 \mu\text{W.m}^{-2}$, alors que le champ électrique près d'une source ne dépasse pas quelques V.m^{-1} . Un exemple de réalisation avec alimentation RF d'un nœud SHM a été présenté par Mascarenas *et al.* [30] : il récupérait $2,5 \text{ mW}$ mais avec une distance source/récepteurs (tous deux munis de cornets) de 61 cm . On voit ici que la source d'énergie est irréaliste au vu des puissances estimées par Yeatman *et al.* [54].

Ces sources RF ne sont pas accessibles à 11 km d'altitude, cependant il existe un rayonnement électromagnétique lié aux commandes électriques (utilisant un signal électrique 400 Hz dans des câbles), qui ne seront pas exploités ici car leur intensité est à la fois globalement trop faible et trop variable selon la position du nœud.

4.2.6. Rayonnement solaire

L'exploitation de source d'énergie a suscité de très nombreux travaux scientifiques, depuis la découverte de l'effet photovoltaïque en 1839 par Antoine Becquerel puis son application à la production électrique en 1954. Aujourd'hui, de nombreuses solutions commerciales existent pour exploiter cette source d'énergie et les meilleurs rendements vont jusqu'à $41,1 \%$ [55]. Les données sur l'énergie disponible sont présentées dans le Tableau 9

Réf.	Puissance moyenne ¹⁷ sol	Rendement typique cellule	Puissance moyenne utile	Conditions
[40]	-	20 à 25 %	12 à 18 mW.cm^{-2} selon capteur	Soleil direct (sans nuages, en extérieur) à 100 mW.cm^{-2}
[41]	57 mW.cm^{-2} en été $2,3$ à 11 mW.cm^{-2} en hiver	15 %	$4,6 \text{ mW.cm}^{-2}$ (minimum $0,34 \text{ mW.cm}^{-2}$ en hiver)	Régions tempérées, cellule à 15 % de rendement.
[42]	23 mW.cm^{-2} (Hollande) 46 mW.cm^{-2} (Tanzanie)	10 %	-	-
[45]		10 à 20 %	50 mW.cm^{-2}	Soleil direct (sans nuages, en extérieur), avec cellule 16-17 %
[43]	25 mW.cm^{-2}	2 à 15 %	$3,7 \text{ mW.cm}^{-2}$	Soleil direct (sans nuages, en extérieur)

Tableau 9 - Bilan de l'énergie solaire disponible et de l'énergie utile qui peut en être extraite d'après les articles de synthèse dédiés à l'alimentation des microsystèmes autonomes.

La puissance moyenne (sur une année, $24/24 \text{ h}$) reçue par la Terre est estimée à environ 25 mW.cm^{-2} , ce qui – en considérant des rendements de cellule photovoltaïque de 15 % – permet de fournir $3,7 \text{ mW.cm}^{-2}$ au capteur. Cependant, ces estimations considèrent un ensoleillement direct toute l'année, toute la journée, ce qui fausse l'estimation de la puissance moyenne en situation réelle. En corrigeant les données d'éclairement de ce biais, Gilbert *et al.* [41] ont mis en évidence qu'en hiver (8 h d'ensoleillement par jour, le plus souvent occulté par des nuages) la puissance moyenne sur 24 h descend à $0,34 \text{ mW.cm}^{-2}$.

¹⁷ Rapportée à 12h de soleil par jour et 12h de nuit pendant laquelle la cellule ne récupère pas d'énergie.

4.3. Le stockage tampon de l'énergie récupérée

Tous les nœuds présentés à ce jour utilisent un stockage électrochimique « tampon ». En effet, dans la littérature, les chercheurs réduisent le rapport cyclique de fonctionnement de leur(s) capteur(s) afin d'en limiter la consommation : le capteur n'est pas maintenu en activité en permanence, et lorsque ce dernier est en veille, l'énergie récupérée est accumulée dans un réservoir temporaire. C'est un compromis entre la réduction nécessaire de la consommation électrique (pour qu'elle puisse être satisfaite par la récupération d'énergie) et la précision du suivi opéré par les capteurs.

Un autre cas de figure impose l'intégration d'un stockage tampon : le cas où la puissance récupérée est inégale dans le temps. Un exemple simple illustre cette situation : les capteurs en extérieur tirant leur énergie du rayonnement solaire et dont le fonctionnement doit être continu (jour et nuit, beau temps ou mauvais temps) doivent prévoir un stockage tampon alimenté par les surplus d'énergie récupéré lors de phases favorables (jour et beau temps) pour pallier le manque d'énergie lors de phases défavorables (nuit ou mauvais temps).

Un condensateur classique de cette capacité est souvent incompatible avec un module de taille millimétrique ou même centimétrique, c'est pourquoi la quasi-totalité des travaux recensés s'est reportée sur des piles Ni-MH (voir Tableau 10). Cependant ces éléments électrochimiques ne peuvent endurer plus d'un millier de cycle charge-décharge, au-delà de quoi leur capacité se dégrade fortement jusqu'à la panne. C'est également le cas des batteries (Lithium-ion ou Lithium-Polymère). Une solution pertinente est d'utiliser un condensateur électrochimique à double couche¹⁸ comme stockage tampon. Ces éléments peuvent endurer plusieurs centaines de milliers de cycles sans perte notable de capacité, mais présentent une capacité de stockage inférieure aux batteries et une autodécharge plus marquée. La comparaison précise, à la lumière du cahier des charges défini par Airbus, est présentée dans la section 5.6 page 45.

Le Tableau 10 liste quelques un des plus récents réseaux de capteurs autonomes alimentés par la récupération d'énergie et précise le stockage tampon utilisé, et la Fig. 12 présente un nœud exploitant deux supercondensateurs comme stockage temporaire.

Réf.	Energie récupérée	Dimensions	Puissance récupérée	Conditions	Stockage temporaire
[56]	Solaire	13,5 x 17,4 cm ²	25 mA @ 5V	Journée ensoleillée	pile Ni-MH
[57]	Solaire	9,5 x 20 cm ²	10 mA @ 5V	1 semaine en extérieur, assez d'énergie pour alimenter un nœud Mica2 à 20 % de rapport cyclique	2 piles Ni-MH
[58]	Solaire	5,7 x 6,3 x 2,5 cm ³	30 mA @ 5 V	Panneau à 5 cm de tubes fluorescents	supercondensateurs

Tableau 10 - Réseau de capteurs autonomes et leur source d'énergie

¹⁸ Aussi appelés EDLC pour Electrochemical Double Layer Capacitor, ou supercondensateurs.

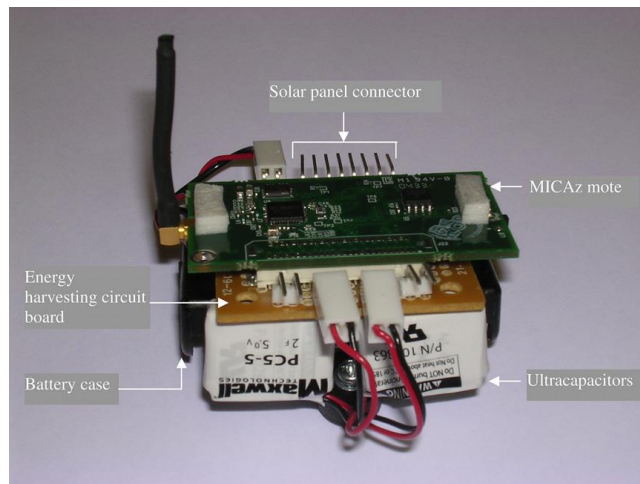


Fig. 12 – nœud sans le panneau solaire, d'après [58]. Le stockage tampon (2 supercondensateurs de 2 F chacun) occupe l'essentiel du volume du dispositif.

Nous avons dressé un état des lieux des besoins et des ressources énergétiques des microsystèmes autonomes, organisés en réseau pour la surveillance de santé des structures mécaniques. Dans la prochaine section, nous établirons les objectifs de ce travail de thèse sur la base du cahier des charges du projet AUTOSSENS qui lui sert de cadre. La problématique des réseaux de capteurs dans le cas particulier des structures aéronautiques est ainsi détaillée.

5. Quelles stratégies énergétiques pour l'autonomie énergétique d'un capteur destiné à la surveillance d'une structure aéronautique ?

5.1. Intérêts dans la problématique industrielle aéronautique

Avec la maturité des technologies de communications sans fil et la disponibilité de microsystèmes constituant le nœud d'un système communiquant, la mise en réseau de capteurs de surveillance pour le contrôle de santé de structure aéronautique promet des développements importants à l'avenir car cela :

- permettra la flexibilité dans l'installation et l'exploitation (reconfiguration possible)
- sera plus rapide à mettre en œuvre
- amènera une réduction des coûts d'installation importante
- permettra une meilleure prédiction des maintenances ou réparation.

Le réseau de capteurs appliqué à la surveillance de santé de structure, permet d'estimer à tout moment le degré de fatigue d'un système et permet donc de programmer des réparations préventives à moindre

coût (éléments moins endommagés, révisions plus espacées) tout en augmentant la sûreté de fonctionnement.

La surveillance de structures par réseau de capteurs est donc un enjeu industriel majeur en aéronautique, puisqu'il permet de réduire la maintenance aux seuls éléments présentant des signes avant-coureurs de défaillance qui auraient été détectés par un ou plusieurs capteurs du réseau [59]. En aéronautique, c'est une technique d'autant plus pertinente que la dernière décennie a vu le recours croissant aux matériaux composites légers et performants [60]. Ces matériaux permettent un gain de 25 à 30 % en masse par rapport à un alliage d'aluminium ; le surcoût (environ 30 €/kg) du matériau brut est en partie compensé par une plus grande facilité d'utilisation qui réduit les coûts de fabrication des structures aéronautiques d'environ 50 % par rapport à une solution métallique. Au-delà de leur densité réduite, les matériaux composites offrent une plus grande résistance à la fatigue mécanique et à la corrosion. L'effort conjugué et permanent de réduction de la masse des aéronefs et d'amélioration de la solidité de leur structure pousse les équipes de développement à utiliser ces nouveaux matériaux¹⁹ dont la fiabilité (qualité des procédés de fabrication, contraintes induites par l'assemblage sur la structure, vieillissement en utilisation) n'est connue que partiellement, le plus souvent en ayant recours à des projections à partir de tests en laboratoire. Ces caractérisations sont d'autant plus délicates que ces matériaux sont inhomogènes (constitués de maillages de fibres imprégnées) et anisotropes, et de nombreux travaux récents cherchent à modéliser l'évolution d'endommagements de tels matériaux [61-63] pour en prédire leur évolution.

Le domaine de la SHM, né de la combinaison des méthodes d'évaluation non destructive (NDE pour Non Destructive Evaluation en anglais) et des nouvelles techniques de détection et d'actionnement, a permis de créer des systèmes de surveillance intelligents installés en permanence sur des structures. Dès sa conception, de nombreux chercheurs travaillant sur des projets SHM ont présenté leurs travaux lors de conférences NDE. La première conférence consacrée à la SHM a été créée par le professeur Fu-Kuo Chang en 1997, et appelée International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM). Aujourd'hui, il existe plusieurs revues et conférences à travers le monde qui comprennent des sections consacrées à SHM²⁰.

5.2. Cahier des charges du projet AUTOSSENS

5.2.1. Contexte de ce travail

Ce travail de thèse de doctorat est financé par le projet AUTOSSENS, cofinancé par la FRAE²¹ et le CNRS. Démarré en mai 2007, le projet a pour objectif de concevoir et intégrer un microsystème de

¹⁹ Par exemple l'Airbus A320 compte 4500 kg de matériaux composites, soit 20 % de sa masse totale à vide.

²⁰ Citons parmi les journaux : Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Smart Materials and Structures, Structural Health Monitoring, Structural Control and Health Monitoring, Structural Durability & Health Monitoring, Smart Materials Bulletin.

²¹ Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, constituée notamment d'Airbus, Safran, Thalès, EADS, du CEA, du CNRS, de l'ONERA et de l'ISAE.

récupération et de gestion de l'énergie pour l'alimentation de capteurs embarqués. La collaboration d'Airbus a donné une application cadre : la surveillance de santé de structure aéronautique.

5.2.2. Contraintes d'encombrement et d'environnement

Le dispositif est destiné à être intégré à la structure de l'avion pour y détecter les défauts dans la structure, il faut donc que sa hauteur soit minimale pour ne pas en perturber l'aérodynamisme : l'épaisseur maximale autorisée est de 5 mm. Pour des raisons similaires, le système pourra être intégré dans la structure et donc pourra ne pas avoir accès au rayonnement solaire. La surface disponible pour le dispositif est de 10×10 cm. Par ailleurs l'orientation du système par rapport à la gravité (dessous/dessus) ainsi que son assiette²² et son roulis²³ ne devront pas avoir d'incidence sensible sur son fonctionnement. La durée de vie du dispositif doit égaler celle de l'avion, soit 40 ans.

L'environnement auquel est exposé le système est particulièrement exigeant puisque la température varie entre -50 °C et + 80°C. Il faut s'assurer que tous les éléments peuvent endurer ces températures, notamment les systèmes de stockage électrochimique de l'énergie.

5.2.3. Contraintes générales sur la source d'énergie

Consommation

Les progrès continus de l'électronique ont permis une très importante réduction de la consommation énergétique des composants. Ainsi, pour fonctionner, un nœud du réseau de capteur aura besoin (en moyenne) de quelques microwatts d'énergie. L'estimation précise²⁴ de cette consommation sort du cadre de ce travail puisqu'elle dépend fortement de l'architecture du réseau, du type de mesure voulu et de la fréquence de mesure. On se fixera un objectif compris entre 1 et 20 μW sur toute la durée du vol, fixé à 10 h.

Energie vibratoire disponible

Les vibrations mécaniques ont été enregistrées en novembre 2005 par Airbus sur un A380 et un A400M. La fréquence de plus grande amplitude est 50 Hz, et l'amplitude varie entre 0,01g²⁵ (A380 en vol), 0,1g (A380 au décollage et à l'atterrissage) et 0,5g (A400M au décollage et atterrissage). Ces niveaux de vibration sont faibles, notablement plus faibles que les accélérations auxquelles ont été testé la quasi-totalité de dispositifs de récupération de vibration de la littérature. Cela constitue le défi principal de ce travail : fournir plusieurs microwatts d'énergie à partir de si faibles vibrations incidentes.

Autres sources disponibles

²² L'assiette désigne la position ou l'état d'équilibre d'un élément dans son milieu par rapport au plan horizontal.

²³ Le roulis est un mouvement de rotation d'un mobile autour de son axe longitudinal.

²⁴ D'autres auteurs [28], [64], [65], [30] ont estimé cette consommation entre 1 et 20 μW , soit par exemple 11 μW pour un accéléromètre effectuant une mesure toutes les 2 s.

²⁵ Conformément à la proposition de normalisation des données sur la récupération d'énergie proposée par Park *et al.* dans [66] les amplitudes de vibration sont exprimées crête à crête en fraction de l'accélération de la pesanteur terrestre ($1g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$). Pour éviter toute confusion l'unité de masse [g] est désignée par n'est pas en italique et est séparée d'un espace de la quantité.

D'autres sources d'énergie sont disponibles dans l'application envisagée : notamment, le solaire, les gradients thermiques ou les gradients de pression. Dans le cas du solaire, l'intégration du nœud dans la structure empêche l'utilisation d'un module photovoltaïque. Par contre, la récupération de l'énergie disponible à travers le gradient thermique créé lors du décollage ou de l'atterrissage fait l'objet d'un développement au sein du projet AUTOSSENS [67], en parallèle de ce travail de thèse. Un dispositif a été réalisé par Bailly *et al.* : il s'agit d'un cube (d'environ 12 cm³) rempli d'eau dont l'une des faces est exposée à une cellule thermoélectrique Micropelt MPGD602 de 2,47 × 2,47 mm². L'autre face de cette cellule est exposée à l'environnement. Lorsque l'avion monte en altitude la température de la face extérieure décroît rapidement jusqu'à -56,5 °C, alors que la température de l'eau dans le réservoir décroît plus lentement. Ce décalage crée un gradient dont la cellule thermoélectrique peut extraire de l'énergie : lors d'une simulation d'un vol Paris-Toulouse (1h15), il a été montré qu'il est possible de récupérer 34 J d'énergie électrique. Cependant cette source d'énergie suppose un stockage tampon de grande capacité puisque 80 % de l'énergie est récupérée dans les 40 premières minutes de vol (décollage) quelles que soit la durée du vol. Cette source peut difficilement être envisagée pour alimenter seule un microsystème autonome de façon fiable puisqu'elle dépend beaucoup des conditions climatiques. Plus spécifiquement, si l'avion décolle d'un aéroport dont la température au sol est inférieure à 0 °C, le décalage de température ne sera plus accentué par le temps de solidification de l'eau et sera limité à quelques K. Avec un si faible gradient de température le rendement de la cellule thermoélectrique sera très largement dégradé. Ainsi, à terme, il sera nécessaire d'envisager une configuration multi-sources comportant de la récupération d'énergie par une cellule thermoélectrique et par un transducteur piézoélectrique. Ce travail de thèse privilégie la piste de la récupération d'énergie vibratoire qui constitue une source faible mais continue (dès le démarrage des moteurs).

5.2.4. Contraintes générales sur le stockage de l'énergie

Dans le projet AUTOSSENS, les vibrations incidentes étant de très faible amplitude, l'énergie qui en sera retirée pourra être trop faible pour alimenter en direct le capteur. Par ailleurs, l'amplitude des vibrations est un ordre de grandeur plus grand en phase de décollage/atterrissage qu'en phase de croisière : un stockage de l'énergie captée est donc nécessaire. Comme l'ensemble du système, l'élément de stockage électrochimique doit être fonctionnel aux températures définies précédemment : de -50 °C à + 80 °C. Cet élément doit également supporter une utilisation multiple chaque jour pendant plusieurs années, sans dégradation sensible des performances.

Ces contraintes particulières éliminent la possibilité de recourir à une batterie. En effet, en dessous de 0 °C une batterie Li-Po présente déjà une capacité dégradée, et elle cesse d'être fonctionnelle en dessous de -20 °C [68]. D'un point de vue durée de vie, les batteries ne peuvent endurer plus d'un millier de cycle charge/décharge sans dégradation de leur performances²⁶. Il faut donc stocker les charges accumulées

²⁶ Notamment parce l'insertion des ions lithium entraîne un gonflement/dégonflement des feuillets de graphite qui constituent l'électrode négative de l'accumulateur, ce qui fatigue le matériau et entraîne des ruptures.

dans un composant reposant sur un stockage de type électrostatique : condensateur ou supercondensateur.

Une synthèse du cahier des charges rédigé en collaboration avec Airbus au début du projet est présentée dans le Tableau 11 ci-dessous :

Nature	Contrainte	Principaux éléments impactés
Durée de vie	40 ans	Impossibilité d'utiliser les batteries
Utilisation	> 10 000 cycles ²⁷	-
Dimensions	100 × 100 × 5 mm	-
Position	dans la structure de l'avion	Pas de photovoltaïque possible
Orientation	tous sens	Récupérateur de vibrations
Durée de vol	10 h	Stockage tampon
Puissance moyenne à fournir	1 à 20 μ W	Récupérateur de vibrations, stockage tampon
Vibrations incidentes min	0,01g @ 40-80 Hz	Récupérateur de vibrations
Vibrations incidentes max	0,5g @ 40-80 Hz	Récupérateur de vibrations
Température de fonctionnement	-50 °C à 80 °C	Impossibilité d'utiliser les batteries

Tableau 11 – synthèse du cahier des charges AUTOSENS

5.3. Architecture de base d'un microsystème autonomes destiné à la surveillance d'une structure aéronautique

Au vu des sources d'énergie pertinentes (par rapport à l'environnement et à l'application) retenues, le microsystème autonome de surveillance a une architecture (voir Fig. 13) découpable en trois blocs :

- Bloc de récupération (module de récupération de vibration, cellule thermoélectrique)
- Bloc de stockage tampon (supercondensateur)
- Bloc où l'énergie est consommée (conditionnement de l'énergie, gestion des composants, mesure, communication radio des données recueillies).

²⁷ 40 ans à raison d'un cycle par jour représentent 14 600 cycles.

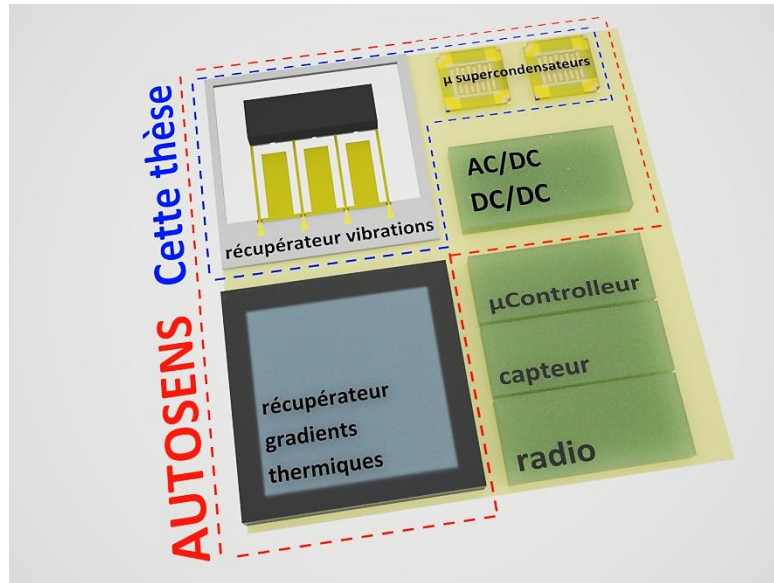


Fig. 13 – Architecture d'un microsystème autonome alimenté par un module de récupération de vibration et une cellule thermoélectrique.

Le projet AUTOSSENS ne vise la conception/fabrication que d'un module d'alimentation pour capteur autonome communiquant sans fil. Ainsi les capteurs, microprocesseur et émetteur RF sont mis de côté pour cette étude. Au sein du projet AUTOSSENS, cette thèse ne traite que la récupération d'énergie des vibrations et le stockage des charges ainsi générées.

5.4. L'intérêt de la technologie MEMS pour intégrer l'énergie avec le capteur

L'état actuel de la technologie ne permet pas de construire un système de récupération et de traitement de l'énergie avec de telles contraintes d'encombrement : un des objectifs de ce travail est de concevoir et fabriquer un tel système miniature. Il existe deux options pour cette réalisation : un dispositif monolithique silicium ou un dispositif hétérogène.

Une réalisation monolithique silicium du module de récupération et du module de stockage présente les avantages suivant :

- La réduction des pertes d'énergie liées aux résistances de contact et d'interconnexions. Dans notre système la source sera au plus près de l'électronique de gestion et du dispositif de stockage de l'énergie.
- La miniaturisation pour limiter le volume du nœud et notamment son épaisseur à 5 mm.
- Une bonne précision : la fabrication des dispositifs vibrants de récupération de l'énergie nécessite une bonne résolution puisque la fréquence de résonance dépend des dimensions. La technologie de photolithographie disponible au LAAS permet une résolution de 1 μm .

- La possibilité de production en volume pour réduire les coûts : les procédés technologiques mis au point en technologie silicium permettent la production d'un grand nombre de pièce en parallèle.
- La pérennité technologique : en concevant un procédé de fabrication basé sur des opérations classiques de la technologie silicium, nous nous assurons que les développements pourront être réutilisés comme brique technologique dans la fabrication d'autres dispositifs.

Cependant une réalisation suivant cette technologique des modules de récupération et stockage est lourde et laisse trop peu de place à la recherche sur les différents blocs (récupération à partir des vibrations, micro-supercondensateurs, circuit AC/DC et DC/DC). Pour cette raison nous allons construire un dispositif hétérogène, mais dont les blocs de récupération d'énergie à partir de vibrations et de micro-supercondensateur seront réalisés en technologie silicium. Nous nous assurerons que les technologies pour ces deux blocs sont compatibles entre elles. **Le développement de tels procédés, couplé avec la réalisation d'un dispositif complet hétérogène, permettra une validation de l'architecture et des performances à moins coût (temps, financement), tout en ouvrant la voie d'une réalisation monolithique silicium future.**

5.5. L'énergie vibratoire disponible dans l'environnement capteur

Pour estimer la viabilité de l'alimentation par un dispositif de récupération d'énergie et identifier les défis, il faut estimer l'énergie disponible dans l'environnement immédiat du capteur. Les vibrations mécaniques sont omniprésentes dans la structure d'un avion. On peut en distinguer deux sortes :

- Les vibrations dues aux turbulences (frottement) et au bruit de l'air. Ces vibrations ont une fréquence aléatoire.
- Les vibrations dues au fonctionnement des moteurs. Ces vibrations ont une fréquence et une amplitude qui ne dépend – pour un avion donné – que du régime des moteurs.

Les spectres de vibrations enregistrés par Airbus montrent que la vibration de plus grande amplitude a une fréquence entre 40 et 80 Hz, et correspond à une accélération allant de 0,5g au décollage (0,98 m.s⁻²) à 0,01g (0,098 m.s⁻²) en régime de croisière.

Il n'est pas trivial d'estimer la puissance récupérable à partir de cette accélération indépendamment du transducteur employé. Von Büren [69] *et al.* ont établi une expression pour une accélération a_{max} correspondant à un déplacement Y_0 , une pulsation ω , une masse m et un déplacement maximal Z_l :

$$P_{max} = \frac{2}{\pi} Y_0 Z_l m \omega^3 \quad (1)$$

Nos contraintes de volume nous limitent à une masse de 2 g, et un déplacement de 2,5 mm ce qui donne une puissance récupérable de 413 μW à 0,1g et 41,3 μW à 0,01g. On remarque que la puissance dépendant de la fréquence à la puissance 3, **la récupération d'une quantité utile d'énergie avec un dispositif technologie silicium à partir de vibrations basse fréquence constitue un défi certain.**

5.6. Pré-dimensionnement du dispositif de stockage tampon

Nous avons vu précédemment que le dispositif de stockage choisi dans le cadre de cette thèse était un dispositif capacitif fonctionnant sur le mode électrostatique, de type condensateur ou supercondensateur, dont la durée de vie et les températures de fonctionnement sont compatibles avec le cahier des charges (Tableau 11).

Le composant de stockage doit au mieux assurer l'alimentation électrique du capteur et de l'électronique pendant les quelques millisecondes d'activité (20 ms pour les éléments retenus dans la section 4.1) à partir de l'énergie récupérée qu'il aura emmagasiné. Dans ce cas de figure, pour une consommation moyenne fixée à 20 μW , cela correspond à une énergie de 40 μJ (1 mesure toutes les 2 s). Dans le cadre d'un nœud millimétrique ou centimétrique c'est une solution envisageable pour un condensateur classique : les condensateurs au format CMS offrent une capacité surfacique suffisante (par exemple 15 à 22 μF sous 4 V pour 3,2×1,6×1,6 mm³ pour des condensateurs à l'oxyde de niobium [70])

L'élément de stockage tampon du nœud doit au pire être capable de stocker l'énergie nécessaire au capteur pour toute la durée du vol, car le régime de croisière est critique : une récupération de l'énergie vibratoire théorique de 41,3 μW (pour 0,01g) pour une consommation des capteurs de 20 μW peut s'avérer insuffisante dans certains cas de figure : pics de consommation lors des mesures des capteurs, fuites dans les circuits/composants. L'énergie totale à fournir est dans ce cas de 720 mJ (20 μW pendant 10 h), ce qui nécessite une capacité de stockage de 230 mF²⁸. Si on considère que la surface allouée au stockage tampon est de 2 cm², seul un supercondensateur peut atteindre cette densité d'énergie (**115 mF.cm⁻²**). **L'intégration sur silicium de supercondensateurs ayant une telle densité d'énergie est un défi au regard de l'état de la technique (détaillée dans le 3^{ème} chapitre), et constitue l'un des deux objectif de cette thèse.**

6. Conclusion et objectifs/défis de cette thèse

La récupération de l'énergie ambiante est une innovation de rupture dans l'alimentation des réseaux de capteurs autonomes. Elle permet de satisfaire aux deux attentes qui motivent le déploiement de ces réseaux pour la surveillance de santé de structures aéronautiques : la légèreté (par rapport à une solution câblée) et la durée de vie (par rapport à une solution sur batterie). Cette technologie apporte une pertinence nouvelle à la surveillance de santé de structures aéronautiques en augmentant la fiabilité de

²⁸ Sur la base d'une tension maximale de 2,5 V : $E = CU^2/2$ donc $C = 2E/U^2 = 230 \text{ mF}$.

fonctionnement à travers la détection et la localisation des défauts lorsqu'ils apparaissent, ouvrant ainsi un champ plus libre à l'utilisation de matériaux nouveaux (comme les matériaux composites) ou de structures nouvelles dont le vieillissement est encore mal connu.

Dans ce contexte, le projet AUTOSSENS répond à un double défi : concevoir et fabriquer un dispositif millimétrique capable de récupérer quelques dizaines de μW à partir de vibrations de très faible amplitude, ainsi qu'un supercondensateur (de dimensions millimétriques) capable de stocker assez d'énergie pour assurer le fonctionnement du nœud pendant les 10 h de vol. Une quadruple contrainte pèse sur ces éléments : une contrainte d'espace (pas plus de 5 mm de hauteur et 100 cm^2), une contrainte d'environnement (exposition à des températures variant entre $-50\text{ }^\circ\text{C}$ et $80\text{ }^\circ\text{C}$), une contrainte de fiabilité (usage prévu pour 40 ans) et une contrainte de très faible puissance électrique (il faut récupérer le maximum d'une très faible énergie vibratoire et perdre le moins possible de cette énergie jusqu'au capteur).

Nous avons donc identifié 2 objectifs pour ce travail de thèse :

3. La conception et le développement d'un procédé de fabrication d'un dispositif de récupération d'énergie à partir de vibration basse fréquence (40-80 Hz) et basse amplitude (0,01g-0,5g) compatible avec la technologie silicium.
4. La conception et le développement d'un procédé de fabrication d'un micro-supercondensateur de grande capacité surfacique (115 mF.cm^{-2}) compatible avec la technologie silicium.

Les briques technologiques devront être développées au LAAS, avec l'appui de la centrale technologique (salle blanche et équipements de la filière microsystemes, salle de caractérisation, outils de simulation).

Le chapitre 2 de ce mémoire présente l'état de l'art de la récupération d'énergie à partir de vibrations, et situe les défis qui ont mené à la conception, la fabrication et la caractérisation d'un générateur piézoélectrique, lesquelles sont présentées ensuite. Le chapitre 3 présente l'état de l'art de l'intégration des supercondensateurs sur silicium, puis la conception et le développement d'un procédé de fabrication et d'encapsulation de micro-supercondensateurs à électrolyte organique liquide. Enfin le chapitre 4 présentera le fonctionnement d'un système simple intégrant le générateur et le micro-supercondensateur.

Chapitre 2

Conception, fabrication et caractérisation du
générateur piézoélectrique

1. Introduction

Le chapitre 1 a situé notre travail dans le contexte des réseaux de capteurs autonomes appliqués à la surveillance de santé de structures aéronautiques, et a présenté les deux objectifs de cette thèse : la conception et la fabrication d'un dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations et d'un dispositif de stockage électrostatique, tous deux sur silicium. Nous avons donné le cahier des charges de l'application que nous visons et établi quelques choix de conception préliminaires.

Ce chapitre sera consacré à la conception, la modélisation et la caractérisation du dispositif de récupération des vibrations d'une structure aéronautique pour délivrer une puissance électrique capable d'alimenter un capteur et son électronique. Il est construit en quatre parties : dans une première partie, nous rappellerons le principe sur lequel sont basés les systèmes de récupération de vibration ainsi que les différents mécanismes de conversion possibles. A l'issue de cette première partie, nous aurons donné tous les éléments qui permettront la conception. Une deuxième partie présentera la conception et la modélisation en vue de l'optimisation, de notre générateur que nous avons choisi basé sur la transduction piézoélectrique. Une troisième partie détaillera le procédé de fabrication et discutera des difficultés rencontrées. Enfin la dernière partie présentera les caractérisations des dispositifs fabriqués et se terminera sur une analyse des performances par rapport à la littérature.

2. Conversion des vibrations mécaniques en énergie électrique

2.1. Principe des générateurs inertiels

La récupération de l'énergie de vibrations mécaniques est basée sur l'utilisation d'un système inertiel qui entre en résonance avec l'excitation à laquelle le système est soumis. Il faut donc que sa fréquence propre soit égale ou proche de celle de l'excitation. La Fig. 14 schématise le fonctionnement d'un générateur inertiel : une masse m est reliée par un ressort de raideur k à une base en mouvement $y(t)$. La génération de charges électriques se fait par un mécanisme de transduction (électromagnétique, électrostatique ou piézoélectrique) qui amortit le mouvement $z(t)$ de la masse par rapport à la base (en plus des amortissements « parasites » de l'air et de la structure du dispositif).

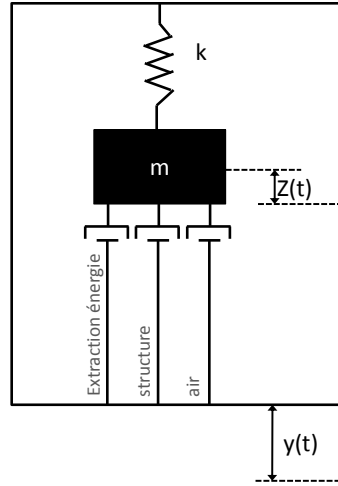


Fig. 14 – schéma de principe général d'un générateur d'énergie à partir de vibration inertiel

L'énergie récupérable est une grandeur difficile à expliciter, et des méthodes de calcul sont proposées dans la section 2.2. Cependant Yates *et al.* ont introduit en 1996 [1], dans une des toutes premières contributions à la récupération d'énergie à partir de vibrations, un modèle au premier ordre prédisant le comportement général (puissance générée, fréquence de résonance, résistance optimale) d'un générateur inertiel. Le modèle décrit imparfaitement l'amortissement piézoélectrique (non visqueux en réalité [2-4]) mais il établit une expression de la puissance maximale P à la résonance (3) à partir de l'équation du mouvement de l'oscillateur amorti (2). Dans ces expressions, b_{elec} et $b_{méca}$ sont respectivement l'amortissement électrique (extraction de l'énergie après conversion) et mécanique (air, structure), ξ_e l'amortissement électrique réduit (défini en (4)), ξ_m l'amortissement mécanique réduit (défini en (5)), ω_n la pulsation propre du dispositif et A l'amplitude de l'accélération des vibrations.

$$m\ddot{z} + (b_{elec} + b_{méca})\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (2)$$

$$P = \frac{m\xi_e A^2}{4(\xi_e + \xi_m)^2 \omega_n} \quad (3)$$

$$b_e = 2m\xi_e \omega_n \quad (4)$$

$$b_m = 2m\xi_m \omega_n \quad (5)$$

Cette expression permet de remarquer que la puissance générée est proportionnelle à la masse m en mouvement et au carré de l'accélération, et inversement proportionnelle à la fréquence de résonance. Dans le spectre des vibrations de l'environnement il faut donc repérer la basse fréquence de plus grande amplitude et concevoir un dispositif résonant à cette fréquence avec la plus grande masse possible compte tenu du volume imparti. Par ailleurs, comme tout système résonant amorti, le générateur possède une réponse en fréquence de type passe-bande, et il y a donc un compromis nécessaire entre la puissance maximale générée et la sélectivité du dispositif, qui sera traité dans la section 4.3.

2.2. Energie disponible

Tous les dispositifs présentés dans la littérature ont été caractérisés dans des conditions de vibration différentes (amplitude et fréquence²⁹) : il est alors difficile de comparer la seule puissance ou densité de puissance générée et discuter l'intérêt des designs et techniques mis en œuvre. Il faut donc établir l'expression de la puissance maximale récupérable – indépendamment du dispositif – pour une vibration de fréquence et d'amplitude donnée. Mitcheson *et al.* [5-7] et Von Büren *et al.* [8] ont discuté de l'établissement de cette expression et arrivent à l'équation (6), où Z_l est le débattement maximal permis à la masse (m) soumise à une vibration d'amplitude Y_0 et de pulsation ω . On remarque que :

- Cette puissance n'est pas donnée indépendamment du dispositif puisqu'elle requiert la connaissance de la masse sismique prise (ici 2 g) et de la hauteur maximale de débattement permise (ici 2,5 mm).
- la puissance récupérable variant avec le cube de la pulsation, les vibrations de basse fréquence sont relativement pauvres en énergie. Pour une vibration d'amplitude (crête à crête) 0,1g et de fréquence 50 Hz, cela représente un maximum de 413 μW à récupérer³⁰.

$$P_{max} = \frac{2}{\pi} Z_l m \omega^3 Y_0 \quad (6)$$

Il faut cependant noter que cette expression néglige toute forme d'amortissement parasite, c'est-à-dire autre que la transformation du mouvement en électricité comme par exemple l'amortissement structural ou les frottements de l'air. Cette expression ne tient pas du tout compte du mode de transduction, et pour pouvoir choisir, selon le contexte, un mode de transduction (électrostatique, électromagnétique ou piézoélectrique) sans être limité par l'état de la technique de fabrication³¹, Mitcheson *et al.* ont établi l'expression de la puissance maximale pour différentes topologies de générateurs. La puissance maximale récupérable pour des dispositifs à transduction électromagnétique ou piézoélectrique, issue de l'équation (7), vaut 324 μW ³² (toujours 0,1g à 50 Hz). Cependant il faut noter que ce calcul suppose que l'amortissement dû à la conversion piézoélectrique du mouvement en charges est une force visqueuse (proportionnelle à la vitesse), ce qui n'est pas exactement le cas.

$$P_{VDRG} = \frac{1}{2} Z_l m \omega^3 Y_0 \quad (7)$$

L'accélération des vibrations sera exprimée dans ce travail en multiples de l'accélération de la pesanteur g , avec $1g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Elle est exprimée en amplitude crête à crête conformément aux recommandations des auteurs de l'ouvrage de synthèse sur la récupération d'énergie à partir de vibrations [9]. Toutes les puissances et tensions électriques sont données en valeur RMS.

2.3. Mécanismes de transduction

²⁹ L'essentiel des auteurs considèrent une excitation harmonique.

³⁰ Le détail du calcul est présenté en annexe.

³¹ En effet l'état de la technique de fabrication peut fausser la pertinence d'un mode de transduction par rapport à un autre : les plus nombreux travaux sur les générateurs piézoélectriques ont pu rendre cette méthode plus optimisée et mieux maîtrisée que d'autres méthodes sans qu'elle soit fondamentalement plus efficace.

³² Le détail du calcul est présenté en annexe.

Il existe trois principaux mécanismes de transduction de puissance mécanique en puissance électrique pour les systèmes résonants : l'effet piézoélectrique, la conversion électrostatique ou électromagnétique. Il est possible de coupler deux principes pour réaliser des systèmes hybrides cumulant des caractéristiques et des performances de deux mécanismes de transduction [10-14].

2.3.1. Electromagnétique

Les dispositifs utilisant l'induction électromagnétique pour produire de l'énergie électrique à partir de vibrations consistent en un aimant et une bobine, mobiles l'un par rapport à l'autre : l'un est fixe tandis que le mouvement de l'autre est induit par les vibrations. Le flux du champ magnétique généré par l'aimant dans la bobine varie et cela génère un courant variable à travers la bobine. Ce type de transduction permet d'obtenir de très bon rendements de transduction mécanique-électrique à la faveur d'un facteur de qualité important (passe bande très étroit) mais l'intégration d'un dispositif électromagnétique aux faibles dimensions et en technologie silicium, reste un défi important.

2.3.2. Electrostatique

Les transducteurs électrostatiques sont des condensateurs plans dont une des plaques est fixe tandis que le mouvement de l'autre est induit par les vibrations. Deux modes de fonctionnement sont possibles : soit la charge des plaques est fixe (auquel cas la tension varie avec l'écartement entre les plaques), soit la tension entre les plaques est fixe. Ces dispositifs sont simples de principe et facilement réalisables en technologie silicium mais ils nécessitent une tension de polarisation initiale pour fonctionner, ce qui est un handicap dans un système autonome isolé comme le nôtre. Certaines équipes ont néanmoins contourné ce problème en utilisant des matériaux à polarisation permanente (électrets), mais leur intégration en technologie est difficile [15]. On citera également les travaux de Despesse *et al.* [16], qui ont produit un générateur électrostatique large bande (faible facteur de qualité électromécanique).

2.3.3. Piézoélectrique

Les dispositifs utilisant la transduction piézoélectrique exploitent la propriété de certains matériaux ferroélectriques : une polarisation apparaît à leurs bornes lorsqu'ils sont contraints. Cet effet sera présenté plus en détail dans la section qui suit. Ce sont les dispositifs les plus représentés dans la littérature puisqu'ils cumulent deux avantages sur les autres méthodes de transduction : ils sont relativement intégrables en technologie silicium et ne nécessitent pas de polarisation initiale contrairement aux transducteurs électrostatiques. Cependant cette transduction possède un rendement maximum théorique plus bas que les transductions électrostatique et électromagnétique.

2.3.4. Autres méthodes

D'autres méthodes de transduction ont été proposées mais leur rendement moindre ou leur difficile intégration dans une process silicium a limité leur impact, par exemple Wang *et al.* [17] ont proposé un dispositif reposant sur la magnétostriction.

2.3.5. Résumé et choix de la transduction piézoélectrique

Les principales caractéristiques communes de ces dispositifs sont résumées et comparées aux autres méthodes de transduction dans le Tableau 12.

		Electrostatique	Electromagnétique	Piézoélectrique
Densité d'énergie	micro	Forte (miniaturisation très performante)	Faible (miniaturisation délicate)	Moyenne (matériaux de moins bonne qualité)
	macro	Faible	Très forte	Forte
Miniaturisation/ comptabilité silicium		Matériaux faciles à intégrer	Bobine et aimant difficiles à intégrer en couches minces	Matériaux piézoélectriques en couches minces moins performants, gravure difficile
Problèmes spécifiques		Nécessité d'une polarisation, tension de fonctionnement élevée, Besoin de plaques parallèles	Tension de sortie très faible, facteur de qualité élevé	Rendement limité par les performances des matériaux, matériaux sensibles à la température

Tableau 12 - Comparaison des méthodes de transduction des vibrations

La transduction piézoélectrique est le mécanisme le plus pertinent vis-à-vis de notre application puisque :

- il n'y a pas de contrainte d'orientation (assiette, roulis) contrairement à la conversion électrostatique
- la tension de sortie – bien que dépendante des vibrations incidentes – est d'une manière générale à un niveau confortable (~ 1 à 10 V) pour l'électronique de gestion qui doit traiter le signal généré
- l'intégration ne dégrade pas trop les performances

L'efficacité du générateur piézoélectrique étant essentiellement limitée par les performances des matériaux, le défi technologique se situe dans l'intégration de matériaux piézoélectriques ayant de bonnes caractéristiques (nous aborderons ce point en détail dans la section 3.2).

3. Générateurs piézoélectriques

3.1. Principe de fonctionnement

3.1.1. L'effet piézoélectrique

Même si la première observation de l'effet piézoélectrique a été effectuée par le minéralogiste français R. Haüy en 1817, c'est aux frères Curie qu'on en attribue la découverte en 1880 à la suite de leurs travaux sur la relation entre structure cristalline et pyroélectricité. Un matériau piézoélectrique se déforme lorsqu'on applique une tension à ses bornes (c'est l'effet direct utilisé par les générateurs), et réciproquement une tension apparaît à ses bornes lorsque le matériau est contraint (c'est l'effet inverse).

La nature de l'effet piézoélectrique est étroitement liée à l'apparition de moments dipolaires électriques dans les solides lors de l'application d'une force. Celle-ci peut être soit induite par des ions sur des sites du réseau cristallin ayant un environnement de charge asymétrique (comme dans PbTiO_3 et PZT) ou peuvent être le fait de groupes moléculaires (comme dans le sucre). La Fig. 15 montre la maille cristalline du PbTiO_3 .

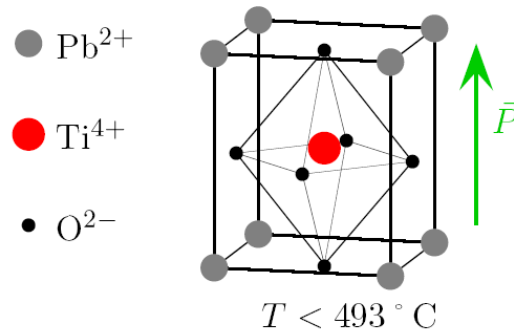


Fig. 15 - Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite : PbTiO_3

3.1.2. Equations constitutives

Les matériaux piézoélectriques étant anisotropes, leur comportement est modélisé par des tenseurs d'ordre 6, dont la numérotation des indices est précisée dans la Fig. 16. Six mouvements sont possibles : trois translations le long des axes (indices 1 à 3) et trois rotations autour de ces axes (indices 4 à 6). Dans un solide non piézoélectrique, les tenseurs de contrainte mécanique \mathbf{T} et de déformation \mathbf{S} sont liés par la conformité mécanique ; dans un matériau piézoélectrique le domaine mécanique est également couplé au domaine électrique par la matrice de coefficients de couplage \mathbf{d} .

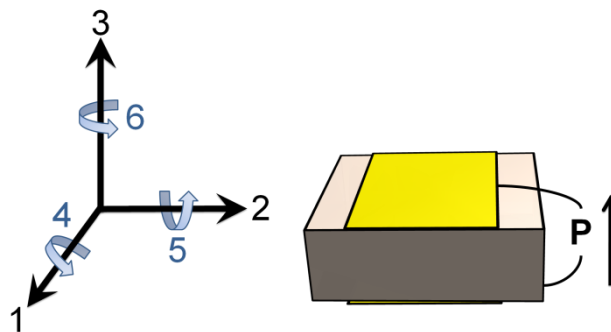


Fig. 16—Indices utilisés dans le formalisme piézoélectrique, pour un élément dont la polarisation a la direction et le sens de \mathbf{P} .

Les équations (8) établissent les relations entre le domaine mécanique et le domaine électrique, et les équations (9) détaillent les indices correspondants. Alors que dans le cas général il faudrait 36 coefficients pour la matrice de conformité mécanique et 18 pour celle de couplage piézoélectrique, la symétrie des matériaux ferroélectriques permet de limiter ces coefficients à respectivement 5 et 3³³.

³³ La direction de polarisation est notée 3 et les directions normales à cet axe sont notés 1.

$$\begin{cases} \mathbf{S} = s_E \mathbf{T} - \mathbf{d}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \varepsilon_T \mathbf{E} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix}}_{\text{flexibilité}} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{23} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{couplage}} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{couplage}} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}}_{\text{permittivité}} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

Variable	Nom	Unité
T	Contrainte	Pa
S	Déformation	-
E	Champ électrique	V.m ⁻¹
	Déplacement électrique	C.N ⁻¹
s _E	Flexibilité mécanique	Pa ⁻¹
d	Couplage piézoélectrique	C.m ⁻²
ε _T	Permittivité	F.m ⁻¹

Tableau 13 - Variables, paramètres et coefficients du formalisme piézoélectrique.

3.2. Matériaux piézoélectriques

Il existe plusieurs catégories de matériaux piézoélectriques :

- Les cristaux naturels (comme le quartz) offrant un comportement très linéaire ce qui en fait une excellente base pour des capteurs et résonateurs. Leurs coefficients de couplage piézoélectrique sont relativement faibles.
- Les nitrures comme l'AlN ou les oxydes complexes comme le Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ abrégé en PZT, le niobate de lithium LiNbO₃, le tantalate de lithium LiTaO₃, le PZN-xPT Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO₃, le PMN-xPT Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO₃, qui sont des matériaux ferroélectriques de structure pérovskite synthétisés pour la première fois en 1940.
- Les semi-conducteurs des groupes III-V de structure zinc-blende et II-VI de structure wurtzite.
- Les polymères, notamment le polyvinylidenedifluoride (PVDF) (-CH₂-CF₂)_n et ses dérivés.

Ils peuvent être présentés sous plusieurs formes :

- Un monocristal : c'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz ou la tourmaline, et c'est également sous cette forme qu'ils ont été utilisés dans les applications de première génération avant la mise au point des céramiques.

- Une céramique, ensemble de grains soudés entre eux par frittage. Les grains présentent une orientation dipolaire statistiquement isotrope³⁴; leur taille peut être contrôlée par les conditions de fabrication. C'est la forme la plus utilisée, principalement en raison de leur facilité de fabrication et des nombreuses propriétés qu'on peut obtenir en faisant varier la composition chimique et les paramètres de la fabrication.
- Un composite : le matériau piézoélectrique est divisé et plongé dans une matrice non piézoélectrique (une résine).
- Une couche mince : l'intégration des matériaux piézoélectriques en couches minces pour microsystèmes (MEMS) a ouvert la voie à de nombreuses applications de capteurs et actionneurs.

Le Tableau 14 présente les caractéristiques des quelques matériaux piézoélectriques courants :

Réf.	matériau	type	format	$d_{33}[\text{pC.N}^{-1}]$	$d_{31}[\text{pC.N}^{-1}]$	ϵ_r
[18]	PZT 5H	Oxyde	Céramique	690	-340	3900
[18]	PZT 5A	Oxyde	Céramique	400	-190	2000
[18]	PMN-0.3PT	Oxyde	Céramique	1700-2200	-1000	5500-7500
[19]	P(VDF-TrFE)	Polymère	Quasi-cristal	-37	-	-
[20]	MFC	Oxyde	Composite	400	-170	-
[21]	AlN 0,1 μm	Nitrure	Couche mince	-	2,4	-
[22]	AlN 2 μm	Nitrure	Couche mince	6,83	2,62	10
[23]	Quartz	Cristal	Mono-crystal	2	-	4,5

Tableau 14 - caractéristiques de matériaux piézoélectriques courants.

3.3. Les générateurs piézoélectriques macroscopiques et miniatures

Depuis plus d'une dizaine d'année, de nombreux dispositifs miniatures piézoélectriques à structure vibrante ont été proposés dans la littérature [24-32], [9] pour récupérer l'énergie de vibrations. La transduction de l'énergie vibratoire en énergie électrique requiert la compression et l'extension alternée du matériau piézoélectrique, et différentes topologies ont été explorées pour cela, par exemple en cymbale [33], [34] (voir Fig. 20), membrane ou ressort en S [24]. Cependant le format le plus répandu reste la poutre bimorphe (une couche de matériau inerte – silicium par exemple ou métal – pris en sandwich entre 2 couches de matériau piézoélectrique : Fig. 19) ou monomorphe (une seule couche de matériau piézoélectrique sur une couche de matériau inerte : Fig. 18)

Ces topologies de type poutre vibrante permet d'utiliser l'effet de levier et donc d'appliquer de fortes déformations sur le matériau piézoélectrique, tout en restant de fabrication relativement simple. Cependant cette topologie n'utilise que le mode 31 (voir Fig. 17) de l'élément piézoélectrique, dont le coefficient de couplage électromécanique d_{31} est plus faible que celui associé au mode 33 (coefficient d_{33}), ce qui limite les performances de tels dispositifs. Une disposition alternative des électrodes (voir Fig. 21)

³⁴ Une opération de polarisation est nécessaire pour rendre le matériau piézoélectrique : la céramique est portée à une température plus élevée que la température de Curie du matériau ce qui provoque la mobilité de l'orientation dipolaire des grains, puis une tension est appliquée à ses bornes ce qui oriente les domaines dans le même sens, puis la température est abaissée alors que la polarisation est maintenue, ce qui fige l'orientation des grains.

permet d'utiliser le mode 33 dans une configuration poutre mais l'optimisation des électrodes et de la poutre est alors plus difficile [35].

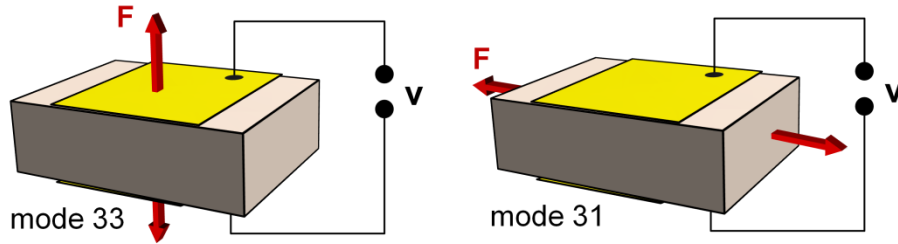


Fig. 17–Modes 31 et 33 : ces modes de fonctionnement dépendent de la direction relative de la polarisation et de la compression/extension

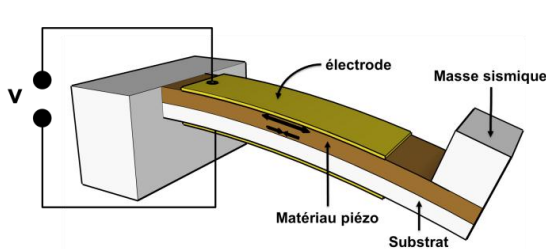


Fig. 18–dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre unimorphe.

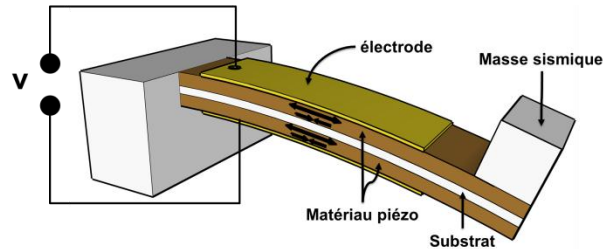


Fig. 19 – dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre bimorphe.

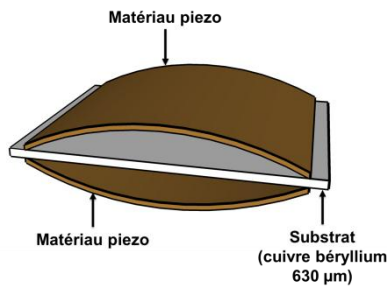


Fig. 20–dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format cymbale, d'après [33].

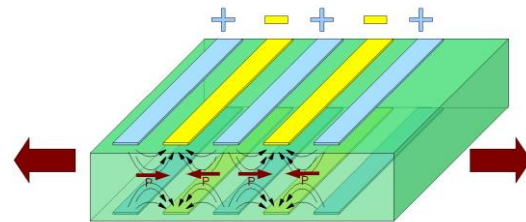


Fig. 21–configuration d'électrodes permettant d'exploiter le mode 33 en configuration poutre [35].

Parmi les nombreux dispositifs développés au format poutre vibrante, les travaux de S. Roundy (2003) ont eu un impact particulier : il a développé un générateur piézoélectrique bimorphe macroscopique (1 cm^3) ayant une fréquence de résonance de 60 Hz, capable de délivrer $180 \mu\text{W}$ électrique, sous une excitation sinusoïdale de $0,23\text{g}$ à 60 Hz ; la masse du système était de 8,2 g [36]. L'importante densité de puissance atteinte à partir de vibrations de faible amplitude a permis d'illustrer la viabilité des systèmes de récupération d'énergie à partir de vibrations, et de susciter à travers le monde de nombreux travaux visant la miniaturisation de ce type de dispositif.

3.4. Les générateurs piézoélectriques intégrés en technologie silicium

La miniaturisation (par micro-fabrication en technologie silicium) des générateurs d'énergie à partir de vibrations s'accompagne en général d'une perte d'efficacité qui a notamment été mise en évidence par

Mitcheson *et al.*, (voir Fig. 22. et Tableau 15) [25]. Cela est la conséquence de dimensions moins précises (relativement aux dimensions du dispositif), de découplages mécaniques proportionnellement plus importants³⁵ et de difficulté d'intégration de certains matériaux.

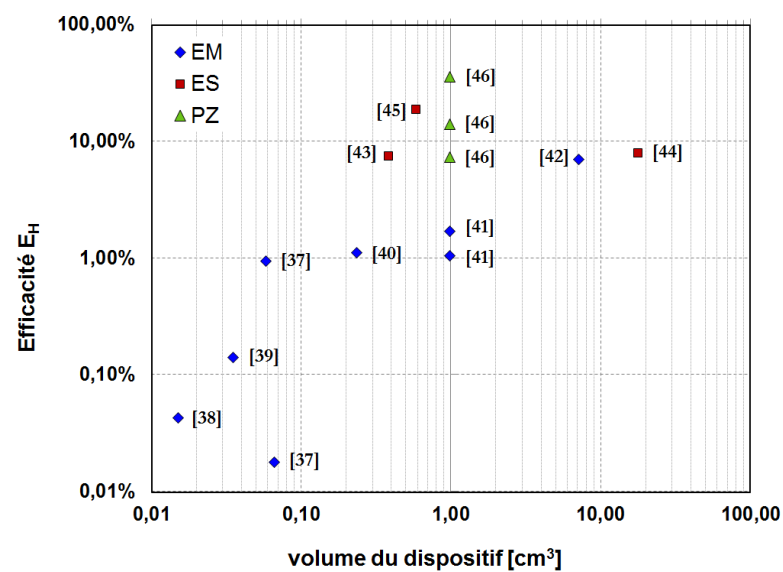


Fig. 22–Efficacité des générateurs d’énergie à partir de vibration en fonction de leur taille, d’après [25].

Réf.	Volume [cm³]	Masse [g]	Z _i [µm]	Amplitude [µm]	Fréquence [Hz]	Puissance [µW]	E _H [%]
[37]	0,06	0,44	217	0,62	350	2,85	0,15
[37]	0,07	0,03	240	0,98 10 ⁻³	9500	0,12	0,17 10 ⁻³
[38]	0,02	2,4 10 ⁻³	63	0,5	4400	0,33	0,04
[39]	0,04	0,03	5200	50	100	1,44	0,08
[40]	0,24	0,50	940	25	322	530	1,09
[41]	1,00	0,22	5000	200	60	100	1,70
[41]	1,00	0,22	1000	200	120	100	1,07
[42]	7,30	0,14	7500	150	85	830	6,92
[43]	0,4	0,65	1000	1000	10	15	7,42
[44]	18	104	90	90	50	1000	7,66
[45]	0,6	0,12	100	1130	20	2,4	17,9
[46]	1	8,5	150	4	120	80	7,3
[46]	1	7,5	143	7,9	85	90	14
[46]	1	8,5	150	16	60	180	34

Tableau 15 – générateurs d’énergie à partir de vibrations, d’après [25].

Plus spécifiquement, la miniaturisation par microfabrication en technologie silicium des générateurs piézoélectriques se heurte à l’intégration des matériaux piézoélectriques : en effet les performances de ces générateurs sont largement tributaires des caractéristiques de ces matériaux (section 2.3.3), or ceux-ci ont

³⁵ Une couche de colle de 10 µm d’épaisseur a plus d’impact sur un dispositif dont l’épaisseur des autres couches est du même ordre de grandeur que sur un dispositif macroscopique.

des performances largement dégradées en couches minces (section 3.2). Nous noterons par exemple les travaux de M. Marzencki *et al.* [35] qui ont développé en 2007 un microgénérateur ($2 \times 2 \times 0,45 \text{ mm}^3$) en technologie silicium capable de générer $0,265 \text{ }\mu\text{W}$, sous une excitation de $1,5g$ à 200 Hz . L'accélération choisie pour caractériser le dispositif paraît inappropriée pour une application réelle : ces travaux sont intéressants car permettent de valider la faisabilité technologique d'intégrer un générateur piézoélectrique sur silicium. En revanche, les niveaux d'énergie récupérés sont trop faibles pour en faire un dispositif fonctionnel et répondant à un cahier des charges applicatif. D'autres travaux de miniaturisation sont également intéressants mais ne seront pas développés ici, des articles de synthèse en font la revue [24-31].

Il y a donc un défi technologique dans l'intégration de matériaux piézoélectriques ayant de bonnes caractéristiques, et c'est un des verrous qui guide la conception du générateur piézoélectrique dans cette thèse.

4. Conception d'un générateur piézoélectrique pour récupérer les vibrations de structures aéronautiques

4.1. Contraintes initiales

Nous rappelons ici que notre objectif technologique est de concevoir un dispositif résonant en technologie silicium capable de récupérer les vibrations d'une structure aéronautique pour produire une puissance électrique capable d'alimenter un capteur et son électronique. Les niveaux d'accélération sont estimés entre $0,01g$ et $0,5g$ et la fréquence est comprise entre $40\text{-}80\text{Hz}$. Nous fixons comme objectif électrique une valeur de puissance minimale de $1 \text{ }\mu\text{W}$ sous une tension minimale de 1 V .

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 1 de ce mémoire, le microsystème complet (récupération, traitement, stockage, gestion, mesure) a une contrainte de dimension fixée à : $10 \times 10 \text{ cm}^2$ et 5 mm d'épaisseur. La contrainte sur l'épaisseur est liée au fait que ce dispositif est prévu pour être intégré sur la surface d'une structure aéronautique et donc ne doit pas entraîner de perturbations aérodynamiques. Enfin, nous avons choisi de réaliser le dispositif en technologie silicium car cela permet une bonne maîtrise des dimensions (ce qui est critique dans un dispositif résonant miniature) et cela permettra à termes d'intégrer le générateur, le dispositif de stockage et l'électronique sur un même substrat. De plus, le LAAS a une bonne expérience en prototypage silicium et dispose de moyens techniques suffisants pour concevoir, fabriquer et caractériser le générateur et le dispositif de stockage.

La contrainte d'épaisseur est surtout dimensionnante pour la masse sismique : en considérant la masse volumique du tungstène ($19\,350 \text{ kg.m}^{-3}$) nous ne pourrions avoir plus de $0,5 \text{ g}$ par poutre, soit une masse de hauteur $1,451 \text{ mm}$. En termes de surface, nous limiterons l'encombrement du convertisseur piézoélectrique à 3 cm^2 .

4.2. Le choix d'un dispositif résonant

Comme discuté à la section 2.1, le générateur inertiel résonant est simple et relativement efficace lorsque la fréquence de résonance du système correspond à la fréquence des vibrations incidentes. Cependant, dans une situation réelle, la fréquence de vibration peut varier ou la fréquence de résonance du système de récupération peut changer : par exemple, dans notre application où la gamme de température d'utilisation est étendue (-50 °C à + 80 °C), la rigidité des matériaux évolue, ce qui modifie la fréquence de résonance du dispositif.

Le passage du laboratoire (où les dispositifs sont caractérisés dans des conditions d'ambiance régulées) à des applications réelles a soulevé ces dernières années la problématique d'adaptation du dispositif à un environnement changeant, que ce soit la source des vibrations qui est incertaine (fréquence, amplitude), ou les conditions d'opération. En 2010, Zhu *et al.* [47] fait une synthèse des techniques mises en œuvre pour augmenter la réponse en fréquence (il distingue six méthodes) ou accorder la fréquence de résonance (il distingue deux méthodes) des dispositifs de récupération d'énergie :

- Accord par intervention mécanique (modification des dimensions, déplacement de la masse)
- Accord par intervention électrique (raidissement de couches piézoélectriques, modification du circuit de charge électrique)
- Elargissement de la réponse en fréquence globale en utilisant des oscillateurs multiples accordés différemment
- Elargissement de la réponse en fréquence par limitation de l'amplitude d'oscillation
- Elargissement de la réponse en fréquence par couplage d'oscillateurs
- Elargissement de la réponse en fréquence par exploitation d'oscillateurs en régime non linéaire (par exemple l'hystérésis des générateurs piézoélectriques soumis à des vibrations de forte amplitude)
- Elargissement de la réponse en fréquence par utilisation d'oscillateurs bistables.
- Elargissement de la réponse en fréquence par utilisation d'un oscillateur harmonique amorti ayant un faible facteur de qualité mécanique.

Les techniques d'accord sont complexes à concevoir et encore loin d'une utilisation aisée et industrielle.

Ainsi nous optons pour un oscillateur simple (masse au bout d'une poutre constituée d'une couche piézoélectrique sur une couche de substrat) ayant un faible facteur de qualité mécanique (cette caractéristique dépend des matériaux et de la géométrie de la poutre). Le matériau du substrat étant imposé (silicium), nous n'avons de latitude que sur le choix du matériau piézoélectrique et l'optimisation du design.

4.3. Choix du matériau piézoélectrique

L'utilisation de matériaux piézoélectriques dans les microsystèmes avait débuté avant la miniaturisation des générateurs piézoélectriques puisqu'ils sont utilisés pour la détection (capteurs, balances) et l'actionnement (gaz, liquides, mouvements de précision). Plusieurs technologies ont été proposées pour déposer des matériaux piézoélectriques en couches minces, notamment :

- les techniques sol-gel : permettent un dépôt d'assez bonne qualité à condition de faire plusieurs cycles sol-gel/recuit haute température.
- l'épitanie de matériaux comme le nitrure d'aluminium AlN est une technique onéreuse fournissant des couches très minces mais de bonne qualité
- La pulvérisation cathodique (PZT, AlN) est collective et particulièrement compatible avec les technologies Si et présente l'avantage de se dérouler à basse température.
- La synthèse hydrothermale (PZT) permet des dépôts à faible température, relativement épais (5 à 10 μm).

Les contraintes internes et les fortes variations de température au cours du process induisent des craquelures dans ces couches minces, ce qui peut mettre en court-circuit les électrodes. De plus, les méthodes de gravure (humide ou sèche) sont mal maîtrisées avec ces matériaux. Mais le principal défaut de ces couches minces reste la faiblesse de leurs caractéristiques piézoélectriques, comme le montre le Tableau 16 :

Réf.	matériau	Méthode de dépôt	$d_{33}[\text{pC.N}^{-1}]$	$d_{31}[\text{pC.N}^{-1}]$	ϵ_r
[18]	PZT 5H	-	690	-340	3900
[18]	PZT 5A	-	400	-190	2000
[18]	PMN-0.3PT	-	1700-2200	-1000	5500-7500
[19]	P(VDF-TrFE)	-	-37	-	-
[45]	MFC	-	400	-170	-
[21]	AlN 0,1 μm	Reactive DC	-	2,4	-
[22]	AlN 2 μm	Reactive DC	6,83	2,62	10
[48]	PZT 2,8 μm	RF magnetron sputtering	-	-49	-
[49]	BiScO ₃ -PbTiO ₃ 3,1 μm	Synthèse hydrothermale	65	-	-
[50]	PZT 5-10 μm	Synthèse hydrothermale	128	< 10	-
[51]	PZT 10 μm	Synthèse hydrothermale	-	26,6	-

Tableau 16 - caractéristiques de matériaux piézoélectriques couche mince comparées aux caractéristiques des matériaux piézoélectriques massifs.

La récupération d'énergie vibratoire à partir de matériaux piézoélectriques est limitée par la capacité des dispositifs à amortir les vibrations [52], notamment parce que le couplage électromécanique (coefficients d_{33} et d_{31}) des matériaux massifs est trop faible. L'utilisation de matériaux piézoélectriques intégrables (procédé de dépôt ou de croissance compatible silicium) ayant des performances dégradées réduit encore l'efficacité de la récupération.

Compte tenu de ces éléments et de la très faible énergie des vibrations présentes sur les structures aéronautiques, **nous choisissons d'utiliser une couche céramique piézoélectrique massive PZT**

qui a de très bonnes performances piézoélectriques (cf. Tableau 17). En vue de son intégration en technologie silicium, elle sera amincie mécaniquement et métallisée sur les deux faces avant report.

Le Tableau 17 donne les caractéristiques de matériaux piézoélectriques massifs, issus du catalogue de TRS Technologies [18]. Le choix du PZT-5H type VI nous permet de satisfaire à la fois les besoins d'un bon coefficient de couplage piézoélectrique d_{31} et de faible facteur de qualité mécanique Q_m .

matériau	$d_{33}[\text{pC.N}^{-1}]$	$d_{31}[\text{pC.N}^{-1}]$	ϵ_r	Q_m	$\text{Tan } \delta$
PZT 5H type VI	690	-340	3900	46	0,018
PZT 5A type II	400	-190	2000	77	0,018
PZT4 type I	235	250	-	650	0,002
PZT8 type III	-100	-125	-	400	0,004

Tableau 17 - caractéristiques de matériaux piézoélectriques massifs, d'après [18].

4.4. Choix technologique pour l'intégration de la couche piézoélectrique

Le générateur sera réalisé en technologie silicium ou compatible. Aussi le PZT-5H retenu doit être gravé avec la meilleure précision possible. Cela suppose un bon alignement de toutes les étapes de fabrication, notamment de la gravure du PZT-5H. Cette dernière doit également être fortement anisotrope, faute de quoi il sera difficile d'atteindre avec précision le design optimal pour le générateur puisqu'il faudra composer avec les caractéristiques de la gravure.

L'épaisseur du PZT-5H est fixée à 200 μm puisque c'est la couche la plus fine qu'est capable de fournir TRS Technologies et qui soit manipulable³⁶. La céramique piézoélectrique sera reportée sur le silicium par collage sur le substrat silicium par l'intermédiaire d'une couche de colle époxy électriquement conductrice (pour que les charges puissent être collectées par les électrodes sur le substrat). Cette technique a l'avantage de ne pas requérir de traitement en température supérieure à la température de Curie du PZT-5H³⁷ (210 °C).

4.5. Modélisation du générateur pour la conception

Pour concevoir un générateur piézoélectrique au format poutre, nous avons modélisé son comportement (contrainte interne des matériaux, déplacement, tension résultante) lorsqu'il est soumis à des accélérations de 0,01 à 0,1g. Nous imposons une accélération d'entrée sinusoïdale d'amplitude 0,1g et de fréquence 50 Hz. L'objectif du modèle est de faire varier les dimensions (largeur, longueur, épaisseur de la poutre) afin de trouver la géométrie optimale permettant de générer la puissance maximale dans les conditions de vibration d'entrée imposées par l'application.

³⁶ Des pièces de 100 μm d'épaisseur sont aussi réalisables mais elles sont peu manipulables car excessivement fragile.

³⁷ Si le matériau est porté au-delà de sa température de Curie, il perd sa polarisation et donc ses propriétés piézoélectriques.

4.5.1. Modèles de la littérature

Un modèle doit décrire le comportement mécanique (courbure, relaxation, contrainte, déplacement, amortissement structurel, couplage mécanique avec la base), piézoélectrique (couplage électromécanique, pertes diélectriques), électriques (circuit de charge) et tous les couplages entre ces éléments. Cependant une telle modélisation, surtout si elle doit être itérée pour plusieurs géométries différentes, est particulièrement lourde, et demande un temps de calcul trop important. Différents modèles de générateurs piézoélectriques au format poutre, dont un aspect au moins a été simplifié, ont été proposés dans la littérature afin de permettre plusieurs itérations. Parmi eux, des modèles électromécaniques basés sur l'approche de Rayleigh-Ritz ([53], [54]) et d'analyse des paramètres distribués [55] reposent sur une description assez précise des aspects mécaniques et du couplage électromécanique, mais ils sont limités à une résistance pour le circuit de charge. D'autre part, les équipes qui développent des circuits d'extraction de charge non linéaire complexe ont proposé des modèles à un seul degré de liberté qui pourraient être utilisés pour évaluer leurs modèles électriques [56-58]. En raison de leur description électromécanique simplifiée, ces modèles ne peuvent pas tenir compte des modes de vibration plus élevés du générateur. Deux modèles ont été proposés récemment pour remédier à ces limitations: Elvin et Elvin ont publié un modèle multimodal à un degré de liberté [59], et un modèle couplant modélisation à éléments finis (FEA³⁸) et description SPICE du circuit de charge [60]. Alors que ce dernier a amélioré la précision par rapport aux modèles précédents, il exige une routine d'automatisation complexe pour effectuer une simulation.

4.5.2. Description du modèle développé

Bien que nous ne recherchions pas de précision dans la description du couplage circuit de charge/générateur, nous avons besoin de la meilleure description possible du comportement mécanique et électromécanique de la poutre. Pour cela nous utilisons une modélisation éléments finis sous le logiciel COMSOL (module SMPZ3D³⁹), couplée dans le logiciel avec une modélisation SPICE du circuit de charge. Ce type de modèle a été proposé (en 2D) par Badel *et al.* [61]. Le modèle découpe la géométrie en milliers d'éléments pour lesquels il résout les équations piézoélectriques pour la couche de PZT-5H et les relations de déformation élastique linéaire anisotrope (pour le silicium) et isotrope (pour la colle époxy) en respectant les conditions aux limites. Pour la couche piézoélectrique un terme d'amortissement structurel $\eta_i = 1/Q_m = 0,022$ a été défini pour prendre en compte les pertes de type hystérésis dans le matériau⁴⁰. Les valeurs des paramètres pris pour la simulation sont présentées dans le Tableau 18 et les expressions (11), (12) et (13). Comme la taille des domaines (couche PZT, couche silicium, couche époxy, masse tungstène) varie grandement au cours des simulations, nous avons recouru à un maillage généré automatiquement par COMSOL (pour chaque géométrie) mélangeant éléments hexaédraux et prismes. Un maillage comporte entre 10 000 et 15 000 éléments. Le circuit de charge est réduit à une

³⁸ Finite Elements Analysis

³⁹ Solid Mechanic Piezoelectric 3D

⁴⁰ Q_m est le facteur de qualité mécanique du PZT-5H et vaut 46.

simple résistance puisqu'il ne s'agit pas ici d'évaluer le circuit de traitement du signal généré mais de rechercher la géométrie optimale et que la complexité du circuit de charge accroît la charge de calcul, ralentissant la recherche. De même, bien que des formes de poutres non-rectangulaires ont été démontrées plus efficaces pour récupérer l'énergie des vibrations [62] notamment en répartissant au maximum la contrainte dans le matériau piézoélectrique, nous limitons notre étude à une poutre rectangulaire pour réduire les temps de calcul. La simulation du modèle complet pour une géométrie sur 10 secondes demande environ 4 heures⁴¹, ce qui permet l'itération de la simulation pour toutes les géométries, laquelle est réalisée au travers d'une liaison Matlab/COMSOL.

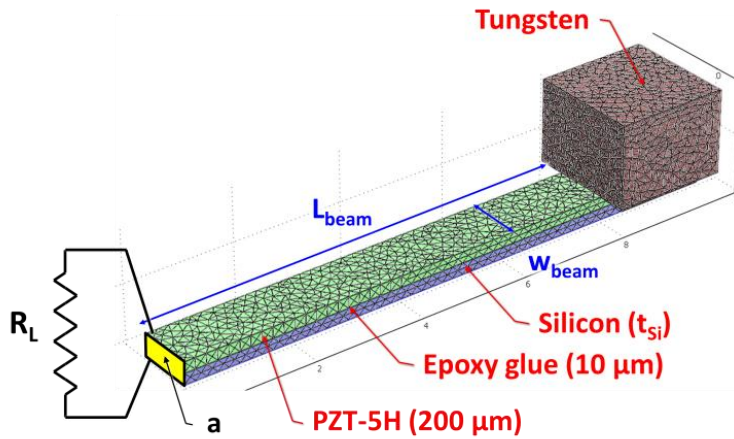


Fig. 23 - modèle éléments finis/SPIICE

Dans le modèle toutes les faces (hors interfaces entre matériaux) de la poutre sont libres à l'exception de la face a, qui est encastree. Une masse de tungstène soumise à une charge en volume correspondant à une accélération sinusoïdale acc définie dans l'équation (10), où f est la fréquence des vibrations, amp l'amplitude, et t le temps.

$$acc = amp \cdot 9,81 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (10)$$

Une résistance (R_L) est connectée entre les deux électrodes de la couche PZT-5H.

⁴¹ En moyenne, le temps de simulation est très dépendant du nombre d'éléments générés lors du maillage.

Variable	Nom	Unités	Valeur
ρ_{Si}	Masse volumique silicium	kg.m ⁻³	2330
ρ_{PZT}	Masse volumique PZT-5H	kg.m ⁻³	19350
ρ_e	Masse volumique colle époxy	kg.m ⁻³	2500
ρ_W	Masse volumique tungstène	kg.m ⁻³	19350
$s_{33 P}$	coefficient 33 de flexibilité du PZT-5H	GPa ⁻¹	21,1
$s_{13 P}$	coefficient 13 de flexibilité du PZT-5H	GPa ⁻¹	-9,1
$s_{33 Si}$	coefficient 33 d'élasticité du silicium	GPa	166
$s_{13 Si}$	coefficient 13 d'élasticité du silicium	GPa	64
d_{33}	Coefficient 33 de couplage électromécanique du PZT-5H	pC.N ⁻¹	690
d_{31}	Coefficient 31 de couplage électromécanique du PZT-5H	pC.N ⁻¹	-340
ϵ_{33}	Permittivité relative PZT-5H	-	3900
E	Module de Young colle époxy	GPa	5
ν	Coefficient de Poisson colle époxy	-	0,28

Tableau 18– Paramètres utilisés dans la modélisation.

$$\begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 16.5 & -3.8 & -9.1 & 0 & 0 & 0 \\ -3.8 & 16.5 & -8.4 & 0 & 0 & 0 \\ -9.1 & -8.4 & 21.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42.6 \end{bmatrix}}_{\text{flexibilité [GPa}^{-1}\text{]}} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -340 \\ 0 & 0 & -274 \\ 0 & 0 & 690 \\ 0 & 741 & 0 \\ 741 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{couplage [pC.N}^{-1}\text{]}} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -340 & -274 & 690 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{couplage [pC.N}^{-1}\text{]}} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 3130 & 0 & 0 \\ 0 & 3130 & 0 \\ 0 & 0 & 3900 \end{bmatrix}}_{\text{permittivité relative}} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_{12} \\ S_{23} \\ S_{13} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 166 & 64 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 166 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 64 & 166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 80 \end{bmatrix}}_{\text{Elasticité du Silicium [GPa]}} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{12} \\ T_{23} \\ T_{13} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_{12} \\ S_{23} \\ S_{13} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 6.4 & 2.5 & 2.5 & 0 & 0 & 0 \\ 2.5 & 6.4 & 2.5 & 0 & 0 & 0 \\ 2.5 & 2.5 & 6.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.8 \end{bmatrix}}_{\text{Elasticité de la colle Epoxy [GPa]}} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{12} \\ T_{23} \\ T_{13} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

4.6. Design choisi

Parmi les combinaisons de dimensions simulées, seules certaines donnaient un dispositif résonant à 50 Hz ; nous avons choisi celle extrayant la plus grande puissance tout en maintenant les contraintes⁴² dans le matériau inférieures à 10 % de leur contrainte de rupture respective afin de limiter les risques de fatigue prématurée ou de rupture⁴³. Les dimensions retenues et la puissance récupérée sont présentées dans le Tableau 19.

Longueur poutre (masse incluse)	14 mm	Puissance maximum @ 0,1g	0,76 μ W
Largeur poutre	350 μ m	Tension (à la puissance maximum) @	1,94 V
Epaisseur silicium	125 μ m	Résistance de charge optimale	5 M Ω
Epaisseur colle époxy	10 μ m		

Tableau 19 – dimensions du design optimal et performances attendues.

Compte tenu du volume disponible, nous choisissons de fabriquer 4 poutres identiques partageant la même masse sismique. Cela permet de mettre en série les poutres et donc de quadrupler la tension générée. Le signal récupéré pourra alors être redressé (pont de diodes) sans trop de pertes⁴⁴. Cette disposition peut être pertinente lors des phases de vol en régime de croisière, où les vibrations sont moins énergétiques (0,098 m.s⁻² seulement). La masse commune permet de limiter la phase entre les signaux récupérés, qui pourrait annuler une partie du signal avant le redressement et donc limiter l'intérêt de la solution. La Fig. 24 illustre le design (dimensions et agencement) retenu et qui a été fabriqué au LAAS.

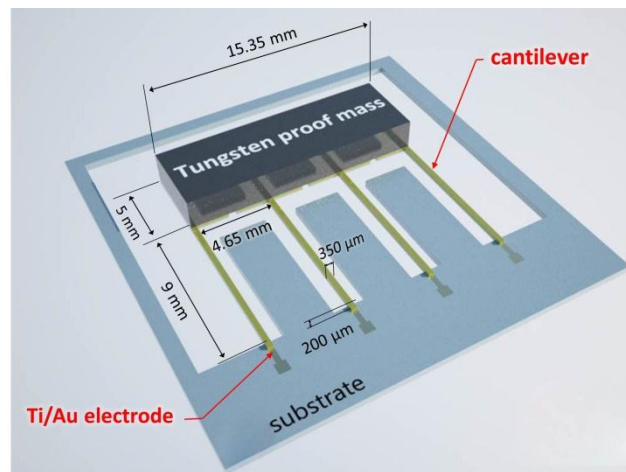


Fig. 24 – design (dimensions et agencement) retenu

⁴² Calculées selon la définition de Von Mises [63].

⁴³ Des butoirs souples pourront être disposés au-dessous et au-dessus de la masse sismique pour limiter l'amplitude de son déplacement, et ainsi éviter une rupture suite à une vibration de plus grande amplitude que celle qui a été simulée (0,98 m.s⁻²).

⁴⁴ Voir Marzencki *et al.* [35] pour la réflexion sur la tension de seuil des diodes de l'étage AC/DC.

5. Fabrication du générateur piézoélectrique

5.1. Présentation globale du procédé

Le développement du procédé a fait l'objet de 2 publications [64], [65] et dont ce mémoire présente la dernière révision illustrée dans la Fig. 25. La fabrication commence avec un substrat de silicium de 4 " de diamètre et 500 μm d'épaisseur. Une couche de nitrure de 80 nm de silicium Si_3N_4 est d'abord déposée par LPCVD⁴⁵ pour assurer l'isolation électrique des électrodes vis-à-vis du substrat (sur la face avant) et servir de masquage pour la gravure humide ultérieure (sur la face arrière). Des ouvertures (100 nm, jusqu'au silicium) sont réalisées par RIE⁴⁶ (après une photolithographie de résine AZ4562 10 μm) sur la face arrière pour permettre la gravure humide par KOH (voir Fig. 25 a). Cette gravure est réalisée dans un bain de KOH maintenu à 90 °C avec une agitation permanente pour assurer une bonne homogénéité de gravure sur les 375 μm .

L'étape suivante (voir Fig. 25 b) est l'évaporation⁴⁷ de deux couches de titane (100 nm, couche d'accroche) puis d'or (800 nm) sur la face avant, dont des motifs sont gravés par attaque chimique d'une solution de $\text{KI}+\text{I}_2$ après une photolithographie de résine PFI Ale 1 μm . Ces motifs serviront de collecteurs de courant, en contact électrique avec la face inférieure de la couche de PZT-5H.

L'étape suivante (voir Fig. 25 c) est le placement et le collage du PZT massif. La pièce de PZT-5H (610HD, fourni par TRS technologies, de dimensions $15 \times 15,5 \times 0,2 \text{ mm}^3$) est placée manuellement sur les repères (motifs en Ti/Au) où de la colle époxy électriquement conductrice (Epotek H20E) a été déposée⁴⁸ préalablement. A partir de cette étape, le wafer ne subira pas de température supérieure à 210 °C, température de Curie du PZT-5H au-delà de laquelle il perd ses propriétés piézoélectriques. Le recuit de la colle se fait à 100 °C pendant qu'une force statique d'environ 2 bar est appliquée, afin que la couche de colle soit la plus fine possible et donc que le couplage mécanique entre la couche de silicium et celle de PZT soit le meilleur possible. Elle a été mesurée à 10 μm d'épaisseur.

Les poutres sont ensuite découpées au LASER femtoseconde par la société Alphanov (voir Fig. 25 d) : bien que solidaires du substrat silicium, elles sont alors électriquement et mécaniquement indépendantes. Le LASER femtoseconde n'échauffe le matériau que très localement, ce qui permet d'éviter de dépolariser le matériau piézoélectrique sur de trop grands volumes lors de la découpe⁴⁹. Enfin, le report des contacts électriques par microsoudure (wedgebonding) et le placement de la masse sismique en tungstène (voir Fig. 25 e) constitue la dernière étape du procédé.

⁴⁵Low Pressure Chemical Vapor Deposition : dépôt chimique en phase vapeur basse pression.

⁴⁶Reactive Ion Etching : gravure ionique réactive, sur AvizaTechnology Omega 201

⁴⁷Réalisée avec un Varian 3616 avec planétaire pour dépôt non directif

⁴⁸Le dépôt de la colle et le placement de la pièce de PZT est assisté par la TRESKI 3000.

⁴⁹La gravure LASER est abordée plus en détail par la suite, au paragraphe 5.2.3, page 19.

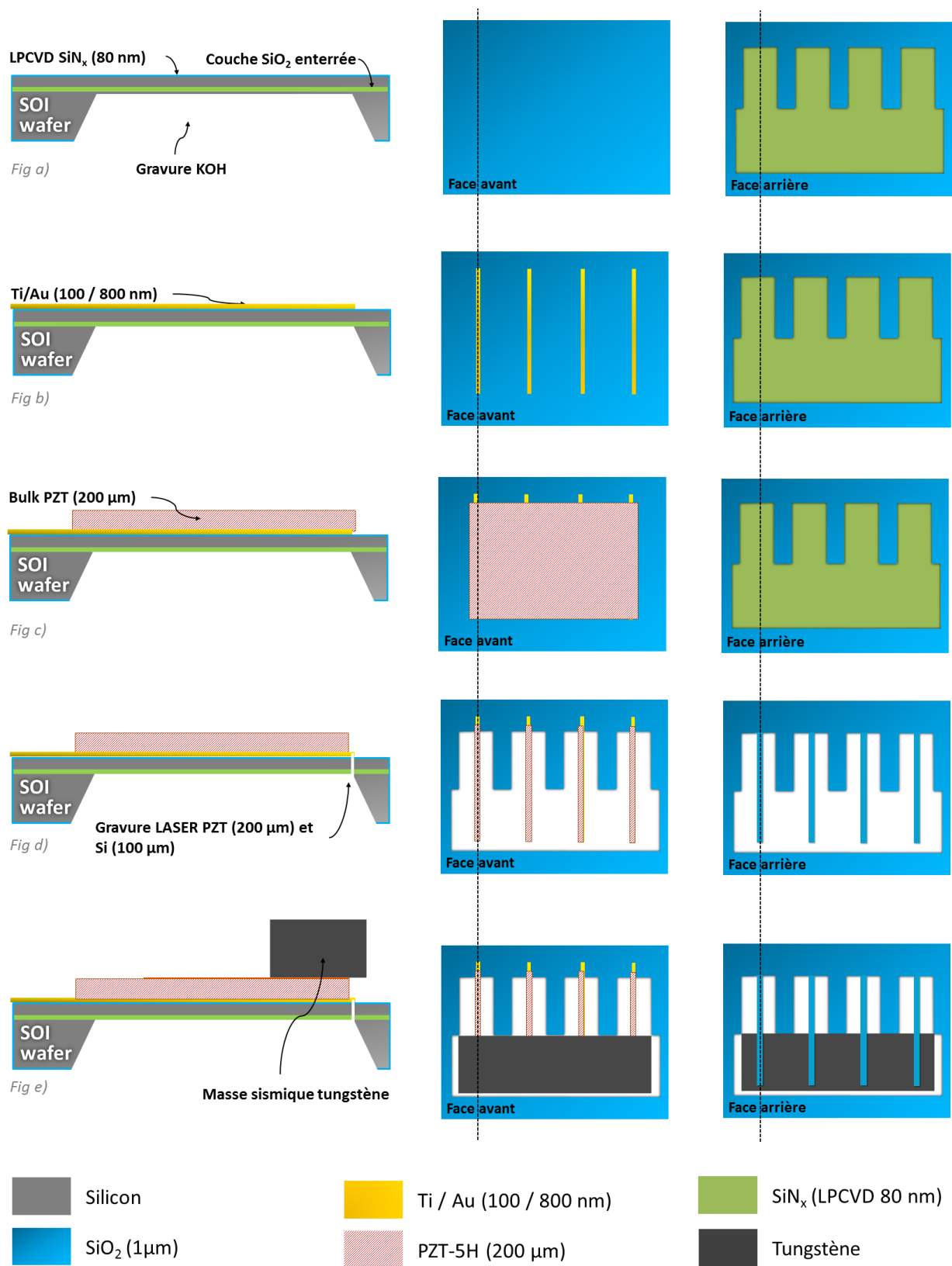


Fig. 25 – procédé de fabrication du générateur à partir d'un wafer SOI Si. La vue en coupe (colonne de gauche) correspond au trait représenté sur les vue de dessus (colonne du milieu) et de dessous (colonne de droite).

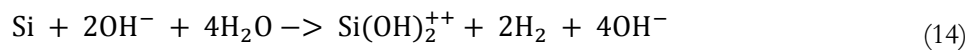
5.2. Discussion sur les étapes clés de fabrication

Quatre dispositifs (sur 1 wafer) ont été réalisés suivant ce procédé. Un dispositif a été détruit pendant le transport depuis le laboratoire de gravure LASER jusqu'au LAAS, et trois étaient fonctionnels. Devant le coût élevé et le temps requis par la gravure LASER, nous avons limité le développement du procédé à ce wafer unique.

5.2.1. Gravure KOH

Le procédé précédant développé par Gustavo Ardila-Rodriguez pour réaliser le générateur piézoélectrique (présenté dans [65]) recourrait à la gravure sèche DRIE pour libérer les poutres en face arrière. L'homogénéité de cette gravure était insuffisante, celle-ci étant réalisée sur une grande surface et sur une grande épaisseur. Plus particulièrement, il était nécessaire de prolonger la gravure au-delà du temps prévu pour libérer les poutres, laissant ainsi à certains endroits une trop faible épaisseur de silicium à cause d'une surgravure et causant de mauvaises performances de récupération.

La gravure humide KOH est un moyen facile à mettre œuvre pour graver toute surface silicium exposée, tout en assurant une gravure relativement homogène sur de grandes épaisseurs. La réaction de gravure anisotrope⁵⁰ du silicium par l'hydroxyde de potassium est précisée dans l'équation (14) et est activée thermiquement [67]. Cependant la gravure entraîne la formation de bulles de dihydrogène, lesquelles interrompent temporairement la réaction : plus la gravure est rapide plus les bulles induisent une inhomogénéité de gravure. Il existe donc un compromis vitesse de gravure / homogénéité de gravure : nous avons maintenu la température du bain de gravure à 90 °C, en assurant une agitation permanente à l'aide d'un barreau magnétique en rotation.



La mesure d'homogénéité a été réalisée après la gravure à l'aide d'un profilomètre LASER confocal⁵¹ dont trois images sont présentées dans la Fig. 26 b) c) d) et repérées sur la Fig. 26 a). La profondeur de gravure, évaluée sur plusieurs endroits du wafer, ne varie pas plus de $\pm 3 \mu\text{m}$ par rapport aux $375 \mu\text{m}$ visés, ce qui est une amélioration significative de l'homogénéité de gravure par rapport au procédé précédant (utilisant la gravure DRIE [65]). La rugosité, inhérente à la formation de dihydrogène, ne dépasse pas $6 \mu\text{m}$ (Fig. 26 c). Il faut cependant souligner que la mesure de la profondeur de gravure se faisant avec une optique présentant un plus faible grossissement que l'optique utilisée pour la mesure de rugosité, il n'est pas possible de savoir dans quelle proportion la rugosité ($6 \mu\text{m}$) affecte la précision de la mesure de profondeur de gravure.

⁵⁰ L'anisotropie de la gravure dépend de nombreux paramètres (température, ratio de KOH/eau, dopage du silicium notamment [66], [67]), mais elle n'est pas problématique ici.

⁵¹ Olympus LEXT OLS3100

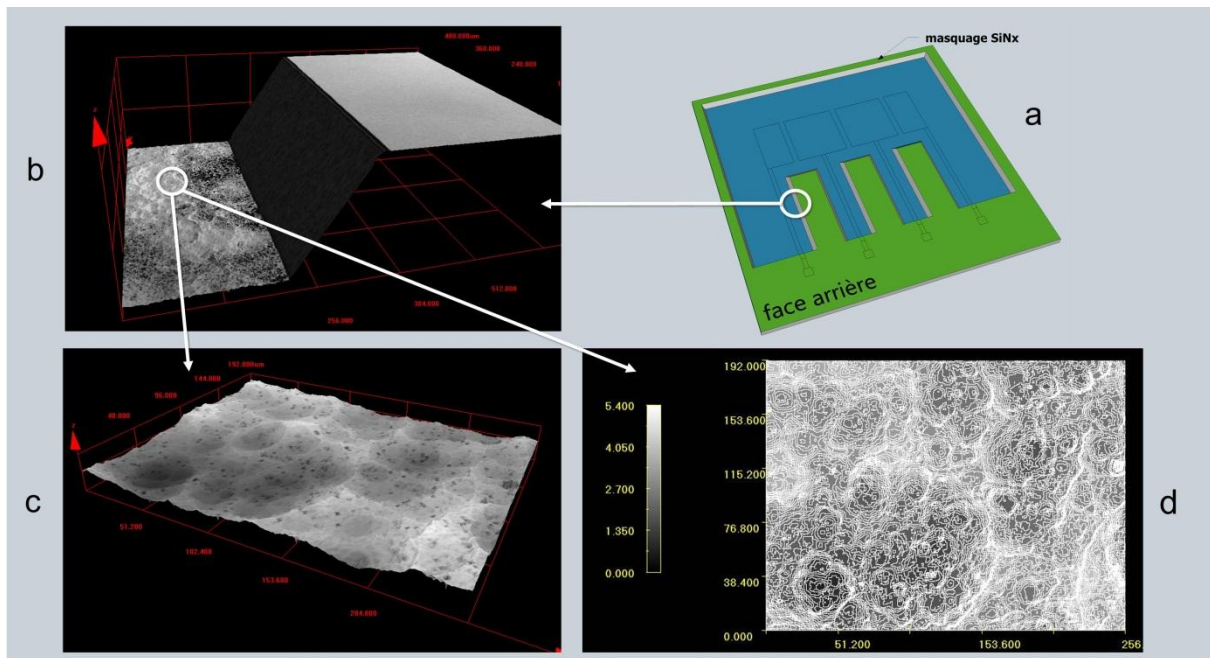


Fig. 26 – a) vue du dispositif après gravure KOH : la couche verte représente la couche de Si_3N_4 et la couche bleue le SiO_2 enterré ; b) observation des flancs de gravure KOH (zone repérée sur la Fig. 27 b)) au profilomètre LASER confocal ; c) étude de la rugosité de la surface après 375 μm de gravure KOH ; d) même observation en vue de dessus avec isohypses.

5.2.2. Collage

Enjeux

L'adhésion de la couche de matériau piézoélectrique au substrat silicium est un élément critique puisque le couplage mécanique du matériau en dépend. C'est là le principal défi de l'utilisation de matériau piézoélectrique massif dans un procédé silicium. Nous avons décidé de recourir à une couche de colle époxy intermédiaire entre le PZT-5H et le silicium. Cette solution est relativement facile à mettre en œuvre mais elle introduit un découplage mécanique : plus la couche de colle est épaisse, plus elle absorbe les contraintes (en compression ou en tension) du substrat, qui sont donc moins transmises au PZT-5H, lequel génère alors moins de charges électriques.

Report

Le report et le collage de la pièce de PZT-5H massif est une étape délicate puisqu'elle ne repose pas sur un procédé lithographique et donc ne permet pas toute la précision associée. De plus le PZT-5H massif aminci mécaniquement à 200 μm est cassant, ce qui rend sa manipulation délicate. La manipulation est assistée dans notre cas par le TRESKI 3000, équipement dédié à l'assemblage de microsystemes.

Collage

Le dépôt de la colle est assuré manuellement, là aussi assisté par le TRESKI 3000 : une seringue est remplie du mélange H20E Epotek (colle époxy électriquement conductrice) dépose des lignes de colle le long des motifs Ti/Au représentant les électrodes (voir Fig. 28 a) puis la plaque (PZT-5H) est placée sur les repères d'alignement. Le recuit s'effectue en étuve thermostatée à 100 °C en maintenant une pression

statique la plus importante possible sans que les éléments ne cassent (le PZT-5H aminci est fragile, et le wafer ayant subi une gravure KOH de 375 μm comporte de nombreuses amorces). Nous avons poussé cette pression à 2 bar, maintenus par des masses en laiton pendant les 12 h de recuit.

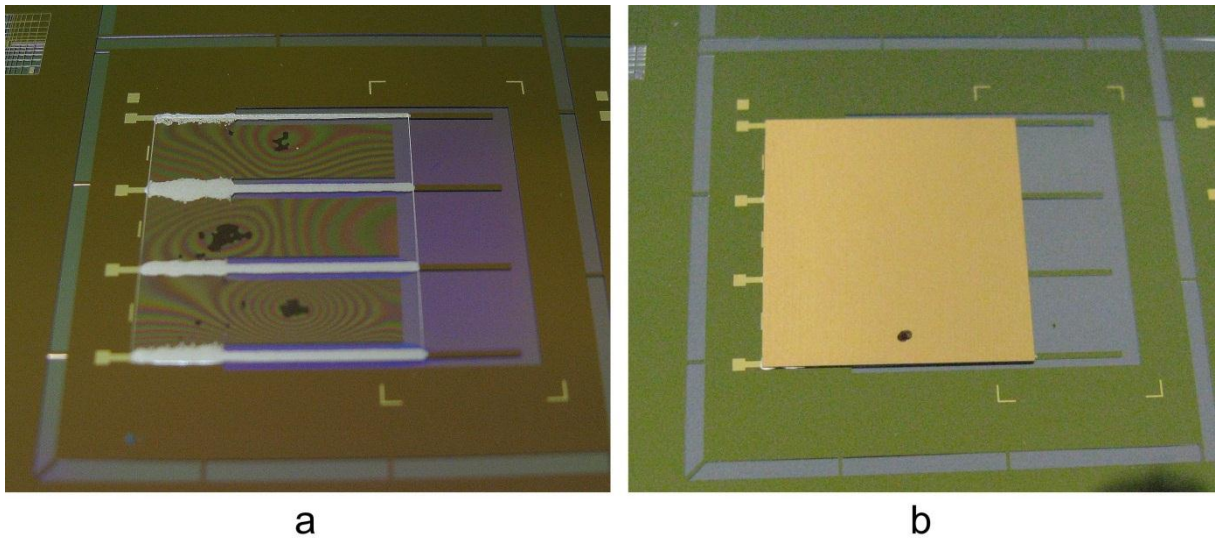


Fig. 28 – a) plaque de verre (170 μm d'épaisseur) collée à un substrat silicium de test pour contrôler l'étalement de la colle époxy ; b) plaque de PZT-5H (métallisée Cr/Au ; le point noir correspond à la marque de prise de contact électrique lors de la polarisation par le fabricant)

Contrôle de l'épaisseur de colle

Le contrôle de l'épaisseur de colle entre la couche piézoélectrique et la couche silicium a été fait au microscope électronique à balayage (MEB), après la découpe LASER des poutres. Nous avons pu mesurer une épaisseur de 10 μm (conforme à notre objectif) avec une très bonne homogénéité le long d'une même poutre comme d'une poutre à l'autre ($\pm 1 \mu\text{m}$). Une image MEB ayant servi pour partie à ces mesures est présentée dans la Fig. 29. Une épaisseur plus faible (2 μm) encore a été atteinte par ailleurs [68], et pour une telle épaisseur Li et Chen [69] considèrent que l'action mécanique de la couche de colle peut être négligée : c'est donc une voie d'amélioration de notre procédé.

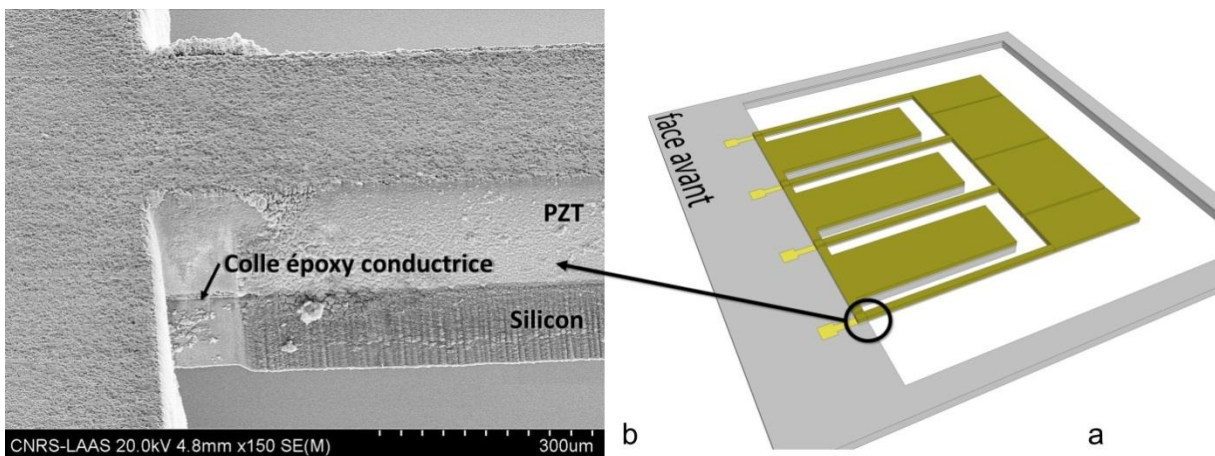


Fig. 29 – image MEB de l'empilement des couches silicium/époxy/PZT-5H au niveau de l'encastrement d'une poutre (b) repérée sur le schéma du dispositif (a).

5.2.3. Gravure LASER

Motivations

La gravure du matériau piézoélectrique massif est un verrou technologique auquel nous avons cherché à apporter une solution. Les techniques de gravure sèche (RIE, DRIE) ou humide sont peu adaptées à la gravure de PZT sur de grandes épaisseurs. Xu *et al.* ont proposé en 2008 une gravure humide à base d'une solution de $1\text{BHF}:2\text{HCl}:4\text{NH}_4\text{Cl}:4\text{H}_2\text{O}$ et ont pu graver $35\text{ }\mu\text{m}$ de PZT massif. Cependant avec cette méthode l'anisotropie de la gravure reste trop faible (1.5 :1) ce qui rend impossible la gravure de poutre de PZT de plusieurs centaines de μm d'épaisseur.

Nous avons choisi de graver le PZT-5H à l'aide d'un LASER parce que c'est un procédé qui permet de découper à la fois le PZT-5H et le silicium avec une précision d'alignement de l'ordre de $10\text{ }\mu\text{m}$: l'alignement entre les motifs de la couche PZT-5H et ceux du substrat silicium est donc suffisamment précis pour assurer une fréquence de résonance conforme aux simulations. L'ablation LASER a été utilisée par Kim *et al.* en 2008 [70], mais avec des impulsions longues (1 ns). Ils ont pu usiner une couche de $500\text{ }\mu\text{m}$ de PZT massif sur un wafer 4 " en 3 h 10⁵², mais ont observé des zones affectées thermiquement assez larges, ce qui est préjudiciable à la qualité de la conversion piézoélectrique dans le PZT-5H.

Ablation LASER pulsée femtoseconde

L'ablation laser est le phénomène de décomposition de la matière (par effet thermique, photochimique ou non linéaire/ultrabref) qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à un rayonnement de forte intensité. Bien que l'ablation laser fût étudiée dès l'apparition des premiers lasers, les travaux sur la photoablation des polymères publiés en 1982 [71] ont fortement contribué à l'essor de cette thématique, avec pour objectifs des applications dans le domaine du micro-usinage.

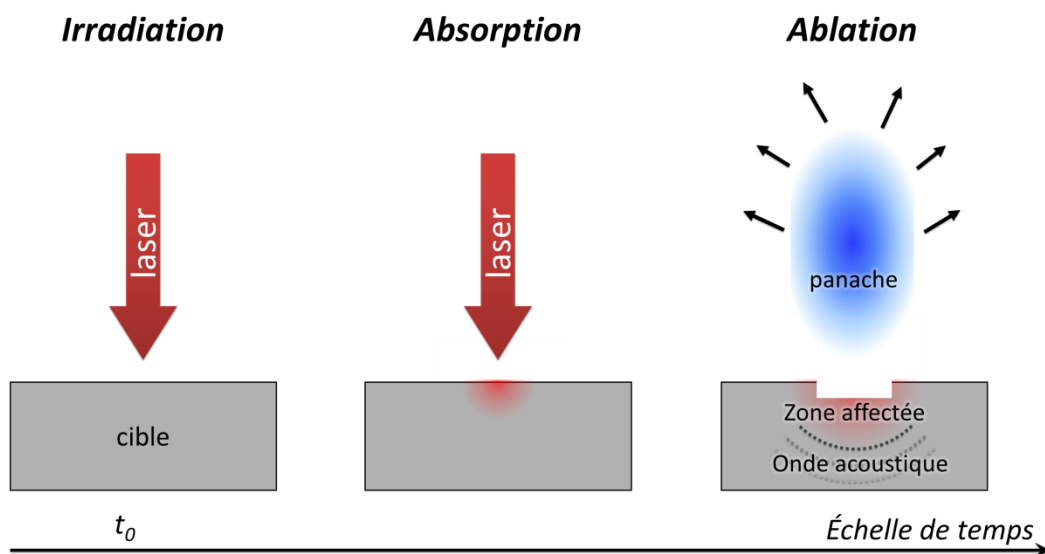


Fig. 30 – fonctionnement général de l'ablation LASER

⁵² Pour comparaison, la gravure femtoseconde de nos 4 dispositifs sur 1 wafer 100 mm a requis 1 semaine de gravure.

L'ablation est un phénomène à seuil, seuil énergétique au-delà duquel il y a décomposition de la matière. Le processus d'interaction laser-matière diffère selon les propriétés du rayonnement (longueur d'onde, durée d'impulsion, intensité...), la nature du matériau, et l'environnement ambiant. On distingue trois processus en fonction de la durée d'impulsion, de la longueur d'onde du laser et de la nature de la cible. Les lasers continus ou à impulsions longues (>10 ps) émettant dans l'infrarouge ou le visible interagissent avec la matière selon un processus thermique. Ils privilégient le débit matière et les effets collatéraux (thermique ou mécanique) au détriment de la qualité d'usinage. La plupart des lasers utilisés en micro-usinage ou en marquage entrent dans cette catégorie. A l'opposé, la brièveté des impulsions des lasers pico ou femtosecondes permet d'usiner tout type de matériau indépendamment de ses bandes d'absorption et de minimiser les effets thermiques sur la cible au détriment du débit matière.

Le processus d'ablation avec une impulsion ps ou fs met en jeu des phénomènes non linéaires. La brièveté des impulsions et surtout leur forte intensité (10^{12} à 10^{14} W.cm⁻² une fois le faisceau focalisé) favorisent la création d'électrons libres par une absorption multiphotonique. Les premiers électrons éjectés sont ensuite chauffés par un processus de type *Bremsstrahlung inverse*, et vont transmettre par choc leur énergie aux autres électrons du réseau d'atomes jusqu'à provoquer une avalanche d'ionisation, laquelle sera suivie d'une expulsion de matière. En théorie, le temps caractéristique de diffusion des électrons excités et de transfert de leur énergie vers le réseau d'atome est de 10 ps. Ainsi, pour une durée d'impulsion inférieure à 10 ps la matière est expulsée avant qu'il n'y ait diffusion de la chaleur hors du volume irradié. La zone affectée thermiquement et la zone fondue existent mais elles sont considérablement réduites par rapport à une impulsion longue (>10 ps).

Configuration utilisée

Le LASER femtoseconde utilisé pour la gravure du PZT-5H et du silicium est un S-Pulse construit par la société Amplitude Systemes. La longueur d'onde du faisceau est de 1030 nm, constitué de pulsations de 500 fs ; l'énergie utilisée sur cible est d'environ 40 μ J. Une refocalisation du faisceau en cours d'usinage est nécessaire car la profondeur de champ de la lentille n'est pas suffisante pour traverser l'épaisseur du matériau.

Observations post-gravure

Le contrôle de la gravure (notamment de l'état des matériaux et du respect des dimensions consignées) a été réalisé au microscope électronique à balayage et au profilomètre confocal LASER. Comme le montre la Fig. 31, la gravure LASER présente une certaine conicité due à la focalisation du faisceau, ce qui rend la fabrication de poutres strictement parallélépipédiques. La conicité mesurée en utilisant le profilomètre confocal LASER (Fig. 31) et les images MEB (Fig. 32 d) est de $5,1^\circ \pm 0,5^\circ$, soit une anisotropie de gravure supérieure à 11 :1, ce qui est significativement plus élevé que l'anisotropie permise par les techniques de gravure humide (1,5 :1). La mesure de la largeur de toutes les poutres fait apparaître une faible variation de 2 μ m entre la plus large et la plus étroite.

La Fig. 32 (b et c) montre une image MEB d'une poutre : on distingue la couche de PZT, la couche de silicium et la couche de colle époxy entre les deux. Le grossissement permet de voir le redépôt du PZT et du silicium ablaté. Le fait que le dépôt recouvre de façon relativement uniforme le flanc du PZT et du silicium laisse supposer que c'est un dépôt composé essentiellement de silicium, dans la mesure où la gravure LASER s'est déroulée en 2 temps et que la gravure du silicium est intervenue après celle du PZT-5H. Le dépôt pouvant être électriquement conducteur (du fait de la présence de métal : Ti ou Au), il y avait un risque que les faces supérieures et inférieures de la couche piézoélectrique des poutres soient en court-circuit électrique, mais les caractérisations ont montré le contraire sur toutes les poutres.

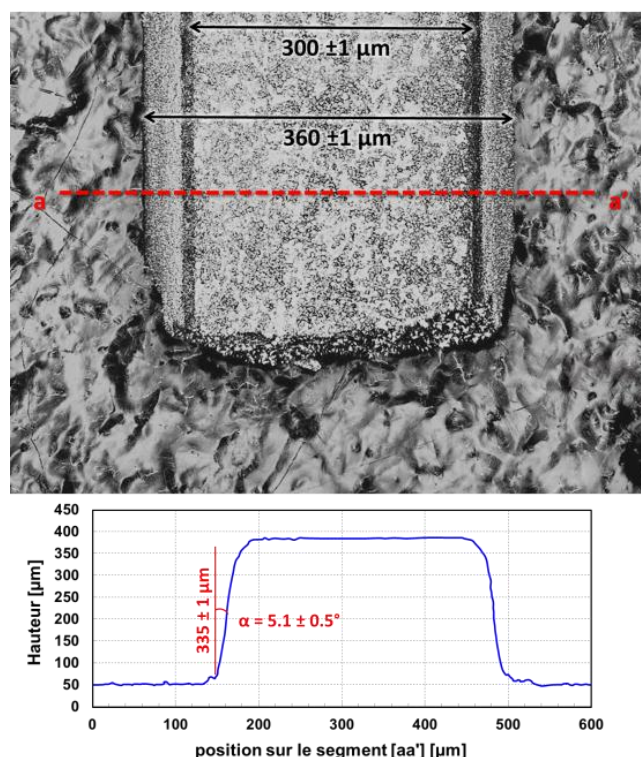


Fig. 31 – observation du profil de gravure au profilomètre confocal LASER.

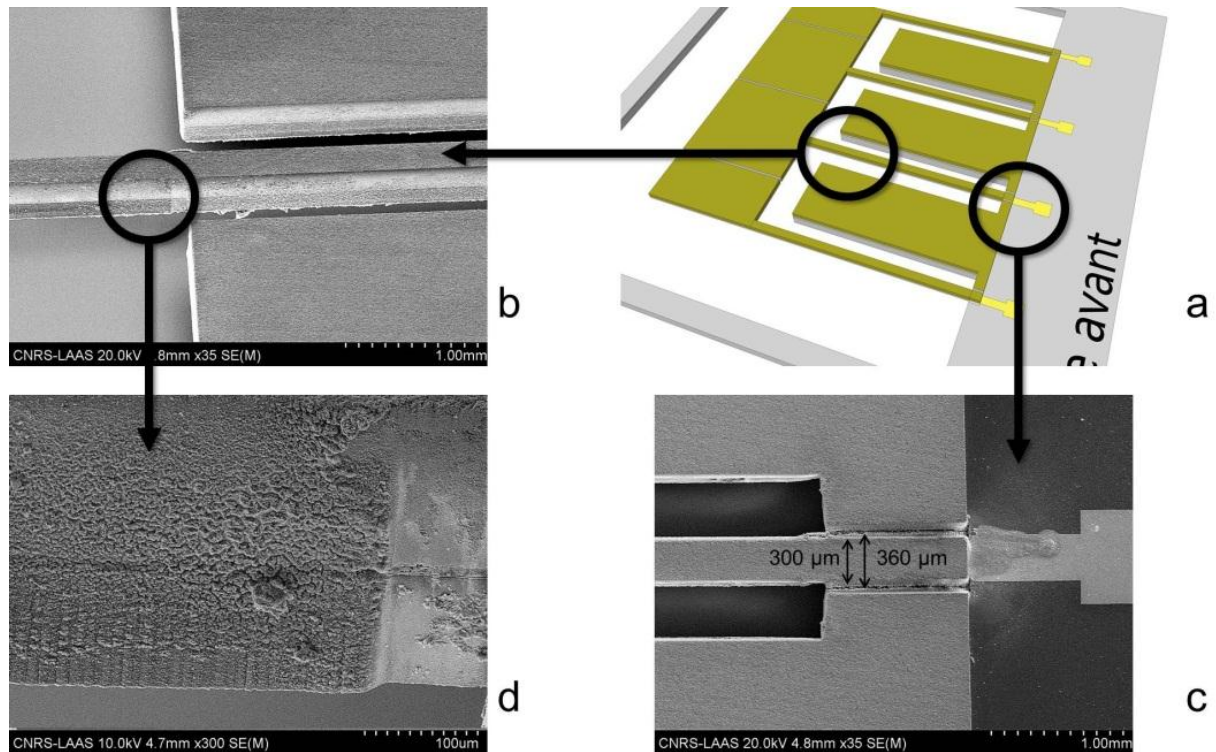


Fig. 32 – b) image MEB d'une des poutres après découpe LASER ; c) grossissement sur le flanc de la poutre : observer le redépôt ; d) vue de dessus de la poutre à l'encastrement pour confirmer les mesures profilomètre LASER confocal ; toutes les vues sont repérées sur le schéma a).

6. Caractérisation : performances et discussion

Sur les trois dispositifs fonctionnels, le premier (dispositif A) a été caractérisé à vide (sans masse) puis détruit lors du collage de la masse, le dispositif B a été caractérisé à vide puis avec une masse de 2,248 g avant d'être détruit lors de l'adjonction d'une masse supplémentaire, et enfin le dispositif C a été caractérisé avec une masse de 2,453 g et a servi à la validation du système complet (récupération, traitement du signal récupéré, stockage tampon, consommation, voir Chapitre 4).

6.1. Protocole expérimental de caractérisation

Le dispositif fabriqué a été monté sur un circuit imprimé (Fig. 34) et une masse sismique en tungstène de 2,248 g a été collée sur l'extrémité libre des poutres. Les connexions électriques des poutres sont reliées à une charge résistive, et le dispositif est caractérisé dans différentes conditions de vibrations harmoniques. Le dispositif expérimental est un support en aluminium (comportant un accéléromètre et un support de fixation du dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations) fixé sur un pot vibrant contrôlé en tension V101 construit par LDS (Fig. 33). Le pot vibrant est fixé à un banc optique lesté pour limiter l'amortissement lié à la désolidarisation du pot vis-à-vis du sol. L'amplitude et la fréquence des vibrations sont mesurées à l'aide d'un accéléromètre trois axes (MMA7260QT de Freescale Semiconductor) intégré dans le support de façon à assurer une amplitude de vibration constante sur

toute bande de fréquence étudiée, quel que soit l'amortissement du générateur piézoélectrique. La charge résistive adaptée est mesurée à 500 k Ω ; toutes les expérimentations ont été faites avec cette valeur.

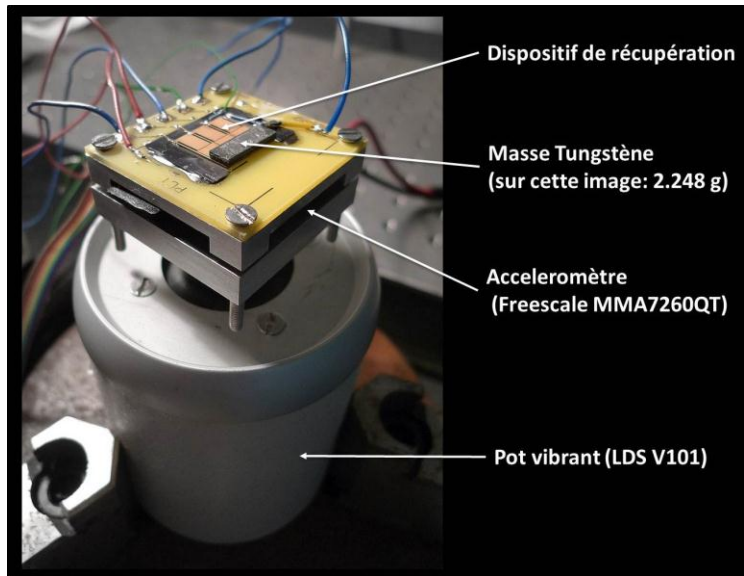


Fig. 33 – dispositif de caractérisation des performances du générateur d'énergie à partir de vibrations.

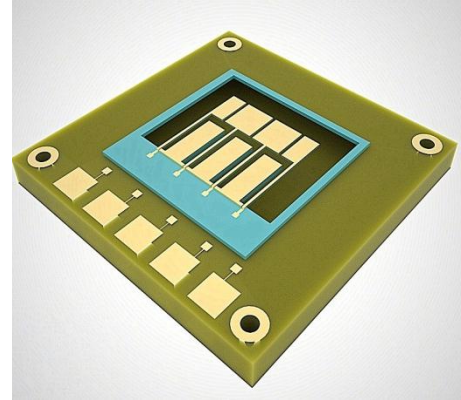


Fig. 34 – générateur (sans masse Tungstène) monté sur carte PCB (schéma)

6.2. Validation du modèle

Nous commençons ici par valider la modélisation que nous avons développée en la confrontant à des résultats expérimentaux, puis nous présenterons dans la section 6.3 les performances du dispositif.

6.2.1. Construction du modèle

La validation du modèle éléments finis/SPICE ayant servi à la recherche des dimensions optimales a été réalisée à 0,1g. La simulation tient compte de l'anisotropie de la gravure LASER (mesurée au paragraphe 5.2.3) : la largeur de la poutre a été modifiée pour avoir un profil trapézoïdal de base 360 μm et de largeur supérieure 300 μm . Les épaisseurs des couches sont maintenues identiques au design initial (200 μm pour le PZT-5H, 10 μm pour l'époxy, 125 μm pour le silicium). Les variations de largeurs ont été prises en compte (2 μm de différence entre la plus large et la plus étroite des poutres) puisqu'elles induisent un léger désaccord de résonance entre les poutres, ce qui diminue le facteur de qualité global du système (réponse en fréquence de plus faible amplitude maximum mais de plus grande largeur à mi-hauteur). La masse sismique est de 2,248 g, commune à toutes les poutres et de dimensions 15×5×1,55 mm³. L'épaisseur de la couche de colle étant très faible par rapport aux autres dimensions, le maillage automatiquement généré par COMSOL est beaucoup trop fin dans cette couche comparé aux autres couches : il n'est pas possible de simuler le modèle complet avec une précision satisfaisante sur toutes les régions. Nous avons donc recouru à un maillage manuel d'éléments parallélépipédiques (généré par

interpolation transfinie⁵³), dont les consignes définies par couches assuraient une finesse de maillage équivalente sur tout le modèle. Comme pour la recherche des dimensions optimales, le circuit de charge était décrit en langage SPICE à l'intérieur du logiciel COMSOL et réduit à une simple résistance.

6.2.2. Comparaison simulation/expérience

La Fig. 35 montre la comparaison entre les performances (puissance électrique récupérée en fonction de la fréquence des vibrations incidentes) mesurées sur le dispositif avec les performances prédites par la simulation FEA/SPICE pour la résistance optimale (500 k Ω dans les 2 cas).

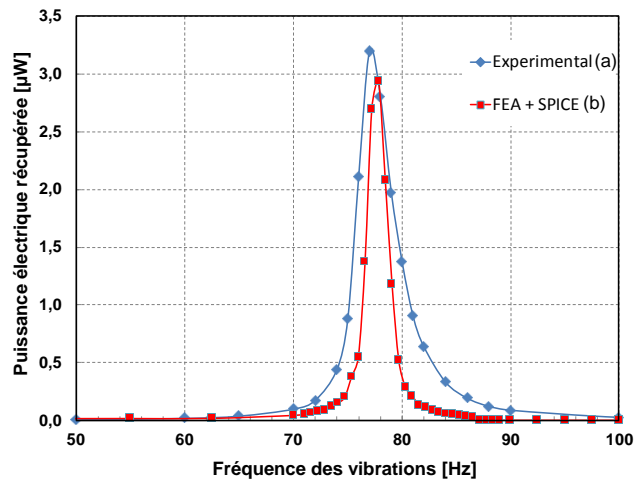


Fig. 35 – Puissance électrique récupérée en fonction de la fréquence des vibrations incidentes, d'accélération constante 0,1g : comparaison entre les performances obtenues sur le dispositif (a) avec les performances prédites par la simulation FEA/SPICE (b).

L'accord entre les deux est satisfaisant puisque :

- la fréquence de résonance prévue (77,8 Hz) est à 1 % de la résonance observée (77 Hz)
- la puissance maximum récupérée (à la résonance et à la résistance optimale = 500 k Ω) est 3,20 μW contre 2,94 μW simulés (8% de différence)

Par ailleurs la bande passante à mi-hauteur simulée est 54 % plus faible que celle observée, en dépit de la prise en compte de la variation de la largeur des poutres. Cela signifie que le modèle surestime le facteur de qualité électromécanique global et sous-estime la puissance récupérée (cette sous-estimation dans les modèle éléments finis a été observée par Yang *et al.* [60]).

6.3. Performances du dispositif

6.3.1. Faibles accélérations (0,1g et 0,2g)

Les faibles accélérations représentent la cible des travaux de cette thèse puisqu'elles représentent la réalité de l'environnement énergétique des futurs nœuds autonomes. Cependant l'accélération 0,01g n'a pas été reportée ici puisque les puissances générées étaient très faibles et la précision des mesures

⁵³ C'est-à-dire le découpage d'un volume en autant d'éléments qu'imposé par les consignes suivant chaque direction x, y et z. Par exemple un cube de 1×1×1 mm maillé suivant cette méthode avec comme consignes 10 nœuds selon x, 5 selon y et 20 selon z aura 1 000 éléments de 100×200×50 μm .

(particulièrement de l'accéléromètre) était insuffisante. Le dispositif B a été caractérisé sur une résistance de 500 k Ω avec une masse sismique de 2,248 g, et les résultats sont présentés dans la Fig. 36 et le Tableau 20 :

accélération [g]	fréquence [Hz]	tension [V]	puissance RMS récupérée [μ W]	densité de puissance [μ W.cm-3]
0,1	77	1,26	3,20	9,22
0,2	76	2,64	13,9	40,1

Tableau 20 – caractérisation électrique à basse accélération

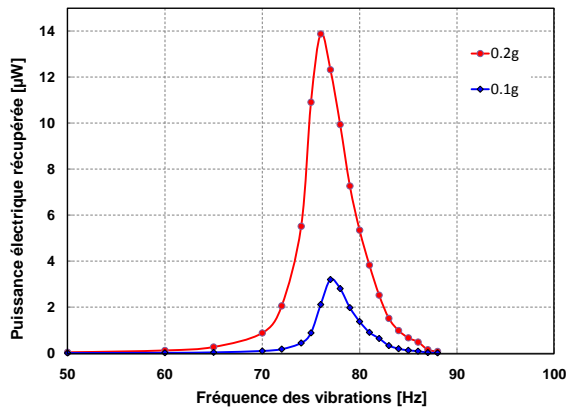


Fig. 36 – Puissance électrique récupérée en fonction de la fréquence des vibrations incidentes, d'accélération constante 0,1g et 0,2g.

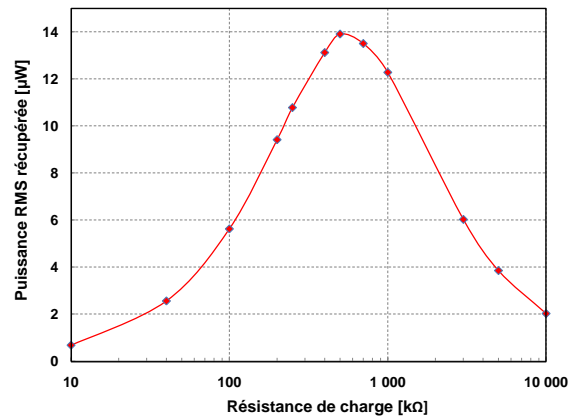


Fig. 37 – Puissance électrique récupérée en fonction de la résistance de charge, pour des vibrations d'accélération constante 0,2g et 76 Hz.

On observe une réponse en fréquence quasi linéaire (quasi symétrique autour de la fréquence de résonance). Le générateur est 217 % plus efficace pour récupérer des vibrations d'accélération 0,2g que pour récupérer des vibrations d'accélération 0,1g (puissance normalisée à l'accélération). La Fig. 37 montre la puissance électrique récupérée en fonction de la résistance de charge, pour des vibrations d'accélération constante 0,2g et 76 Hz.

6.3.2. Fortes accélérations (0,3g à 0,5g)

Les performances du générateur d'énergie à partir de vibrations pour des accélérations de 0,3, 0,4 et 0,5g sont présentées dans le Tableau 21 et la Fig. 38 :

accélération [g]	Fréquence [Hz]	Tension [V]	Puissance RMS récupérée [μ W]	Densité de puissance [μ W.cm-3]
0,3	81	3,20	20,5	59,1
0,4	85	3,44	23,6	68,0
0,5	88	3,65	26,6	76,7

Tableau 21 – caractérisation électrique à basse accélération

Le comportement du générateur⁵⁴ soumis à des vibrations de forte amplitude se distingue de celui qu'il présente pour des vibrations de moins de 0,2g : une forte hystérésis apparaît autour de la fréquence de résonance (la réponse en fréquence croissante n'est pas la même que la réponse en fréquence décroissante, voir Fig. 39). Une hystérésis a déjà été observée par Marzencki *et al.* [35] pour des poutres piézoélectriques, et cette hystérésis était également d'autant plus marquée que l'excitation était forte

⁵⁴ Les dispositifs B et C présentaient tous les deux ce comportement (uniquement avec les masses sismiques), mais nous ne présentons dans ce mémoire que les caractérisations du dispositif B.

(grande accélération). Cependant, dans le cas de Marzencki *et al.* la puissance maximale continuait à augmenter à mesure que l'accélération des vibrations augmentait, alors que dans nos observations la puissance maximale récupérée reste sensiblement la même à partir du moment où l'accélération des vibrations est suffisante pour faire apparaître l'hystérésis. En échange, dans nos observations la largeur de bande passante augmente à mesure qu'on augmente l'accélération des vibrations.

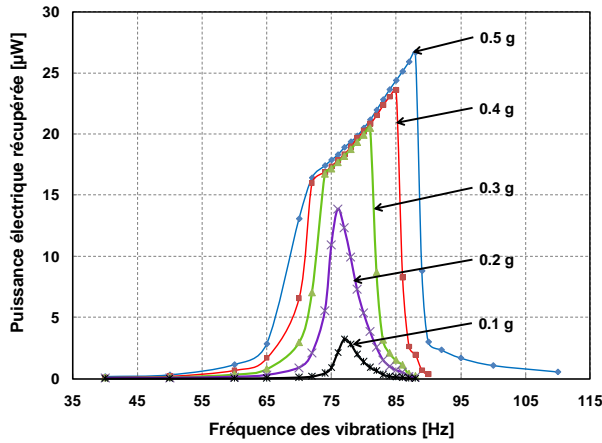


Fig. 38 – Puissance électrique récupérée en fonction de la fréquence des vibrations incidentes, d'accélération constante 0,1g à 0,5g.

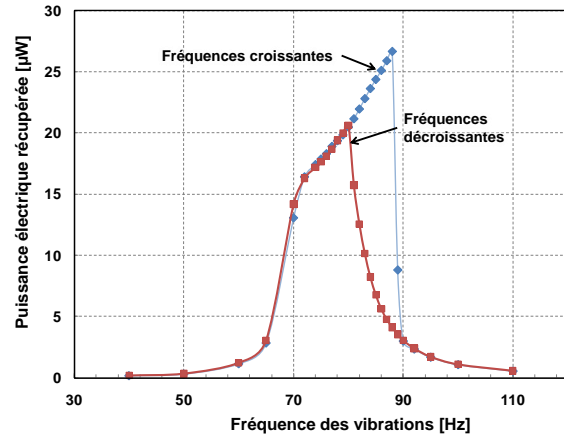


Fig. 39 – Puissance électrique récupérée en fonction de la fréquence des vibrations incidentes, d'accélération constante 0,5g en fréquences croissantes ou décroissantes.

Ce comportement est caractéristique d'un oscillateur défini par parties, c'est-à-dire dont l'oscillation est mécaniquement interrompue par un obstacle : l'oscillateur oscille comme un oscillateur harmonique amorti sur une partie de sa période puis se comporte comme un oscillateur différent sur le reste de la période. Cette limitation d'amplitude a été étudiée et modélisée par Soliman *et al.* [72]. Dans leurs travaux, cette équipe a modélisé un générateur basé sur la transduction électromagnétique avec la description de Williams et Yates (1996 [1]) basée sur un amortissement (dû à l'extraction d'énergie) visqueux. Ce modèle ne décrit pas parfaitement les générateurs piézoélectriques – notamment parce qu'il ne tient pas compte de la rétroaction électromécanique – mais il est resté le modèle de référence au début de la modélisation des générateurs piézoélectriques et a notamment été utilisé par Jeon *et al.* (2005) [73], Fang *et al.* (2006) [74] et Ajitsaria *et al.* (2007) [75].

Comparaison au modèle de contact de Soliman *et al.*

A défaut de solution de mesure permettant de vérifier si les poutres entrent ou non en contact avec la surface, la comparaison de la modélisation proposée par Soliman *et al.* à nos mesures fournira une indication *a minima*. A partir d'une équation différentielle du second ordre du mouvement (15), Soliman *et al.* décrit par parties les coefficients d'amortissement b et la raideur mécanique k , selon que la poutre est en contact avec l'obstacle ($z \geq z_0$) ou non ($z < z_0$) au cours de son oscillation (équations (16) et (17)).

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (15)$$

$$b(z) = \begin{cases} b_1, & z < z_0 \\ b_2, & z \geq z_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$k(z) = \begin{cases} k_1, & z < z_0 \\ k_2, & z \geq z_0 \end{cases} \quad (17)$$

La résolution de cette équation différentielle pour les paramètres (associés à nos mesures) $b_1 = 0,197$ (obtenu à partir de la bande passante à mi-hauteur), $b_2 = 1,80$ et $k_2/k_1 = 33$, prédit que le système excité à $0,5g$ entre en régime non-linéaire par parties à partir de 72,1 Hz et en sort à 88,1 Hz (fréquences croissantes). Les valeurs mesurées sont 72 Hz et 88 Hz respectivement, ce qui montre un bon accord avec le modèle, supportant l'hypothèse du contact intermittent.

Le signal d'une poutre a été reproduit (Fig. 41) après acquisition sur oscilloscope, dans un cas de contact (supposé) et un cas de non-contact (supposé). On observe bien que le signal harmonique devient distordu dans la situation de contact (supposé).

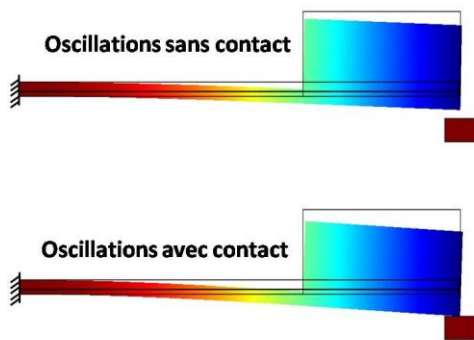


Fig. 40 – Oscillations avec contact intermittent ou non.

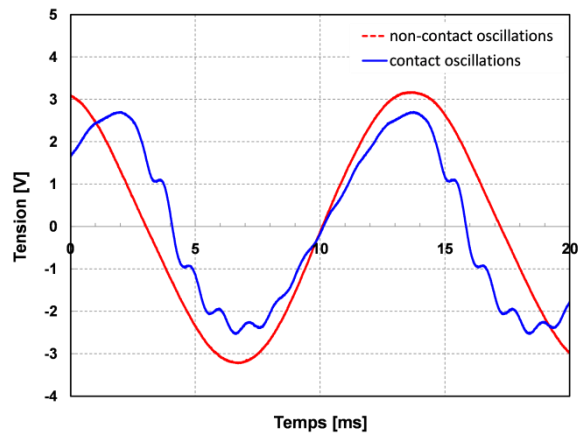


Fig. 41 – Signal (oscilloscope) d'une poutre observé en contact (bleu) et non-contact (rouge). On observe bien le passage d'un signal harmonique en un signal distordu.

6.3.3. Déphasage entre les poutres

Le redressement du signal alternatif produit par le générateur « perd » toute la tension sous le seuil des diodes (0,6 V pour une diode Schottky standard) et la régulation du signal continu n'a de bons rendements que s'il faut abaisser la tension : un signal ayant une tension trop faible serait rapidement perdu avant même d'atteindre les réservoirs. Or à très basse accélération, la tension de chaque poutre s'approche de 1 V (1,26 V pour une accélération de $0,1g$). La mise en série ou en parallèle de poutres a donc été envisagée comme un moyen d'augmenter la tension du signal récupéré avant qu'il soit traité (redressement et régulation).

Cependant cette solution n'est pertinente que si le déphasage entre les signaux des poutres est négligeable, faute de quoi l'interférence sera partiellement destructrice et le bénéfice sera nul (ou ce sera même une plus mauvaise solution que l'addition de signaux continus). Le partage de la masse sismique et

du support d'encastrement, ainsi que la faible variation des dimensions d'une poutre à l'autre (grâce à la précision de la gravure LASER) a permis de limiter cette phase. La Fig. 42 montre le déphasage entre les signaux des 4 poutres, dans des conditions de non contact à 65 Hz. Ce déphasage (et donc les pertes liées à l'interférence destructrice) est alors négligeable. Dans des conditions de contact entre les poutres et le support, le déphasage devient plus marqué mais reste inférieur à 15° .

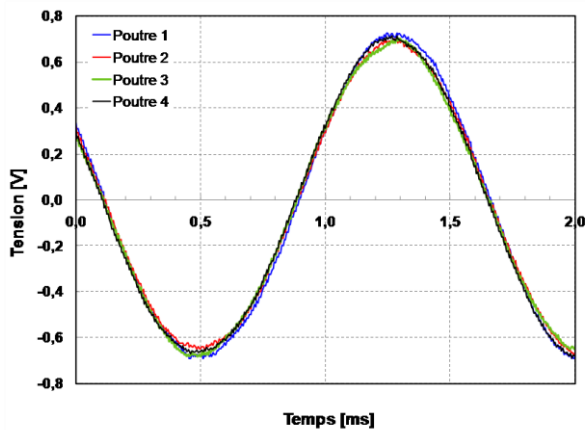


Fig. 42 – Signal (oscilloscope) des 4 poutres observé pour des vibrations sans contact.

7. Comparaison à la littérature et discussion

7.1.1. Figures de mérite

Il est difficile de comparer l'efficacité de dispositifs de récupération de vibration – efficacité que l'on définirait comme le rapport de l'énergie électrique produite par l'énergie mécanique incidente – car l'énergie mécanique incidente dépend du type de générateur (notamment pour les expressions (6) et (7) de la masse sismique prise et de la hauteur maximale de débattement permise). On ne peut pas définir l'énergie incidente sans prendre en compte la masse du dispositif, faute de quoi cette énergie serait infinie [25].

Ainsi, d'autres figures de mérite ont été proposées, comme la densité de puissance [76], la densité de puissance normalisée [77] et deux expressions de l'efficacité [78], [79]. La densité de puissance (W.m^{-3}) est intéressante parce qu'elle fournit une donnée utile pour l'utilisateur du générateur, mais elle ne permet la comparaison de générateurs qu'à la condition qu'ils soient soumis à la même vibration. Une figure de mérite plus universelle a été proposée dans [77]: la densité de puissance normalisée par l'amplitude au carré de l'accélération des vibrations incidentes. Elle a l'intérêt de tenir compte en partie de l'énergie incidente mais il y a trois limitations :

- La valeur de cette figure de mérite peut dépasser 1. Elle ne peut donc permettre de juger si un dispositif est optimal ou non.

- La puissance générée est rapportée au carré de l'accélération des vibrations incidentes, alors que la puissance incidente varie avec le carré de l'accélération des vibrations incidentes divisé par la pulsation. La dépendance des performances par rapport à la source n'a donc pas été entièrement supprimée.
- Puisque la puissance récupérable varie avec le volume^{3/4}, la densité de puissance ne supprime pas complètement la dépendance vis-à-vis de la taille du dispositif, ce qui favorise les dispositifs de grande taille.

L'expression de l'efficacité donnée par Roundy *et al.* [78] fait intervenir un coefficient de transduction k et un facteur de qualité Q , mais ce dernier n'ayant pas de limite, cette expression de l'efficacité n'a pas de valeur maximale et ne permet donc pas de savoir si un dispositif est optimal. Une définition alternative est proposée par [79] (équation (18)).

$$e_d = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance maximum récupérable}} = \frac{\text{Puissance utile}}{\frac{1}{2}Z_l m \omega^3 Y_0} \quad (18)$$

Cette définition permet de mesurer à quel point un dispositif ayant une masse sismique et une hauteur de débattement maximale données s'approche de l'optimum, mais elle ne permet pas de discuter la pertinence du choix de ces 2 paramètres par rapport à la source. Ainsi, nous adopterons une autre figure de mérite proposée par Mitcheson qui normalise la puissance utile par le volume occupé et par des paramètres Z_l et m idéaux par rapport à ce volume (c'est-à-dire tout le volume occupé sert de masse sismique de densité maximale (celle de l'or) et le débattement est maximal dans le volume imparti). Cette expression est donnée dans l'équation(19).

$$FoM_v = \frac{\text{Puissance utile}}{\frac{1}{16} \rho_{Au} vol^{4/3} \omega^3 Y_0} \quad (19)$$

7.1.2. Réponse en fréquence

Les figures de mérite présentées précédemment permettent seulement de comparer la puissance maximale que génère un générateur soumis à une vibration d'accélération et de fréquence donnée. Certains générateurs parviennent à générer une grande puissance utile à la faveur d'un facteur de qualité très élevé, mais cela suppose un ajustement délicat de la fréquence de résonance du dispositif et de la fréquence des vibrations dans l'environnement, elle-même supposée fixe. Pour mesurer l'efficacité d'un dispositif sur tout le spectre, nous utilisons la valeur de la figure de mérite proposée en (19) intégrée sur la fréquence de vibration, soit l'expression (20) :

$$FoM_{int} = \int_0^\infty \frac{\text{Puissance utile}}{\frac{1}{16} \cdot Y_0 \cdot \rho_{Au} \cdot Vol^{4/3} \omega_0^3} \cdot d\omega \quad (20)$$

7.1.3. Comparaison et discussion

Le but du développement du générateur piézoélectrique était de réaliser un dispositif capable de fournir une quantité utilisable d'énergie dans des conditions réelles de vibration, c'est-à-dire à très faible accélération. Avec $3,20 \mu\text{W}$ à $0,1g$ et $12,3 \mu\text{W}$ à $0,2g$, le dispositif remplit cette mission, bien que cela reste inférieur aux $20 \mu\text{W}$ de consommation estimée du capteur. Toujours dans l'optique de rapprocher la récupération d'énergie à partir de vibrations des situations réelles, le second objectif qui a guidé la conception était de produire un dispositif capable de récupérer de l'énergie sur une large bande de fréquences, pour faire face – par exemple dans le projet AUTOSENS – à la variation de la fréquence de résonance naturelle du générateur lorsque la température varie⁵⁵. L'approche choisie était de produire un résonateur ayant un faible facteur de qualité électromécanique. C'est un choix qui a le bénéfice de la simplicité (par de mécanisme d'accord de la fréquence) mais qui implique une limitation de la puissance maximale générée. Ainsi la figure de mérite du dispositif (variable avec l'accélération des vibrations) se place dans la moyenne des dispositifs recensés par Mitcheson *et al.* [25] (maximum 1,74 % et moyenne 0,239 %), mais celle-ci est handicapée par le faible facteur de qualité électromécanique. Pour donner une figure de mérite plus juste, c'est-à-dire qui représenterait la capacité du dispositif à récupérer de l'énergie sur toutes les fréquences et qui ne favoriserait pas les dispositifs récupérant toute leur énergie dans une bande passante très étroite autour de leur fréquence de résonance, nous avons proposé d'intégrer la figure de mérite de Mitcheson *et al.* sur toutes les fréquences (voir paragraphe 7.1.2). Ces deux figures sont calculées pour notre dispositif et pour tous les dispositifs commerciaux et de la littérature donnant les informations nécessaires, et sont présentées dans le Tableau 22. Pour représenter graphiquement la figure de mérite que nous proposons, nous avons tracé dans les Fig. 43 et Fig. 44 la FoM_{int} pour toutes les fréquences de vibration⁵⁶. L'efficacité du générateur dépendant de l'intensité de l'excitation à laquelle il est soumis, nous avons présenté les performances de $0,1$ à $0,5g$.

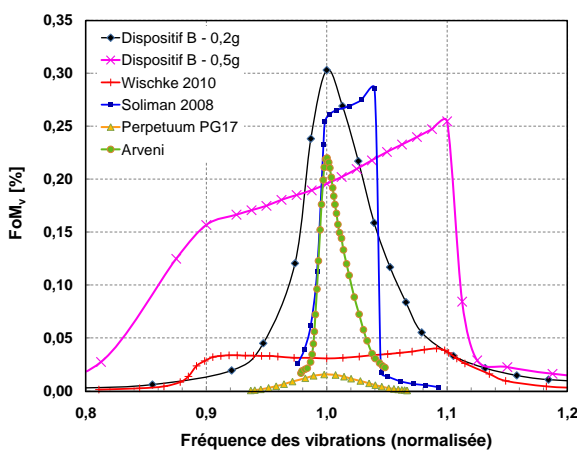


Fig. 43 – Figure de mérite volumique par rapport à la fréquence des vibrations (normalisée par la fréquence de résonance du dispositif) pour des dispositifs commerciaux et de la littérature récente

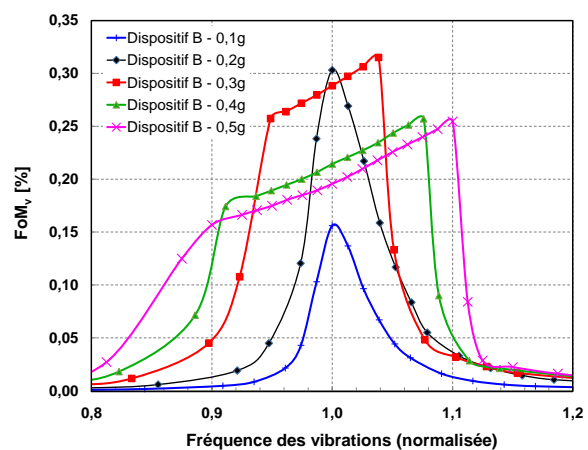


Fig. 44 – Figure de mérite volumique par rapport à la fréquence des vibrations (normalisée par la fréquence de résonance du dispositif) pour toutes accélérations caractérisées

⁵⁵ De $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ selon le cahier des charges.

⁵⁶ Pour plus de clarté, nous avons séparé les caractéristiques du dispositif de $0,1g$ à $0,5g$ et celle des dispositifs commerciaux.

Le dispositif fabriqué présente une FoM_{int} supérieure aux dispositifs comparés, tout en ayant un volume beaucoup réduit.

Auteur	Réf.	Accélération [m.s ⁻²]	Fréquence [Hz]	Amplitude [μm]	Puissance [μW]	Volume [mm ³]	FoM_v [%]	FoM_{int} [ppm]
LAAS		4,91	88	16,0	26,6	464	0,226	504
LAAS		3,92	86	13,4	23,6	464	0,257	490
LAAS		2,94	81	11,4	20,5	464	0,315	448
LAAS		1,96	76	8,6	12,3	464	0,303	258
LAAS		0,98	77	4,2	3,20	464	0,156	205
Soliman	[72]	4,91	95	13,78	2 083	9 337	0,300	145
Wischke	[80]	10,00	296	2,9	68	800	0,041	88
Perpetuum PG17	[81]	0,98	100	2,48	5000	537 067	0,0154	10,4
Arveni	[82]	4,91	50	49,75	44 800	190 080	0,220	145

Tableau 22 - Comparaison des performances de récupération d'énergie à partir de vibrations

8. Synthèse et conclusion du chapitre

Nous avons conçu un dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations ayant pour but de récupérer une puissance électrique utilisable ($> 1\mu\text{W}$) dans des conditions réelles : celles du projet AUTOSSENS (très faible accélération, grande variation de température). L'examen de la littérature nous a mené à développer une technologie permettant d'utiliser du PZT-5H massif dans un procédé compatible silicium afin d'avoir les meilleures performances de récupération possible. Le choix du PZT-5H, ayant un facteur de qualité mécanique faible, vise à rendre le générateur actif sur une grande plage de fréquence, faisant ainsi face à une éventuelle modification de la raideur mécanique du système suite à une variation de température.

Nous avons utilisé la gravure LASER femtoseconde pour découper la céramique PZT-5H, avec de bons résultats sur la précision d'usinage. Les performances de récupérations permettent une réponse en fréquence large bande, et permettent de générer une puissance utilisable à très faible amplitude ($3,20\mu\text{W}$ à $0,1g$). Cependant, à cette amplitude (qui correspond à la phase de décollage sur un Airbus A380) le dispositif ne génère pas assez d'énergie pour couvrir les besoins du capteur type que nous avons retenu ($20\mu\text{W}$), ce qui met en évidence le besoin d'un stockage électrostatique de grande capacité surfacique qui puisse alimenter le capteur sur toute la durée du vol. Nous détaillerons les travaux entrepris pour développer un tel composant dans le chapitre qui suit.

Chapitre 3

Micro-supercondensateurs
intégrés sur Silicium

1. Introduction

Le cahier des charges du projet AUTOSSENS présenté à la fin du chapitre 1 impose plusieurs contraintes sur le stockage de l'énergie récupérée : durée de vie 40 ans et plus de 10 000 cycles, température de fonctionnement entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, énergie totale à fournir 720 mJ ($20\text{ }\mu\text{W}$ pendant 10 h) pour seulement 2 cm^2 alloués au stockage, soit 360 mJ.cm^{-2} en densité d'énergie.

L'utilisation d'une batterie est exclue puisqu'en dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ une batterie présente déjà une capacité dégradée, et qu'elle cesse d'être fonctionnelle en dessous de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Par ailleurs, les batteries ne peuvent endurer plus d'un millier de cycle charge/décharge sans dégradation notable de leurs performances. D'autre part, du fait que la densité d'énergie à stocker peut être importante (360 mJ.cm^{-2}), l'utilisation d'un condensateur classique est également exclue : il faut un composant ayant une capacité surfacique⁵⁷ d'au moins 115 mF.cm^{-2} . Seul un condensateur à double couche électrochimique (EDLC) – ou supercondensateur carbone/carbone – peut satisfaire cette triple contrainte de durée de vie, de température de fonctionnement et de capacité surfacique.

Par ailleurs, la relativement faible puissance moyenne à fournir est le résultat d'un fonctionnement alternatif des composants (capteurs et microcontrôleurs fonctionnent en alternant veille et activité). Ainsi, la puissance instantanée à fournir peut être importante (jusqu'à $1,29\text{ mW}$, cf. chapitre 1) et le choix d'un stockage électrostatique (permettant des charges/décharges rapides) est là aussi justifié.

Les contraintes en volume, le souci de faibles pertes d'énergie dans le nœud AUTOSSENS imposent une intégration monolithique du stockage et du microsystème de récupération (proposé au chapitre 2). Ce chapitre présente la réalisation de micro-supercondensateurs sur silicium répondant au cahier des charges de l'application. Dans une première partie, les supercondensateurs seront présentés et leurs spécificités seront discutées en regard de l'application aéronautique. L'état de l'art sur les micro-supercondensateurs sera également dressé. Dans une deuxième partie, sur la base de résultats préliminaires obtenus par l'équipe et des besoins relatifs au cahier des charges AUTOSSENS, un design de micro-supercondensateur sera conçu. La troisième partie détaillera le procédé du micro-supercondensateur à réaliser, avec toutes les étapes ayant nécessité des développements technologiques particuliers. Enfin, la quatrième partie rendra compte des performances des micro-dispositifs réalisés.

1.1. Supercondensateurs

1.1.1. Condensateur à double couche électrochimique

Principe de fonctionnement

⁵⁷ Il s'agit d'un dimensionnement, considérant notamment que toute l'énergie stockée est utilisable indépendamment de la tension (max $2,5\text{ V}$), qu'il n'y a aucune perte résistive ou autodécharge.

Un condensateur à double couche électrochimique est un composant de stockage électrostatique des charges électriques qui exploite l'exceptionnelle surface spécifique des matériaux poreux conducteurs pour offrir une capacité surfacique 1 à 2 ordres de grandeur au-dessus des condensateurs classiques.

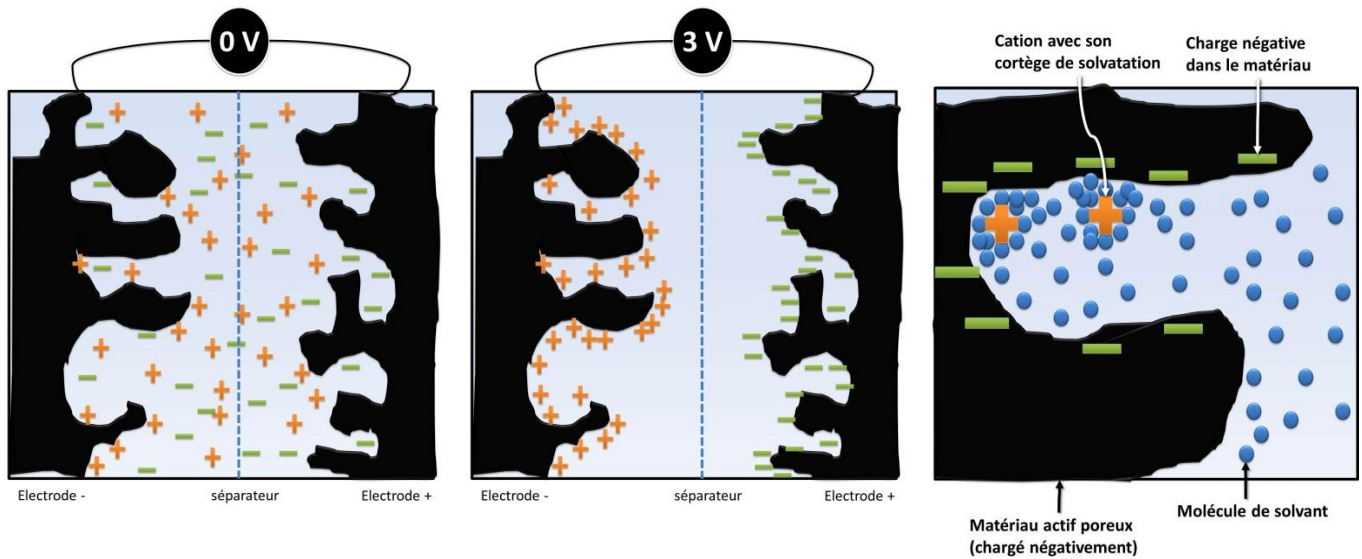


Fig. 45 – Schémas du fonctionnement d'un supercondensateur.

Un supercondensateur est constitué de deux électrodes constituées principalement d'un matériau poreux conducteur⁵⁸ séparées par un film électroniquement isolant et poreux⁵⁹ ; le tout est imprégné d'électrolyte isolant électronique contenant des ions (Fig. 45). Lorsqu'un potentiel est appliqué entre les deux électrodes, celles-ci se chargent et les ions (entourés d'un cortège solvation qui forme une fine couche de diélectrique de 3 à 5 Å d'épaisseur [2]) migrent vers l'électrode de charge respectivement opposée. L'interface entre l'électrode et les ions adsorbés forme alors la double couche électrochimique, décrite pour la première fois par Helmholtz en 1879 [3], puis complétée par Gouy, Chapman et Stern [4]. Un supercondensateur est donc une association en série de deux condensateurs, l'un à la cathode, l'autre à l'anode.

Comparaison avec les condensateurs classiques

La très grande capacité surfacique des supercondensateurs provient en premier lieu de la très grande surface spécifique des électrodes. En effet la capacité C d'un condensateur plan est déterminée par l'expression (21) ci-dessous :

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad (21)$$

où ϵ est la permittivité du diélectrique séparant les deux armatures planes de surface S distantes de d l'une de l'autre. La très importante surface spécifique des matériaux poreux (1000 à 3000 m².g⁻¹ pour les charbons actifs) utilisés dans les supercondensateurs ainsi que la très faible distance d entre charges

⁵⁸ Par exemple du charbon actif, issu de résines ou végétaux.

⁵⁹ La fibre de verre est un matériau couramment utilisé à cet effet.

ioniques et électroniques, i.e. la double couche électrochimique permettent d'augmenter significativement la capacité surfacique et d'énergie.

Spécificités liées à l'électrolyte

Les supercondensateurs peuvent fonctionner avec des électrolytes solides, polymères ou liquides. Les électrolytes solides et polymères étant caractérisés par de trop faibles puissances (à cause d'une conductivité ionique trop faible) et une énergie limitée (à cause d'un mouillage trop partiel des électrodes par l'électrolyte) *a priori* (d'après [5]), nous nous sommes limités à l'étude de supercondensateurs à électrolyte liquide. Ces électrolytes peuvent être de trois types :

- Aqueux : un acide ou une base en solution aqueuse (H_2SO_4 ou KOH par exemple). La fenêtre électrochimique va de 0 à 1 V puisqu'au-delà l'eau est électrolysée. La conductivité ionique est excellente (jusqu'à $0,8 \text{ S.cm}^{-1}$ [6]), et les coefficients de diffusion des ions souvent de l'ordre de $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$. La taille relative des ions (sphère de solvation) varie de 10 à 20 Å, de sorte qu'ils accèdent à la microporosité⁶⁰. Puisque l'eau sert de solvant dans ces électrolytes, le composant n'est plus opérationnel en dessous de 0 °C.
- Organique, généralement des ions Et_4NBF_4 en solution dans de l'acétonitrile (50 mS.cm^{-1} à 25 °C [6]) ou du carbonate de propylène ($8,3 \text{ mS.cm}^{-1}$ à 25 °C [6]). Cet électrolyte élargit la fenêtre électrochimique à 3 V⁶¹.
- Liquide ionique, comme $\text{EMI}^+\text{BF}_4^-$, alternative récente aux électrolytes organiques : moins volatils et moins toxiques que l'acétonitrile, ils présentent une conductivité moindre (13 mS.cm^{-1} à 25 °C [6]) mais une fenêtre électrochimique plus étendue. Cependant les liquides ioniques utilisés ne permettent pas un fonctionnement à -50 °C⁶², ce qui exclut leur usage dans le projet AUTOSSENS.

La possibilité de travailler dans une fenêtre électrochimique large augmente l'énergie E stockable dans le composant de capacité C puisque celle-ci dépend du carré du potentiel U , selon l'expression (22) :

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (22)$$

Cependant la présence d'eau, même à l'état de traces [8], dans un électrolyte organique ou un liquide ionique limite la fenêtre électrochimique à 1 V, ce qui suppose un effort particulier de scellement hermétique du composant. Ce sera notamment – appliqué aux microcomposants silicium – un des objectifs de cette thèse.

⁶⁰ La norme SI définit trois types de porosité : la microporosité (taille de pores inférieure à 20 Å, mesurée par l'indice d'iode), la mésoporosité (entre 20 et 500 Å, mesurée par l'indice de bleu), et la macroporosité (supérieure à 500 Å).

⁶¹ 2,7 V dans les composants commerciaux [7] pour éviter un vieillissement prématuré.

⁶² Le (fluorosulfonyl)(pentafluoroethanesulfonyl)imide a un point de fusion à -19 °C.

Spécificités liées aux matériaux d'électrode

Les matériaux d'électrodes jouent un rôle important dans la densité d'énergie et la densité de puissance d'un supercondensateur au travers de leur surface spécifique, de leur porosité. Plus la surface spécifique est importante plus la capacité du matériau sera importante, et celle-ci est généralement augmentée en augmentant la proportion de mésopores. Des travaux récents ont cependant montré qu'il était possible d'accéder aux pores inférieurs à 1 nm, grâce à une déformation de la couche de solvation entourant l'ion, permettant une augmentation importante de la capacité⁶³ [9].

Parmi les matériaux d'électrodes à base de carbone, on répertorie classiquement les charbons actifs, les aérogels, les fibres activées et plus récemment les nanotubes de carbone [10], les carbones dérivés des carbures [11].

L'activation du carbone est une technique connue de longue date et mise à profit pour produire des matériaux présentant de bonnes propriétés d'adsorption. Il existe donc sur le marché une très grande variété de charbons actifs. Les charbons actifs offrent une grande surface spécifique (typiquement 1000 m².g⁻¹ et jusqu'à 3000 m².g⁻¹ [6]) mais l'augmentation de la surface spécifique se traduit forcément par une diminution de la conductivité électronique du matériau⁶⁴; il s'agit donc de faire un compromis entre les différentes caractéristiques du charbon actif selon l'application visée et le type de performance privilégiée (puissance, énergie...). La capacité massique peut atteindre 180 F.g⁻¹ par électrode (60 F.cm⁻³), la fenêtre électrochimique permise est de l'ordre de 3 V [6]. Ces matériaux permettent un stockage essentiellement électrostatique des charges⁶⁵.

1.1.2. Supercondensateurs pseudo-capacitifs et supercondensateurs hybrides.

Le stockage de charges des matériaux pseudo-capacitifs s'apparente à un comportement capacitif, mais procède via des processus faradiques rapides et réversibles en surface du matériau. C'est le cas de l'oxyde de ruthénium hydraté (RuO₂.xH₂O) qui peut atteindre des densités de capacité jusqu'à 768 F.g⁻¹ pour une surface spécifique de seulement 95 m².g⁻¹ [6]. Des polymères dopés ont également un comportement faradique ce qui augmente sensiblement leur capacité surfacique, et leur synthèse a été largement étudiée pour les supercondensateurs : polyaniline ou polypyrrole [12-17] par exemple. Il faut cependant noter que dans la fenêtre de potentiel électrochimique est réduite par rapport au stockage capacitif pur sur carbone : par exemple les dispositifs à base de polypyrrole sont limités à 1 V [5].

Des supercondensateurs constitués des deux électrodes pseudo-capacitives permettent d'obtenir des valeurs de capacité plus importantes que les condensateurs à double-couche. Car contrairement au charbon actif où seule la surface est utilisée, les polymères conducteurs et les oxydes métalliques mettent

⁶³ Dans les travaux cités, les ions avaient un diamètre de 0,68 nm ((CH₃CH₂)₄N⁺) et 0,33 nm (BF₄⁻) et la capacité surfacique augmente lorsque les pores font moins de 1 nm. Cette capacité surfacique atteint un maximum à 0,7 nm, soit la taille du cation, ce qui laisse penser que les ions peuvent pénétrer dans les pores sans leur cortège de solvation.

⁶⁴ Par diminution de la densité de matériau conduisant les charges.

⁶⁵ Les groupements chimiques en surface du charbon donnent lieu à des réactions faradiques, mais celles-ci représentent moins de 5 % des charges stockées.[8]

en jeu des réactions faradiques de surface où la quasi-totalité du matériau est impliquée dans les réactions électrochimiques. Par contre, il existe un problème de stabilité pendant le cyclage : gonflement, craquelures dues à l'adsorption et la désorption des ions. Cette fatigue mécanique place leur durée de vie (nombre maximal de cycle) entre celle des EDLC et des batteries [18].

Il est également possible de constituer un agencement hybride (asymétrique) avec 2 électrodes différentes possédant des mécanismes de stockage de charge différents à la cathode et à l'anode (C/RuO₂, C/MnO₂, C/PbO₂, C/LiMn₂O₄, TiO₂/C etc..). L'intérêt est de pouvoir ajuster les propriétés du supercondensateur en termes d'énergie, de puissance et de durée de vie en fonction des matériaux utilisés. Par ailleurs, en associant des électrodes ayant des fenêtres électrochimiques complémentaires, il est possible d'obtenir un dispositif fonctionnant sur une gamme de potentiel excédant la fenêtre électrochimique de l'électrolyte. Dans l'exemple charbon actif/ MnO₂ [19], il est ainsi possible d'atteindre 2V de fenêtre de potentiel en milieu aqueux, alors qu'un supercondensateur MnO₂ symétrique serait limité à 1 V.

1.1.3. L'autodécharge

Dans une application où l'énergie est rare, les pertes par autodécharge dans le composant de stockage sont critiques. Or les supercondensateurs présentent une autodécharge plus marquée que les condensateurs classiques. La Fig. 46 présente l'évolution de la tension d'un supercondensateur commercial mis en circuit ouvert après sa charge. On y distingue trois cinétiques différentes de décroissance du potentiel, selon le mécanisme qui prédomine. En effet, l'autodécharge résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes intervenant avec des cinétiques différentes [5], [20], [21]: réduction/oxydation des impuretés (Fig. 46 A), réorganisations des ions à travers les pores (Fig. 46 B) et fuites diélectriques ou courant de fuite (Fig. 46 C). Ces phénomènes et la modélisation de leur cinétique sont relativement complexes et seront discutés dans le quatrième chapitre.

Sur la figure 2, on note qu'après 500 h (21 jours) le composant a perdu un peu plus de 32 % de l'énergie emmagasinée au départ. Le Tableau 23 donne la valeur du courant de fuite de plusieurs supercondensateurs commerciaux ; la mesure correspond au courant nécessaire pour maintenir le potentiel à 2,5 V après une charge potentiostatique de longue durée (70 à 150 h).

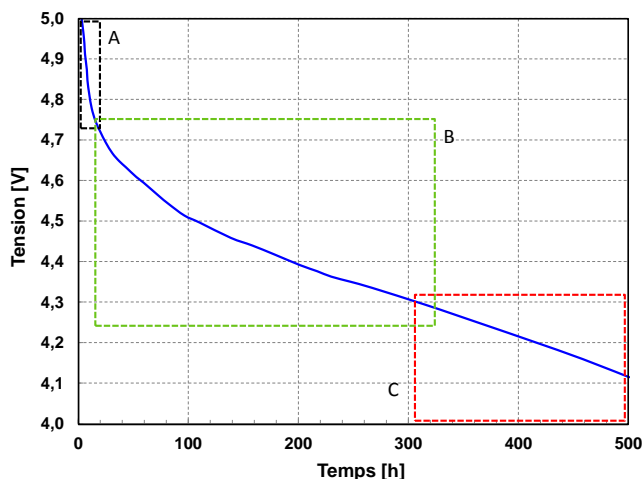


Fig. 46 – évolution du potentiel d'un supercondensateur Panasonic Goldcap 1 F en circuit ouvert. 3 phases (repérées par A, B et C) sont distinguées selon le mécanisme d'autodécharge qui y prédomine, d'après [23].

Réf.	Composant	Courant de fuite	Temps de charge avant mesure
[7]	Maxwell BCap 5F	3 μ A/F	72 h @ 25 °C
[22]	Kanthal LK 1F	3,3 μ A/F	70 h @ 25 °C
[23]	Panasonic Goldcap 1F	0,7 μ A/F	150 h @ 25°C
[24]	CapXX HW207 0,4F	5 μ A/F	70 h @ 25 °C

Tableau 23 – comparaison des courants de fuite pour différents supercondensateurs du commerce.

Au vu des spécificités des composantes d'un supercondensateur, en particulier, les tenues en tension et en températures des électrolytes, les capacités spécifiques des matériaux d'électrodes, **notre choix s'est porté, pour l'application aéronautique du nœud AUTOSENS, sur des supercondensateurs à base de charbon actif et électrolyte liquide organique.**

Il est alors nécessaire d'établir l'état de l'art sur l'intégration de cette technologie de supercondensateurs sur silicium et dresser les avantages et inconvénients par rapport à d'autres types de supercondensateurs (supercondensateurs pseudo-capacitifs en particulier).

1.2. Etat de l'art de l'intégration de micro-supercondensateurs sur silicium

L'intégration des μ SC sur silicium permet de placer le stockage des charges récupérées auprès du (des) générateur(s), de l'électronique de gestion et du (des) capteur(s), et donc d'atteindre le double objectif de miniaturisation et surtout de limitation des pertes. Il y a deux principales difficultés à cette intégration : le dépôt du matériau d'électrode et l'encapsulation hermétique de l'électrolyte liquide.

1.2.1. Dépôt / croissance du matériau d'électrode

Des méthodes d'intégration du matériau d'électrode sur silicium ont été proposées pour fabriquer des micro-supercondensateurs intégrés. La principale difficulté de cette intégration réside dans le dépôt du matériau d'électrode sur des collecteurs de courant par des techniques de microfabrication. Les différentes techniques présentées dans la littérature se répartissent en deux catégories, selon que les électrodes sont réalisées par dépôt ou croissance. Ces techniques sont comparées dans le Tableau 24.

Techniques par croissance des électrodes :

Un matériau d'électrode réalisé par croissance est un candidat idéal pour l'intégration sur substrat en couches minces : la majorité des cas reportés dans la littérature traite de matériaux d'électrodes pour des supercondensateurs pseudo-capacitifs en couches minces RuO_2 ou polypyrrole (PPy). La première intégration sur silicium a été réalisée par Yoon *et al.* en 2001 [25], avec un empilement d'électrodes RuO_2 séparée par une couche LiPON (verre conducteur ionique) qui sert d'électrolyte solide (classiquement utilisé pour les microbatteries). Cette technique a été améliorée en 2003 par la même équipe en utilisant des électrodes RuO_2/W [26], plus perméables à l'intercalage des ions Li^+ . En 2006, Lee *et al.* [27] ont proposé une technique similaire mais où Ta_2O_5 (utilisé habituellement comme diélectrique dans les condensateurs) joue le rôle d'électrolyte solide du fait de sa bonne conductivité ionique. En 2010, Liu *et al.* [28] ont proposé des micro-supercondensateurs dont les électrodes sont des nanofils de RuO_2 par électrodéposition suivie d'un *reactive sputtering*, et ils atteignent $21,4 \text{ mF.cm}^{-2}$ à 50 mV.s^{-1} . Ils ont également mesuré la capacité pour des vitesses de balayage plus élevées, jusqu'à $14,9 \text{ mF.cm}^{-2}$ à 500 mV.s^{-1} , pour des électrodes de $200 \text{ }\mu\text{m}$ de large interdigitées, ce qui indique un effet positif de la structure du composant sur la densité de puissance. Nous discuterons ce point pour nos composants dans la section 4.1.2.

En 2004, Sung *et al.* [13] ont proposé une intégration sur silicium d'électrodes en PPy, polymérisé par croissance électrolytique sur des collecteurs de courant en Cr/Au. Le principal inconvénient de cette technique est le faible volume d'électrode créé (l'épaisseur n'excède pas $2 \text{ }\mu\text{m}$). Pour augmenter le volume de matériau électrode (PPy), Sun *et al.* [16] (2009) ont créé un motif SU-8 ayant un fort facteur de forme (largeur $50 \text{ }\mu\text{m}$ pour $500 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur) sur lequel ils ont fait croître électrolytiquement du polypyrrole. Ils parviennent alors à une capacité surfacique de 29 mF.cm^{-2} . En 2010, cette équipe utilise des motifs traversant sur un wafer de silicium gravé en DRIE ($525 \text{ }\mu\text{m}$), polymérise le PPy sur ce support et atteint 56 mF.cm^{-2} [29]. Cependant le PPy ne permet pas d'exploiter une fenêtre électrochimique supérieure à 1 V .

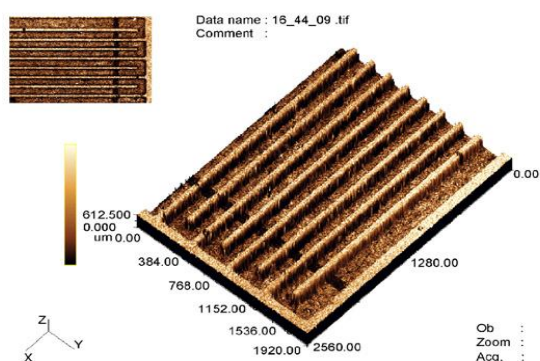


Fig. 47 – PPy sur Si . Sun *et al.* [29]

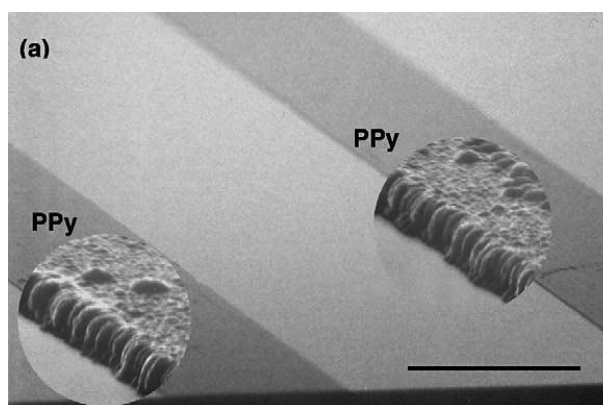


Fig. 48 – PPy sur Pt . Sung *et al.* [13]

Enfin, récemment est apparue la possibilité de réaliser des carbones dérivés de carbures de titane sous forme de couches minces [30] présentant des capacités volumiques très élevées (jusqu'à 120 F/cm^3 pour

des dépôts de 20 μm d'épaisseur). Ces couches minces permettent d'envisager, par un procédé adapté de microfabrication, la réalisation de micro-supercondensateurs de très fortes densités d'énergie.

Techniques par dépôt :

L'avantage des techniques reposant sur un dépôt du matériau d'électrode est qu'on peut utiliser les mêmes matériaux que dans les composants discrets, notamment le charbon actif (qui présente l'une des plus grandes surfaces spécifiques). Cela permet de reporter sur les composants intégrés les efforts de recherche et développement dédiés aux supercondensateurs discrets.

En 2006, In *et al.* [31] ont proposé une technique de dépôt des électrodes (charbon actif + 1 % PVDF⁶⁶) par une pointe sur une membrane de SU-8 qu'on vient replier sur le silicium (technique OrigamiTM). Cette technique permet de retrouver l'architecture d'un supercondensateur discret (empilement ou enroulement des couches électrodes/séparateur/électrode) mais elle induit plusieurs difficultés :

- Le séparateur n'est pas évoqué et semble être un simple espace entre les électrodes en vis à vis. Cette solution rend critique le repliement de la membrane SU-8.
- L'encapsulation (non envisagée dans l'article) est difficile parce qu'elle suppose d'englober le trou d'où provient la membrane, ce qui induit une perte de capacité surfacique.

En 2007, Ho *et al.* [32] ont proposé une technique de dépôt des électrodes (charbon actif + PVDF) par une seringue sur un substrat de verre. Ce mode de dépôt ne permet pas à priori une bonne résolution (le dispositif présenté fait 5 mm×5 mm×100 μm) puisque limité par la taille de la seringue et par la précision des mécanismes de déplacement du substrat. En 2008, Lee *et al.* [33] ont réalisé des électrodes par dépôt de couches successives de nanotubes de carbones sur un support de verre. La capacité surfacique ainsi obtenue est faible notamment parce que les électrodes sont très minces ($< 1 \mu\text{m}$).

En 2009, nous avons proposé (Pech *et al.* [34]) une méthode de dépôt de charbon actif par jet d'encre permettant une capacité surfacique de 2,1 mF.cm⁻², expliquée plus en détail en section 2.2. Dans ces travaux, l'encapsulation de l'électrolyte pour former un composant complet n'est pas abordée.

⁶⁶ Le PVDF sert ici à lier les grains de charbon actif.

Référence	Année	Support	Electrode	Structure des électrodes	Dépôt/Croissance	Electrolyte	Capacité surfacique	Densité d'énergie
[26] Kim	2003	Si + TiO ₂ /Pt	RuO ₂ -W	empilement	Dépôt (reactive sputtering)	Solide : Lipon	36 mF.cm ⁻²	72 mJ.cm ⁻² (2 V) (100 μA.cm ⁻²)
[12] Sung	2004	SiO ₂ /Si + Cr/Au/Pt	polypyrrole (PPy) et poly-(3-phenylthiophene) (PPT)	interdigitée	Croissance (Électrodéposition)	Liquide : H ₃ PO ₄ (0.1 mol.L ⁻¹) + H ₂ O	5,2 mF.cm ⁻²	0,65 mJ.cm ⁻² (0.5 V)
[35] Sung	2006	SiO ₂ /Si + Cr/Au	polypyrrole (PPy)	interdigitée	Croissance (Électrodéposition)	Gel : aqueux PVA-H ₃ PO ₄ -H ₂ O Gel : organique PAN/LiCF ₃ SO ₃ -EC/PC	0,36 mF.cm ⁻²	0,06 mJ.cm ⁻² (0.6 V) (2,5 μA.cm ⁻²)
[27] Lee	2006	Si + TiO ₂ /Pt	RuO ₂	empilement	Dépôt (reactive sputtering)	Solide : Ta ₂ O ₅	1,2 mF.cm ⁻²	0,86 mJ.cm ⁻² (1.2 V) (100 μA.cm ⁻²)
[31] In	2006	Si + Au / SU-8	Charbon actif + 1% PVDF	empilement	Dépôt (Probe tip)	Liquide : H ₂ SO ₄ + H ₂ O	0,8 mF.cm ⁻²	0,14 mJ.cm ⁻² (0.6 V) (CV à 50 mV.s ⁻¹)
[10] Jiang	2009	Si wafer	Forêt de CNT, sur couches Mo/Al/Fe	interdigitée	Croissance (CVD)	Liquide : liquide ionique [BMIM][BF ₄]	0,43 mF.cm ⁻²	0,21 mJ.cm ⁻² (1 V) (CV à 50 mV.s ⁻¹)
[34] Pech	2009	Si	Charbon actif kuraray YP-50 + PTFE	interdigitée	Jet d'encre	Liquide : PC + Et ₄ NBF ₄ (1 mol.L ⁻¹)	2,1 mF.cm ⁻²	6,56 mJ.cm ⁻² (2.5 V) (CV à 100 mV.s ⁻¹)
[36] Shi	2010	Si	polypyrrole (PPy) sur Pt (100 nm)	interdigitée	Polymérisation électrochimique	Liquide : Na ₂ SO ₄ (0.5 mol.L ⁻¹)	11,3 mF.cm ⁻²	4,57 mJ.cm ⁻² (0.9 V) (CV à 2 mV.s ⁻¹)
[29] Sun	2010	Si	polypyrrole (PPy) sur Ti / SiO ₂ /Si	interdigitée	Polymérisation électrochimique	Liquide : NaCl + H ₂ O (pH 4)	56 mF.cm ⁻²	28 mJ.cm ⁻² (1 V) (CV à 20 mV.s ⁻¹)
[28] Liu	2010	SiO ₂ /Si + TiO ₂ /Au	Nanofils RuO ₂	interdigitée	Electrodéposition + reactive sputtering	Liquide : H ₂ SO ₄ (0,5M) + H ₂ O	21,4 mF.cm ⁻²	10,7 mJ.cm ⁻² (1 V) (CV à 50 mV.s ⁻¹)

Tableau 24 - comparaison des techniques d'intégration de micro-supercondensateurs dans la littérature. Les densités de capacité sont calculées pour le composant, c'est-à-dire pour 2 électrodes en série.

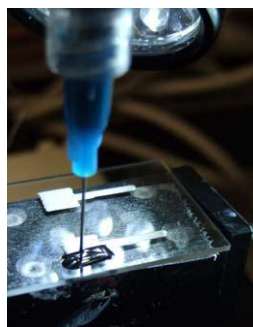


Fig. 49 – dépôt par seringue, Ho *et al.* [37].

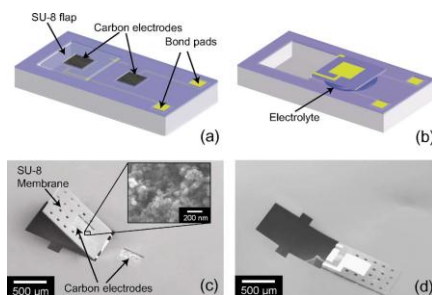


Fig. 50 – Méthode origami . In *et al.* [31]

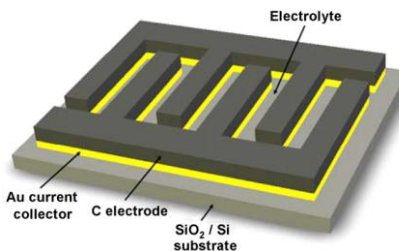


Fig. 51 – jet d'encre, Pech *et al.* [34]

Du fait de la recherche émergente sur le sujet, les techniques proposées jusqu'ici dans la littérature ne permettent pas d'atteindre la capacité surfacique nécessaire pour satisfaire le cahier des charges du projet AUTOSSENS : au mieux on atteint 28 mJ.cm^{-2} , alors qu'il faudrait 360 mJ.cm^{-2} . D'autre part, lorsqu'il s'agit de micro-supercondensateurs à base d'électrolyte liquide, les techniques d'encapsulation pour obtenir un composant complet ne sont pas anticipées. Pour exploiter une fenêtre de 2,5 V et les performances associées à un électrolyte liquide organique dans un composant intégré sur silicium, il faut pouvoir l'encapsuler (ou le sceller) hermétiquement. Plus spécifiquement, il ne peut y avoir de trace d'eau dans l'électrolyte. Il faut donc que l'encapsulation soit imperméable à l'humidité de l'atmosphère. La section suivante dresse un état de l'art de l'encapsulation hermétique de composants à l'échelle de la plaquette de silicium.

1.2.2. Encapsulation de l'électrolyte : vers le composant complet

Electrolyte liquide dans les supercondensateurs discrets

Dans les dispositifs actuels commerciaux, l'électrolyte liquide est introduit dans le dispositif déjà assemblé par un orifice dans le boîtier qui est ensuite refermé par une soudure à chaud [6]. Cette opération est effectuée en atmosphère anhydre dans le cas des électrolytes organiques. Il est évident que dans le cas d'un supercondensateur intégré sur silicium, la configuration planaire et sa fabrication collective impose une technique toute autre.

Contraintes

Un procédé d'encapsulation hermétique sur plaquette de silicium (Wafer Level Packaging) de microsupercondensateurs intégrés requiert :

- Un capot (verre, quartz, borosilicate, silice fondue ou silicium par exemple)
- Une température toujours inférieure à la température d'ébullition des électrolytes (82 °C pour l'acétonitrile, 240 °C pour le carbonate de propylène)
- Une résistance aux électrolytes, qui peuvent être agressifs (acétonitrile par exemple)
- Un passage du contact électrique depuis les collecteurs de courant du composant encapsulé vers l'extérieur.

Méthodes d'encapsulation haute température

Comme l'ont indiqué Esashi *et al.* [38] dans leur article de synthèse, les techniques d'encapsulation de composants sur wafer sont distinguées en deux catégories : soit par adhésion directe du capot sur le wafer, soit par l'intermédiaire d'une couche adhésive, comme un polymère, du verre frité ou une couche intermétallique. Les techniques d'adhésion directe, comme la soudure anodique, la soudure eutectique ou la thermocompression, offrent une herméticité stricte puisque les matériaux sont interpénétrés à l'interface. Cependant ces techniques requièrent des températures élevées : la plus basse relevée dans la littérature étant 250 °C [39].

Parmi les méthodes avec couche intermédiaire, le verre frité demande une température de l'ordre de 400 °C, et la couche intermétallique In (entre deux interfaces Au) nécessite 200 °C [40]. Il ne reste donc que les couches intermédiaires polymères pour encapsuler un électrolyte de supercondensateur comme l'acétonitrile ou le carbonate de propylène.

Méthodes d'encapsulation polymère adhésif

Le scellement par couche polymère intermédiaire repose sur des polymères pas ou peu réticulés, déposés sur le capot, sur le wafer ou sur les deux, de sorte que cette couche remplisse l'espace entre les deux substrats [41]. Les polymères sont réticulés (par UV ou par température) pour assurer l'adhésion entre substrats. Cette technique permet de faire passer les contacts électriques en surface, à l'interface entre wafer silicium et capot, puisque le polymère épouse (dans une certaine limite de rapport de forme) le relief que forme ces pistes métalliques. L'herméticité est le principal défaut de ces techniques puisque les polymères sont perméables aux gaz : la pluparts des articles proposant une technique d'encapsulation à base de polymère (comparés dans le Tableau 25) testent l'herméticité obtenue par des tests de fuite d'hélium⁶⁷ ou de dégradation de calcium (très sensible à l'eau).

Kim *et al.* [42], Oberhamen *et al.* [43], Jourdain *et al.* [44] et Choi *et al.* [45] ont proposé des techniques d'encapsulation hermétique (principalement aux gaz) en une étape par collage de benzocyclobutene (BCB), mais ce matériau nécessite un recuit à haute température : 170 à 250°C pour assurer le collage. Ces températures ne sont pas compatibles avec un électrolyte liquide organique.

Zine-El-Abine *et al.* [46] revendiquent l'herméticité aux gaz en utilisant comme "colle" de la résine photosensible SU-8 grâce à un procédé basse température (100 °C) mais celle-ci est essentiellement due à une métallisation (Ti/Cu) du composant assemblé, et aucun test n'a été présenté pour prouver cette revendication.

Marquardt *et al.* [47] ont quant à eux tenu compte dans leur procédé des caractéristiques particulières provenant d'un microcomposant électrochimique : la basse température, l'herméticité à l'eau et la tenue aux électrolytes agressives (type acétonitrile) pour encapsuler des batteries Li. Ils utilisent une résine époxy photodurcissable comme colle et réalisent l'encapsulation en boîte à gant. Cependant, cette résine n'est pas photosensible (leurs motifs sont réalisés à l'aide d'une seringue) et la batterie doit être réalisée en parallèle avant d'être insérée dans une cavité servant pour l'encapsulation. De nombreuses étapes manuelles sont donc nécessaires empêchant ainsi des réalisations à l'échelle du wafer. Ces techniques ne proposent pas non plus la prise de contact électrique simple : Kim *et al.* [42] proposent de réaliser des vias dans le capot. Dans le procédé de Marquardt *et al.* [47], une couche métallique sur le capot vient établir lors de l'assemblage le contact électrique entre le composant et le capot : ce genre de contact peut amener des résistances parasites non négligeables (par le biais d'un mauvais contact mécanique entre les couches métalliques ou par le fait d'un métal oxydé).

⁶⁷ Le protocole est défini par la norme MIL-STD-883.

Réf.	Polymère	Contact électrique	Herméticité	Résistance électrolyte	Température max procédé
[48]	Epoxy UV	Cr/Au sur Si et sur capot verre	Herméticité à l'eau : test dégradation calcium réussi	1 M LiPF ₆ dans EC/DEC	80 °C
[42]	BCB	via argent à travers capot LTCC + époxy conductrice	Fuites He (conforme MIL-STD-883D)	Non testé	170 °C à 290 °C
[43]	BCB	-	Fuites He (non conforme MIL-STD-883E)	Non testé	250 °C
[44]	BCB	Electrodes en surface	10^{-11} mbar.l.s ⁻¹ < Fuites He < 10^{-8} mbar.l.s ⁻¹	Non testé	250 °C
[45]	BCB	-	Résiste à une pression de 1.7 bar	Eau-méthanol	250 °C
[46]	SU-8	-	Non testé	Non testé	95 °C
[47]	Epoxy	Via cuivre à travers le capot	Fuites He > 10^{-8} mbar.l.s ⁻¹ (non conforme MIL-STD-883)	Non testé	90 °C à 170 °C

Tableau 25 - Etat de l'art sur les méthodes d'encapsulation de microsystèmes.

Nous avons vu, en établissant l'état de l'art du domaine que d'une part, les techniques proposées jusqu'ici pour la réalisation de micro-supercondensateurs ne permettent pas d'atteindre la capacité surfacique nécessaire pour satisfaire le cahier des charges du projet AUTOSSENS : au mieux on atteint 28 mJ.cm⁻², alors qu'il faudrait 360 mJ.cm⁻². D'autre part, lorsque ces micro-supercondensateurs sont à base d'électrolyte liquide, aucun procédé d'encapsulation à l'échelle de la plaquette n'est proposé. Et en dressant la liste des méthodes d'encapsulation (dédiées pour la plupart à d'autres applications que les micro-supercondensateurs), peu d'entre elles considèrent le cas d'électrolytes à faible point de fusion et anhydre.

Nous proposons dans ce travail de thèse un procédé complet de fabrication d'un micro-supercondensateur à base de carbone et électrolyte liquide. Ce procédé devrait améliorer la densité d'énergie à travers deux aspects :

- Un dépôt très épais (> 100 µm contre 5 µm pour la méthode jet d'encre) de matière active (en l'occurrence le charbon actif) dans des cuves micro-usinées dans le silicium.
- Un procédé d'encapsulation d'électrolyte organique anhydre pour exploiter la fenêtre de potentiel de 2,5V.

2. Etude technologique préliminaire

2.1. Structure générale des composants

Un supercondensateur fonctionnel doit avoir, dans un électrolyte commun, deux électrodes en matériau poreux électriquement conducteur (charbon actif par exemple) qui ne sont pas en contact. Par exemple dans une pile bouton cette configuration est permise par l'empilement de deux films de charbon

actif (+ PTFE) séparés par un isolant électrique perméables aux ions. Nous avons choisi pour l'intégration sur silicium d'utiliser des électrodes interdigitées (voir Fig. 52 a et Fig. 53). L'isolation électrique entre les deux électrodes est assurée dans ce cas par un espacement physique.

2.2. Technologies explorées et résultats

Plusieurs méthodes de dépôt de matière active ont été étudiées en amont ou en parallèle de ce travail de thèse, en particulier la méthode par jet d'encre ou l'électrophorèse, qui a permis de dégager une voie d'intégration privilégiée pour le micro-supercondensateur, qui répondrait au mieux au cahier des charges AUTOSSENS. Cette section présente donc en bref toutes les techniques envisagées et celle qui a retenu notre attention : à savoir le dépôt par sérigraphie.

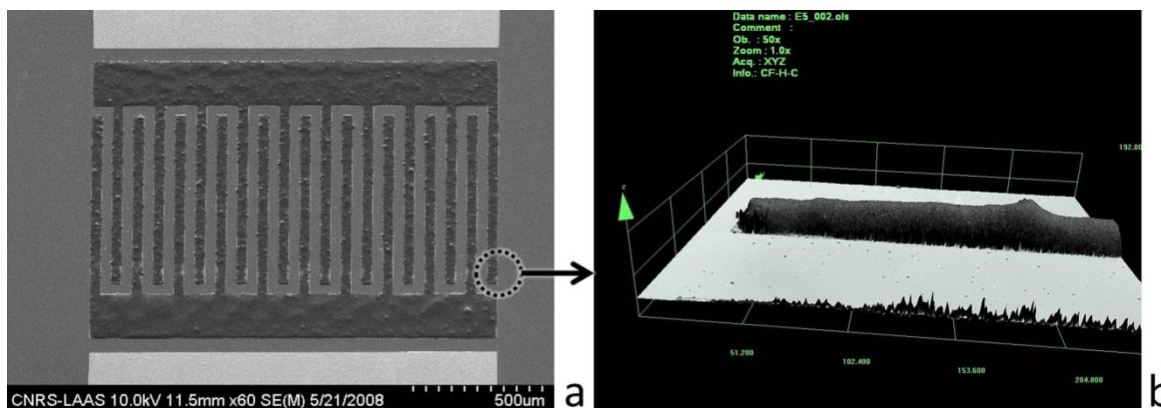
2.2.1. Méthode de dépôt par jet d'encre

Nous recherchons une méthode de dépôt qui permette d'intégrer de grandes épaisseurs d'électrodes sur silicium afin d'augmenter la densité (surfactive) de capacité. La première méthode envisagée est le dépôt par jet d'encre sur des collecteurs de courant interdigités : l'émulsion (ou l'encre) utilisée comprend le charbon actif dans de l'éthylène glycol, un liant (PTFE⁶⁸) pour l'adhérence des particules de charbon actif un fois déposées sur les collecteurs de courant et d'un surfactant (Triton X100) permettant la mise en suspension et la stabilité des particules dans l'émulsion [34].

La Fig. 52 a) qui est une image MEB de pâte de charbon actif déposée par jet d'encre sur des collecteurs de courant interdigités, montre que la résolution de cette technologie est satisfaisante : les doigts sont séparés de 40 μm . La Fig. 52 b) une image profilomètre confocal LASER du dépôt le plus épais obtenu (5 μm en moyenne, en plusieurs passages).

Cette technique a permis d'atteindre une densité capacité de 2,1 mF.cm^{-2} pour le microcomposant testé à 1 mV.s^{-1} (proche des valeurs de la littérature) mais l'épaisseur du dépôt est limitée (entre 1 et 2 μm) car l'encre est trop peu dense (3 % en masse de charbon actif) pour former une couche continue et épaisse. Pour augmenter l'épaisseur, il faudrait effectuer plusieurs passages (comme sur la Fig. 52) ce qui ralentit grandement la fabrication des composants.

⁶⁸ Polytétrafluoroéthène



C

Fig. 52 – a) image MEB de pâte de charbon actif déposé par jet d'encre sur des collecteurs de courant interdigités, b) image profilomètre confocal LASER du dépôt le plus épais obtenu (5 μm en moyenne).

2.2.2. Méthode de dépôt par électrophorèse.

Le dépôt par électrophorèse repose sur la migration et l'adhésion sur l'électrode de particules chargées en solution colloïdale sous l'influence d'une tension. Dans la technique présentée dans [49], les particules de charbon actif sont en suspension (0,3 % en masse) dans une solution éthanol-eau (95 %-5 %). Pour stabiliser les particules et former une couche adhérente, 0,03 % (en masse) de MgCl_2 a été ajouté à la suspension. Les ions hydroxyde accumulés près de l'électrode réagissent avec les ions Mg^{2+} adsorbé sur les particules de charbon pour former le complexe $\text{Mg}(\text{OH})_2$, qui joue le rôle de liant inorganique.

Cette technique permet d'avoir une bonne résolution puisqu'elle dépend essentiellement de la taille des particules ($4,2 \pm 1,1 \mu\text{m}$ pour le charbon actif utilisé⁶⁹) et de la taille des électrodes (la résolution de la photolithographie utilisée ici est de $1 \mu\text{m}$). L'absence de liant organique permet une forte disponibilité des pores du charbon actif. Cependant le dépôt par cette méthode est isotrope, ce qui limite l'épaisseur du dépôt selon la résolution voulue (des électrodes séparées de $10 \mu\text{m}$ ne permettent pas un dépôt de $5 \mu\text{m}$ d'épaisseur sans court-circuit). De plus l'épaisseur du dépôt est limitée $35 \mu\text{m}$ environ, épaisseur à partir de laquelle le dépôt devient moins adhérent, ce qui limite la capacité surfacique.

2.3. Conception basée sur la méthode de dépôt par sérigraphie dans des cuves enterrées

Pour augmenter l'épaisseur de pâte déposée (et donc la capacité surfacique surfacique du composant), nous proposons ici de déposer la pâte par sérigraphie dans des cuves « enterrées » dans le wafer. Nous avons choisi de graver les cuves en gravure humide KOH (hydroxyde de potassium) pour que leurs flancs soient inclinés et ainsi pouvoir remonter le contact électrique depuis le fond des cuves vers la

⁶⁹ Kuraray YP-50

surface par métallisation (évaporation non directive). Nous avons estimé dans le Tableau 26 la densité surfacique de capacité attendue selon la profondeur de gravure et la configuration des électrodes à partir de la densité volumique de capacité obtenues pour des pâtes de charbon actif et PTFE 5 % en masse ($10 \text{ mF} \cdot \text{mm}^{-3}$ [50]). L'augmentation de la capacité surfacique n'est pas linéaire avec la profondeur de gravure puisque la gravure humide KOH est anisotrope (voir Fig. 54), et les capacités ont été calculées en tenant compte du volume réel.

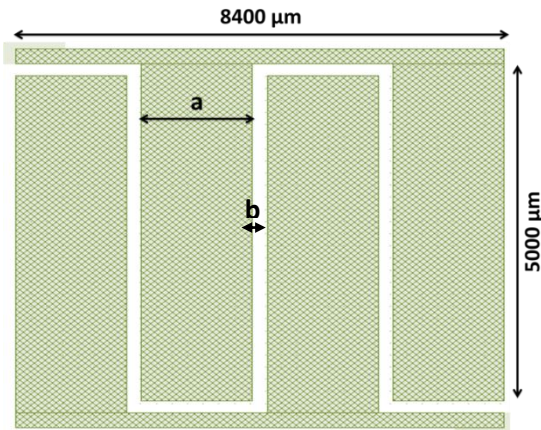


Fig. 53 – structure générale d'une micro-supercondensateur interdigital sur nos masques photolithographique.

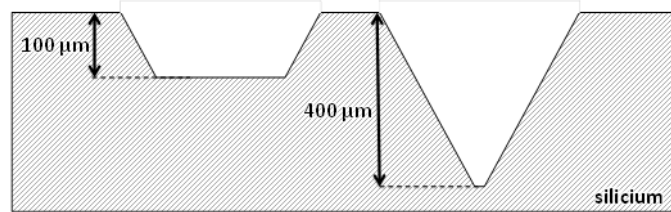


Fig. 54 – illustration de l'augmentation non linéaire du volume des cuves avec la profondeur de gravure.

Le dessin des collecteurs de courants (au format interdigité) a été guidé par deux contraintes :

- Maintenir une surface totale du composant fixe, ce qui a permis leur encapsulation puis leur découpe, ainsi qu'une surface électrode + inter-espace fixe (dimension b sur la Fig. 53) pour permettre une comparaison directe des performances.
- Faire varier l'espacement inter-électrode et le nombre de doigts pour en étudier l'impact sur les caractéristiques des composants produits et la résolution maximale dont sont capables nos méthodes de dépôt ou de croissance.

Les caractéristiques des composants résultants (12 différents, répétés 4 fois par wafer 4") sont rappelées dans le Tableau 26 et la Fig. 53. A 100 μm de profondeur aucune des configurations ne remplit les objectifs fixés pour le projet AUTOSSENS ($115 \text{ mF} \cdot \text{cm}^{-2}$) – et seulement 66 % des composants atteignent cet objectif pour 400 μm de profondeur – mais les dispositifs de plus faible densité permettront l'étude de l'impact de la géométrie.

Electrode				Profondeur 100 μm			Profondeur 400 μm		
Interstice b [μm]	Doigts par électrode	Largeur a [μm]	Surface [mm^2]	Volume [mm^3]	Capacité attendue [mF]	Capacité surfacique attendue [mF.cm^2]	Volume [mm^3]	Capacité attendue [mF]	Capacité surfacique attendue [mF.cm^2]
10	2	1243	24,7	2,15	21,5	86,1	7,04	70,4	281
50	2	1213	23,5	2,08	20,8	83,1	6,76	67,7	270
100	2	1175	22,0	1,99	19,9	79,5	6,42	64,2	256
150	2	1138	20,5	1,90	19,0	75,9	6,08	60,8	243
10	4	616	24,3	2,00	20,0	80,0	4,88	48,9	195
50	4	581	21,5	1,86	18,6	74,2	4,33	43,4	173
100	4	538	18,0	1,68	16,8	67,2	3,67	36,7	147
150	4	494	14,5	1,51	15,1	60,2	3,06	30,6	122
10	8	303	23,5	1,71	17,1	68,2	2,38	23,8	95,2
50	8	266	17,5	1,42	14,2	56,8	1,81	18,1	72,7
100	8	219	10,0	1,07	10,7	42,6	1,21	12,2	48,7
150	8	172	2,5	0,72	7,2	28,8	0,74	7,4	29,7

Tableau 26 – caractéristiques des composants sur les masques de photolithographie, la surface électrode + inter-espace est constante (25 mm^2) et la surface d'électrode seule est indiquée. Le volume calculé tient compte de la gravure anisotrope KOH, et la capacité surfacique est calculée à partir de la surface électrodes+interstices soit 25 mm^2 .

3. Procédé de fabrication et développements technologiques

3.1. Dépôt du matériau d'électrode

3.1.1. Procédé complet

La première étape est de couvrir le wafer silicium (4" de diamètre, $525 \mu\text{m}$ d'épaisseur) de nitrure de silicium stœchiométrique (Si_3N_4) de 80 nm d'épaisseur par LPCVD⁷⁰. Cette couche est alors gravée en face avant par RIE⁷¹ suivant un masquage photolithographique (image Fig. 55a)), puis exposée à un bain de KOH⁷² dont la température est maintenue à 90°C ⁷³ pendant 1 à 4 h selon la profondeur de gravure voulue. Ensuite le silicium est recouvert d'un isolant électrique (Si_3N_4 LPCVD 80 nm) pour éviter les fuites de courant dans le substrat (image Fig. 55b)), puis d'une couche de titane (couche d'accroche 100 nm par PVD⁷⁴) et enfin d'une couche d'or (800 nm par PVD). La bicouche métallique est gravée après masquage photolithographique (motifs formant les électrodes) par voie chimique ($\text{KI}+\text{I}_2$) puis buffer HF ⁷⁵ (image Fig. 55c)). Une protection en résine (motif en photolithographie, image Fig. 55d)) recuite en étuve à 220°C pendant 10h. Le matériau d'électrode, ou matière active (à base de charbon actif Kuraray

⁷⁰ Low Pressure Chemical Vapor Deposition : dépôt en phase vapeur à basse pression.

⁷¹ Reactive Ion Etching : gravure ionique réactive.

⁷² Hydroxyde de Potassium

⁷³ La gravure humide KOH utilisée suit la même procédure que pour le dispositif de récupération de vibration, exposé au chapitre précédent.

⁷⁴ Physical Vapor Deposition : dépôt physique en phase vapeur

⁷⁵ La gravure humide de la bicouche Ti/Au suit la même procédure que pour le dispositif de récupération de vibration, exposé au chapitre précédent.

Chemical YP-50) est alors déposé par sérigraphie dans les cuves en utilisant une racle en PVC⁷⁶ souple, puis recuit également en étuve à 220 °C pendant 10h (image Fig. 55e)). La résine est gravée à l'aide d'une solution basique (AZ400K non dilué) puis le composant est séché (image Fig. 55f)).

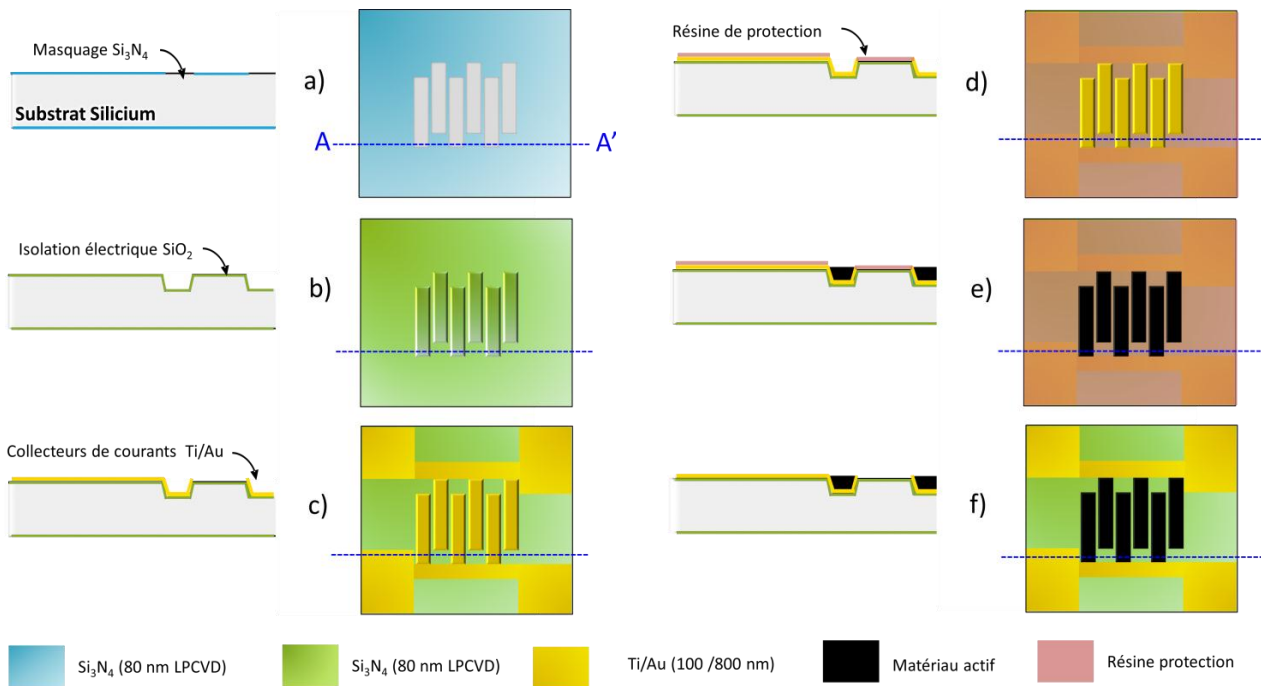


Fig. 55 – procédé de fabrication des μ CDCE sur Silicium.

3.1.2. Photolithographie sur motifs 3D profonds

La photolithographie définissant les motifs sur la bicouche métallique Ti/Au se fait sur des reliefs pouvant atteindre 400 μ m (profondeur maximale des cuves dans toutes les plaques traitées), ce qui pose de sérieux problèmes d'uniformité de la couche de résine déposée par tournette (épaisseur très hétérogène, voir schéma Fig. 56 a).

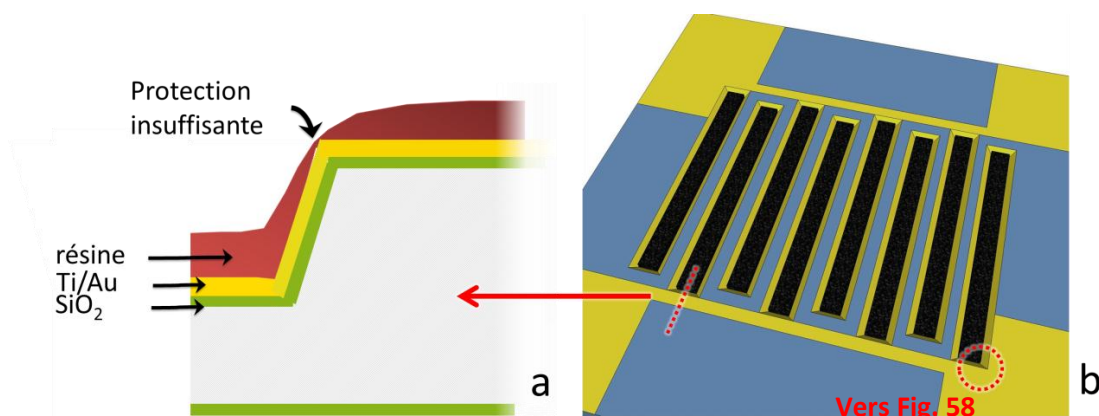


Fig. 56 - a) schéma du dépôt de résine sur des motifs 3D, b) représentation schématique du composant situant la vue en coupe a) et les prises de vue microscope Fig. 57.

⁷⁶ Polychlorure de vinyle

Les résines fluides (Clariant AZ 1529 1 μm et Sumitomo PFI 1 μm) habituellement utilisées pour la photolithographie avant gravure chimique de métaux mènent à des dépôts trop fins au niveau des arêtes, ce qui laisse la couche métallique exposée à la solution de gravure chimique sur des zones qui ne devraient pas l'être (Fig. 57 a). Nous avons alors utilisé une résine plus visqueuse (Clariant AZ 4562), déposée à plus faible vitesse (1000 tours.min⁻¹ pendant 30 s pour avoir une épaisseur moyenne > 10 μm). Ces conditions de dépôt ne favorisent pas une plus grande homogénéité de l'épaisseur, mais elles assurent un dépôt globalement plus épais, qui protège alors suffisamment les arêtes (Fig. 57 b). Par ailleurs, Kutchoukov *et al.* [51] ont proposé un dépôt à deux vitesses avec la résine AZ 4562, dont les résultats ont mené à une protection identique des arrêtes.

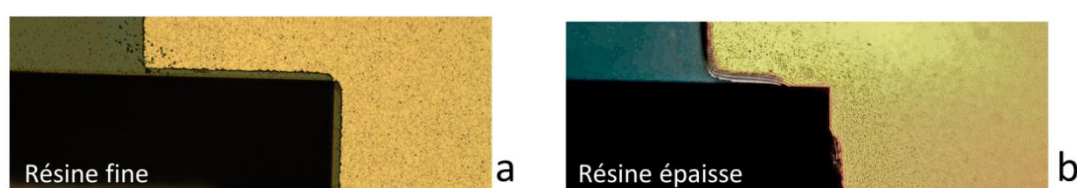


Fig. 57 - a) vue de dessus (microscope) d'un dépôt de résine habituellement utilisée pour les motifs en gravure chimique (Sumitomo PFI 1 μm) après insolation/révélation, d) le même endroit avec la résine épaisse (AZ 4562).

Pour s'assurer de la continuité de la couche métallique entre le fond des cuves et la surface, nous avons conduit une observation au MEB avec une inclinaison de 27 ° (Fig. 58 a et b, représentant la zone de la Fig. 56 b). Même attaqué par la solution de gravure chimique, la bicouche métallique reste continue, ce qui sera confirmé par les tests électriques sous pointes. A long terme, nous sommes conscient de la nécessité d'améliorer ce contact car la résistance série des composants peut en être affectée.

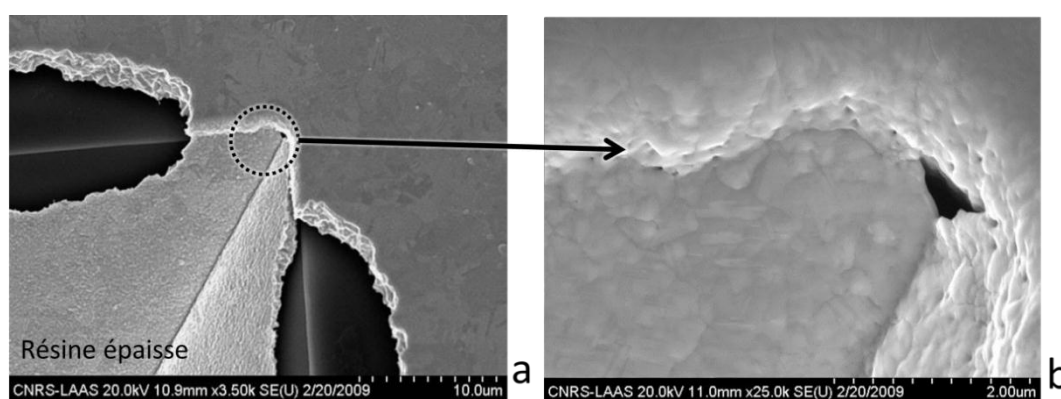


Fig. 58 - e) images microscope électronique (MEB) d'un coin où le contact doit remonter, f) agrandissement sur la couche d'or pour vérifier la continuité de la bicouche métallique et donc du contact électrique.

3.1.3. Dépôt du matériau d'électrode

Sérigraphie automatique avec masquage acier

Le dépôt de la matière active a d'abord été étudié par sérigraphie à travers un masque en acier inox dont les ouvertures correspondent aux cuves ; l'application de la pâte étant assurée par un équipement automatique de sérigraphie (Fig. 59). Cependant, cette technique impose certaines caractéristiques

rhéologiques pour la pâte : celle-ci doit être globalement visqueuse⁷⁷ et la viscosité doit être maîtrisée dans le temps et sous les contraintes mécaniques pour passer à travers les ouvertures lorsqu'elle est poussée par la raclette.

La nature du liant et du solvant a un rôle déterminant sur les propriétés rhéologiques de la pâte. Les premiers essais avec un mélange PTFE/éthylène glycol ont donné une pâte anti-thixotrope⁷⁸ et très hydrophobe qui ne passait pas à travers des ouvertures de 1 mm de côté. Le PTFE a donc été remplacé par du PVDF, moins hydrophobe. Cependant l'éthylène glycol (choisi car visqueux et s'évaporant lentement à température ambiante, il a également servi de solvant pour l'encre dans la technique de dépôt par jet d'encre) dégorgeait des dépôts réalisés et en modifiait la forme (limitant de fait la résolution) tout en charriant des particules de charbon pouvant causer des court-circuits. La Fig. 60 est une image microscope d'un transfert de cette pâte à travers des ouvertures carrées dans un masque métallique, où l'on voit bien la perte de la forme lors du transfert, et la résolution très réduite.

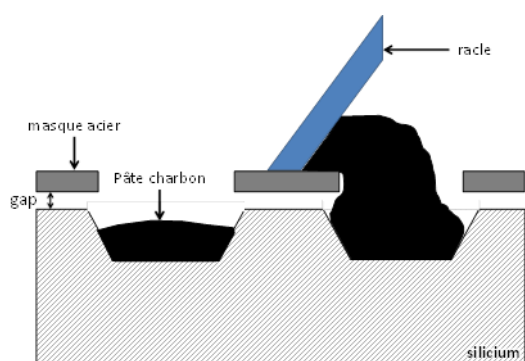


Fig. 59 – schéma du dépôt de pâte par sérigraphie avec masque acier.

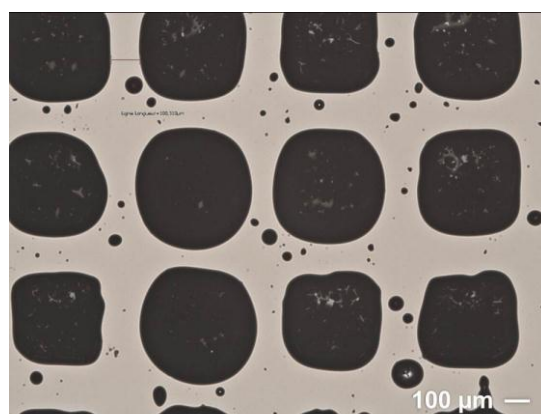


Fig. 60 – image microscope d'un dépôt sur Si_3N_4 plan par sérigraphie à travers des ouvertures carrées dans un masque métallique. La pâte est composée de charbon actif lié par du PVDF dans de l'éthylène glycol.

Pour donner les propriétés rhéologiques adéquates à la pâte, nous avons dû remplacer l'éthylène glycol par de l'éthanol comme solvant, l'utilisation d'acétone (solvant usuel du PVDF) étant proscrite au vu de sa trop grande volatilité à température ambiante. La dissolution du PVDF par l'éthanol étant incomplète, nous avons dû mettre le liant en grande quantité (30 % en masse) pour assurer un maintien minimal de la pâte dans les cuves et éviter que les grains ne se dispersent une fois l'électrolyte introduit, ce qui diminue d'autant la densité de matériau actif et donc la capacité surfacique atteignable par cette technique.

Ce mélange remplit les cuves (bien que seulement partiellement), mais le solvant charrie des grains de charbon actif après le passage de la raclette jusqu'à son évaporation, ce qui constitue un risque de court-

⁷⁷ Plus ou moins la consistance du chocolat fondu, soit environ 25 000 cP à 100 tours.min⁻¹

⁷⁸ Un fluide est dit thixotrope si sous contrainte constante sa viscosité diminue au cours du temps. On retrouve ce comportement dans des gels et des fluides contenant des solides (eau et sable par exemple) [52], [53]. Par exemple, la pâte à base de glycol d'éthylène avait un caractère thixotrope prononcé.

circuit d'une cuve à l'autre (voir Fig. 61). La formulation de la pâte est donc satisfaisante, mais la technique nécessite une amélioration pour réduire de façon significative ce risque de court-circuit.

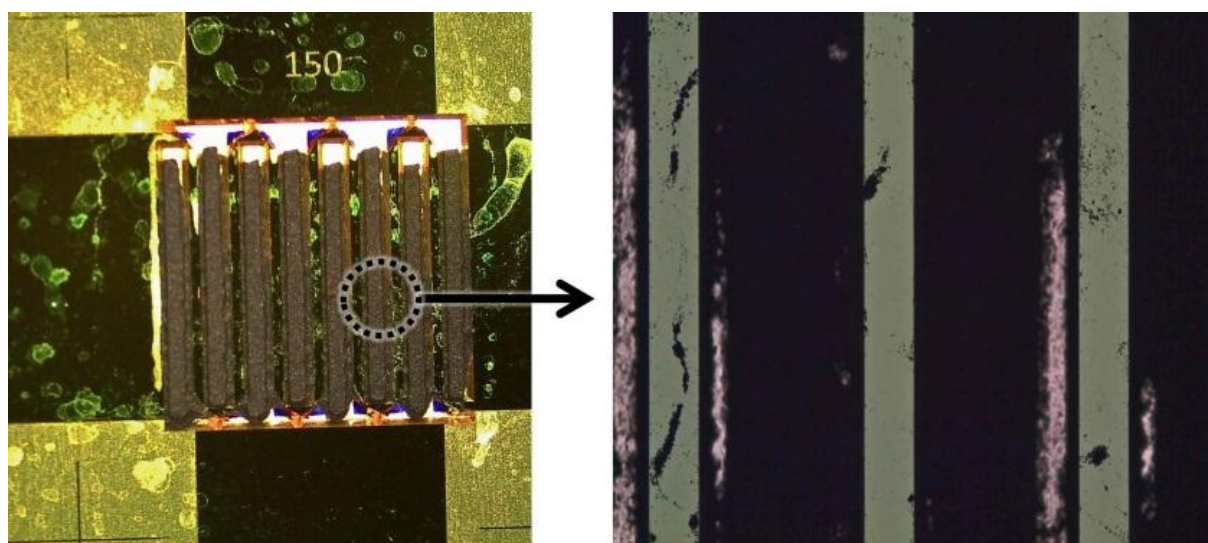


Fig. 61 – a) image microscope du dépôt par sérigraphie avec masque acier, en vue de dessus. On y voit l'état de surface des abords du composant, impropre au collage pour l'encapsulation. b) agrandissement (image microscope) : 4 cuves partiellement remplies (noir sur fond rose) et 3 murs inter-cuves (gris) sur lesquels on distingue du charbon actif pouvant établir un court-circuit entre 2 cuves.

Sérigraphie avec couche sacrificielle en résine sur-recuite

Nous avons alors proposé une méthode alternative de dépôt, en recourant à une couche de résine sacrificielle, laquelle recouvre l'ensemble du wafer à l'exception des cuves. La résine sacrificielle est une résine fluide (Sumitomo PFI) déposée à grande vitesse (5000 tours.min⁻¹) pour avoir une épaisseur inférieure à 1 µm, insolée (50 mJ à 405 nm) et développée (MIF-CD 26) recuite à 220 °C pendant 12 h en étuve. Ce recuit permet de rendre la résine insensible à l'acétone et à l'éthanol, et soluble à l'AZ 400K pur (base forte) à température ambiante. La pâte – contenant du charbon actif (Kuraray Chemical YP-50), et du PVDF (20 % en masse) en suspension dans de l'acétone – est étalée manuellement avec une racle souple en PVC.

Avec cette technique, les cuves sont plus remplies mais l'utilisation d'une pâte (qui contient donc un solvant) implique que le remplissage ne peut être complet puisque le solvant s'évapore : l'épaisseur du dépôt (sur des cuves de 400 µm de profondeur) est estimée à $320 \pm 10 \mu\text{m}^{79}$ (voir Fig. 63). Le recours à une couche sacrificielle élimine le besoin d'un masque de sérigraphie en acier, et réduit considérablement le risque de court-circuit en protégeant les abords des cuves (voir Fig. 62).

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

⁷⁹ Il s'agit d'une valeur moyenne estimée à partir des images microscope (échantillon incliné) par rapport à la profondeur des cuves ; la pâte étant visqueuse lors du dépôt, celui-ci n'est pas homogène.

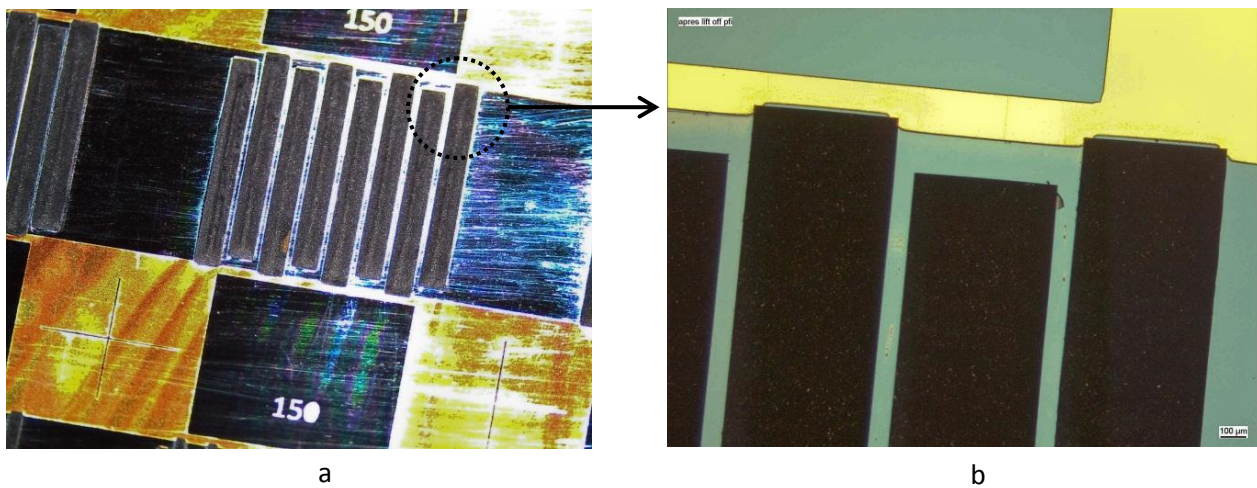


Fig. 62 – a) image microscope du dépôt par sérigraphie avec couche sacrificielle (après dépôt et avant gravure de la couche sacrificielle), b) image microscope (agrandissement) après gravure de la couche sacrificielle.

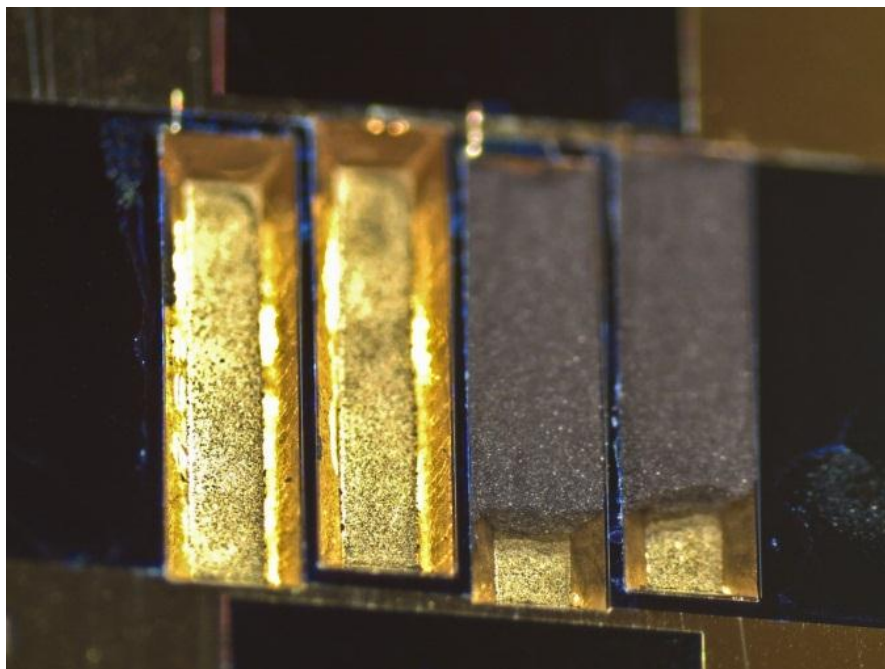


Fig. 63 – image microscope du dépôt par sérigraphie avec couche sacrificielle, dont une partie a été enlevée pour estimer le volume des électrodes.

3.2. Encapsulation de l'électrolyte liquide

L'encapsulation de l'électrolyte est un point critique pour fournir un composant fonctionnel. Celle-ci doit être hermétique à l'eau et être réalisable à basse température. Hors aucune technique de la littérature ne remplit ces deux conditions (voir section 1.2.2) concernant des micro-supercondensateurs sur silicium. La section ci-après propose un procédé d'encapsulation simple développé dans un premier temps et un procédé d'encapsulation en deux temps qui correspond à une amélioration du premier procédé.

3.2.1. Procédé d'encapsulation simple

Nous avons utilisé une résine photosensible et thermoplastique (polyisoprène solvaté dans du xylène, vendu sous le nom SCresist 180 par Fujifilm), déposée sur un substrat transparent (borosilicate ou silice fondue), insolée et révélée. Le substrat transparent (qui sert de capot) est ensuite pressé contre le substrat silicium contenant le composant juste après que l'électrolyte a été déposé. Cette opération est effectuée en atmosphère contrôlée (boîte à gants : argon avec moins de 1 ppm d'eau) pour éviter la contamination de l'électrolyte avec l'eau, après étuvage (120 °C) à vide du substrat silicium pour éliminer les traces d'eau éventuellement adsorbée à la surface du charbon actif. L'ensemble substrat silicium et capot est ensuite chauffé à 150 °C sous 2 bar pendant 120 min, puis découpé en 2 temps (voir Fig. 65).

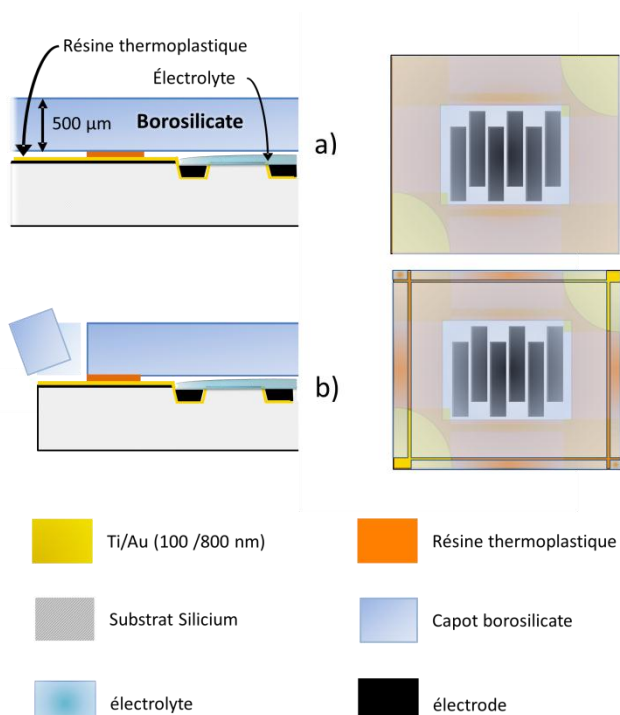


Fig. 64 – procédé d'encapsulation de l'électrolyte liquide : a) dépôt de résine photosensible et thermoplastique sur un substrat transparent (borosilicate ou silice fondue), b) découpe en 2 temps

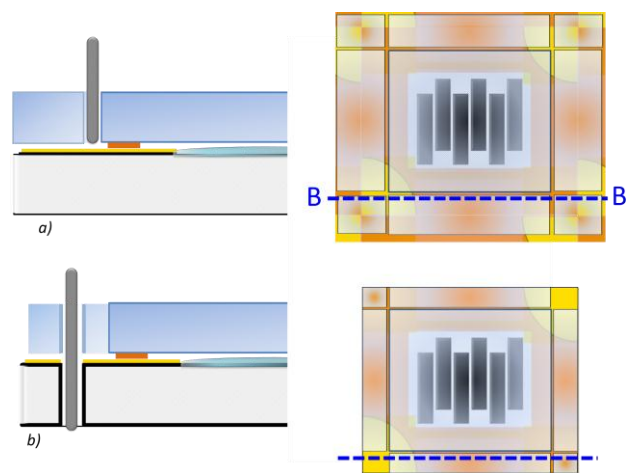


Fig. 65 – détail des chemins de découpe : a) découpe partielle (seulement le capot), b) découpe totale. Le trait [BB'] correspond à la vue en coupe présentée à gauche de la figure.

Collage

La Fig. 66 (a) montre des images microscope des abords de la marche entre la bicouche métallique Ti/Au (100/800 nm) et le Si_3N_4 , où se forment des bulles qui peuvent ouvrir un passage qui compromet l'herméticité de l'encapsulation. D'après [41], ces bulles résultent du piégeage de substances volatiles contenues dans le polymère (eau, solvant) ou d'argon (le collage n'a pas été fait sous vide mais sous atmosphère en boîte à gants) lors de sa rigidification. La Fig. 66 (b) montre des images microscope des abords de la marche entre la bicouche métallique Ti/Au et le Si_3N_4 lors d'un collage réussi : lorsque la température est suffisamment élevée, les bulles formées sont assez petites pour ne pas former un passage continu, et donc ne pas rompre l'herméticité. Cette température doit être ajustée selon l'épaisseur de la couche métallique. Le Tableau 27 montre l'évolution de la qualité du collage en fonction de l'épaisseur de

la couche de résine, et nous avons pu établir qu'une forte épaisseur de résine favorise le collage. Cependant les épaisseurs présentées ici demandent un dépôt à très basse vitesse de rotation (500 tour.min⁻¹) et en double couche (jusqu'à 12,4 µm). Un dépôt plus épais (triple couche à 17,8 µm) réduit la planarité de la couche, ce qui réduit la qualité du collage.

Epaisseur Ti/Au [nm]	Epaisseur résine [µm]	Température collage [°C]	Durée [min]	Indice de collage ⁸⁰
100 / 800	5,1 ± 0,2	130	30	56 %
100 / 800	8,2 ± 0,3	130	30	63 %
100 / 800	12,4 ± 0,3	130	30	85 %
100 / 800	17,8 ± 1,2	130	30	40 %

Tableau 27 – indice de collage en fonction de la température de collage, de l'épaisseur de résine et des contacts métalliques.

Pour arriver au collage hermétique, il faut modifier le rapport épaisseur électrodes/épaisseur résine ou augmenter la température. Le Tableau 28 résume les conditions de température et d'épaisseur de résine permettant l'encapsulation en fonction de l'épaisseur des contacts métalliques. Nous avons obtenu un collage hermétique pour une épaisseur standard d'électrode (100/800 nm, permettant la prise de contact électrique par wedge bonding) pour une température de 150 °C (moins que le point d'ébullition du carbonate de propylène) et une durée de 120 minutes.

Epaisseur Ti/Au [nm]	Epaisseur résine [µm]	Température collage [°C]	Durée [min]	Indice de collage
50 / 100	10,6 ± 0,2	130	30	100 %
50 / 150	12,7 ± 0,6	130	60	100 %
100 / 800	12,8 ± 0,6	150	120	100 %

Tableau 28 – température de collage et épaisseur de résine pour parvenir à l'encapsulation en fonction de l'épaisseur des contacts métalliques.

La Fig. 67 montre un composant avec du carbonate de propylène encapsulé dans des cuves de 104 µm de profondeur ; le composant a une épaisseur totale de 1130 µm et une surface de 0,65 cm².

⁸⁰ L'indice de collage est la moyenne (sur tous les composants d'un wafer) du rapport de surface collée sans bulle sur la surface totale observée, celle-ci étant toujours identique d'un composant à l'autre (voir Fig. 66 a). La surface prise au microscope mesure 2,6 mm² et seule la surface de la grande bulle rompant l'herméticité est prise en compte au dénominateur de l'indice.

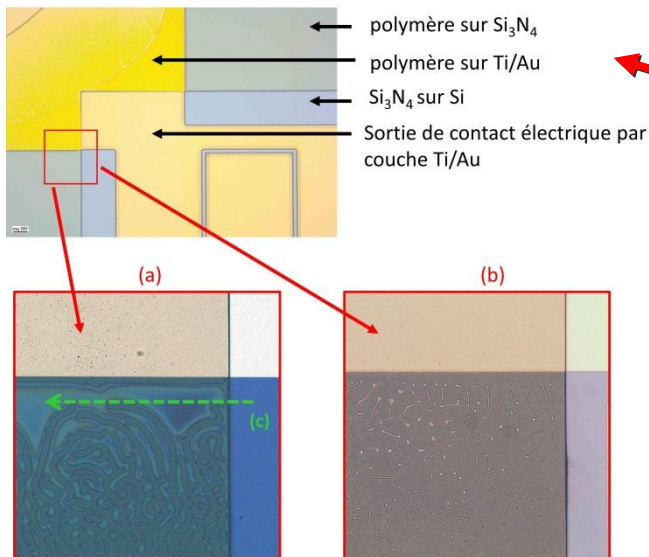


Fig. 66 – collage échoué (a) et réussi (b) sur une bicouche métallique Ti/Au servant à sortir les contacts électriques du composant vers l'extérieur. Comme on peut le voir sur (a), d'importantes bulles se sont formées aux abords de la marche Ti/Au – Si₃N₄, qui sont le signe visible d'une herméticité compromise à travers (c). La zone étudiée est repérée en pointillés rouges sur la Fig. 67.

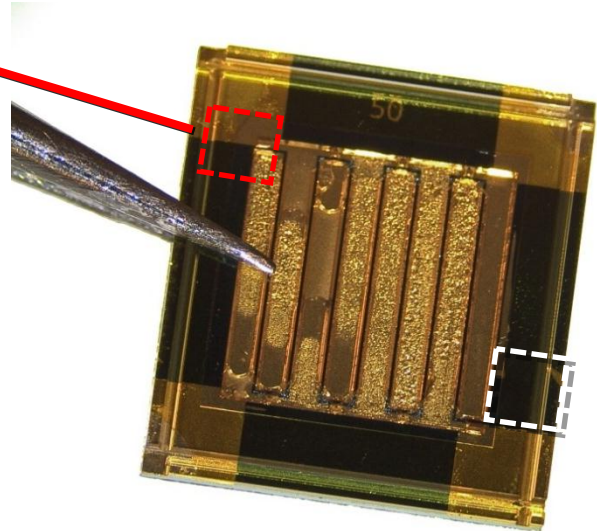


Fig. 67 – électrolyte (carbonate de propylène) encapsulé dans des cuves de 104 µm de profondeur. La zone repérée par un carré pointillé blanc correspond à la zone étudiée dans Fig. 69.

Caractérisation du polymère

Pour comprendre le comportement du polymère que nous utilisons, nous avons fait⁸¹ des expériences de calorimétrie différentielle sur des échantillons exposés et non-exposés au rayonnement ultraviolet, présentés dans la Fig. 68.

⁸¹ Mesures réalisées par la société NovaMEMS, basée sur le campus du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) à Toulouse.

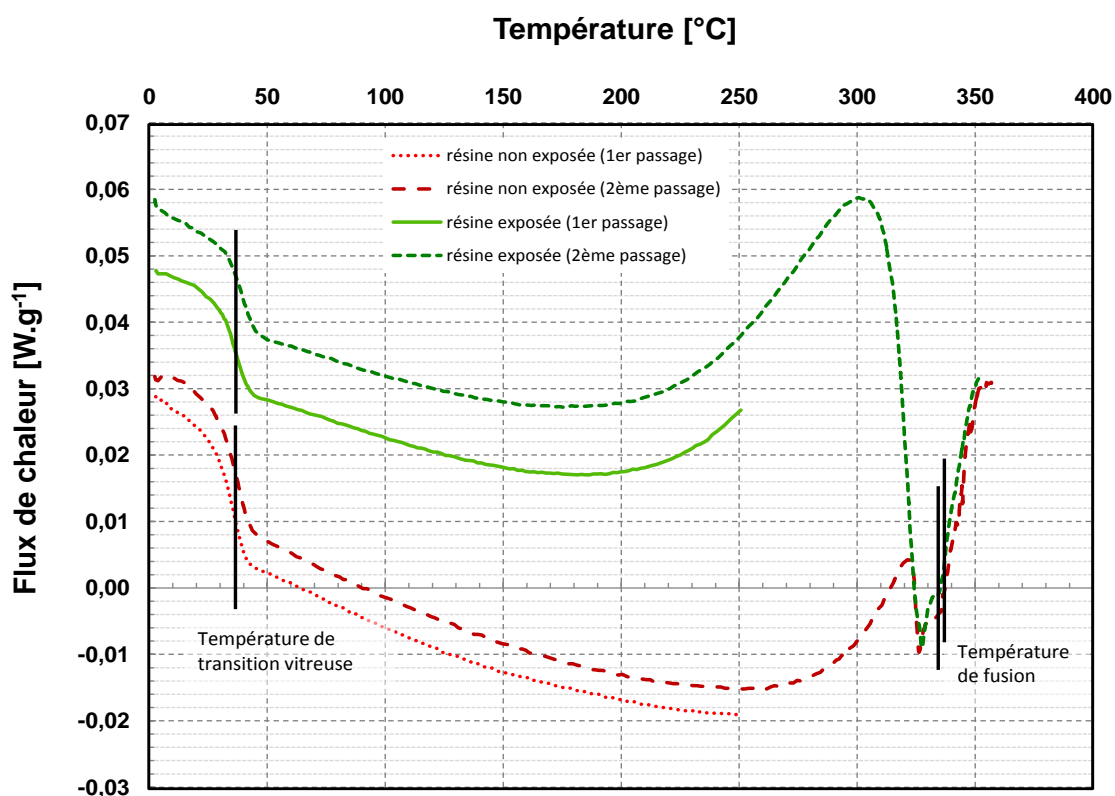


Fig. 68 – mesures de calorimétrie différentielle sur le polymère thermoplastique d'encapsulation.

Le polymère présente une transition vitreuse⁸² à 38,7 °C (pour l'échantillon insolé comme pour l'échantillon non insolé), et une température de fusion à 327 °C pour l'échantillon insolé et 335 °C pour l'échantillon non insolé. Il n'y a pas de différence entre le premier balayage en température et le second, pour les deux échantillons, ce qui montre que le polymère ne réticule pas sous l'effet de la température. L'absence de transition particulière entre la transition vitreuse et la fusion indique qu'il s'agit d'un polymère thermoplastique simple, c'est-à-dire dont la viscosité augmente à mesure que sa température augmente.

Résistance aux électrolytes

Les électrolytes organiques utilisés dans les supercondensateurs peuvent avoir un effet sur le polymère (perte des propriétés d'adhérence, perte de l'étanchéité). Pour étudier cet impact, nous avons immergé des composants encapsulés (à vide) et découpés dans du propylène de carbonate et de l'acétonitrile pendant 19 jours.

⁸² Température au-delà de laquelle les chaînes polymères sont mobiles les unes par rapport aux autres.

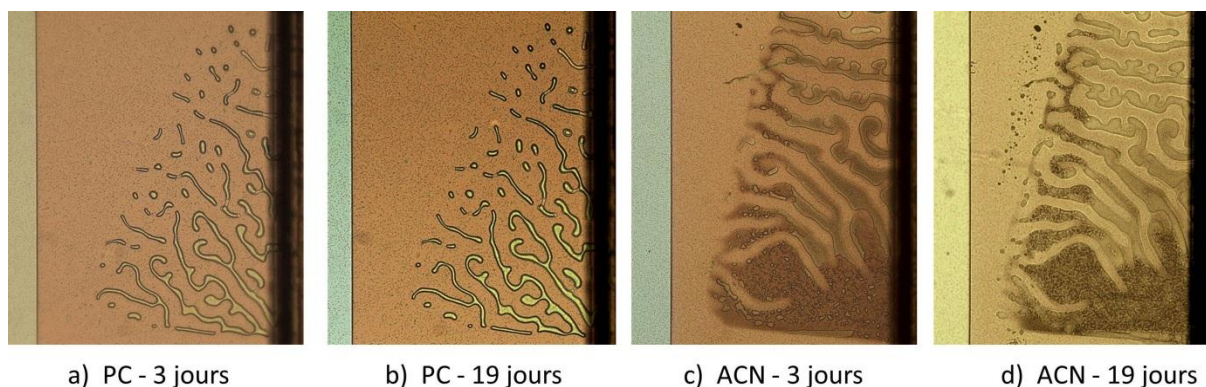


Fig. 69 – effet de l'exposition du polymère au carbonate de propylène (PC) et à l'acétonitrile (ACN). La zone étudiée est repérée sur la Fig. 67 : la bande noire sur la droite correspond au trait de découpe qui constitue l'interface entre la résine et l'électrolyte dans lequel le composant est immergé.

Des images microscope d'une région (repérée sur la Fig. 67) des composants immergés sont présentées dans la Fig. 69. Le carbonate de propylène ne semble pas avoir d'effet notable (a et b), mais l'étude de composants exposés à de l'acétonitrile semble montrer une légère extension des bulles (c et d). L'étude d'un autre composant immergé pendant 214 jours dans de l'acétonitrile n'a pas montré d'extension des bulles au-delà de leurs zone initiale, ce qui suppose soit que l'extension des bulles est limitée dans le temps, soit que le phénomène est une interprétation erronée (couleurs, contraste, remplissage par l'électrolyte lors de l'observation) des images du composant exposé 19 jours. Il nous est malheureusement difficile de conclure avec certitude sur ce point avec si peu de données.

Résistance mécanique

La résistance mécanique au cisaillement a été testée à l'aide d'un dispositif de die shear⁸³, sur des composants avec et sans électrolyte encapsulé pour étudier l'impact de l'électrolyte. L'appareil de test (DAGE series 4000T) consiste en un étai (maintenant la partie silicium du composant) et une pointe qui pousse le capot dans le plan de l'interface entre les deux substrats jusqu'à ce que le collage cède. Les composants encapsulés ont des anneaux de colle de 500 μm de côté, ce qui représente une surface de 22,95 mm^2 . La force à la rupture a été mesurée à 27,9 kgf (sans électrolyte) et 27,4 kgf (avec électrolyte), ce qui correspond respectivement à une contrainte de cisaillement de 11,9 MPa et 11,7 MPa. Ces valeurs dépassent les recommandations du standard MIL-STD-883, qui requiert une force de rupture en cisaillement de plus de 2,5 kgf pour un composant de plus de 4 mm^2 . Les forces à la rupture mesurées sont comparables aux valeurs relevées dans la littérature : Jourdain *et al.* [44] ont caractérisé leur collage (à base de BCB) et ont trouvé une force à la rupture de 18 kgf pour un composant de 4 mm^2 (anneaux de colle de 400 μm , Marquardt *et al.* [48] ont quant à eux trouvé une contrainte de rupture en cisaillement de 15 MPa pour leur collage à base d'époxy photo-réductible.

⁸³ Les tests ont été conduits par la société NovaMEMS

3.2.2. Limitations du procédé en un temps

Le procédé d'encapsulation en un temps a permis de produire un composant fonctionnel, où l'électrolyte (carbonate de propylène) est protégé hermétiquement de l'atmosphère extérieure. Cependant ce procédé a deux défauts :

- Une température d'encapsulation en présence de l'électrolyte de 150 °C, compatible avec le carbonate de propylène (électrolyte le plus courant dans les supercondensateurs commerciaux), mais incompatible avec de nombreux autres électrolytes (liquides ioniques, électrolytes aqueux, acétonitrile)
- Un contrôle difficile de la quantité d'électrolyte introduit : dès que l'électrolyte est mis en excès, il déborde, se répand à la surface du wafer et rend le collage impossible. Or les très faibles volumes (1 à 7 μL selon le composant et la profondeur) rendent le dépôt manuel en boîte à gants très incertain, et donc les performances d'un composant à l'autre peu comparables.

3.2.3. Description du procédé d'encapsulation en deux temps

Nous avons donc conçu un procédé qui dépasse ces deux limitations : une encapsulation en deux temps. Il s'agit de coller un premier capot percé d'ouvertures, puis de déposer l'électrolyte et enfin le second capot. L'intérêt est triple :

- le premier capot peut être collé à haute température ($> 200\text{ °C}$) et donc assurer un collage avec un minimum de bulles
- le premier capot sert de réservoir et permet d'introduire suffisamment d'électrolyte sans risque de débordement, et l'utilisation d'ouvertures étroites permet de contrôler plus précisément la quantité d'électrolyte introduite (sur le principe du pycnomètre).
- La seule température à laquelle est exposé l'électrolyte est de 80 °C puisque le collage du dernier capot se fait sur une interface plane (celle du premier capot).

Le dépôt par sérigraphie étant réalisé dans des cuves, le capot intermédiaire (ou réservoir) est percé de deux trous, et l'électrolyte injecté par seringue ou micropipette dans un trou, tandis que l'air s'échappe par l'autre trou. La principale difficulté consiste à concilier l'ouverture traversante du capot intermédiaire avec le dépôt de résine adhésive thermoplastique :

- Si la résine est déposée avant la réalisation d'ouvertures, celle-ci ne doit pas être dégradée par des méthodes de gravure chimique ou plasma.
- Si les ouvertures sont réalisées avant le dépôt de résine, celui-ci est beaucoup trop inhomogène (comme pour la photolithographie sur les cuves dans la section 3.1.2) et le collage est non-hermétique.

Pour dépasser ce compromis nous avons réalisé le dépôt de la résine dans un premier temps, puis gravé les ouvertures à l'aide de silice en poudre pulsée. Les deux faces du capot sont précédemment protégées par un film adhésif, qui est retiré après gravure (Fig. 71).

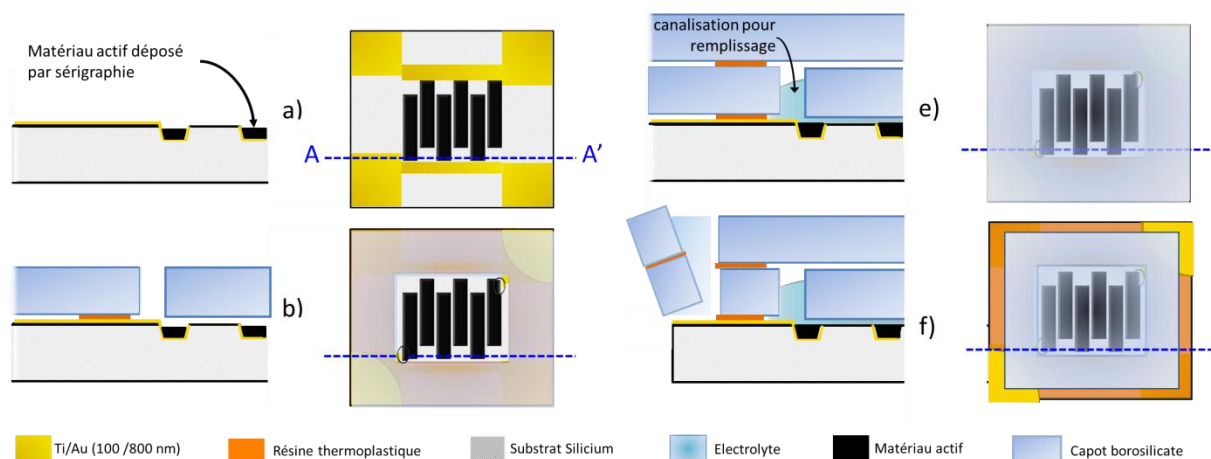


Fig. 70 - procédé d'encapsulation en deux temps pour un dépôt par sérigraphie.

Faute de temps, une tentative unique a été réalisée (Fig. 72), mais le premier collage a été imparfait. La température trop faible (150 °C) de cette opération est probablement en cause : lors du développement du procédé en un temps, nous avons recherché la température la plus basse possible pour encapsuler des collecteurs de courant Ti/Au sans matériau actif⁸⁴, mais le dépôt par sérigraphie avec couche sacrificielle introduits des impuretés et le matériau actif piège une très grande quantité de gaz qui rendent un collage à 150 °C pendant 1h insuffisant. Dans la mesure où l'électrolyte n'est pas présent à cette étape dans le procédé en deux temps, il serait préférable d'élever la température au-delà de 200 °C pendant au moins 2h.

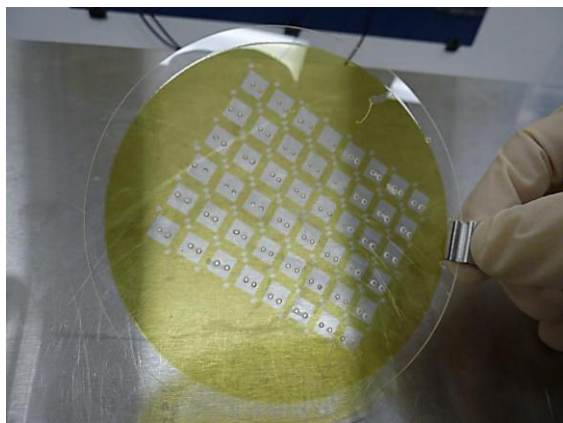


Fig. 71 – capot intermédiaire percé (les ouvertures font 1 mm de diamètre environ). Les films protecteurs ont été enlevés.

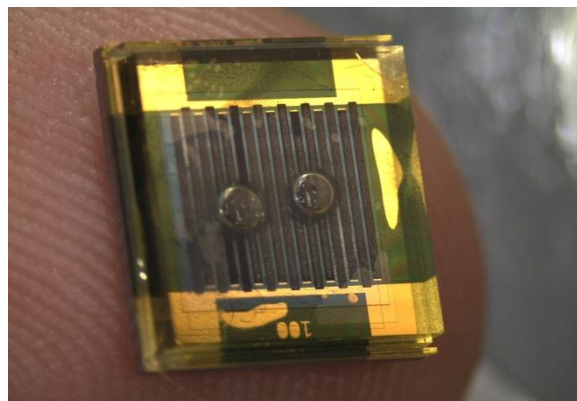


Fig. 72 – composant collé avec le procédé en deux temps (dépôt matériau actif par sérigraphie avec couche sacrificielle) et découpé. La seule tentative (dont le résultat est montré ici) a été un échec (électrolyte contaminé et partiellement évaporé).

⁸⁴ Afin de ne pas être tributaire de la méthode de dépôt.

4. Caractérisations électrochimiques des microsupercondensateurs

4.1. Etudes sur les électrodes

Des micro-supercondensateurs ont été fabriqués avec la méthode de dépôt présentée précédemment (râcle souple et couche sacrificielle) dans des cuves de 336 μm de profondeur ($\pm 2 \mu\text{m}$). La pâte utilisée contient 15 % en masse de PVDF (liant) et du charbon activé Kuraray YP-50 en suspension dans de l'acétone. Pour ces études concernant les électrodes, les microcomposants sont collés et bondés sur des boîtiers TO8. L'électrolyte, du carbonate de propylène contenant des sels Et_4NBF_4 (1 mol.L^{-3}) est alors déposé sur les électrodes, en boîte à gants. Les microcomposants sont enfermés dans une boîte scellée et qui comporte des sorties de câbles électriques pour les caractérisations. Ces caractérisations se font sur un potentiostat Bio-logic VMP-3 piloté par le logiciel EC-lab 9.95.

4.1.1. Capacité surfacique

Nous avons mesuré le voltammogramme des micro-supercondensateurs fabriqués (Fig. 73) et évalué la capacité surfacique du composant en intégrant la décharge sur toute la gamme de potentiel selon la relation :

$$C = \frac{Q}{\Delta E \cdot S} \quad (23)$$

où Q est la charge (en C), ΔE la fenêtre de potentiel (en V) et S la surface totale des 2 électrodes (en cm^2). Pour le voltammogramme présenté en Fig. 73, cela représente une capacité surfacique de $81,0 \text{ mF.cm}^{-2}$ à 5 mV.s^{-1} , $82,2 \text{ mF.cm}^{-2}$ à 20 mV.s^{-1} , et $78,7 \text{ mF.cm}^{-2}$ à 50 mV.s^{-1} .

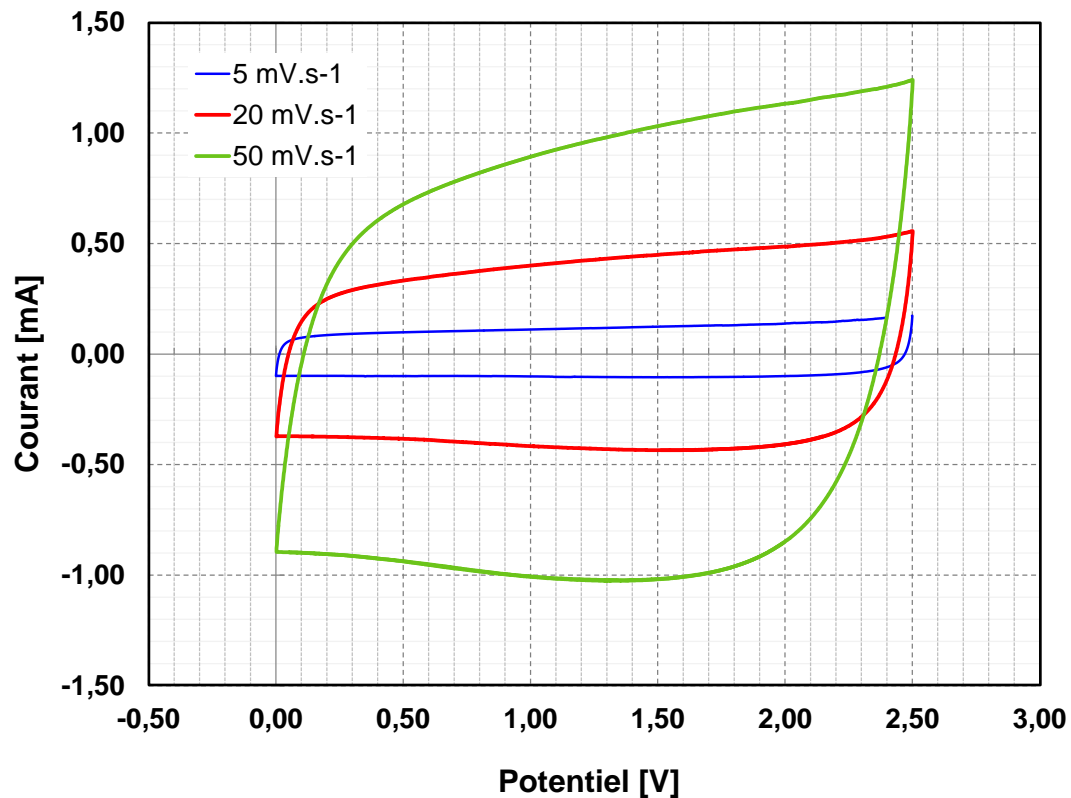


Fig. 73 – voltammogrammes d'un micro-supercondensateur fabriqué avec la méthode décrite dans la section 4. Le composant a une structure 8 électrodes interdigitées séparées de 100 μm .

La diminution de la capacité surfacique avec l'augmentation de la vitesse de balayage (visible sur la Fig. 74) est due à la nature du stockage des ions. En effet lors d'une charge/décharge lente, les ions ont le temps de diffuser à l'intérieur des pores et donc d'accéder à toute la surface disponible, alors que pour une charge/décharge rapide seules les surfaces les plus accessibles (entrées des pores) sont exploitées.

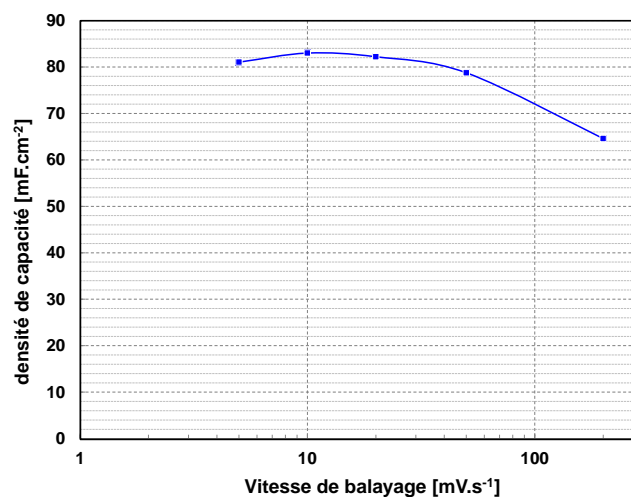


Fig. 74 – densité surfacique de capacité en fonction de la vitesse de balayage pour le composant testé dans la Fig. 73.

Nous avons calculé la valeur attendue de la capacité surfacique en considérant le volume occupé par $260 \pm 10 \mu\text{m}$ (mesuré) de charbon actif dans des cuves de $336 \mu\text{m}$, soit seulement $2,31 \text{ mm}^3$ (64 %) sur

les 3,63 mm³ disponibles pour un agencement 8 doigts espacés de 100 µm. La valeur attendue était de 102,4 mF.cm⁻² (320 mJ.cm⁻²), soit une différence de 20 % par rapport à la valeur mesurée (82,2 mF.cm⁻²) qui peut être attribuée à la plus grande proportion et la nature du liant organique (PVDF), qui représente 15 % de la masse contre 10 % de liant organique PTFE dans l'article ayant servi de référence pour la densité volumique de capacité.

La densité d'énergie atteinte (257 mJ.cm⁻²) avec 80 mF.cm⁻² à 2,5 V est significativement supérieure aux techniques présentées dans la littérature (maximum 72 mJ.cm⁻² [26]). Ces performances sont cependant insuffisantes vis-à-vis des objectifs du projet AUTOSSENS, qui visait 360 mJ.cm⁻². Ainsi, même en améliorant fortement les valeurs de l'état de l'art, la technologie développée nécessite encore des approfondissements.

4.1.2. Effet de la microstructure

Lors de leur conception, les composants avaient une surface égale et un agencement d'électrode différent (voir Tableau 26), de façon à pouvoir comparer directement l'effet de la microstructure. Cette comparaison requiert un dépôt uniforme du matériau d'électrode, ce qui est difficile avec la méthode présentée précédemment (sérigraphie avec racle PVC souple). Nous avons néanmoins pu réaliser cette étude avec un dépôt par électrophorèse, décrit par Pech *et al.* [49], dont l'épaisseur (7 µm) est restée constante d'un composant à l'autre. Le matériau d'électrode utilisé est du charbon actif (Fig. 73, utilisé pour le dépôt par jet d'encre et par sérigraphie) ou des *oignons de carbone*⁸⁵ (Fig. 75). La Fig. 75 présente la capacité normalisée mesurée en fonction de la vitesse de balayage pour un nombre d'électrodes croissant.

Il est ici intéressant de noter que les vitesses de balayage mesurées avec ces microcomposants sont exceptionnelles : de 50 à 200 V.s⁻¹, alors qu'elles sont généralement limitées à 100 mV.s⁻¹ dans les articles précédemment publiés dans la littérature. Une vitesse de balayage élevée est la traduction de la rapidité d'absorption/désorption des ions dans le composant et donc d'une puissance spécifique importante (cycles de charge/décharge rapides). Nous expliquons cette rapidité d'adsorption/désorption par l'absence de liant organique dans la matière active, et l'utilisation d'un matériau actif innovant, les oignons de carbone, qui permettent une accessibilité des ions bien plus favorable que dans le cas du charbon actif comportant tout un réseau de pores.

⁸⁵ nanoparticules sphériques de 6-7 nm de diamètre, composées de feuillets graphitiques en couches concentriques superposés à la manière d'un oignon [54]

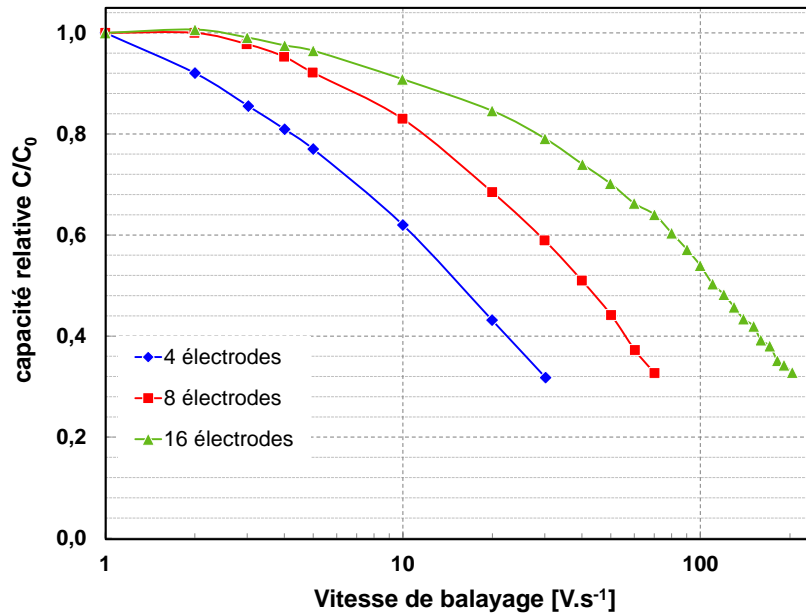


Fig. 75 – capacité normalisée⁸⁶ (C/C_0) en fonction de la vitesse de balayage pour des microstructures différentes (4 à 16 électrodes interdigitées). Ici les *oignons de carbone* constituent le matériau d'électrode (7 μm d'épaisseur).

Comme le montre la Fig. 75, l'effet de la microstructure sur la vitesse de balayage atteignable est également important. Plus un composant a d'électrodes (à surface égale), plus il est puissant. En d'autres termes, la proximité des électrodes entre elles réduit la résistance de l'électrolyte, et favorise une charge et une décharge rapide.

Pour tester cette hypothèse, nous avons calculé, par une routine Matlab® (voir annexes), la distance moyenne d'un ion à l'électrode de charge opposée la plus proche. Le programme considère le masque des collecteurs de courant sur lesquels sont déposées les électrodes, et divise la surface du composant en carrés de 10 μm de côté, l'espace du composant étant rempli de cations et anions de façon uniforme (ce qui correspond au supercondensateur déchargé). Pour chaque carré il considère un cation⁸⁷ et cherche quel carré parmi tout l'espace du composant comporte l'anode la plus proche. La valeur de cette distance minimale est reportée dans la Fig. 77. Nous avons pu établir une corrélation de type linéaire entre la distance minimale moyenne (chemin ionique moyen) et la résistance série équivalente mesurée sur un dépôt de 5 μm (voir Fig. 76), mesuré avec un électrolyte Et_4NBF_4 (1 mol.L⁻¹) dans du carbonate de propylène, en atmosphère argon contenant moins de 1 ppm d'eau. Ces observations semblent indiquer que la résistance liée à l'électrolyte (limitation de la diffusion des ions) est prépondérante dans la valeur de la résistance série équivalente, devant les contributions des collecteurs de courant, de la matière active et de l'interface (voir [6] pour la décomposition des contributions de l'ESR). Les caractéristiques calculées et mesurées des composants sont rappelées dans le Tableau 29.

⁸⁶ La surface totale d'électrode et donc la quantité de matériau variant d'un composant à l'autre, nous avons représenté les variations de capacité en les normalisant par rapport à la capacité maximale (à basse vitesse de balayage) du composant.

⁸⁷ Les motifs étant symétriques, il n'est pas nécessaire de faire le calcul pour les 2 espèces.

Electrodes	Murs (a) [μm]	Chemin ionique moyen [μm]	ESR [$\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$]
4	100	167,73	9,8
4	150	176,05	10,9
8	100	80	5,8
8	150	86,34	6,3
16	100	43,67	3

Tableau 29 – caractéristiques des composants comparés et chemin ionique moyen calculé.

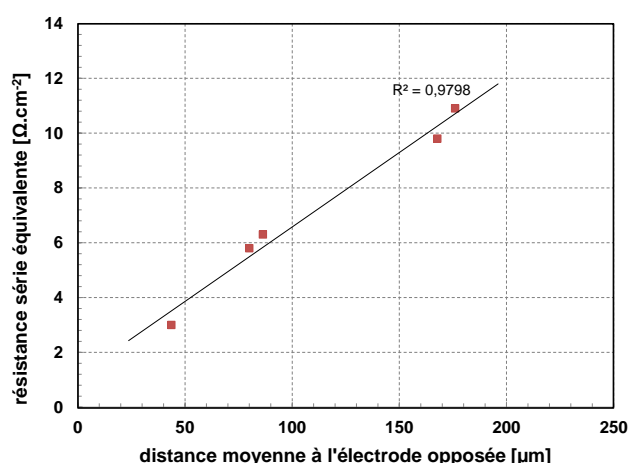


Fig. 76 – résistance série équivalente en fonction de la distance minimale moyenne (chemin ionique moyen), pour un dépôt de 5 μm de charbon actif.

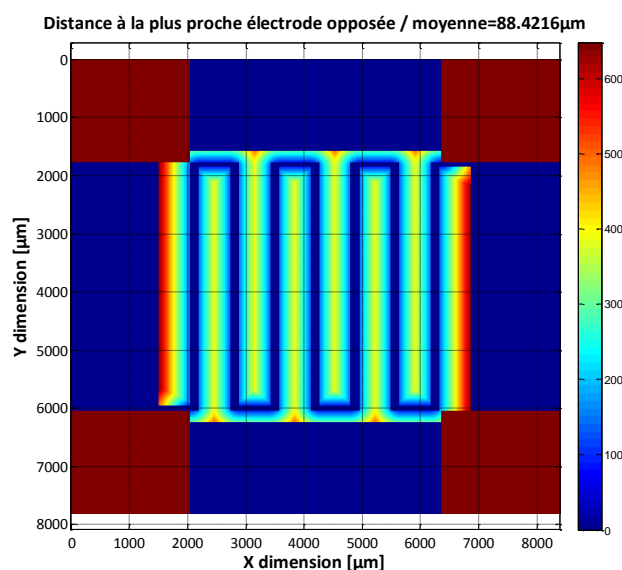


Fig. 77 – image du calcul du chemin ionique moyen à parcourir pour un ion lors que le supercondensateur passe de l'état chargé à l'état déchargé (ou inversement). Calcul réalisé ici pour 8 électrodes interdigitées avec un espacement de 100 μm .

4.1.3. Perspectives sur les micro-supercondensateurs

Puisque les diverses techniques de dépôt présentées dans ce travail utilisent les mêmes matériaux actifs que les supercondensateurs discrets, elle peut bénéficier des avancées de la recherche dans ce domaine. En effet, en ce qui concerne les matériaux carbonés, beaucoup d'avancées ont été faites sur le contrôle de densité de pores, de la conductivité, de la porosité [55], [56], et ces travaux pourront également améliorer les performances des micro-supercondensateurs fabriqués avec cette technique. Enfin, une voie d'amélioration de la densité de puissance – au vu de l'impact de la microstructure – consiste à augmenter la densité de doigts pour réduire le chemin ionique moyen. Par exemple pour la technique de dépôt par électrophorèse, un motif de doigts de 10 μm espacés de 10 μm (possible avec une épaisseur de dépôt de l'ordre de 5 μm) donnerait un chemin ionique moyen de 2,55 μm soit 17 fois moins que pour la structure donnant le plus de puissance précédemment (16 doigts espacés de 100 μm). Bien qu'il soit impossible de savoir a priori si la puissance augmentera linéairement, une telle étude permettra éventuellement de quantifier la contribution de l'électrolyte à la résistance série globale (par rapport aux contributions des collecteurs de courant et des électrodes). Du point de vue de la nature des

électrolytes, seul le propylène carbonate a été essayé sur les micro-supercondensateurs fabriqués, et un développement futur portera sur les électrolytes présentant une meilleure conductivité ionique (électrolytes aqueux à large fenêtre, liquides ioniques, acétonitrile...).

4.2. Caractérisation de l'encapsulation

4.2.1. Herméticité – encapsulation simple

La technique d'encapsulation que nous avons développée représente une amélioration (température plus basse) que les techniques de l'état de l'art, si l'herméticité est vérifiée. Au-delà de l'intérêt d'éviter l'évaporation à long terme de l'électrolyte liquide, l'enjeu de l'encapsulation hermétique est d'empêcher la pénétration d'eau (présente en phase gazeuse dans l'atmosphère) dans le composant, laquelle limite la fenêtre électrochimique de travail. L'imperméabilité à l'eau a été évaluée en observant la réponse électrochimique (cyclo-voltammogrammes à 50 mV.s^{-1} entre 0 et 2,5 V) du composant encapsulé, testés avec du carbonate de propylène et du Et_4NBF_4 (1 mol.L^{-3}), sans charbon activé. Les composants ont subi ce test 8 jours et 62 jours après leur encapsulation. Ces résultats sont présentés dans la Fig. 78.

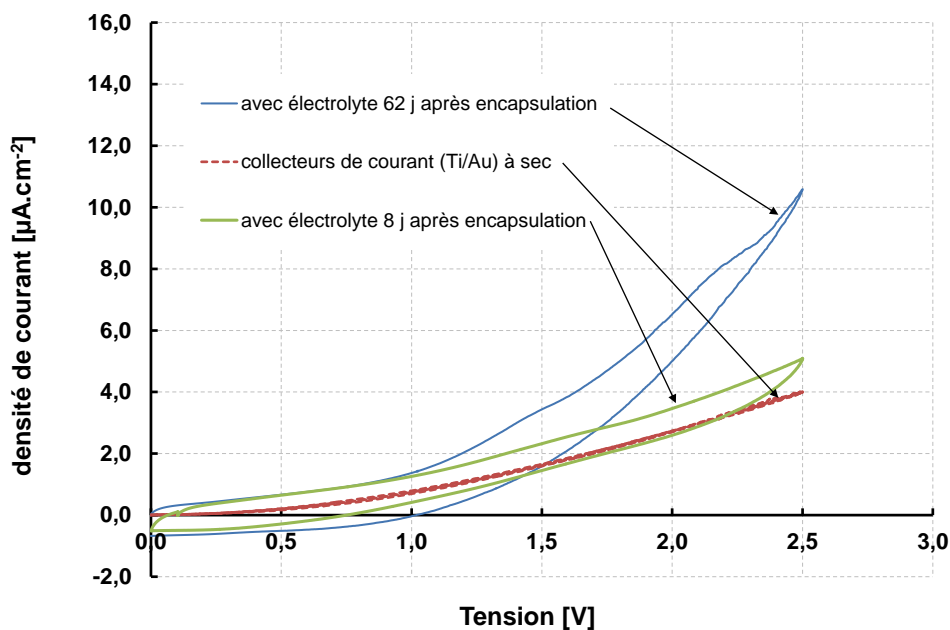


Fig. 78 – cyclo-voltammogramme de micro-supercondensateur (sans matériau actif), 8 jours et 62 jours après encapsulation. Le signal des collecteurs de courant à sec est donné pour référence.

La présence d'électrolyte est confirmée par la comparaison avec le signal des collecteurs de courant à sec. On remarque également des fuites de courant qui mènent à une augmentation du courant proportionnelle à la tension, qui ne correspond pas à un comportement strictement capacitif, et qui est visible sur tous les voltammogrammes. Une explication probable est que la couche de Si_3N_4 (80 nm) qui assurait l'isolation électrique du substrat silicium soit insuffisante. Le procédé corrigé utilise une couche d'oxyde de silicium thermique épais (800 nm) pour l'isolation électrique.

La fenêtre électrochimique est supérieure à 1 V, ce qui semblerait montrer une herméticité à l'eau suffisante pour le fonctionnement d'un supercondensateur à électrolyte organique. L'augmentation du courant avec le potentiel est similaire pour les collecteurs de courant seuls et pour l'électrolyte encapsulé : celle-ci pourrait donc être attribuée à une mauvaise isolation des collecteurs de courant vis-à-vis du substrat, et non à la présence d'eau. Cependant le signal du composant après 62 jours montre une évolution, qui peut être attribuée à une interaction entre résine et électrolyte ou à une perméabilité partielle de l'encapsulation. Le faible niveau de courant global ($10,5 \mu\text{A}.\text{cm}^{-2}$ maximum) permet toutefois de relativiser cette évolution, qui serait négligeable devant les niveaux de courants du micro-supercondensateur avec charbon actif.

4.2.2. Caractérisation d'un composant complet (encapsulation en deux temps)

Nous avons réalisé un composant complet, dont le matériau actif a été déposé par électrophorèse à travers des ouvertures étroites dans le premier capot (1 mm de diamètre environ, voir Fig. 79). Le dépôt a là aussi été imparfait (inhomogène et instable). Le premier collage a été réalisé à 200 °C pendant 2 h, le second à 130 °C pendant 2 h. Potentiellement, cette seconde étape pourrait être abaissée à 80 °C (nous avons réussi des collages SC180 sur surface plane à cette température), mais l'électrolyte utilisé dans ce composant supportant une température plus élevée, nous avons préféré assurer la réussite de l'expérience.

Les composants produits ont été testés électriquement (voltammogrammes Fig. 80), et un signal capacitif plus marqué semble apparaître pour le composant ayant du charbon, bien que tous les composants (avec ou sans électrolyte) soient affectés par un courant de fuite important. Il est impossible de conclure sur la présence d'eau dans les composants scellés dans ces conditions. Ces courants peuvent être issus encre une fois d'une mauvaise isolation électrique vis-à-vis du substrat (80 nm Si_3N_4) ou d'un électrolyte contaminé, avant ou après encapsulation.

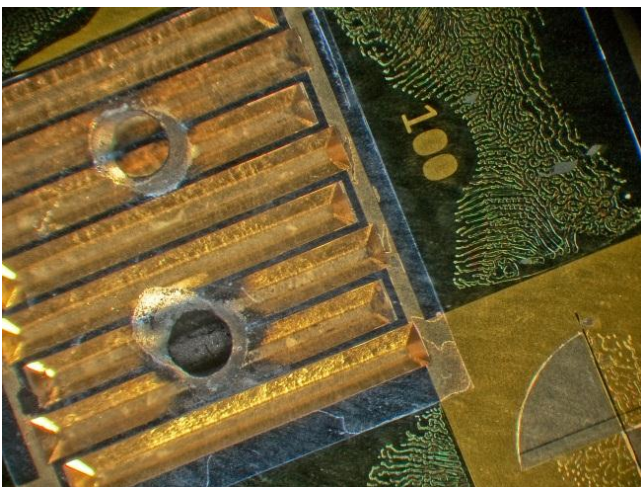


Fig. 79 – composant après le dépôt par électrophorèse à travers les ouvertures cylindriques : le charbon actif ne se dépose pas uniformément, et ne se dépose qu'en face des ouvertures.

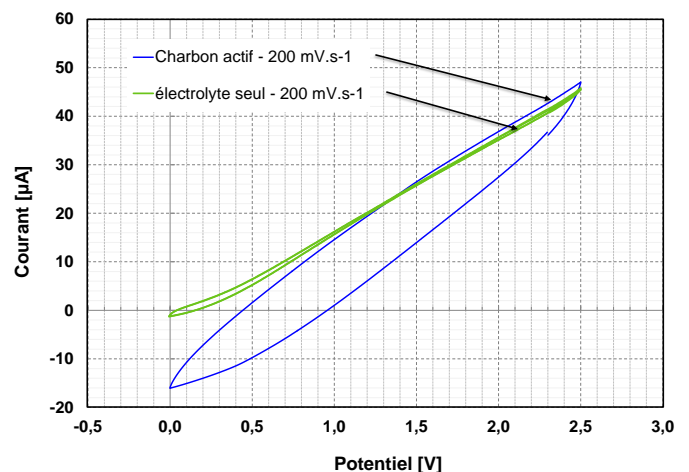


Fig. 80 – voltammogramme du composant montré en Fig. 79 et d'un composant du même wafer pour lequel il n'y a pas eu de dépôt de matériau actif.

5. Conclusion

Nous avons conçu et développé un procédé de fabrication de micro-supercondensateurs intégrés sur silicium avec l'objectif d'augmenter sensiblement la capacité surfacique par rapport aux techniques rapportées dans la littérature. Nous sommes parvenus à caractériser électriquement des composants présentant une capacité surfacique de $82,2 \text{ mF.cm}^{-2}$. Cette valeur n'atteint pas notre objectif initial (115 mF.cm^{-2}), mais elle constitue une amélioration nette de la capacité surfacique (29 mF.cm^{-2} [16]) et de la densité d'énergie (257 mJ.cm^{-2} contre 72 mJ.cm^{-2} [26]) maximale de l'état de l'art. D'autre part, une étude sur la géométrie des électrodes a montré qu'il était possible d'améliorer considérablement la puissance des micro-supercondensateurs. Des perspectives sur la géométrie des électrodes et sur les matériaux ont été proposées pour améliorer encore les performances des composants, en particulier la résistance série.

Le second volet de ce travail d'intégration concerne l'encapsulation hermétique du micro-supercondensateur avec son électrolyte organique liquide pour permettre l'exploitation de toute la fenêtre électrochimique du charbon actif, et nous sommes parvenus à fabriquer et caractériser un composant renfermant du carbonate de propylène anhydre. Les cyclo-voltammogrammes ont montré l'absence de traces significatives d'eau. Cependant les mesures répétées après 62 jours ont montré une évolution de la réponse électrochimique du composant, dont nous ne pouvons identifier avec certitude la ou les cause(s).

Un procédé d'encapsulation en deux temps a enfin été mis au point pour permettre un meilleur contrôle de la quantité d'électrolyte encapsulé et rendre le procédé compatible avec des électrolytes ayant un point de vaporisation inférieur à 150°C . Les micro-supercondensateurs encapsulés produits ont révélé malheureusement un courant de fuite trop important, dont les causes sont d'origines diverses. Ainsi, bien qu'il soit impossible de conclure de façon tranchée sur l'efficacité de la technique d'encapsulation, nous avons produit un procédé complet de micro-supercondensateurs à base de carbone et d'électrolyte liquide organique anhydre qui nécessitera des ajustements futurs pour être complètement validé. Dans le prolongement direct des travaux présentés dans ce chapitre, des essais d'encapsulation en deux temps se poursuivent en explorant la compatibilité avec le dépôt par électrophorèse, ainsi que l'abaissement de la température du second collage à 80°C (température la plus basse à laquelle nous avons obtenu un collage sur surface plane) qui rendrait la technique compatible avec plus de solvants volatils, comme l'acétonitrile (évaporation à 82°C).

Pour discuter de la pertinence du micro-supercondensateur au sein du module AUTOSSENS, nous devons effectuer des caractérisations supplémentaires. Plus particulièrement, la mesure et la modélisation de l'autodécharge doit permettre de savoir si la capacité est suffisante, et d'évaluer la pertinence du composant dans le système. C'est l'un des objets du quatrième chapitre de ce mémoire de thèse.

Chapitre 4

Le générateur piézoélectrique et
le micro-supercondensateur dans
le microsystème autonome

1. Introduction

Notre travail de thèse a pour objectif de proposer un microsystème de gestion de l'énergie capable d'alimenter un nœud de capteur dans le cadre d'applications SHM pour une structure aéronautique. Dans les chapitres 2 et 3, nous avons présenté la conception, la fabrication et la caractérisation du micro-générateur piézoélectrique et du micro-supercondensateur sur silicium.

L'objectif de ce dernier chapitre est double :

- Valider le fonctionnement d'un démonstrateur intégrant le micro-supercondensateur, le générateur piézoélectrique et une diode qui représente le capteur. Le générateur piézoélectrique et le micro-supercondensateur sont assemblés sur un circuit imprimé et la validation expérimentale du fonctionnement du dispositif simple est faite au travers de deux opérations de base : l'alimentation d'une diode par le microgénérateur, et l'alimentation d'une diode par un micro-supercondensateur chargé.
- Fournir un modèle des composants fabriqués pour permettre une première simulation du système complet. Cette démarche présente l'avantage de pouvoir explorer plus largement la compatibilité des deux éléments (micro générateur piézoélectrique et supercondensateur).

2. Rappel des éléments constitutifs du microsystème autonome AUTOSSENS et de notre démonstrateur

Nous avons fait au chapitre 1, l'analyse des sources d'énergie pertinentes par rapport à l'environnement et à l'application aéronautique et avons défini alors une architecture multi-sources pour le microsystème autonome AUTOSSENS (voir section 5.3 et Fig. 15 du premier chapitre), découparable en trois blocs :

- Bloc de récupération (module de récupération de vibration, cellule thermoélectrique)
- Bloc de stockage tampon (supercondensateur)
- Bloc où l'énergie est consommée (conditionnement de l'énergie, gestion des composants, mesure, communication radio des données recueillies).

L'étude complète de ce capteur autonome AUTOSSENS fait l'objet de 3 thèses de doctorat :

- La mienne qui vise la récupération d'énergie vibratoire et son stockage dans des micro-supercondensateurs. Ce travail a principalement pour but la conception/fabrication d'un générateur piézoélectrique de grande densité de puissance sous faible accélération, et la conception/fabrication d'un micro-supercondensateur de grande capacité surfacique.

- Celle d'Adrien Ramond qui est en charge de concevoir et fabriquer le module de gestion de l'énergie entre le générateur piézoélectrique, le stockage et l'utilisation. Ce travail a principalement pour but de concevoir un système de gestion capable de traiter (AC/DC et DC/DC) de très faibles puissances ($\sim 10 - 100 \mu\text{W}$) et d'optimiser l'extraction de charge du générateur piézoélectrique.
- Celle de Laurent Assouère qui traite de la gestion de l'énergie récupérée par thermo-génération. Ce travail a principalement pour but d'optimiser la génération d'énergie à partir d'une cellule thermoélectrique et son stockage dans un micro-supercondensateur.

Les énergies transitant entre le micro générateur et le supercondensateur étant très faibles, il faut non seulement faire un effort sur la conception de chacun des éléments (générateur piézoélectrique et micro-supercondensateur discutés dans les chapitres 2 et 3), mais aussi sur l'adéquation de tous les composants du système entre eux (points de fonctionnement, puissances et énergies échangées)⁸⁸.

La caractérisation des éléments fabriqués – que nous avons présentée dans les chapitres 2 et 3, et que nous complèterons dans ce chapitre – est une étape nécessaire pour valider les choix de conception et les briques technologiques mais limitée. En effet, pour assurer un développement des interfaces de gestion de l'énergie, il est très intéressant de disposer de modèles des composants fabriqués dans un langage commun permettant les simulations électriques afin de faire du prototypage virtuel. Ainsi, nous présenterons dans ce chapitre des modèles de composants fabriqués et nous ferons un premier bilan énergétique.

3. Validations expérimentales par assemblage d'un démonstrateur simple et représentatif

La validation expérimentale que nous présentons ici constitue, comme dit précédemment, une preuve de concept de deux étapes fondamentales du microsystème de mesure autonome : alimentation par vibrations, puis par micro-supercondensateur d'un petit système ultra-basse consommation. N'ayant pas de spécifications dans le cahier des charges sur le type de capteur à alimenter avec le module AUTONSENS, nous avons opté pour une diode modulée en pulsations brèves, et dont la consommation moyenne s'établit à $15 \pm 5 \mu\text{W}$. Cela facilite la vérification visuelle du fonctionnement.

3.1. Alimentation d'une diode par le microgénérateur au travers d'un étage AC/DC et DC/DC

⁸⁸ Par exemple un micro-générateur très performant mais dont la tension de sortie est très basse (typiquement un générateur électromagnétique) sera largement sous-exploité par un circuit AC/DC à base de diodes passives (tension de seuil élevée) et un circuit DC/DC Buck, même si ces circuits sont très performants individuellement.

Dans le premier démonstrateur, le microgénérateur piézoélectrique alimente une diode à travers un étage AC/DC et DC/DC commercial (LTC3588 de Linear Technology). Ce module AC/DC et DC/DC assure le redressement de la tension du générateur piézoélectrique au moyen d'un pont double alternance (diode à seuil 400 mV) et régule la tension (1,8 V) à l'aide d'un abaisseur de tension *Buck*. Un condensateur tampon de 1 μ F est connecté au circuit. La diode basse consommation (Kingbright APD3224ZGC-F01) est modulée par un circuit LMC7215 sous forme de pulsations brèves dont la durée et la fréquence sont réglées manuellement à l'aide de potentiomètres. La consommation, dépendant du rapport cyclique et de la durée des impulsions, a été fixée à son minimum et mesurée à $15 \pm 5 \mu$ W. Le circuit connectant les composants entre eux est présenté dans la Fig. 81 et la Fig. 82.

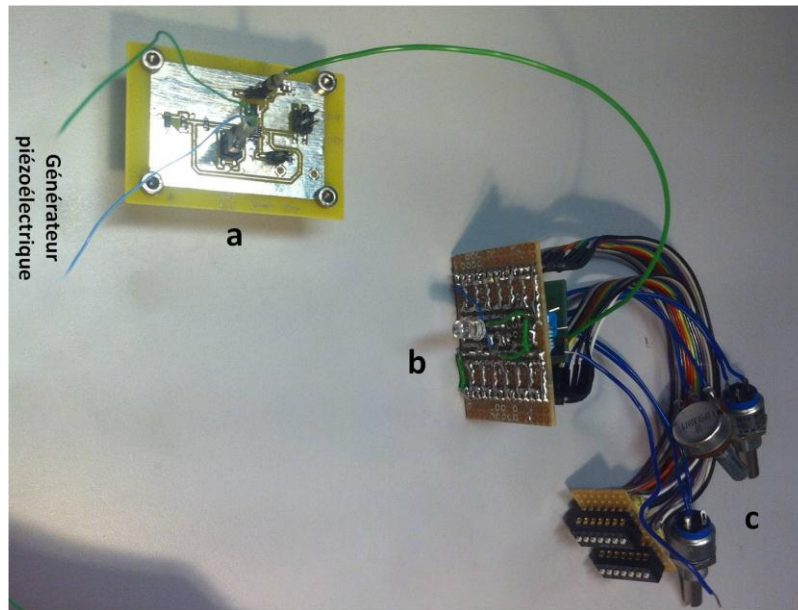


Fig. 81 – montage pour validation expérimentale : redresseur AC/DC et régulateur DC/DC (a), circuit de modulation et diode très basse consommation (b), potentiomètre d'ajustement du rapport cyclique et de la durée des pulsations (c).

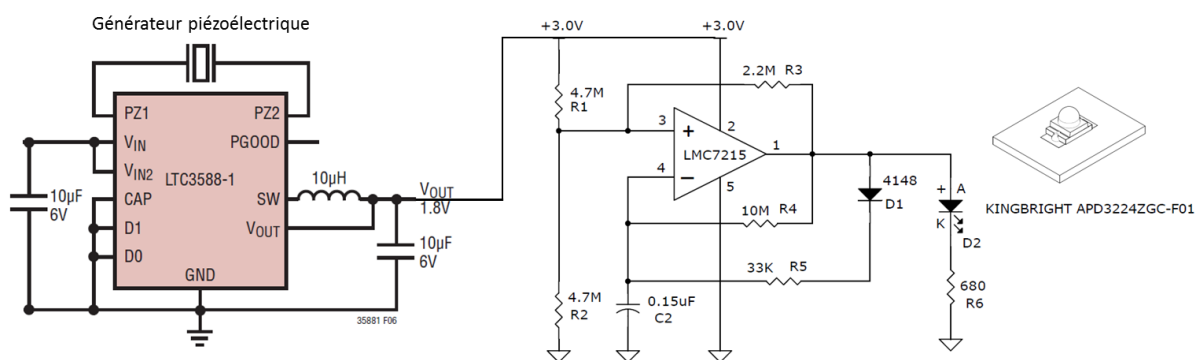


Fig. 82 – schéma électrique du circuit de validation expérimentale visuelle.

Nous avons monté le circuit complet sur le pot vibrant (voir détail du montage dans le chapitre 2) et avons ainsi vérifié que le générateur parvient bien à fournir la tension ($> 1,8$ V) et la puissance nécessaire au fonctionnement de la diode, sous des vibrations d'accélération **0,3g à 80 Hz**. Cette fréquence correspond à la fréquence de résonance du générateur piézoélectrique et d'après les caractérisations électriques il fournit $20 \pm 1 \mu$ W RMS dans telles conditions, ce qui correspond à la consommation

moyenne du circuit. La Fig. 83 est une image issue de la vidéo de l'expérience. On y voit la diode montée sur le circuit AC/DC et DC/DC, le générateur piézoélectrique monté sur le pot vibrant, lui-même alimenté par un générateur basse fréquence.

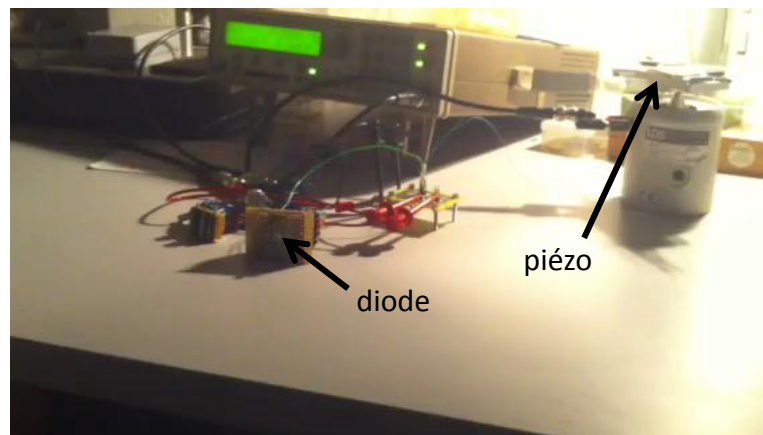


Fig. 83 – image issue de la vidéo de l'expérience d'alimentation d'un circuit basse consommation (diode modulée) par le micro-générateur piézoélectrique. Une partie des câbles relie le montage à un oscilloscope pour le contrôle de l'amplitude de vibration et de la consommation.

3.2. Alimentation d'une diode par un micro-supercondensateur chargé

Dans ce deuxième montage, un micro-supercondensateur que nous avons réalisé est chargé à son potentiel nominal (2,5 V) par un potentiostat (Autolab PGSTAT30) puis connecté à la diode modulée pour vérifier qu'il est capable de l'alimenter. Le dépôt du matériau d'électrode (charbon actif) a été réalisé par électrophorèse (35 μm d'épaisseur) sur des collecteurs de courant plans (Ti/Au 100/800 nm). Le composant a été découpé puis collé et soudé sur un boîtier TO8. L'électrolyte (Et_4NBF_4 1M dans PC) a été déposé en boîte à gants et le composant a été placé dans un boîtier hermétique pour être caractérisé.

Nous avons caractérisé ce micro-supercondensateur (Fig. 84 et Fig. 85), et les mesures de charge et décharge à courant constant montrent une autodécharge particulièrement prononcée. Dans la Fig. 84, une charge de 10 μA ne parvient pas à porter la tension du composant à sa limite (2,5 V), c'est-à-dire qu'à partir de 2 V, il faut plus de 10 μA pour compenser les pertes. C'est un effet inattendu car ce procédé de fabrication ayant déjà été suivi pour fabriquer des micro-supercondensateurs – lesquels ne présentaient pas d'autodécharge aussi prononcée –, l'électrolyte semble incriminé. De plus, plusieurs autres facteurs jouent en défaveur de l'autodécharge : de l'électrolyte en trop grande quantité (proportion électrolyte/matériau d'électrode environ 10 fois supérieure à celle des piles boutons), ou encore fonctionnement non encapsulé permettant une évaporation de l'électrolyte. Ce composant étant le seul que nous ayons pu tester en autodécharge, nous ne pourrions pas étendre le protocole de modélisation aux micro-supercondensateurs. Nous détaillerons les phénomènes physiques à l'origine de cette autodécharge dans la section 4.3 de ce chapitre, et sur la base de ces phénomènes, nous proposerons un modèle comportemental de supercondensateurs adapté aux faibles puissances, construit à partir de données expérimentales mesurées sur un composant commercial.

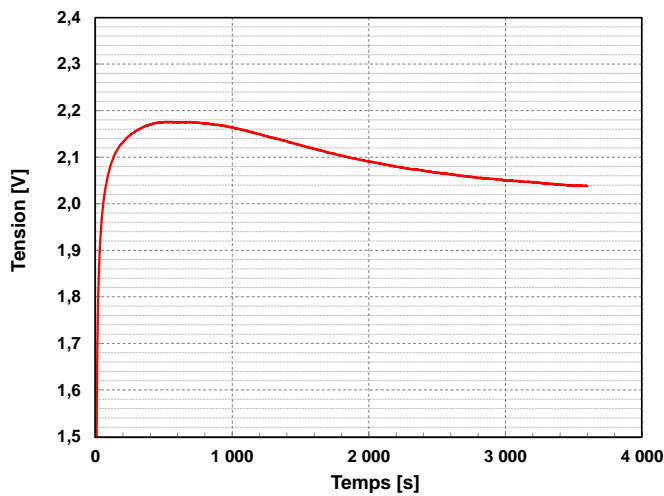


Fig. 84 – évolution du potentiel d'un micro-supercondensateur chargé à 10 µA (constant).

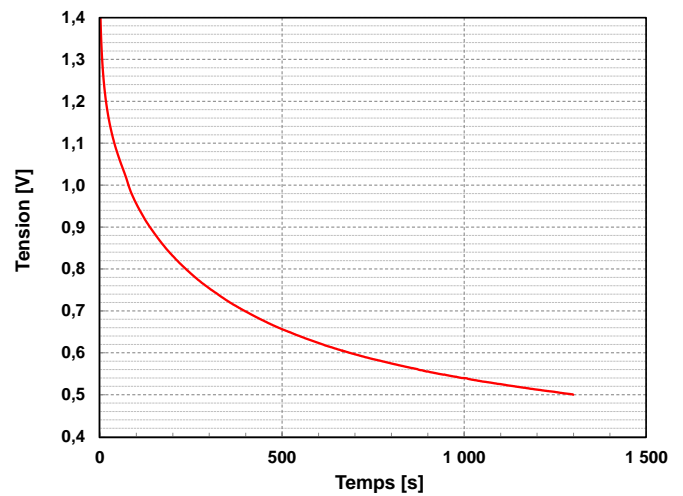


Fig. 85 – évolution du potentiel d'un micro-supercondensateur en circuit ouvert après une charge à 10 µA (constants) jusqu'à 2,05 V.

Bien que le micro-supercondensateur que nous avons utilisé présente une autodécharge anormalement prononcée, il a été capable d'alimenter quelques pulsations lumineuses de la diode connectée à travers le circuit de modulation. Cette validation reste très limitée compte tenu de la densité d'énergie du composant, et d'autres essais sont en cours.

4. Modélisation système pour explorer son autonomie

4.1. Choix du support de modélisation

Le système complet comporte de nombreux étages différents : génération (piézoélectrique, thermoélectrique), traitement du signal (AC/DC et DC/DC dynamique adapté à chaque générateur), stockage (condensateurs et micro-supercondensateurs) et gestion de l'énergie. Ces étages font intervenir des composants divers, et leur modélisation doit pouvoir intégrer des modèles hétérogènes :

- Modèles électriques de composant simples, exprimés par une ou plusieurs équations (résistances, condensateurs, diodes) permettant de décrire de façon simplifiée la plupart des comportements physiques par analogie électrique.
- Modèles numériques permettant de décrire les architectures de commande et les composants de type microcontrôleurs.

Nous avons choisi le langage VHDL-AMS comme outil de simulation. Ce langage a été développé pour décrire de façon concourante les signaux analogiques continus (tension, courant) et les signaux numériques (états, valeurs). Nous utiliserons le logiciel SystemVision de Mentor Graphics pour décrire le

circuit qui relie les différents éléments entre eux (*netlist*) et exécuter la simulation de l'évolution temporelle du système (à travers le moteur ELDO).

4.2. Modèle du générateur piézoélectrique

Cette partie présente la modélisation sous VHDL-AMS du microgénérateur piézoélectrique que nous avons fabriqué. Les caractéristiques que nous souhaitons prédire sont le courant et tension générés sous une vibration harmonique.

4.2.1. Modélisation VHDL-AMS du générateur piézoélectrique dans la littérature

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2, il existe de très nombreux travaux sur la modélisation des générateurs piézoélectrique. Les modèles proposés offrent des degrés divers de précision sur la description du comportement électrique, mécanique ou sur le couplage électromécanique. L'analyse détaillée de tous les modèles de la littérature sort du cadre de notre travail, et est redondante avec le travail de [1-3]. Nous nous limiterons ici à l'étude de l'implémentation des modèles en VHDL-AMS. Si la description du générateur s'avère suffisante dans de nombreux cas, la prise en compte du circuit de charge (éventuellement complexe et non-linéaire) connecté au générateur piézoélectrique est souvent partielle : on citera par exemple le modèle très complexe développé par Erturk et Inman [4], qui offre une solution analytique de la puissance générée à condition de limiter le circuit de charge à une résistance.

L'implémentation des modèles en VHDL-AMS répond à cette problématique puisqu'elle permet de connecter au modèle du générateur un circuit complet. Sur les nombreux modèles proposés à ce jour, 3 types ont fait l'objet de portage sous VHDL-AMS, directement ou indirectement :

- Un modèle très simplifié [5], sans couplage électromécanique (voir Fig. 86), appelé modèle structurel.
- Elvin *et al.* [6] ont permis un portage (indirectement) puisqu'ils présentent les deux équations différentielles couplées décrivant le générateur (modèle unidimensionnel) sous forme de circuit équivalent (Fig. 87), dont les valeurs des composants sont calculées pour une poutre rectangulaire monomorphe (hypothèses Bernoulli et méthode Rayleigh-Ritz). Une telle présentation a déjà été proposée par Roundy *et Wright*. [7] mais pour un seul mode de vibration.
- Boussetta *et al.* [8] ont proposé un portage du modèle à deux dimensions développé par Marzencki *et al.* [9], qui offre une plus grande précision sur le comportement mécanique du générateur.

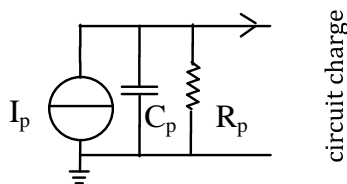


Fig. 86 – modèle structurel d'un

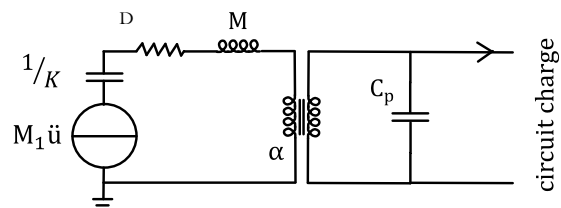


Fig. 87 – circuit équivalent d'un générateur piézoélectrique,

La valeur des paramètres du modèle unidimensionnel est calculée à partir de la géométrie et des caractéristiques des matériaux de la poutre, et plusieurs auteurs ont proposé des expressions différentes selon les hypothèses et la méthode de calcul [6], [8], [10], [11]. A ce jour, seules les poutres parallélépipédiques bimorphes et monomorphes ont été traitées. Le modèle bidimensionnel développé par Marzencki *et al.* se limite également aux poutres parallélépipédiques.

Il existe donc deux caractéristiques à cause desquelles aucun modèle implémentable en VHDL-AMS ne sait décrire le comportement de notre générateur piézoélectrique :

- Poutre non parallélépipédique : la gravure LASER étant imparfaitement anisotrope, la poutre a une section trapézoïdale (voir chapitre 2).
- Couche intermédiaire⁸⁹ : la couche de colle époxy rattachant le matériau piézoélectrique au substrat silicium entraîne un fort découplage mécanique entre les deux.

Dans notre cas, nous proposons de calculer les paramètres du modèle, non plus à partir des dimensions géométriques et des propriétés des matériaux, mais à partir du comportement mesuré ou simulé (éléments finis/SPICE⁹⁰). Ce type de modèle empirique ne permet pas la conception du générateur piézoélectrique lui-même (dimensions, forme, matériaux) mais il permet de fournir les caractéristiques électriques de ce générateur. Grâce à ces caractéristiques, il est possible alors de développer les briques qui l'entourent (AC/DC, DC/DC, stockage...).

4.2.2. Procédure et résultats

L'identification des paramètres du modèle structurel a été réalisée sur la caractéristique tension/résistance de charge mesurée (sur notre générateur) (Fig. 88) en considérant les équations de la tension d'une résistance de charge branchée aux bornes du circuit présenté en Fig. 86. Dans les équations (24) et (25), R_L est la résistance de charge du circuit, R_p la résistance de perte diélectriques, I_p le courant du générateur piézoélectrique, ω la pulsation des vibrations, C_p la capacité de l'élément piézoélectrique et V la tension aux bornes de la résistance R_L . Les paramètres I_p , C_p et R_p ont été identifiés par la Curve Fitting toolbox de Matlab. Les paramètres sont présentés dans le Tableau 30 ; les paramètres du modèle sans pertes tracé dans la Fig. 88 sont : $I_p = 6,17 \mu A$, $C_p = 212 pF$.

⁸⁹ Le modèle bidimensionnel pourrait *a priori* prendre en compte une telle couche au prix d'une petite adaptation, puisqu'il prend en compte l'amortissement du aux couches métalliques servant d'électrodes.

⁹⁰ Remarquons ici que la simulation d'un circuit de charge non linéaire complexe est possible dans le modèle éléments finis/SPICE que nous avons proposé dans le chapitre 2, mais que le langage SPICE ne permet pas d'inclure des composants numériques ou décrit à haut niveau (comportemental). C'est ce qui motive la transposition du modèle du générateur piézoélectrique en VHDL-AMS.

$$V = \frac{I_p R}{\sqrt{1 + (\omega C_p R)^2}} \quad (24)$$

$$\begin{cases} R = R_L \text{ (sans pertes)} \\ R = \frac{R_L R_p}{R_L + R_p} \text{ (avec pertes)} \end{cases} \quad (25)$$

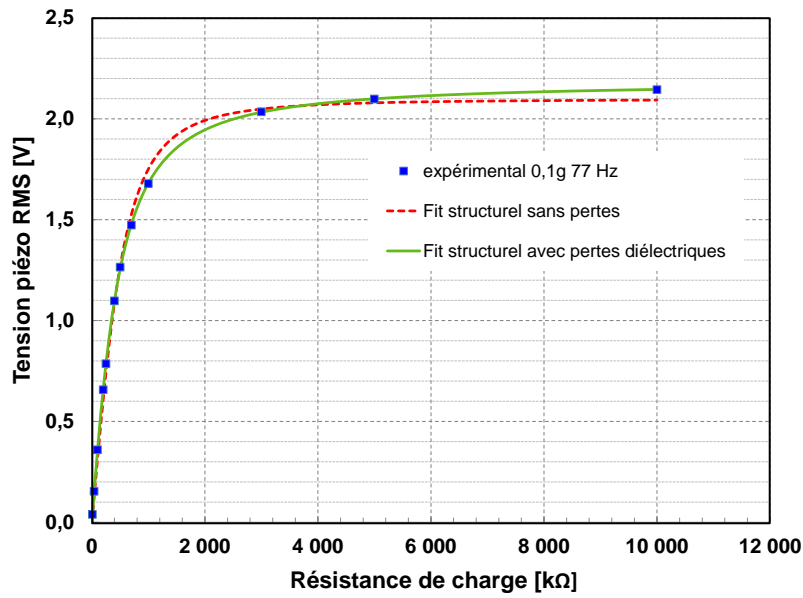


Fig. 88 – caractéristique tension/résistance du modèle structurel avec et sans pertes diélectriques (modélisés par la résistance parallèle R_p sur la Fig. 86) par rapport aux données expérimentales (0,1g à 77 Hz).

accélération [g]	Fréquence [Hz]	Puissance RMS générée [μW]	C_p [pF]	I_p [μA]	R_p [kΩ]
0,1	77	3,20	233	7,43	438
0,2	76	13,9	334	15,4	439
0,3	81	20,5	727	18,8	442
0,4	85	23,6	706	20,0	448
0,5	88	26,6	720	21,4	447

Tableau 30 – caractérisation du modèle structurel à différentes accélérations pour le micro-générateur piézoélectrique.

4.2.3. Limitations et alternatives

Un tel modèle permet donc de développer les étages suivants du circuit d'alimentation à partir de valeurs mesurées précisément, et dont les modèles 1D et 2D analytiques ne peuvent prédire le fonctionnement (dans le cas du générateur piézoélectrique que nous avons fabriqué : une géométrie non parallélépipédique et contenant une couche intermédiaire de colle époxy entre la couche piézoélectrique et le substrat silicium). Cependant, si un tel modèle a l'avantage d'être très léger (en termes de temps de calcul), il peut s'avérer insuffisant pour simuler la réponse à un circuit de charge fortement non-linéaire. Une solution plus pertinente dans ce cas serait d'identifier les paramètres du modèle unidimensionnel, à partir des fréquences de résonance en circuit ouvert et circuit fermé et facteur de qualité mécanique,

comme proposé par Badel *et al.* [10]. Cependant, la détermination expérimentale du paramètre λ (coefficient de proportionnalité entre tension et le déplacement de l'extrémité libre de la poutre) est délicate et peut être plus accessible par la simulation éléments finis.

4.3. Modèle du supercondensateur

Cette partie du chapitre décrit la construction d'un modèle de supercondensateur adapté à un fonctionnement très basse puissance. Les caractéristiques importantes que nous voulons caractériser et modéliser sont la capacité, la résistance équivalente série et l'autodécharge ; cette dernière caractéristique est un enjeu important dans un microsystème autonome où l'énergie est rare.

Le composant utilisé a une capacité de 50 mF (tension maximale 3,5 V), il s'agit du composant commercial, vendu par Cellergy, se rapprochant le plus des caractéristiques de nos micro-supercondensateurs.

4.3.1. Autodécharge

Mécanismes d'autodécharge

D'après [12-14], l'autodécharge résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes intervenant avec des cinétiques différentes :

1. L'électrolyte et les différents matériaux (séparateur, électrodes poreuses, collecteurs de courant, joint, boîtier) contiennent une part plus ou moins importante d'**impuretés qui sont réduites ou oxydées** lors de la charge. Ces réactions consomment une part de l'énergie introduite dans le supercondensateur, et entraînent une décroissance linéaire par rapport au temps du potentiel (26).

$$V_t = V_i - A \log(t + \tau) \quad (26)$$

V_t est le potentiel, V_i le potentiel de charge (potentiel initial), A une constante liée à la pente de Tafel [15], τ une constante d'intégration et t le temps.

2. La charge – surtout si elle est rapide – ne permet pas aux ions d'accéder de façon égale à toute la surface de l'électrode : les pores sont sous-peuplés et le potentiel apparent du composant est alors supérieur à son potentiel réel. Lorsque la charge est interrompue, les ions continuent à diffuser dans l'électrode, conduisant à une **homogénéisation des potentiels locaux** et donc à une diminution du potentiel global. Ce mécanisme est limité par diffusion (des ions dans l'électrolyte) et conduit à une décroissance du potentiel proportionnelle à la racine carrée du temps (27).

$$V_t = V_i - \frac{2ZS\sqrt{\pi D}c_0}{C} \cdot \sqrt{t} \quad (27)$$

V_t est le potentiel, V_i le potentiel de charge (potentiel initial), S la surface électroactive, D le coefficient de diffusion des espèces redox en jeu, z la charge, c_0 la concentration initiale, τ une constante d'intégration et t le temps.

3. Les **fuites à dues à un défaut d'isolation** constituent la part irréductible d'autodécharge (28) : il s'agit du courant minimal à assurer pour maintenir le potentiel du supercondensateur, appelé **courant de fuite**.

$$V_t = \ln V_i - \frac{t}{RC} \quad (28)$$

V_t est le potentiel, V_i le potentiel de charge (potentiel initial), R la résistance de fuite équivalente, et t le temps.

4.3.2. Modèles de supercondensateurs dans la littérature

De nombreux articles caractérisant et/ou modélisant des supercondensateurs ont été publiés dans la littérature, et c'est un sujet de recherche très actif puisque les supercondensateurs ouvrent la voie à des améliorations des systèmes électriques⁹¹. Leur comportement électrique diffère beaucoup de celui des batteries et l'intégration de ces composants dans des systèmes électriques demande une modélisation adéquate. Une partie des modèles proposés est dédiée à la caractérisation du comportement haute fréquence / haute puissance des supercondensateurs [16-22], et éventuellement à l'influence de la température sur ce comportement [23]. A ces échelles de temps, l'autodécharge n'est pas significative, et n'est pas caractérisée.

Il existe par ailleurs des articles traitant de l'autodécharge, dont la plupart proposent une modélisation sous forme de circuit équivalent. L'autodécharge est modélisée soit par une branche résistance/capacité parallèle [23], [24], soit par une résistance parallèle [25], [26], soit par des circuits plus complexes constitués d'arrangements RLC [27-32]. Une modélisation par un réseau RC parallèle (ligne de transmission) a également été proposée [33-35] par une équipe de l'IMS, ainsi que par une équipe de l'Université d'Aachen [36], [37]. La description du supercondensateur sous cette forme a été proposée par De Levie en 1967 pour des électrodes poreuses. Les travaux de l'IMS concernent surtout l'identification des paramètres de l'expression temporelle de la tension et de l'impédance.

Il est à noter que l'importance relative des phénomènes responsables de l'autodécharge, leur ordre d'apparition, leur durée et même leur nature est encore discutée : Conway *et al.* [19], [38-40] ont estimé que la redistribution de charges est limitée aux 100 premières secondes et que toute l'autodécharge qui suit est liée aux réactions redox parasites. La variation en $\log(t)$ du potentiel en circuit ouvert appuyait cette théorie, cependant Black *et al.* [27] ont montré que la redistribution de charge est un processus qui peut être très lent (~ 50 h) avec des charbons actifs très poreux, et que la variation de potentiel associée est également proportionnelle à $\log(t)$, ce qui rend le diagnostic (entre processus faradique ou redistribution) impossible en l'état.

Une difficulté avec les modèles consiste à identifier leurs paramètres à partir des expériences. Dans les modèles proposée dans la littérature, celle-ci se fait principalement par spectroscopie d'impédance (EIS)

⁹¹ Pour des applications dans l'actionnement mécanique, l'automobile, les transports en commun (métro, trains, avions) notamment.

[33-35], [41-43] ou par charge/décharge à courant constant [24], [29-31], [44], [45]. Si les modèles peuvent être précis, l'identification oblige souvent à faire des hypothèses supplémentaires, qui réduisent la fidélité de la modélisation.

Modèle couplé

Les modèles développés ne proposent pas d'étude de l'influence d'une décharge à faible puissance sur l'autodécharge. Ce cas de figure tombe à mi-chemin entre les modèles de puissance et les modèles d'autodécharge (construits à partir de mesures en circuit ouvert). Or concevoir un modèle qui serait la simple superposition des deux suppose qu'il n'y a pas d'interaction entre les phénomènes de décharge et d'autodécharge, ce qui est questionnable. En effet la redistribution des charges signifie qu'il y a des charges en excès à l'entrée des pores ; on peut faire l'hypothèse qu'un appel de courant relaxe préférentiellement ces ions facilement accessibles, perturbant alors la redistribution spontanée.

4.3.3. Construction du modèle et validation sur composant commercial

Description de la procédure

Le modèle que nous proposons est un modèle comportemental de l'évolution du potentiel du supercondensateur en fonction du temps et du courant qui lui est fourni/demandé. Le modèle est d'abord construit puis validé à partir d'un composant commercial (Cellergy 50 mF (3,5 V) ; ce composant sert à la validation du modèle, mais les paramètres doivent être remesurés pour chaque supercondensateur, et notamment pour le micro-supercondensateur. Le composant est maintenu à 0 V (court-circuit) pendant 3600 s, puis chargé à courant constant jusqu'à 3,5 V (tension maximum de fonctionnement du composant), et enfin déchargé à courant constant. Cette procédure est répétée pour plusieurs courants de charge (50 à 900 μA) et de décharge (0 à 80 μA). Les mesures sont effectuées avec un potentiostat Ecochemie Autolab PGSTAT30 piloté par le logiciel NOVA 1.4. La tension est limitée à la fenêtre 0,5-3,5 V.

Données brutes : réponse à une charge/décharge à courants constants

Les Fig. 89 (circuit ouvert), Fig. 90 (décharge) et Fig. 91 (charge) montrent l'évolution du potentiel pour différents courants de charge et de décharge. L'autodécharge y est présente à chaque fois, mais son importance plus faible selon que le courant demandé/fournit est fort. Cette chute de potentiel n'est pas négligeable dans notre application : par exemple en circuit ouvert après une charge à 900 μA (courbe bleue sur la Fig. 89) le composant passe de 3,5 V à 3 V en 1 h, soit une perte de 81 mJ. Cela représente une chute de potentiel équivalente à une consommation moyenne sur la première heure de 22,5 μW , soit légèrement plus que la consommation du capteur (20 μW).

A partir de ces données, les paramètres B et C (équation (29)) sont identifiés à l'aide de la curve fitting toolbox de Matlab (méthode des moindres carrés) pour chaque combinaison courant de charge / courant de décharge.

$$V(t) = V_i - B \cdot \sqrt{t} - C \cdot t \quad (29)$$

Avec cette expression, nous faisons l'hypothèse que les impuretés impliquant des oxydo-réductions sont négligeables et que l'autodécharge dépend ici essentiellement de la réorganisation des charges (coefficient B) et des fuites (coefficient C). Cette hypothèse est très importante dans un système où l'énergie est rare : **si l'autodécharge n'est qu'une réorganisation des ions, alors le système est conservatif**. Cette hypothèse a également été faite par Black *et al.* [46], [28], [27], et leurs travaux semblent la valider. Ce coefficient C englobe également la variation de potentiel due à la charge/décharge imposée par le circuit. Le modèle étant comportemental, nous nous limiterons à ce coefficient global. Il est intéressant de limiter le modèle au minimum de termes nécessaires à la bonne description du comportement, faute de quoi l'identification des paramètres devient imprécise. Une expression de la valeur de ces coefficients en fonction du courant demandé/fournit est enfin implémentée dans un modèle VHDL-AMS.

Si le supercondensateur avait un comportement capacitif pur, le potentiel devrait rester constant lorsque le composant est en circuit ouvert, et décroître proportionnellement au temps lorsqu'un courant constant est tiré. La Fig. 90 correspond à la mesure d'évolution du potentiel du composant commercial une fois mis en circuit ouvert et la Fig. 91 lorsqu'un courant constant est tiré, et dans les deux cas le comportement n'est pas purement capacitif. A chaque fois les données expérimentales sont comparées au modèle de réorganisation des charges, et la corrélation est très proche de 1, ce qui indique que l'hypothèse de la prédominance de la réorganisation de charge dans cette configuration⁹² est pertinente. Cela suppose également que l'hypothèse du système conservatif est crédible dans ces conditions (de courant, de température).

La pertinence de considérer l'autodécharge dans la configuration décharge forcée est examinée dans la Fig. 92. Le modèle avec réorganisation de charges est représenté en pointillés lâches noirs, et le modèle sans réorganisation de charges est représenté en pointillés serrés bleus ; tous deux comparés aux données expérimentales (ligne continue rouge). Le modèle sans réorganisation est assimilé à un modèle sans pertes puisque sans le terme $B \cdot \sqrt{t}$ dans l'expression (29), la variation de potentiel y est essentiellement due à l'entrée/sortie de courant (comportement capacitif pur) et à un courant de fuite. Celui-ci ayant été mesuré (après 40 h de charge à 3,5 V) à moins de 1 μA , il constitue une part négligeable face au courant de 50 μA de charge. Seul le modèle avec réorganisation de charges rend bien compte de l'évolution de la tension du composant, ce qui indique que dans ces conditions, et notamment à ce niveau de courant de charge, l'influence de l'autodécharge n'est pas négligeable. Les modèles et études de la littérature ne

⁹² Configuration de composant, de courants, de capacité et de température. Rien ne nous indique *a priori* que c'est le cas pour d'autres composants (autres électrolytes ou autres matériaux d'électrodes) ou d'autres températures (activation des réactions faradiques plus rapide à haute température, variation de la viscosité de l'électrolyte) par exemple. Les articles de Black *et al.* [46], [28], [27], modélisant l'autodécharge sur des composants commerciaux, ne prennent pas cette précaution.

considérant l'autodécharge que lorsqu'aucun courant n'est fourni ou demandé au supercondensateur⁹³, cela constitue une imprécision pénalisante pour la modélisation de système ultra-basse puissance construits autour de supercondensateurs.

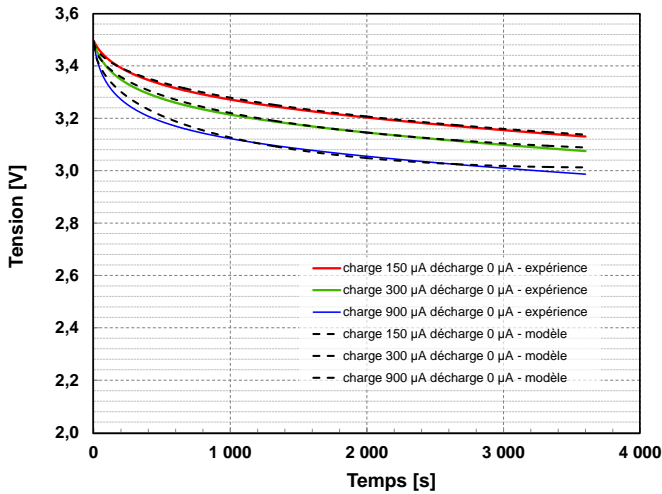


Fig. 89 – évolution du potentiel d'un supercondensateur commercial (50 mF) chargé à différents courant (constants), puis laissé en circuit ouvert, et la modélisation associée (modèle avec réorganisation de charges).

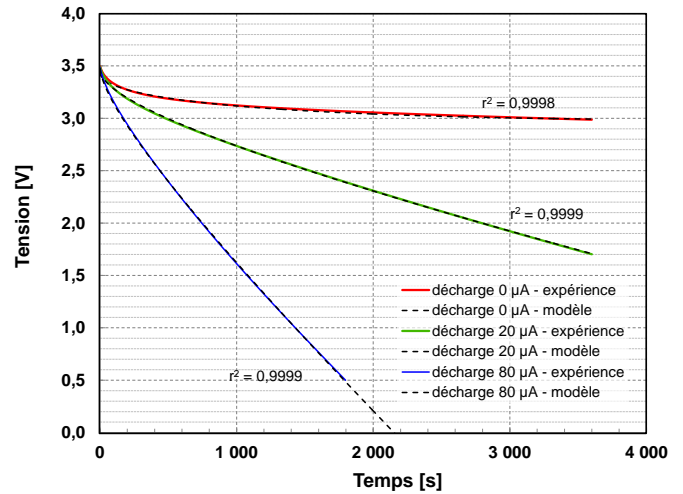


Fig. 90 – évolution du potentiel d'un supercondensateur commercial (50 mF) déchargé à différents courant (constants) après une charge à 900 µA, et la modélisation associée (modèle avec réorganisation de charges).

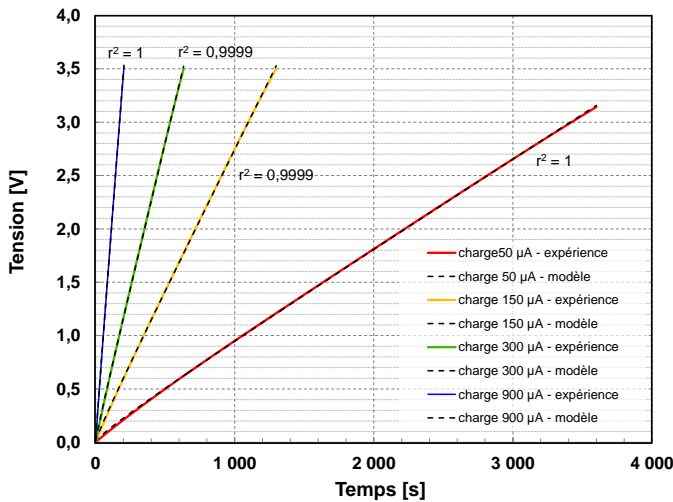


Fig. 91 – évolution du potentiel d'un supercondensateur commercial (50 mF) chargé à différents courant (constants), et la modélisation associée (modèle avec réorganisation de charges).

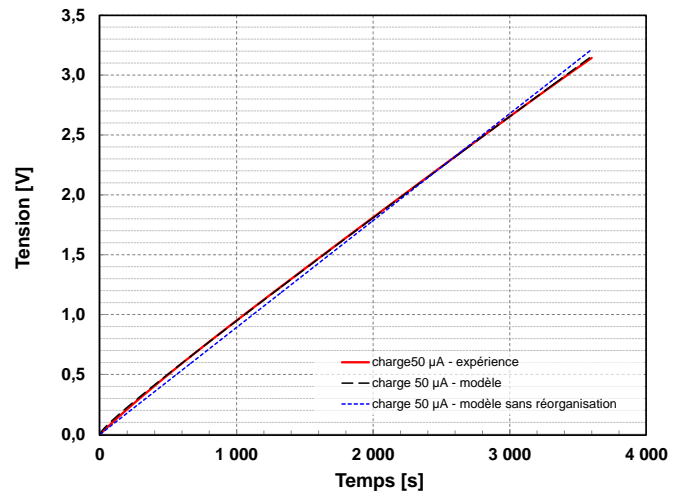


Fig. 92 – évolution du potentiel d'un supercondensateur commercial (50 mF) chargé 50 µA (constant), et la modélisation associée (modèle avec réorganisation de charges et sans réorganisation de charges).

Evolution des paramètres B et C identifiés en fonction du courant

Pour que le modèle soit exploitable, il faut pouvoir établir une expression des paramètres B et C en fonction de n'importe quelle valeur du courant (demandé ou fourni). Cela suppose qu'une loi simple puisse être établie entre ces variables, pour permettre une interpolation, faute de quoi il faut une infinité de mesures pour couvrir tous les cas rencontrés au cours des simulations.

⁹³ Cela se justifie pour des applications de forte puissance puisqu'en fonctionnement la puissance consommée ou fournie est de 1 à 2 ordres de grandeurs plus importante que les courants d'autodécharge.

Les Fig. 93 à Fig. 96 montrent que des expressions de ces paramètres sont accessibles (avec une approximation) au travers d'expressions analytiques dépendant des courants de charge et de décharge (expressions (30) à (33))

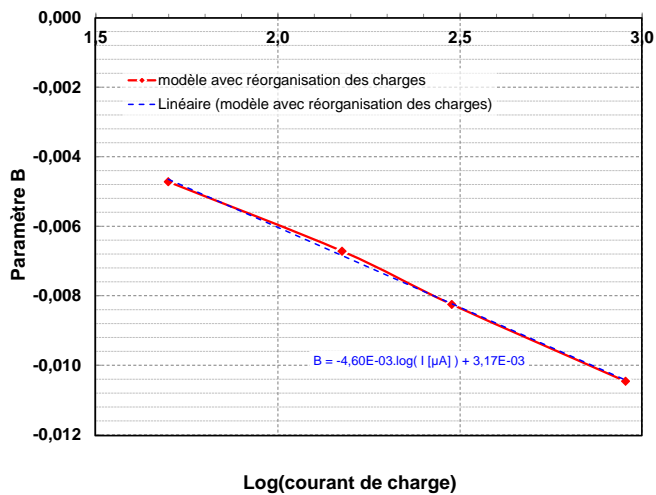


Fig. 93 – régression linéaire du paramètre B en charge, en fonction du logarithme (base 10) du courant.

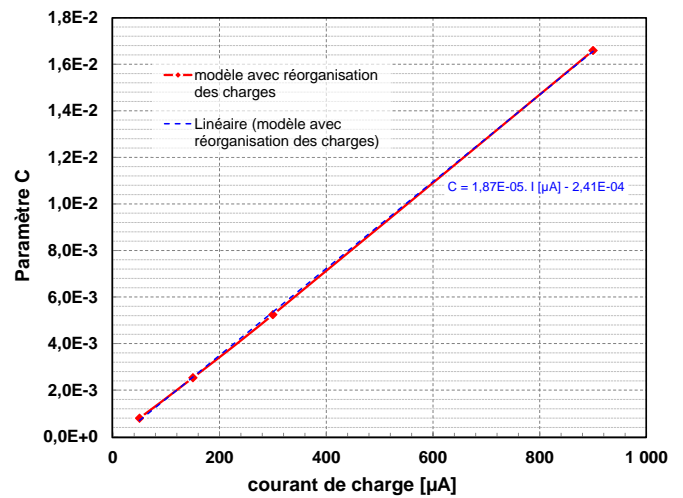


Fig. 94 – régression linéaire du paramètre C en charge, en fonction du courant.

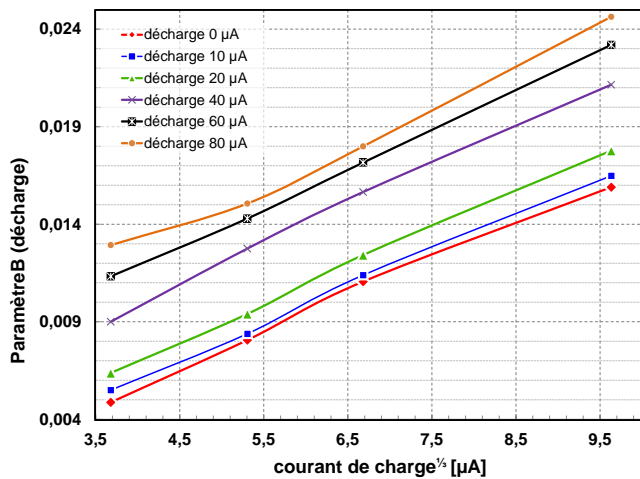


Fig. 95 – régression linéaire du paramètre B en décharge, en fonction de la racine cubique⁹⁴ du courant.

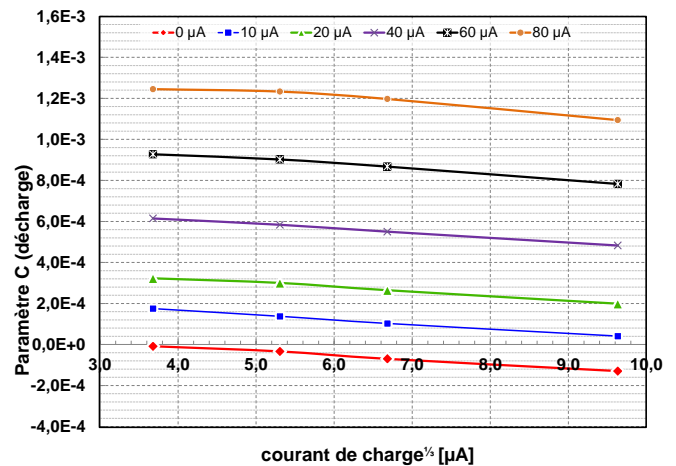


Fig. 96 – régression linéaire du paramètre C en décharge, en fonction de la racine cubique du courant.

⁹⁴ La dépendance en racine cubique des paramètres B et C n'a pas d'origine physique que nous ayons pu identifier.

$$\text{Charge} \quad B = -4,60.10^{-3} \cdot \log_{10}(I_{charge} [\mu A]) + 3,17.10^{-3} \quad (30)$$

$$\text{Charge} \quad C = 1,87E.10^{-5} \cdot I_{charge} [\mu A] - 2,41E.10^{-4} \quad (31)$$

$$\text{Décharge} \quad B = 2,0.10^{-3} \cdot \sqrt[3]{I_{charge} [\mu A]} - (9,09.10^{-2} \cdot I_{décharge} [\mu A] - 2,03.10^{-3}) \quad (32)$$

$$\text{Décharge} \quad C = -(6,62.10^{-8} \cdot I_{décharge} [\mu A] + 2,07.10^{-5}) \cdot \sqrt[3]{I_{charge} [\mu A]} - (1,59.10^{-5} \cdot I_{décharge} [\mu A] - 8,13.10^{-5}) \quad (33)$$

Implémentation VHDL-AMS

Le portage sous VHDL-AMS des relations (30) à (33) passe par 14 constantes, 7 signaux (mis à jour à chaque changement de signe du courant) et 1 quantité (voir Annexe 4). Deux *process* (*ChangeState* et *DetectState*) détectent les changements de signe du courant et recalculent les paramètres B et C, ainsi que la nouvelle tension de départ V_0 . Enfin l'équation de la dérivée du courant (dérivée de l'expression (29) à la base du modèle) définit le comportement du composant.

Cette procédure permet d'obtenir un modèle de supercondensateur à faible puissance, tenant compte de l'autodécharge (par réorganisation des charges) et de l'interaction entre autodécharge et décharge forcée. Cependant ce modèle possède des limitations : les paramètres ne sont valables que dans la gamme de courant évalués (50 à 900 μA pour la charge, 0 à 80 μA pour la décharge), et – de par la nature même de l'implémentation du modèle – l'erreur commise dans l'appréciation de la dérivée de la tension s'accumule avec le temps, rendant les simulations de longue durée incertaines. Une étude précise de la portée de ce modèle, ou l'établissement d'un modèle à base de réseau de neurones artificiels font partie des voies de développement envisagées pour la suite de ce travail.

4.4.Simulation VHDL-AMS générateur et supercondensateur

Les deux modèles (générateur et supercondensateur) ont été implémentés en VHDL-AMS sous Mentor Graphics SystemVision 5.6 (voir Fig. 97), pour simuler trois situations simples, reportées dans la Fig. 98. Dans tous les cas, le capteur consomme 10 μA par pulsation de 100 μA pendant 100 ms toutes les secondes à partir de 10 s et le dispositif de stockage est constitué d'une capacité de 50 μF (pas de pertes diélectriques, ni de pertes résistives). Le générateur piézoélectrique alimente le système à travers un pont de diodes (modèles SPICE de diodes BAT42 High speed, tension de seuil 0,40 V).

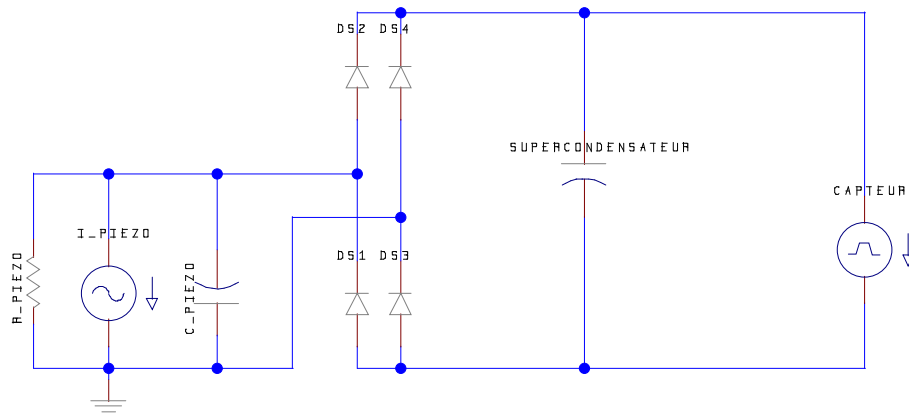


Fig. 97 – Circuit de test des trois cas simples sous SystemVision. Les diodes sont des modèles SPICE de diodes BAT42 High speed, le générateur est une modélisation structurelle du générateur piézoélectrique et le supercondensateur est issu des données présentées dans la section 4.3.

La courbe bleue correspond au potentiel du dispositif de stockage lorsque le générateur piézoélectrique est soumis à une vibration de 0,1g à 77 Hz. Dans cette situation, le micro-générateur a transféré 12,2 μJ de 0 à 10 s (0,7 V) soit seulement 38 % de sa puissance maximum⁹⁵. Nous attribuons cela à l'absence d'adaptation de charge : le générateur ne débite 3,2 μW que dans une résistance de 500 k Ω , or le condensateur déchargé a une impédance quasi-infinie, ce qui limite la puissance transmise. A partir de 10 s, le capteur est activé et micro-générateur ne parvient pas à compenser cette consommation : le potentiel du condensateur décroît jusqu'à une oscillation « non physique » (le capteur étant modélisé par une source de courant pulsée, elle agit comme une source pour le condensateur lorsque la tension de celui-ci devient négative).

La courbe rouge correspond au potentiel du dispositif de stockage lorsque le générateur piézoélectrique est soumis à une vibration de 0,3g à 86 Hz. Dans cette situation, le micro-générateur a transféré 81,0 μJ de 0 à 10 s (1,8 V) soit seulement 39 % de sa puissance maximum. Là aussi nous attribuons cela à la non-adaptation des charges. A partir de 10 s, le capteur est activé et le micro-générateur ne parvient pas non plus à compenser cette consommation : le potentiel du condensateur décroît jusqu'à 0,6 V (en deçà de 1 V, la tension est trop basse pour la plupart des capteurs).

La courbe verte correspond au potentiel du dispositif de stockage lorsque le générateur piézoélectrique est soumis à une vibration de 0,5g à 88 Hz. Dans cette situation, le micro-générateur a transféré 110 μJ de 0 à 10 s (2,1 V) soit seulement 41 % de sa puissance maximum. Là aussi nous attribuons cela à la non-adaptation des charges. A partir de 10 s, le capteur est activé et micro-générateur ne parvient pas non plus à compenser cette consommation : le potentiel du condensateur décroît mais s'équilibre autour de 1,4 V.

⁹⁵ Puissance moyenne calculée à partir des tensions efficaces mesurées sur des charges résistives pures.

L'enseignement commun de ces trois simulations est que le circuit de redressement et d'adaptation de charge est un maillon essentiel dans la récupération d'énergie. Ici, en dépit de diodes relativement bien choisies (diodes Schottky dont la tension de seuil est de 0,4 V), le montage inadéquat (pont redresseur double alternance) et l'absence d'étage d'adaptation de charge ont eu raison de plus de la moitié de la puissance récupérable.

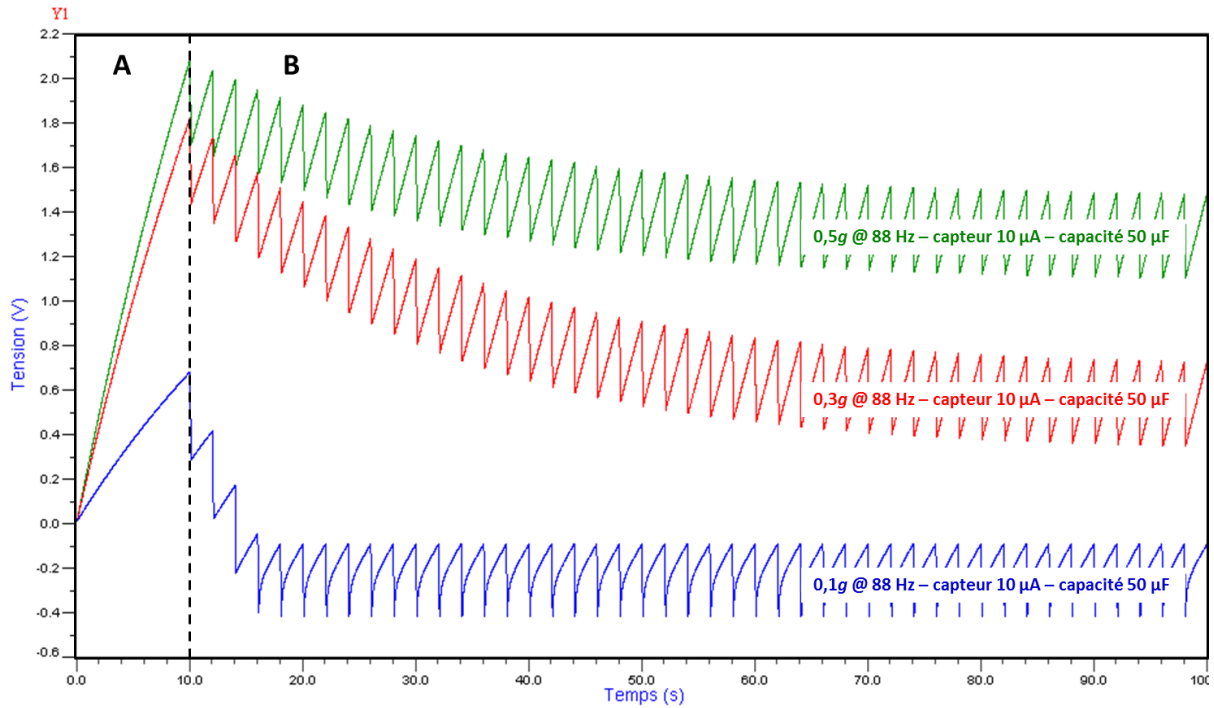


Fig. 98 – évolution du potentiel du dispositif de stockage (condensateur 10 µF). Il n'y a pas de consommation du capteur pendant les 10 premières secondes (zone A) ; celle-ci est fixée à 10 µA en moyenne ensuite (pulsations de 100 µA pendant 100 ms toutes les 1 s). Le micro-générateur piézoélectrique alimente le système à partir de vibrations de 0,1g, 0,3g et 0,5g.

Dans une seconde simulation, nous avons évalué la pertinence d'utiliser un supercondensateur comme dispositif de stockage pour le micro-générateur piézoélectrique. En effet l'autodécharge (en circuit ouvert, estimée en section 4.3.3) représente une chute de potentiel qui correspondrait à une consommation de 22 µW, il est intéressant d'observer si le micro-générateur parvient à compenser cette « perte ».

Dans la Fig. 99, nous considérons un circuit alimenté par le micro-générateur piézoélectrique (0,5g 88 Hz) à travers les mêmes diodes que la simulation précédente. Le dispositif de stockage est le modèle de supercondensateur commercial présenté en section 4.3. Sur les trois tracés (on ne voit que le rouge sur cette partie), le micro-générateur piézoélectrique alimente le système à partir de vibrations de 0,5g et il n'y a pas de consommation du capteur pendant les 5000 premières secondes. A partir de 5000 s, trois configurations sont simulées : consommation du capteur (10 µA en moyenne ensuite par pulsations de 100 µA pendant 100 ms toutes les 1 s) en maintenant le micro-générateur actif (courbe rouge) ou sans micro-générateur (courbe verte). Enfin, la courbe bleue représente le composant mis en circuit ouvert

après la charge. On voit le potentiel du système de stockage augmenter quasi-linéairement lors de la charge, puis la pente diminue lorsque le capteur est activé (courbe rouge) : dans ce cas, le micro-générateur parvient à compenser la consommation du capteur. En circuit ouvert, on note une décroissance du potentiel de 3,7 % en 1h (de 1,1582 V à 1,1152 V), ce qui faible par rapport aux valeurs mesurées dans la en section 4.3 : par exemple pour une charge à 300 μA (jusqu'à 3,5 V en 204 s) la chute est de 11,9 % (0,418 V), et pour une charge à 900 μA (jusqu'à 3,5 V en 636 s) la chute est de 14,5 % (0,508 V). La courbe verte correspond au cas de fonctionnement où le micro-générateur n'est soumis à des vibrations d'accélération suffisante (0,5g) qu'au début du vol. La simulation montre que la charge accumulée permet le fonctionnement du capteur pendant les 3600 s de la simulation, mais la tension passe sous les 1 V après 700 s (en deçà de 1 V, la tension est trop basse pour la plupart des capteurs).

Conformément à l'hypothèse de l'autodécharge conservative, le micro-générateur parvient à charger le supercondensateur. L'autodécharge par réorganisation des charges a lieu (voir agrandissement), en même temps que la charge qui s'effectue à très faible puissance : le composant atteint 1,158 V en 5000 s, soit une puissance moyenne transférée de 6,71 μW ⁹⁶, ce qui représente environ 25 % de la puissance maximum récupérable (26,6 μW à 0,5g/88 Hz, voir Tableau 30). Nous atteignons ici les limites de notre modèle : avec une puissance de charge de 6,71 μW , le courant de fuite (mesuré à 1 μA après 40 h de charge à 3,5 V) n'est plus négligeable devant les courants de charge/décharge, et la validité de l'hypothèse « conservative » doit être nuancée.

La capacité étant largement surdimensionnée, la tension du dispositif de stockage (et donc la tension de travail du micro-générateur piézoélectrique) reste très basse pendant ces 2000 s de charge, ce qui rend l'absence d'étage d'adaptation DC/DC particulièrement sensible au début, et explique ce faible rendement de charge (25 %). De plus, la conversion AC/DC est largement améliorable en utilisant d'autres diodes (comme par exemple des diodes à bas seuil comme Marzencki *et al.* [9] ou un montage différent comme Bailly *et al.*[47]). Tous ces développements sont, dans notre équipe, au cœur du travail de thèse d'Adrien Ramond.

Enfin, nous devons souligner ici que la consommation moyenne de 10 μA ne correspond pas à la puissance de 20 μW définie dans le cahier des charges puisque la tension ne dépasse pas 1,3 V. Nous n'avons pas pu laisser le système évoluer jusqu'à cette tension dans la mesure SystemVision n'accepte pas de simulations de plus de 10^4 s. Nous n'avons pas pu réduire la capacité des éléments de stockage puisque notre modèle de supercondensateur se construit par identification sur un composant, et que nous n'avons pas de composant de capacité inférieure à 50 mF à caractériser.

⁹⁶ En prenant l'hypothèse d'une capacité quasi-constante de 50 mF.

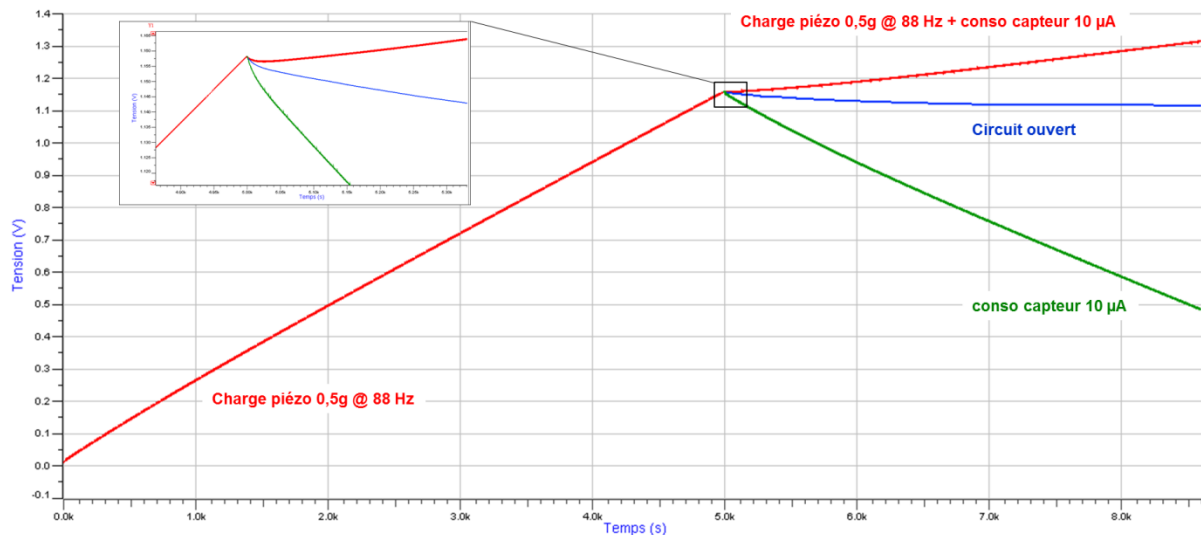


Fig. 99 – Simulation VHDL-AMS du potentiel du supercondensateur modélisé en section 4.3 de 0 à 8600 s. Commun de 0 à 5000 s : charge par micro-générateur piézoélectrique 0,5g @ 88 Hz. Au-delà : la courbe rouge représente la charge micro-générateur et consommation capteur (10 μ A), la courbe bleue correspond au composant en circuit ouvert et la courbe verte à la consommation de capteur seule.

5. Conclusion

Ce chapitre a permis de replacer les éléments conçus et fabriqués au cours de cette thèse dans le contexte du projet AUTOSSENS, et notamment de souligner le besoin de construire des modèles dans un langage commun (VHDL-AMS) pour rendre cohérent la conception de tous les éléments entre eux.

Une validation expérimentale simple de l'alimentation d'un système très basse consommation par le générateur piézoélectrique puis par un micro-supercondensateur est réalisée.

Un modèle simple du générateur piézoélectrique, et dont les paramètres sont identifiés sur l'expérience ou sur la simulation éléments finis/SPICE a été appliqué. Ce modèle ne permet pas l'optimisation ou la conception de générateurs puisque les paramètres géométriques y sont inconnus, mais il permet une simulation à très faible temps de calcul pour établir un premier bilan énergétique. Un modèle plus complexe des supercondensateurs a été proposé, dont les paramètres sont là aussi identifiés à partir de mesures expérimentales. Une simulation de plusieurs cas de fonctionnement simples a été réalisée, et elle a permis de mettre en évidence que la puissance maximum (mesurée au chapitre 2) n'est atteinte que lorsque la charge est optimale, ce qui n'est presque jamais le cas sans adaptation de charge.

Par ailleurs, le modèle d'autodécharge conservative (pas de dissipation de l'énergie transférée dans le supercondensateur) a montré un bon accord avec les mesures (à courant constant). Cette hypothèse explique le résultat de la seconde simulation : un supercondensateur pourrait être envisagé pour le stockage de l'énergie récupérée par un micro-générateur piézoélectrique, à condition d'avoir besoin d'une grande capacité et de tolérer les contraintes de tension de fonctionnement. Nous avons toutefois vu que le modèle est poussé un peu à sa limite par la faible puissance de charge initiale (6,71 μ W en moyenne sur

les 5000 premières secondes). On privilégiera donc a priori ce type de stockage là où il est strictement nécessaire, c'est-à-dire pour les sources qui ne sont disponibles que par épisode ; c'est le cas en présence d'un module de thermogénération (qui produit jusqu'à 20 J sur les premières 20 minutes de vol [47]), ou si le module est alimenté par RF au sol.

Il existe plusieurs voies d'amélioration des modèles qui permettraient de les compléter ou de les rendre plus précis. Par exemple, en considérant le couplage électromécanique du générateur piézoélectrique à travers un modèle 1D couplé, on pourrait observer des comportements transitoires. Ces comportements peuvent être importants lorsque la charge est modifiée de façon abrupte – par exemple dans un circuit de MPPT – et ils peuvent affecter significativement le bilan énergétique de la simulation. D'autre part nous n'avons pas considéré jusqu'ici les caractéristiques des composants à température ambiante, or la température en vol est de 50 °C. Il est notamment attendu que la raideur des poutres du micro-générateur piézoélectrique augmente, et que l'autodécharge soit ralentie et la capacité soit réduite.

Conclusion générale

Les réseaux de surveillance autonomes, constitués de microsystemes communiquant sans fil, sont une forme d'intelligence ambiante qui a suscité un nombre croissant de travaux au cours de la dernière décennie. Ils offrent une amélioration significative des applications de surveillances existantes (surveillance en milieux inaccessibles par exemple) ou ouvrent de nouvelles possibilités, comme les réseaux mobiles et reconfigurables *ad hoc*. La question de l'énergie est centrale dans ces réseaux puisque les microsystemes sont autonomes, et disposent donc de ressources très limitées. En effet, en dépit de l'amélioration continue de la capacité des micro-batteries et de la réduction de la consommation électrique des éléments du nœud, l'énergie embarquée s'épuise soit parce qu'elle a été consommée, soit par autodécharge, au mieux au bout de 3 à 4 ans.

Une alternative consiste à récupérer l'énergie disponible dans l'environnement du microsysteme pour l'alimenter. Cette stratégie a permis de faire fonctionner des microsystemes (capteurs, processeurs, émetteurs) avec une puissance de plus en plus réduite (de l'ordre du microwatt), en transformant l'énergie présente dans l'environnement (sous formes diverses : lumière, chaleur, vibrations, radiation...) en électricité. La puissance récupérée est certes faible en l'état actuel de la technologie, mais elle augmente avec les efforts de recherche : elle est suffisante aujourd'hui pour faire fonctionner des microsystemes très simples dans des conditions idéales (environnement très riche en énergie), elle suffira demain à alimenter des microsystemes plus complexes dans des situations plus défavorables – mais plus réalistes.

Ce travail de thèse de doctorat fait partie du projet AUTOSSENS, cofinancé par la FRAE⁹⁷ et le CNRS. Démarré en Mai 2007, le projet a pour objectif de concevoir et intégrer un microsysteme de récupération et de gestion de l'énergie pour l'alimentation de capteurs embarqués. La collaboration d'Airbus a donné une application cadre : la surveillance de santé de structure aéronautique. Dans cette application, nous n'avons retenu comme source d'énergie que les vibrations des moteurs, et ces vibrations sont de très faible amplitude. La conception d'un microsysteme capteur autonome nécessite donc un travail conjoint sur l'intégration et l'efficacité du dispositif de récupération. Face à une faible énergie récupérable, il faut également envisager une alimentation électrique alternative qui chargerait un dispositif de stockage de grande capacité au début du vol (par RF au sol ou par thermogénération en vol, cette dernière faisant l'objet d'une autre thèse au sein du projet AUTOSSENS).

Ainsi, ce mémoire fait le bilan de notre contribution à ce projet sur deux points qui constituent les verrous et développements nécessaires pour concevoir un microsysteme autonome pour le contrôle de santé des structures aéronautiques :

1. La conception d'un dispositif de **récupération d'énergie à partir de vibration basse fréquence et basse amplitude** et le développement d'un procédé de fabrication en technologie MEMS,

⁹⁷ Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, constituée notamment d'Airbus, Safran, Thalès, EADS, du CEA, du CNRS, de l'ONERA et de l'ISAE.

2. La conception et le développement d'un procédé de fabrication d'un **micro-supercondensateur** compatible avec la technologie silicium, pour le stockage de l'énergie récupérée.

Les travaux sont rapportés suivant 4 chapitres : le premier chapitre situe ce travail de thèse dans la problématique de l'autonomie énergétique des microsystèmes autonomes utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil dédiés à la surveillance de santé de structures aéronautiques, et à identifier les développements nécessaires. Dans une première partie nous avons regardé les facteurs qui ont permis la faisabilité des réseaux de capteurs sans fil, puis les enjeux généraux de cette technologie. Dans un second temps, nous avons identifié les enjeux de la surveillance de santé de structures mécaniques, puis – après avoir dressé un état de l'art des méthodes utilisées à ce jour – nous avons mis en évidence les bénéfices attendus des réseaux de capteurs autonomes dédiés à cette application. Dans la troisième partie de ce chapitre nous avons situé la problématique de l'énergie dans ces microsystèmes autonomes (besoins et ressources) appliqués à la surveillance de structures aéronautiques, puis dans la quatrième partie nous avons identifié les sources ambiantes d'énergie dans l'application du projet AUTOSENS et les problèmes liés à la collecte et au stockage de cette énergie. Enfin, la dernière partie a identifié, à partir du cahier des charges du projet, les problèmes spécifiques que nous avons exploré dans cette thèse.

Le **second chapitre** détaille le développement du **dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations**. La première partie fait un état de l'art des techniques de récupération, prolongé dans une seconde partie en se concentrant sur la transduction piézoélectrique pour cerner les verrous technologiques actuels. Lors de la conception de notre dispositif, nous avons développé un modèle éléments finis / SPICE qui nous a permis d'optimiser la structure, et nous avons fait le choix d'intégrer un matériau massif (PZT-5H) pour bénéficier de ses bonnes performances piézoélectriques, au lieu de recourir à des matériaux piézoélectriques en couche mince, moins performants. Pour cela nous avons eu recours à une gravure LASER femtoseconde combinée à des techniques standards de microsystèmes. Nous avons pu fabriquer un dispositif qui satisfait les contraintes du cahier des charges, et qui présente un rendement (figure de mérite volumique) comparable à l'état de l'art, tout en ayant une réponse en fréquence plus large.

Le **troisième chapitre** rapporte le développement du **micro-supercondensateur intégré sur silicium**. La première partie du chapitre dresse l'état de l'art sur l'intégration des supercondensateurs sur silicium et identifie les limites actuelles, que ce soit sur la densité d'énergie surfacique ou sur les procédés d'encapsulation hermétique. Nous avons conçu un procédé de fabrication de micro-supercondensateur qui puisse atteindre les objectifs de densité d'énergie définis par le cahier des charges du projet, lesquels étaient particulièrement ambitieux puisqu'ils représentaient une amélioration de 500 % de la meilleure densité d'énergie de la littérature. Le procédé complet comportait deux volets pour aboutir à un composant fonctionnel : l'intégration du matériau actif sur silicium et l'encapsulation hermétique du composant. Le procédé d'intégration de charbon actif sur silicium nous a permis d'améliorer de 357 % la

densité d'énergie de référence de la littérature, tandis que le procédé d'encapsulation, même s'il nécessite des développements et caractérisations supplémentaires, semble offrir une herméticité suffisante sans exposer l'électrolyte à plus de 150 °C, ce qui est une amélioration par rapport à l'état de l'art. Nous n'avons cependant pas pu valider de façon satisfaisante la combinaison des deux volets.

Le **quatrième** et dernier chapitre présente la **construction d'un système autonome complet**, puisant son énergie à partir des vibrations récupérées par notre dispositif et la stockant dans notre micro-supercondensateur. La première partie présente la validation expérimentale de l'alimentation (d'abord par un micro-générateur piézoélectrique fabriqué, puis par un micro-supercondensateur) d'un système très basse consommation simple, développé pour l'occasion. La seconde partie présente les efforts de modélisation du générateur piézoélectrique et du supercondensateur, afin que les briques développées puissent être intégrées dans des solutions à d'autres applications et que les autres éléments du système puissent être optimisés dans des travaux futurs. Cette partie présente d'abord l'architecture générale, puis la modélisation VHDL-AMS des éléments que nous avons fabriqués (micro-générateur piézoélectrique et supercondensateur). Nous y présentons un modèle du supercondensateur adapté aux petites puissances, où l'autodécharge et la décharge sont mêlées. Enfin la simulation du système complet sur des cas d'utilisation très simples permet de valider les dimensionnements (micro-générateur piézoélectrique par rapport à la consommation du capteur), mais met en évidence un manque de puissance aux très basses accélérations ($< 0,3g$) et le besoin impératif d'un étage d'adaptation de charge pour que le micro-générateur puisse transmettre toute l'énergie récupérable.

Par ailleurs, le modèle d'autodécharge conservative (pas de dissipation de l'énergie transférée dans le supercondensateur) a montré un bon accord avec les mesures (à courant constant). Cette hypothèse explique le résultat de la seconde simulation : un supercondensateur peut être envisagé pour le stockage de l'énergie récupérée par un micro-générateur piézoélectrique, à condition d'avoir besoin d'une grande capacité et de tolérer les contraintes de tension de fonctionnement. Cette hypothèse doit néanmoins être nuancée car le courant de fuite n'est plus négligeable avec de si faibles puissances de charge. On privilégiera donc *a priori* ce type de stockage là où il est vraiment nécessaire, c'est-à-dire pour les sources qui ne sont disponibles que par épisode ; c'est le cas en présence d'un module de thermogénération (qui produit jusqu'à 20 J sur les premières 20 minutes de vol [47]), ou si le module est alimenté par RF au sol.

Ces travaux ont permis des améliorations par rapport à l'état de l'art (notamment en rendement large bande pour le générateur piézoélectrique et en densité d'énergie surfacique pour le micro-supercondensateur), mais ils appellent également à des développements supplémentaires.

D'un point de vue du générateur piézoélectrique, une optimisation du modèle ou l'emploi de stations de calcul plus performantes devraient permettre d'explorer des designs moins conventionnels comme des poutres trapézoïdales ou triangulaires [1-3]. Par ailleurs, nous avons vu que le couplage mécanique entre la couche piézoélectrique et la couche silicium pouvait réduire considérablement les performances.

Il peut être intéressant d'explorer un collage par soudure eutectique (363 °C, entre l'or de la couche piézoélectrique et le silicium du substrat) qui permettrait de s'affranchir de la couche de colle, mais nécessiterait une polarisation après la soudure, puisque cette température dépasse la température de Curie de la plupart des matériaux piézoélectriques connus.

Dans le prolongement direct des travaux présentés dans ce mémoire sur le micro-supercondensateur, les essais d'encapsulation en deux temps se poursuivent en explorant la compatibilité avec le dépôt par électrophorèse, et l'abaissement de la température du second collage à 80 °C (température la plus basse à laquelle nous avons obtenu un collage sur surface plane) qui rendrait la technique compatible avec plus de solvants volatils, comme l'acétonitrile (évaporation à 82 °C). Le procédé que nous avons développé a montré une amélioration sensible de la densité d'énergie, mais toujours en deçà des objectifs du projet (360 mJ.cm⁻²). Il faut noter également que la capacité surfacique nécessaire calculée à partir de cette densité d'énergie nécessaire est sous-estimée : nous avons considéré que toute la fenêtre électrochimique était utile, or le supercondensateur est rarement déchargé en dessous de 1,25 V [4], pour des problèmes d'efficacité énergétique. Par ailleurs, nous avons également négligé dans ce calcul les pertes par autodécharge. Pour améliorer encore la densité d'énergie, une option consiste à augmenter le volume d'électrode en augmentant la profondeur des cuves ou en utilisant une gravure directive (DRIE). Une autre voie consiste à utiliser un matériau actif offrant une plus grande capacité surfacique spécifique, comme les oxydes de ruthénium (RuO₂) qui atteignent 1220 F.g⁻¹ contre 140 F.g⁻¹ pour les charbons actifs [5], en tenant compte du fait que la fenêtre de potentiel est réduite.

Les voies d'améliorations de l'autodécharge pourraient être étudiées, notamment en portant une attention particulière aux groupements chimiques de surface du charbon actif [8], au dosage et la nature de l'électrolyte [9], ou en remplaçant le charbon actif par d'autres matériaux poreux (CDC, nanotubes de carbone, ou même silicium poreux très dopé), dont la surface est *a priori* beaucoup moins polluée de groupes chimiques réactifs. Les effets de la microstructure sur l'autodécharge sont une question qui mérite un développement (notamment parce que la micro-structuration rend le matériau plus accessible et donc la redistribution plus rapide). L'étude des contributions respectives de l'électrolyte, de la géométrie des électrodes et du matériau actif dans l'autodécharge est par ailleurs nécessaire.

Les modèles développés ont permis de faire un premier bilan énergétique à travers plusieurs scénarii, mais il faut encore modéliser des micro-supercondensateurs pour faire un vrai dimensionnement optimisé des éléments et du système. Enfin la conception du système de gestion de l'énergie est source d'améliorations de l'efficacité énergétique que nous n'avons pas étudiée dans ce mémoire : notamment en adaptant le circuit de redressement (AC/DC) et en créant un étage d'adaptation d'impédance (DC/DC) qui puisse tirer le maximum du micro-générateur piézoélectrique, à la manière des circuits de MPPT (*maximum power point tracking*) largement répandus dans les systèmes de gestion de cellules photovoltaïques.

Tous ces développements rapprocheront encore les microsystèmes de l'autonomie énergétique – et donc de l'autonomie totale – dans des situations et des environnements réels difficiles, et cette autonomie permettra le déploiement de tout leur potentiel applicatif.

-
- [1] D. Benasciutti, L. Moro, S. Zelenika, and E. Brusa, “Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes,” *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 5, pp. 657-668, May. 2010.
 - [2] A. Erturk, J. M. Renno, D. J. Inman, and M. Ahmadian, “Piezoelectric energy harvesting from an L-shaped beam-mass structure,” in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, vol. 6928, pp. 69280I-15, 2008.
 - [3] F. Goldschmidtboeing and P. Woias, “Characterization of different beam shapes for piezoelectric energy harvesting,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 10, p. 104013, 2008.
 - [4] J. LASSÈGUES, *Supercondensateurs | Techniques de l'ingénieur*. 2001.
 - [5] K. Naoi and P. Simon, “New materials and new configurations for advanced electrochemical capacitors,” *Journal of The Electrochemical Society (JES)*, vol. 17, no. 1, pp. 34–37, 2008.
 - [7] A. Stein, Z. Wang, and M. A. Fierke, “Functionalization of Porous Carbon Materials with Designed Pore Architecture,” *Advanced Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 265-293, 2009.
 - [8] H. A. Andreas, K. Lussier, and A. M. Oickle, “Effect of Fe-contamination on rate of self-discharge in carbon-based aqueous electrochemical capacitors,” *Journal of Power Sources*, vol. 187, no. 1, pp. 275-283, Feb. 2009.

Annexes

1. Modèle éléments finis / SPICE

1.1. Script de lancement

Ce code à exécuter sous Matlab en connexion avec COMSOL 3.5a lance 400 itérations du modèle pour 40 fréquences d'excitation différentes et 10 résistances de charge différentes, et récupère à chaque fois la tension au cours du temps sur l'électrode.

```
clear all
close all

frequence = linspace(20,100,40);
frequence(1:5) = linspace(40,70,5);
frequence(6:35) = linspace(71,89,30);
frequence(36:40) = linspace(90,100,5);

resistance_charge = linspace(2e5,2e6,10);
temps_extraction = 0:30000;
compteur = 0;
memoire_tension = zeros(30000,length(frequence),length(resistance_charge));

for f=1:length(frequence)
    for rc=7
        tic
        [tension] = piezo(frequence(f),resistance_charge(rc));
        memoire_tension(:,f,rc) = tension(:);
        toc
        compteur = compteur +1;
        save comsol--mesh5.mat
        disp(['simu ' num2str(compteur) '/'
num2str(length(resistance_charge)*length(frequence))])
    end
end
```

1.1. Modèle

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.608, $Date: 2009/05/11 07:38:49 $)
function [tension] = piezo(frequence,resistance_charge)

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 608;
vrsn.rcs = '$Name: v35ap $';
vrsn.date = '$Date: 2009/05/11 07:38:49 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g2=block3('9e-3','350e-6','100e-6','base','corner','pos',{ '0','0','0'},'axis',{ '0','0','1'},'rot','0');
g3=block3('5e-3','3.8375e-3','100e-6','base','corner','pos',{ '9e-3','-1.74375e-3','0'},'axis',{ '0','0','1'},'rot','0');
[g4,g5]=geomcopy({g2,g3});
[g6,g7]=geomcopy({g4,g5});
g6=move(g6,[0,0,1.0E-4]);
g7=move(g7,[0,0,1.0E-4]);
g6=scale(g6,1,1,0.1,0,0,100e-6);
g7=scale(g7,1,1,0.1,0,0,100e-6);
[g8,g9]=geomcopy({g6,g7});
[g10,g11]=geomcopy({g8,g9});
g10=move(g10,[0,0,1.0E-5]);
g11=move(g11,[0,0,1.0E-5]);
g10=scale(g10,1,1,20,0,0,110e-6);
g11=scale(g11,1,1,20,0,0,110e-6);
[g12]=geomcopy({g11});
[g13]=geomcopy({g12});
g13=move(g13,[0,0,2.0E-4]);
g13=scale(g13,1,1,75.685,0,0,310e-6);
g14=block3('0.0050','0.0038375','1.5137e-3','base','corner','pos',{ '0.0090','-0.00174375','3.1E-4'},'axis',{ '0','0','1'},'rot','0');

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g2,g3,g6,g7,g10,g11,g14};
s.name={'si','si_pelle','si1','si_pelle1','si2','si_pelle2','w'};
s.tags={'g2','g3','g6','g7','g10','g11','g14'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Constants
fem.const = {};

% Constants
fem.const = {'qe_cir','1.602E-19[C]', ...
'kB_cir','1.38E-23[J/K]', ...
'freq_cir','1e3[Hz]', ...
'T_cir','27.2[K]+273.15[K]', ...
'omega_cir','2*pi*freq_cir', ...
'sim_X1_Masse_i','0', ...
'sim_RC_VALUE',resistance_charge, ...
'sim_RC_R','1', ...
'sim_RC_TC1','0', ...
'sim_RC_TC2','0', ...
'sim_RC_TCE','0', ...
'sim_RC_T_ABS','27.2', ...
'sim_GROUND_p_v','0'};

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
'hauto',6, ...
'zscale',2);
```

```

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'PiezoSolid3';
appl.module = 'MEMS';
appl.gporder = 4;
appl.cporder = 2;
appl.sshape = 2;
appl.border = 'on';
appl.assignsuffix = '_smpz3d';
clear prop
prop.analysis='time';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.I0 = {0,0,0,'sim_X1_V_piezo_i','nan'};
bnd.electrictype = {'nD0','cont','nD0','fp','fp'};
bnd.index = {0,0,0,'V_piezo','Masse'};
bnd.Q0 = {0,0,0,'sim_X1_V_piezo_q','nan'};
bnd.constrcond = {'free','free','fixed','free','free'};
bnd.ind = [3,1,1,3,1,2,3,1,5,4,1,1,1,1,1,1,2,1,1,5,1,1,4,1,2,2,2,1, ...
    1,1,1,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.materialmodel = {'aniso','iso','piezoelectric','iso'};
equ.nu = {0.33,0.28,0.33,'mat4_nu'};
equ.epsilonrS = {{1704.4,0,0,0,1704.4,0,0,0,1433.61},{1704.4, ...
    0,0,0,1704.4,0,0,0,1433.61},{1704.4,0,0,0,1704.4, ...
    0,0,0,1433.61},{1704.4,0,0,0,1704.4,0,0,0,1433.61}};
equ.epsilonr = {1,4.5,1,1};
equ.eta_s = {0,0,'1/46',0};
equ.rho = {'mat1_rho','1900[kg/m^3]','7950[kg/m^3]','mat4_rho'};
equ.cE = {{127205000000,80212200000,84670200000,0,0,0;80212200000, ...
    127205000000,84670200000,0,0,0;84670200000,84670200000,117436000000, ...
    0,0,0;0,0,0,22988600000,0,0,0;0,0,0,22988600000, ...
    0,0,0,0,23474200000},{127205000000,80212200000,84670200000, ...
    0,0,0;80212200000,127205000000,84670200000,0,0,0;84670200000, ...
    84670200000,117436000000,0,0,0;0,0,0,22988600000,0, ...
    0,0,0,0,22988600000,0,0,0,0,23474200000}, ...
    {'1.27205e+011[Pa]','8.02122e+010[Pa]','8.46702e+010[Pa]','0[Pa]','0[Pa]', ...
    '0[Pa]','8.02122e+010[Pa]','1.27205e+011[Pa]','8.46702e+010[Pa]','0[Pa]', ...
    '0[Pa]','0[Pa]','8.46702e+010[Pa]','8.46702e+010[Pa]','1.17436e+011[Pa]', ...
    '0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','2.29885e+010[Pa]','0[Pa]', ...
    '0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','2.29885e+010[Pa]','0[Pa]','0[Pa]', ...
    '0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','0[Pa]','2.34742e+010[Pa]},{127205000000,80212200000, ...
    84670200000,0,0,0;80212200000,127205000000,84670200000,0, ...
    0,0;84670200000,84670200000,117436000000,0,0,0;0,0, ...
    0,22988600000,0,0,0,0,22988600000,0,0,0,0, ...
    0,0,23474200000}};
equ.dampingtype = {'nodamping','nodamping','lossfactor','nodamping'};
equ.D = {{'mat1_Delastic3D_1_1','mat1_Delastic3D_1_2','mat1_Delastic3D_1_3', ...
    'mat1_Delastic3D_1_4','mat1_Delastic3D_1_5','mat1_Delastic3D_1_6','mat1_Delastic3D_2_1', ...
    'mat1_Delastic3D_2_2','mat1_Delastic3D_2_3','mat1_Delastic3D_2_4','mat1_Delastic3D_2_5', ...
    'mat1_Delastic3D_2_6','mat1_Delastic3D_3_1','mat1_Delastic3D_3_2','mat1_Delastic3D_3_3', ...
    'mat1_Delastic3D_3_4','mat1_Delastic3D_3_5','mat1_Delastic3D_3_6','mat1_Delastic3D_4_1', ...
    'mat1_Delastic3D_4_2','mat1_Delastic3D_4_3','mat1_Delastic3D_4_4','mat1_Delastic3D_4_5', ...
    'mat1_Delastic3D_4_6','mat1_Delastic3D_5_1','mat1_Delastic3D_5_2','mat1_Delastic3D_5_3', ...
    'mat1_Delastic3D_5_4','mat1_Delastic3D_5_5','mat1_Delastic3D_5_6','mat1_Delastic3D_6_1', ...
    'mat1_Delastic3D_6_2','mat1_Delastic3D_6_3','mat1_Delastic3D_6_4','mat1_Delastic3D_6_5', ...
    'mat1_Delastic3D_6_6'},{127205000000,80212200000,84670200000,0, ...
    0,0;80212200000,127205000000,84670200000,0,0,0;84670200000, ...
    84670200000,117436000000,0,0,0;0,0,0,22988600000,0, ...
    0,0,0,0,22988600000,0,0,0,0,23474200000}, ...
    {127205000000,80212200000,84670200000,0,0,0;80212200000,127205000000, ...
    84670200000,0,0,0;84670200000,84670200000,117436000000,0, ...
    0,0;0,0,0,22988600000,0,0,0,0,22988600000, ...
    0,0,0,0,23474200000},{127205000000,80212200000,84670200000, ...
    0,0,0;80212200000,127205000000,84670200000,0,0,0;84670200000, ...
    84670200000,117436000000,0,0,0;0,0,0,22988600000,0, ...
    0,0,0,0,22988600000,0,0,0,0,23474200000}};
equ.E = {200000000000,'5e9[Pa]',200000000000,'mat4_E'};
equ.sE = {{1.65e-11,-4.78e-12,-8.4500000000000001e-12,0,0,0; ...
    -4.78e-12,1.65e-11,-8.4500000000000001e-12,0,0,0;-8.4500000000000001e-12, ...
    -8.4500000000000001e-12,2.07e-11,0,0,0;0,0,0,4.35e-11, ...

```

```

0,0;0,0,0,0,4.35e-11,0;0,0,0,0,4.26e-11}, ...
{1.65e-11,-4.78e-12,-8.450000000000001e-12,0,0,0;-4.78e-12, ...
1.65e-11,-8.450000000000001e-12,0,0,0;-8.450000000000001e-12, ...
-8.450000000000001e-12,2.07e-11,0,0,0;0,0,0,4.35e-11, ...
0,0;0,0,0,0,4.35e-11,0;0,0,0,0,4.26e-11}, ...
{'1.65e-011[1/Pa]','-3.78e-012[1/Pa]','-9.1e-012[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]', ...
'0[1/Pa]','-3.78e-012[1/Pa]','1.65e-011[1/Pa]','-8.45e-012[1/Pa]','0[1/Pa]', ...
'0[1/Pa]','0[1/Pa]','-9.1e-012[1/Pa]','-8.45e-012[1/Pa]','2.11e-011[1/Pa]', ...
'0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','4.35e-011[1/Pa]', ...
'0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','4.35e-011[1/Pa]', ...
'0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','0[1/Pa]','4.26e-011[1/Pa]'}, ...
{1.65e-11,-4.78e-12,-8.450000000000001e-12,0,0,0;-4.78e-12, ...
1.65e-11,-8.450000000000001e-12,0,0,0;-8.450000000000001e-12, ...
-8.450000000000001e-12,2.07e-11,0,0,0;0,0,0,4.35e-11, ...
0,0;0,0,0,0,4.35e-11,0;0,0,0,0,4.26e-11}};
equ.constform = {'stress','stress','strain','stress'};
equ.sigma = {59900000,'0.004[S/m]',59900000,'mat4_sigma'};
equ.d = {{0,0,0,0,7.41e-10,0;0,0,0,7.41e-10,0,0; ...
-2.74e-10,-2.74e-10,5.93e-10,0,0,0},{0,0,0,0,7.41e-10, ...
0;0,0,0,7.41e-10,0,0;-2.74e-10,-2.74e-10,5.93e-10,0, ...
0,0},{'0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','7.41e-010[C/N]','0[C/N]'; ...
'0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','7.41e-010[C/N]','0[C/N]';-3.4e-010[C/N]', ...
'-2.74e-010[C/N]','6.90e-010[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]','0[C/N]';{0,0, ...
0,0,7.41e-10,0;0,0,0,7.41e-10,0,0;-2.74e-10,-2.74e-10, ...
5.93e-10,0,0,0}};
equ.e = {{0,0,0,0,17.0345,0;0,0,0,17.0345,0,0; ...
-6.62281,-6.62281,23.2403,0,0,0},{0,0,0,0,17.0345, ...
0;0,0,0,17.0345,0,0;-6.62281,-6.62281,23.2403,0,0, ...
0},{'0[C/m^2]','0[C/m^2]','0[C/m^2]','0[C/m^2]','17.0345[C/m^2]','0[C/m^2]'; ...
'0[C/m^2]','0[C/m^2]','0[C/m^2]','0[C/m^2]','17.0345[C/m^2]','0[C/m^2]'; ...
'-6.62281[C/m^2]','-6.62281[C/m^2]','23.2403[C/m^2]','0[C/m^2]','0[C/m^2]', ...
'0[C/m^2]';{0,0,0,0,17.0345,0;0,0,0,17.0345,0,0; ...
-6.62281,-6.62281,23.2403,0,0,0}};
equ.Fz = {0,0,0,'charge'};
equ.ind = [1,2,3,1,2,3,4];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'charge','-19350*(9.81+.1*sin(2*3.14159*frequence*t))', ...
'frequence',frequence};

% Global expressions
fem.globalexpr = {'sim_X1_V_piezo_v','VpntV_piezo_g1_smpz3d', ...
'sim_X1_Masse_v','sim_GROUND_p_v', ...
'sim_X1_Masse_q','nan', ...
'sim_RC_i','sim_RC_p_i', ...
'sim_RC_v','sim_RC_VALUE*sim_RC_i', ...
'sim_RC_p_v','sim_RC_v+sim_X1_Masse_v', ...
'sim_RC_p_i','-sim_X1_V_piezo_i', ...
'sim_RC_n_v','-sim_RC_v+sim_RC_p_v', ...
'sim_RC_n_i','-sim_RC_p_i', ...
'sim_GROUND_p_i','-sim_X1_Masse_i-sim_RC_n_i'};

% Descriptions
clear descr
descr.const=
{'sim_GROUND_p_v','GROUND.p.v','sim_RC_TC1','RC.TC1','sim_RC_T_ABS','RC.T_ABS','sim_RC_TCE','RC.TC
E','sim_RC_TC2','RC.TC2','sim_RC_VALUE','RC.VALUE','sim_X1_Masse_i','X1.Masse.i','sim_RC_R','RC.R'}
;
descr.globalexpr=
{'sim_RC_n_i','RC.n.i','sim_RC_v','RC.v','sim_RC_i','RC.i','sim_X1_Masse_q','X1.Masse.q','sim_X1_V
__piezo_v','X1.V_piezo.v','sim_RC_p_i','RC.p.i','sim_RC_p_v','RC.p.v','sim_GROUND_p_i','GROUND.p.i'
,'sim_RC_n_v','RC.n.v','sim_X1_Masse_v','X1.Masse.v'};
descr.ode= {'sim_X1_V_piezo_i','X1.V_piezo.i 0','sim_X1_V_piezo_q','X1.V_piezo_q 0'};
fem.descr = descr;

% Library materials
clear lib
lib.mat{1}.name='Silicon (single-crystal)';

```



```

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, ...

'solcomp',{ 'w','v','u','V','sim_Xl_V__piezo_i','VconstrV_piezo_g1_smpz3d','sim_Xl_V__piezo__q'},
...

'outcomp',{ 'w','v','u','sim_Xl_V__piezo_i','V','VconstrV_piezo_g1_smpz3d','sim_Xl_V__piezo__q'},
...

        'blocksize','auto', ...
        'odesolver','genalpha', ...
        'tlist',[colon(0,4.0e-4,12)], ...
        'tout','tlist', ...
        'tsteps','manual', ...
        'timestep',4e-4, ...
        'nlsolver','manual', ...
        'linsolver','spooles', ...
        'ntolfact',1, ...
        'maxiter',4, ...
        'dtech','const', ...
        'damp',1.0, ...
        'jtech','minimal');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

for temps_extraction=1:30000

% Integrate
tension(temps_extraction)=postint(fem,'V', ...
        'unit','V', ...
        'recover','off', ...
        'dl',4, ...
        'edim',0, ...
        'solnum',temps_extraction);

end

```

2. Calcul de la capacité surfacique attendue

Ce code à exécuter sous Matlab permet de calculer la surface et le volume des électrodes des micro-supercondensateurs, et la capacité attendue. Le calcul prend en compte la perte de volume due à la gravure KOH.

```
profondeur = 336; % µm
nbre_doigts = [2;2;2;2;4;4;4;8;8;8;8;]; % µm
largeur_doigts = [1243;1213;1175;1138;616;581;538;494;303;266;219;172;]; % µm
largeur_murs = [10;50;100;150;10;50;100;150;10;50;100;150;]; % µm
profondeur_max = largeur_doigts./2.*tan(deg2rad(54.7)); % µm
longueur_elec = 5000 - 400 - largeur_murs; % µm
surface_elec = (largeur_doigts/1000.*longueur_elec/1000.*nbre_doigts.*2); % en mm²
surface_elec_murs = (largeur_doigts/1000.*longueur_elec/1000.*nbre_doigts.*2 ...
+longueur_elec/1000.*largeur_murs/1000.*(nbre_doigts.*2-1)); % en mm²
volume_carre = surface_elec.*profondeur/1000; % mm³
avancee_KOH = profondeur./tan(deg2rad(54.7)); % µm

for k = 1:12
    if profondeur_max(k) > profondeur
        volume_KOH(k) = volume_carre(k) - profondeur/1000.*avancee_KOH/1000 ...
        .*nbre_doigts(k)*longueur_elec(k)/1000*2; % mm³
        test(k) = 0;
    else % si la gravure KOH se prolonge sur des motifs étroits, les flancs (111) se rejoignent
        volume_KOH(k) = surface_elec(k).*profondeur_max(k)/1000/2; % mm³
        test(k) = 1;
    end
end

volume_KOH = shiftdim(volume_KOH); % mm³

capa_KOH = 10*volume_KOH; % mF, je prends une densité de capa de 10 F/cm³, soit 10 mF/mm³
capa_KOH_surf = capa_KOH./0.25; % mF/cm²
```

3. Calcul de la distance ionique moyenne

Ce code à exécuter sous Matlab permet de calculer la distance moyenne qu'un ion a à parcourir pour rencontrer une électrode de charge opposée. Le calcul fait l'hypothèse que la hauteur des électrodes n'a pas d'influence notable (calcul en 2D) et que les ions ne pénètrent pas le volume du charbon. Toutes les distances sont exprimées en dizaines de micron pour réduire la taille de la matrice de calcul et donc le temps de calcul ; pour des dimensions d'électrode inférieure à 10 μm , il faut s'affranchir de cette dernière simplification.

```
%% ==== micro 2*125 10µm ====
clear all
motif = single(zeros(840,780)); % fond
motif(650:670,140:640) = -1; % barre -
motif(170:190,140:640) = 1; % barre +

mur = 1;
nombre_elec = 8;
largeur = round((500 - mur*(nombre_elec*2-1))/(nombre_elec*2));

% electrodes +
prochain_y1 = 140;
prochain_y2 = 140+largeur;

for n=1:nombre_elec
    motif(190:640,prochain_y1:prochain_y2) = 1;
    prochain_y1 = prochain_y2 + largeur + 2*mur;
    prochain_y2 = prochain_y1 + largeur;
end

% electrodes -
prochain_y1 = 140 + largeur + mur;
prochain_y2 = prochain_y1 + largeur;

for n=1:nombre_elec
    motif(200:650,prochain_y1:prochain_y2) = -1;
    prochain_y1 = prochain_y2 + largeur + 2*mur;
    prochain_y2 = prochain_y1 + largeur;
end

memoire_distance = single(zeros(length(motif(:,1)),length(motif(1,:))));
tic

for x_MC=1:length(motif(:,1))/2
    for y_MC=1:length(motif(1,:))/2
        memoire_distance(x_MC,y_MC) = 0;

        if motif(x_MC,y_MC) == 1 % si on est sur une electrode +
            for xx=1:length(motif(:,1))
                for yy=1:length(motif(1,:))
                    if (motif(xx,yy) == -1 && sqrt((xx-x_MC)^2 + (yy-y_MC)^2) ...
                        <= memoire_distance(x_MC,y_MC)) || ...
                        (motif(xx,yy) == -1 && memoire_distance(x_MC,y_MC) == 0)
                        memoire_distance(x_MC,y_MC) = sqrt((xx-x_MC)^2 + (yy-y_MC)^2);
                    end
                end
            end
        end

        if motif(x_MC,y_MC) == -1 % si on est sur une electrode -
            for xx=1:length(motif(:,1))
                for yy=1:length(motif(1,:))
                    if (motif(xx,yy) == 1 && sqrt((xx-x_MC)^2 + (yy-y_MC)^2) ...
```

```

        <= memoire_distance(x_MC,y_MC)) || ...
        (motif(xx,yy) == 1 && memoire_distance(x_MC,y_MC) == 0)
        memoire_distance(x_MC,y_MC) = sqrt((xx-x_MC)^2 + (yy-y_MC)^2);
    end
end
end
end
end
disp([' ' num2str((x_MC+1)/length(motif(:,1))*100) ' % done'])
toc
end

memoire_distance = memoire_distance*10;

moyenne_distance = mean(mean(memoire_distance));

% on remet les pads pour le graphe
maximum_distance = max(max(memoire_distance));
memoire_distance(1:190,1:190) = maximum_distance; % pad + 1
memoire_distance(1:190,590:780) = maximum_distance; % pad + 2
memoire_distance(650:840,1:190) = maximum_distance; % pad - 1
memoire_distance(650:840,590:780) = maximum_distance; % pad - 2

imagesc((0:840)*10,(0:780)*10,memoire_distance)

axis equal

set(gca, 'FontName', 'calibri',...
        'FontSize', 13)

h_title = title(['Distance à la plus proche électrode opposée / moyenne='...
        num2str(moyenne_distance) 'µm']);
set(h_title, 'FontName', 'calibri',...
        'FontSize', 16,...
        'FontWeight', 'bold')

h_y = ylabel('Y dimension [µm]');
set(h_y, 'FontName', 'calibri',...
        'FontSize', 16,...
        'FontWeight', 'bold')

h_x = xlabel('X dimension [µm]');
set(h_x, 'FontName', 'calibri',...
        'FontSize', 16,...
        'FontWeight', 'bold')

grid on
colorbar('location','eastoutside')

set(gcf,'OuterPosition',[0, 0, 820, 850]);

saveas(gcf,['Z:\Windows\Documents\Boulot - LAAS\12 - Decembre\modele ionique\Modele ionique 2x' ...
        num2str(nombre_elec) ' electrodes -- murs=' num2str(mur*10) 'µm sans pads.emf'])
saveas(gcf,['Z:\Windows\Documents\Boulot - LAAS\12 - Decembre\modele ionique\Modele ionique 2x' ...
        num2str(nombre_elec) ' electrodes -- murs=' num2str(mur*10) 'µm sans pads.png'])
saveas(gcf,['Z:\Windows\Documents\Boulot - LAAS\12 - Decembre\modele ionique\Modele ionique 2x' ...
        num2str(nombre_elec) ' electrodes -- murs=' num2str(mur*10) 'µm sans pads.fig'])
save(['Z:\Windows\Documents\Boulot - LAAS\12 - Decembre\modele ionique\Modele ionique 2x' ...
        num2str(nombre_elec) ' electrodes -- murs=' num2str(mur*10) 'µm sans pads.mat'])
toc

```

4. Code VHDL-AMS du supercondensateur

Le portage sous VHDL-AMS des relations (30) à (33) passe par 14 constantes, 7 signaux (mis à jour à chaque changement de signe du courant) et 1 quantité (voir Code 1) :

```
generic (  
  cap          : capacitance;           -- Capacité [F]  
  v_ic         : real := real'low;      -- Tension initiale  
  B1c          : real := -4.60e-3;  
  B2c          : real := 3.17e-3;  
  B1d          : real := 2.0e-3;  
  B2d          : real := 9.09e-2;  
  B3d          : real := -2.03e-3;  
  C1c          : real := 1.87e-5;  
  C2c          : real := -2.41e-4;  
  C1d          : real := -6.62e-8;  
  C2d          : real := -2.07e-5;  
  C3d          : real := 1.59e-5;  
  C4d          : real := 8.13e-5;  
  seuil : real := 0.000000001); -- Amperes ==> 100 pA  
  
port (  
  terminal p1, p2 : electrical);  
  
end entity capacitor;  
  
architecture ideal of capacitor is  
  
  quantity v across i through p1 to p2;  
  signal V0 : real := 0.0001; -- tension de départ  
  signal Etat : bit := '0'; -- 0 pour décharge / 1 pour charge  
  signal t0 : real := 0.0;  
  signal i_charge : real := 0.0;  
  signal i_decharge : real := 0.0;  
  signal B : real := 0.0;  
  signal C : real := 0.0;
```

Code 1 - déclarations des constantes, signaux et quantités du modèle de supercondensateur

Deux *process* (*ChangeState* et *DetectState*) détectent les changements de signe du courant et recalculent les paramètres B et C, ainsi que la nouvelle tension de départ V_0 (Code 2). Enfin l'équation de la dérivée du courant (dérivée de l'expression (29) à la base du modèle) définit le comportement du composant.

```

begin

ChangeState: process
begin -- process ChangeState

    case Etat is
        when '0' => -- quand il est en mode décharge ou quiescent
            wait on i'above(seuil);
            Etat <= '1';
            wait on Etat'transaction;
        when '1' => -- quand il est en mode décharge ou quiescent
            wait on i'above(seuil);
            Etat <= '0';
            wait on Etat'transaction;
    end case;
end process ChangeState;

DetectState: process (Etat)
begin -- process DetectState
    if (Etat'event and Etat = '0') then -- mode décharge
        V0 <= v;
        t0 <= now;
        i_decharge <= i;
        B <= B1d * i_charge **0.333 + B2d * i_decharge + B3d;
        C <= (C1d * i_decharge - C2d) * i_charge + C3d * i_decharge + C4d;
    elsif (Etat'event and Etat = '1') then -- mode charge
        V0 <= v;
        t0 <= now;
        i_charge <= i;
        B <= B1c * log10(i_charge) + B2c;
        C <= C1c * i_charge + C2c;
    end if;
end process DetectState;

if domain = quiescent_domain and v_ic /= real'low use
    v == v_ic;
else
    v'dot == B/SQRT(now - t0 + 1.0) + C; -- charge et décharge
end use;

end architecture ideal;

```

Code 2 – instructions conditionnelles séquentielles (process) et concurrentielles.

Cette procédure permet d’obtenir un modèle de supercondensateur à faible puissance, tenant compte de l’autodécharge (par réorganisation des charges) et de l’interaction entre autodécharge et décharge forcée. Cependant ce modèle possède des limitations : les paramètres ne sont valables que dans la gamme de courant évalués (50 à 900 μA pour la charge, 0 à 80 μA pour la décharge), et – de par la nature même de l’implémentation du modèle – l’erreur commise dans l’appréciation de la dérivée de la tension s’accumule avec le temps, rendant les simulations de longue durée incertaines. Une étude précise de la portée de ce modèle, ou l’établissement d’un modèle à base de réseau de neurones artificiels font partie des voies de développement envisagées pour la suite de ce travail.

Bibliographie

1. Références chapitre 1

- [1] Y. C. Tai and R. S. Muller, "IC-processed electrostatic synchronous micromotors," *Sensors and Actuators*, vol. 20, no. 1, pp. 49–55, 1989.
- [2] K. D. Wise, D. J. Anderson, J. F. Hetke, D. R. Kipke, and K. Najafi, "Wireless implantable microsystems: high-density electronic interfaces to the nervous system," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 1, 2004.
- [3] A. M. Turing, "Intelligent Machinery: A Heretical View," *Alan M. Turing*, Cambridge: Heffer & Sons, 1959.
- [4] J. Hassoun, S. Panero, P. Reale, and B. Scrosati, "A New, Safe, High-Rate and High-Energy Polymer Lithium-Ion Battery," *Advanced Materials*, vol. 21, no. 47, pp. 4807-4810, 2009.
- [5] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. Pister, "Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust"," in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 271–278, 1999.
- [6] "Crossbow Technology - <http://www.xbow.com/>." [Online]. Available: <http://www.xbow.com/>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [7] "Welcome to Dust Networks: Embedded Wireless Sensor Networking for Monitoring and Control - <http://www.dust-inc.com/>." [Online]. Available: <http://www.dust-inc.com/>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [8] "ZigBee modules, Development tools, WSN software - MeshNetics - <http://www.meshnetics.com/>." [Online]. Available: <http://www.meshnetics.com/>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [9] "Welcome to Accsense.com - <http://www.accsense.com/>." [Online]. Available: <http://www.accsense.com/>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [10] "Millennial Net : Wireless Sensor Mesh Networking - <http://www.millennial.net/>." [Online]. Available: <http://www.millennial.net/>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [11] "ZigBee Wireless Networking Systems - Chips, Software, Tools - Ember - http://www.ember.com/products_index.html." [Online]. Available: http://www.ember.com/products_index.html. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [12] "MicroStrain 2.4 GHz Wireless Sensors and Sensing Network - <http://www.microstrain.com/wireless-sensors.aspx>." [Online]. Available: <http://www.microstrain.com/wireless-sensors.aspx>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [13] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution," *Sensors*, vol. 9, no. 9, p. 6869, 2009.
- [14] P. Volgyesi, G. Balogh, A. Nadas, C. B. Nash, and A. Ledeczi, "Shooter localization and weapon classification with soldier-wearable networked sensors," in *Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services*, p. 126, 2007.
- [15] "Glacsweb - <http://envisense.org/glacsweb/>." [Online]. Available: <http://envisense.org/glacsweb/>. [Accessed: 26-Jul-2010].
- [16] "Permasense - <http://www.permasense.ch/>." [Online]. Available: <http://www.permasense.ch/>. [Accessed: 26-Jul-2010].
- [17] M. Maroti, G. Simon, A. Ledeczi, and J. Sztipanovits, "Shooter localization in urban terrain," *Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 60-61, 2004.
- [18] G. E. Rolader, J. Rogers, and J. Battah, "Self-healing minefield," in *Battlespace Digitization and Network-Centric Systems IV*, vol. 5441, pp. 13-24, 2004.
- [19] G. Simon *et al.*, "Sensor network-based countersniper system," in *Proceedings of the 2nd international*

- conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 1–12, 2004.
- [20] E. Kannan, B. W. Maxfield, and K. Balasubramaniam, “SHM of pipes using torsional waves generated by in situ magnetostrictive tapes,” *Smart Materials and Structures*, vol. 16, p. 2505, 2007.
 - [21] H. Kwun, G. M. Light, S. Y. Kim, and R. L. Spinks, “Magnetostrictive sensor for active health monitoring in structures,” in *2002 San Diego SPIE Conference on Smart NDE for Health Monitoring of Structural and Biological Systems*.
 - [22] J. R. Lee, C. Y. Ryu, B. Y. Koo, S. G. Kang, C. S. Hong, and C. G. Kim, “In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system,” *Smart Materials and Structures*, vol. 12, p. 147, 2003.
 - [23] C. Liang, F. P. Sun, and C. A. Rogers, “Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems—Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 5, no. 1, p. 12, 1994.
 - [24] V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Bao, “Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, no. 9, p. 673, 2004.
 - [25] H. Sohn and H. W. Park, “Can damage be detected without any baseline data?,” in *Proceedings of SPIE*, vol. 5768, p. 418, 2005.
 - [26] A. Lecoindre *et al.*, “Miniaturized wireless sensor networks,” in *International Semiconductor Conference*, 2006, vol. 1, 2006.
 - [27] M. Lallart, “Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d’énergie - Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté,” Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
 - [28] M. Marzencki, “Conception de microgénérateur intégrés pour systèmes sur puce autonomes,” UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, 2007.
 - [29] C. Mathuna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn, “Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks,” *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613–623, Mai. 2008.
 - [30] D. L. Mascarenas, M. D. Todd, G. Park, and C. R. Farrar, “Development of an impedance-based wireless sensor node for structural health monitoring,” *Smart Materials and Structures*, vol. 16, p. 2137, 2007.
 - [31] “Libelium - Wasp mote - Wireless Sensor Networks Mote - <http://www.libelium.com/products/wasp mote/sensors>.” [Online]. Available: <http://www.libelium.com/products/wasp mote/sensors>. [Accessed: 19-Jul-2010].
 - [32] J. Zhang, D. Wang, W. Xu, J. Xiao, R. E. Williford, and G. Graff, “High Capacity Li-Air Batteries,” *ECS Meeting Abstracts*, vol. 1003, no. 1, p. 811, May. 2010.
 - [33] “New Wasp mote Sensor Board enables extreme precision agriculture in vineyards and greenhouses - <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=1016616603>.” [Online]. Available: <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=1016616603>. [Accessed: 19-Jul-2010].
 - [34] D. Gascon, “Experimental Evaluation of Radio Transceivers for Sensor Networks in Harsh Environments,” in *EWSN2010*, 2010.
 - [35] “Securing your house with a WSN using Hall effect sensors - <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=0825425429>.” [Online]. Available: <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=0825425429>. [Accessed: 19-Jul-2010].
 - [36] “Permasense | Main / HomePage browse.” [Online]. Available: <http://www.permasense.ch/>. [Accessed: 06-Jul-2010].
 - [37] H. Dubois-Ferriere, L. Fabre, R. Meier, and P. Metrailler, “TinyNode: a comprehensive platform for wireless sensor network applications,” in *Proceedings of the 5th international conference on Information*

processing in sensor networks, p. 365, 2006.

- [38] S. J. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2003.
- [39] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," *Measurement science and technology*, vol. 17, p. R175, 2006.
- [40] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, "Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, p. 043001, 2008.
- [41] J. Gilbert and F. Balouchi, "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 334-347, Oct. 2008.
- [42] L. Mateu and F. Moll, "Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics," in *Proc. SPIE*, vol. 5837, pp. 359–373, 2005.
- [43] C. Mathuna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn, "Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks," *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613-623, May. 2008.
- [44] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, 2008.
- [45] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, 2005.
- [46] S. Priya, "Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers," *Journal of Electroceramics*, vol. 19, no. 1, pp. 165-182, 2007.
- [47] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 7, pp. 684-693, Jul. 2009.
- [48] D. Zhu, M. J. Tudor, and S. P. Beeby, "Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 2, p. 022001, 2010.
- [49] G. Park, T. Rosing, M. D. Todd, C. R. Farrar, and W. Hodgkiss, "Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 64-79, Mar. 2008.
- [50] E. P. James *et al.*, "An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications* 1," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 110, no. 1, pp. 171–176, 2004.
- [51] F. M. Discenzo, D. Chung, and K. A. Loparo, "Pump condition monitoring using self-powered wireless sensors," *Sound and Vibration*, vol. 40, no. 5, pp. 12–15, 2006.
- [52] D. J. Inman and B. L. Grisso, "Towards autonomous sensing," in *Proceedings of SPIE*, vol. 6174, p. 61740T, 2006.
- [53] T. Starner and J. A. Paradiso, "Human generated power for mobile electronics," *Low-power electronics design*, 2004.
- [54] E. M. Yeatman, "Advances in power sources for wireless sensor nodes," in *Proc. Int'l Workshop Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pp. 20–21.
- [55] mzentgraf, "World Record: 41.1% efficiency reached for multi-junction solar cells at Fraunhofer ISE — Fraunhofer ISE." [Online]. Available: <http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/press-releases/press-releases-2009/world-record-41.1-efficiency-reached-for-multi-junction-solar-cells-at-fraunhofer-ise>. [Accessed: 19-Jul-2010].
- [56] V. Kyriatzis, N. S. Samaras, P. Stavroulakis, H. Takruri-Rizk, and S. Tzortzios, "Enviromote: A New Solar-Harvesting Platform Prototype for Wireless Sensor Networks/Work-in-Progress Report," in *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007*, pp. 1–5, 2007.

- [57] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," in *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, p. 64, 2005.
- [58] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, "Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 31, no. 6, pp. 420–432, 2007.
- [59] A. Tiwari, P. Ballal, and F. L. Lewis, "Energy-efficient wireless sensor network design and implementation for condition-based maintenance," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 3, no. 1, p. 1, 2007.
- [60] J. Cinquin, "Utilisation des composites en aérospatiale," presented at the Treizièmes Journées Nationales sur les Composites, Strasbourg, France, 2003.
- [61] D. A. Ramantani, R. Campilho, M. De Moura, and A. T. Marques, "Stress and Failure Analysis of Repaired Sandwich Composite Beams using a Cohesive Damage Model," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 12, no. 3, p. 369, 2010.
- [62] Y. Thollon and C. Hochard, "A general damage model for woven fabric composite laminates up to first failure," *Mechanics of Materials*, vol. 41, no. 7, pp. 820–827, 2009.
- [63] F. Wu and W. X. Yao, "A fatigue damage model of composite materials," *International Journal of Fatigue*, vol. 32, no. 1, pp. 134–138, 2010.
- [64] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, 2008.
- [65] B. W. Cook, S. Lanzisera, and K. S. Pister, "SoC issues for RF smart dust," *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 6, pp. 1177–1196, 2006.
- [66] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- [67] N. Bailly, J. Dilhac, C. Escriba, C. Vanhecke, and M. Bafleur, "Energy Scavenging Based on Transient Thermal Gradients: Application to Structural Health Monitoring of Aircrafts," presented at the 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS2008, Sendai, Japan, 2008.
- [68] "Infinite Power Solutions / Products." [Online]. Available: <http://www.infinitepowersolutions.com/index.php?txtMode=pagelevel&id=4>. [Accessed: 01-Sep-2008].
- [69] T. von Büren, P. Lukowicz, and G. Tröster, "Kinetic energy powered computing-an experimental feasibility study," in *Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'03)*, vol. 1530, pp. 17–00.
- [70] "Capacitors - Niobium Oxide - AVX Online." [Online]. Available: http://www.avx.com/prodinfo_catlist.asp?ParentID=184. [Accessed: 28-Sep-2010].

2. Références chapitre 2

- [1] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 52, no. 1, pp. 8–11, 1996.
- [2] A. Erturk and D. J. Inman, "Comment on 'Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation'," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 5, p. 058001 (3pp), 2008.
- [3] A. Erturk and D. J. Inman, "Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 6, p. 065016 (14pp), 2008.
- [4] A. Erturk and D. J. Inman, "On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy

- Harvesters,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X07085639v1, 2008.
- [5] P. D. Mitcheson, E. K. Reilly, T. Toh, P. K. Wright, and E. M. Yeatman, “Performance limits of the three MEMS inertial energy generator transduction types,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 9, pp. S211-S216, 2007.
 - [6] P. D. Mitcheson, E. K. Reilly, P. Wright, and E. Yeatman, “Transduction mechanisms and power density for MEMS inertial energy scavengers,” *Proceeding of the Fourth International Conference on Power MEMS, Berkeley, CA, USA*, 2006.
 - [7] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, “Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, 2008.
 - [8] T. von Büren, P. Lukowicz, and G. Tröster, “Kinetic energy powered computing—an experimental feasibility study,” in *Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC’03)*, vol. 1530, pp. 17–00.
 - [9] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
 - [10] V. R. Challa, M. G. Prasad, and F. T. Fisher, “A coupled piezoelectric–electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching,” *Smart Materials and Structures*, vol. 18, p. 095029, 2009.
 - [11] H. B. Fang, *SYSTEM AND METHOD FOR PROVIDING A PIEZOELECTRIC ELECTROMAGNETIC HYBRID VIBRATING ENERGY HARVESTER*. Google Patents, 2008.
 - [12] Y. Tadesse and others, “Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electromagnetic,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, no. 5, p. 625, 2009.
 - [13] X. Wu, A. Khaligh, and Y. Xu, “Modeling, design and optimization of hybrid electromagnetic and piezoelectric MEMS energy scavengers,” in *IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2008. CICC 2008*, pp. 177–180, 2008.
 - [14] B. Yang, C. Lee, W. L. Kee, and S. P. Lim, “Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms,” 2010.
 - [15] F. Peano and T. Tambosso, “Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger,” *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 14, no. 3, pp. 429–435, 2005.
 - [16] G. Despesse *et al.*, “High damping electrostatic system for vibration energy scavenging,” in *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies*, pp. 283–286, 2005.
 - [17] L. Wang and F. G. Yuan, “Energy harvesting by magnetostrictive material (MsM) for powering wireless sensors in SHM,” in *SPIE Smart Structures and Materials & NDE and Health Monitoring, 14th International Symposium (SSN07)*, pp. 18–22, 2007.
 - [18] “Piezoceramics - TRS Technologies, Inc. - <http://www.trstechnologies.com/Materials/piezoceramics.php>.” [Online]. Available: <http://www.trstechnologies.com/Materials/piezoceramics.php>. [Accessed: 05-Aug-2010].
 - [19] K. Omote, H. Ohigashi, and K. Koga, “Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric properties of “single crystalline” films of vinylidene fluoride trifluoroethylene copolymer,” *Journal of Applied Physics*, vol. 81, p. 2760, 1997.
 - [20] “MFC - <http://www.smart-material.com/Smart-choice.php?from=MFC>.” [Online]. Available: <http://www.smart-material.com/Smart-choice.php?from=MFC>. [Accessed: 06-Aug-2010].
 - [21] R. B. Karabalin *et al.*, “Piezoelectric nanoelectromechanical resonators based on aluminum nitride thin films,” *Applied Physics Letters*, vol. 95, p. 103111, 2009.
 - [22] F. Martin, P. Muralt, M. A. Dubois, and A. Pezous, “Thickness dependence of the properties of highly c-axis textured AlN thin films,” *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and*

Films, vol. 22, p. 361, 2004.

- [23] N. Setter, *Piezoelectric materials in devices*. Ceramics Laboratory, EPFL Swiss Federal Institute of Technology, 2002.
- [24] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, "Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, p. 043001, 2008.
- [25] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, 2008.
- [26] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," *Measurement science and technology*, vol. 17, p. R175, 2006.
- [27] J. Gilbert and F. Balouchi, "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, Oct. 2008.
- [28] L. Mateu and F. Moll, "Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics," in *Proc. SPIE*, vol. 5837, pp. 359–373, 2005.
- [29] C. Mathuna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn, "Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks," *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613–623, May. 2008.
- [30] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, 2005.
- [31] S. Priya, "Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers," *Journal of Electroceramics*, vol. 19, no. 1, pp. 165–182, 2007.
- [32] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 7, pp. 684–693, Jul. 2009.
- [33] H. W. Kim *et al.*, "Energy Harvesting Using a Piezoelectric "Cymbal" Transducer in Dynamic Environment," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 9, pp. 6178–6183, 2004.
- [34] S. Kim, W. W. Clark, and Q. M. Wang, "Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: analysis," *Journal of intelligent material systems and structures*, vol. 16, no. 10, p. 847, 2005.
- [35] M. Marzencki, "Conception de microgénérateur intégrés pour systèmes sur puce autonomes," UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, 2007.
- [36] S. J. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2003.
- [37] S. P. Beeby *et al.*, "Macro and micro scale electromagnetic kinetic energy harvesting generators," in *Proc. DTIP Conf.(Stresa, Italy)*, 2006.
- [38] C. Williams, C. Shearwood, M. Harradine, P. Mellor, T. Birch, and R. Yates, "Development of an electromagnetic micro-generator," *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems*, vol. 148, no. 6, pp. 337–342, Décembre. 2001.
- [39] W. Huang, K. Tzeng, M. Cheng, and R. Huang, "A Silicon MEMS Micro Power Generator for Wearable Micro Devices," *JOURNAL-CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS*, vol. 30, no. 1, p. 133, 2007.
- [40] M. El-hami *et al.*, "Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 92, no. 1, pp. 335–342, Août. 2001.
- [41] W. J. Li, P. H. Leong, T. C. Hong, H. Y. Wong, and G. M. Chan, "Infrared Signal Transmission by a Laser Micromachined Vibration Induced Power Generator," in *PROCEEDINGS OF THE IEEE MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, vol. 43, pp. 236–239, 2000.
- [42] J. Lee, S. Yuen, W. Li, and P. Leong, "Development of an AA size energy transducer with micro resonators," in *Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on*,

vol. 4, pp. IV-876-IV-879 vol.4, 2003.

- [43] Y. Arakawa, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Micro seismic power generator using electret polymer film," *Proc. PowerMEMS*, pp. 187–190, 2004.
- [44] G. Despesse *et al.*, "High damping electrostatic system for vibration energy scavenging," in *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies*, pp. 283-286, 2005.
- [45] P. Miao, P. D. Mitcheson, A. S. Holmes, E. M. Yeatman, T. C. Green, and B. H. Stark, "MEMS inertial power generators for biomedical applications," *Microsystem Technologies*, vol. 12, no. 10, pp. 1079–1083, 2006.
- [46] S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*. 2004.
- [47] D. Zhu, M. J. Tudor, and S. P. Beeby, "Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 2, p. 022001, 2010.
- [48] K. Morimoto, I. Kanno, K. Wasa, and H. Kotera, "High-efficiency piezoelectric energy harvesters of c-axis-oriented epitaxial PZT films transferred onto stainless steel cantilevers," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010.
- [49] C. F. Zhong, X. H. Wang, H. Wen, L. T. Li, C. W. Nan, and Y. H. Lin, "Fabrication and properties of epitaxial growth BiScO–PbTiO thin film via a hydrothermal method," *Applied Physics Letters*, vol. 92, p. 222910, 2008.
- [50] S. Euphrasie, S. Daviero-Minaud, and P. Pernod, "PZT films deposited by a hydrothermal method and characterizations," *Materials Science and Engineering B*, vol. 104, no. 3, pp. 180–184, 2003.
- [51] N. Fujiwara and K. Kusakawa, "Piezoelectric properties of PZT films prepared by hydrothermal method," *Issues*, vol. 25, no. 27, pp. 3805–3810, 2006.
- [52] P. D. Mitcheson, E. K. Reilly, T. Toh, P. K. Wright, and E. M. Yeatman, "Performance limits of the three MEMS inertial energy generator transduction types," *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, vol. 17, no. 9, p. 211, 2007.
- [53] N. DUTOIT and B. WARDLE, "Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters," *ALAA journal*, vol. 45, no. 5, pp. 1126-1137, 2007.
- [54] Y. Liao and H. A. Sodano, "Model of a single mode energy harvester and properties for optimal power generation," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 6, p. 065026, 2008.
- [55] A. Badel, D. Guyomar, E. Lefeuvre, and C. Richard, "Efficiency Enhancement of a Piezoelectric Energy Harvesting Device in Pulsed Operation by Synchronous Charge Inversion," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 889-901, Oct. 2005.
- [56] E. Lefeuvre, A. Badel, A. Benayad, L. Lebrun, C. Richard, and D. Guyomar, "A comparison between several approaches of piezoelectric energy harvesting," *J. Phys. IV France*, vol. 128, pp. 177-186, 2005.
- [57] N. G. Elvin and A. A. Elvin, "A general equivalent circuit model for piezoelectric generators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, no. 1, p. 3, 2009.
- [58] S. Kim, "Low Power Energy Harvesting with Piezoelectric Generator," 2002.
- [59] N. G. Elvin and A. A. Elvin, "A Coupled Finite Element--Circuit Simulation Model for Analyzing Piezoelectric Energy Generators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, no. 5, pp. 587-595, Mar. 2009.
- [60] Y. Yang and L. Tang, "Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X09351757, Oct. 2009.
- [61] A. Badel, "Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire," Université de Savoie, 2005.
- [62] F. Goldschmidtboeing and P. Woias, "Characterization of different beam shapes for piezoelectric

- energy harvesting,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 10, p. 104013, 2008.
- [63] S. M. A. Kazimi, *Solid mechanics*. Tata McGraw-Hill, 1982.
- [64] G. A. Rodr\iguez *et al.*, “FABRICATION AND SIMULATION OF A PZT ENERGY HARVESTER MEMS.”
- [65] G. Ardila, H. Durou, C. Rossi, and X. Dollat, “A PZT vibration harvester: Fabrication and characterization,” in *Technical Digest*, 2009.
- [66] M. Ahn, R. K. Heilmann, and M. L. Schattenburg, “Fabrication of ultrahigh aspect ratio freestanding gratings on silicon-on-insulator wafers,” *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 25, p. 2593, 2007.
- [67] K. R. Williams and R. S. Muller, “Etch rates for micromachining processing,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 256–269, 1996.
- [68] X. H. Xu and J. R. Chu, “Preparation of a high-quality PZT thick film with performance comparable to those of bulk materials for applications in MEMS,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, p. 065001, 2008.
- [69] S. Li and S. Chen, “Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 104, no. 2, pp. 151–161, Apr. 2003.
- [70] H. Kim, V. Bedekar, R. Islam, W. Lee, D. Leo, and S. Priya, “Laser-machined piezoelectric cantilevers for mechanical energy harvesting,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 55, no. 9, pp. 1900–1905, 2008.
- [71] R. Srinivasan and W. J. Leigh, “Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly (ethylene terephthalate) films,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 104, no. 24, pp. 6784–6785, 1982.
- [72] M. S. M. Soliman, E. M. Abdel-Rahman, E. F. El-Saadany, and R. R. Mansour, “A wideband vibration-based energy harvester,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 11, p. 115021, 2008.
- [73] Y. Jeon, R. Sood, J. Jeong, and S. Kim, “MEMS power generator with transverse mode thin film PZT,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 122, no. 1, pp. 16–22, Jul. 2005.
- [74] H. Fang *et al.*, “Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting,” *Microelectronics Journal*, vol. 37, no. 11, pp. 1280–1284, Nov. 2006.
- [75] J. Ajitsaria, S. Y. Choe, D. Shen, and D. J. Kim, “Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation,” *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*, vol. 16, no. 2, p. 447, 2007.
- [76] X. Cao, W. J. Chiang, Y. C. King, and Y. K. Lee, “Electromagnetic energy harvesting circuit with feedforward and feedback DC–DC PWM boost converter for vibration power generator system,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 679–685, 2007.
- [77] S. P. Beeby *et al.*, “A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 7, pp. 1257–1265, 2007.
- [78] S. Roundy, “On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 809–823, Oct. 2005.
- [79] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, “Architectures for vibration-driven micropower generators,” *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 13, no. 3, pp. 429–440, 2004.
- [80] M. Wischke, M. Masur, F. Goldschmidtboeing, and P. Woias, “Electromagnetic vibration harvester with piezoelectrically tunable resonance frequency,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 3, p. 035025, 2010.
- [81] “PMG17 - Technical Specification,” <http://www.perpetuum.co.uk/>. [Online]. Available: <http://www.perpetuum.co.uk/>. [Accessed: 10-Nov-2008].

- [82] “Arveni : Product specifications,” http://www.arveni.fr/eng_productspe.php. [Online]. Available: http://www.arveni.fr/eng_productspe.php. [Accessed: 20-Jun-2010].

3. Références chapitre 3

- [1] “Infinite Power Solutions / Products.” [Online]. Available: <http://www.infinitepowersolutions.com/index.php?txtMode=pagelevel&id=4>. [Accessed: 01-Sep-2008].
- [2] “Get The Lowdown On Ultracapacitors.” [Online]. Available: <http://electronicdesign.com/Articles/Index.cfm?AD=1&AD=1&AD=1&ArticleID=17465>. [Accessed: 02-Apr-2008].
- [3] H. Helmholtz, “Theory of Electrical Double Layer,” *Wied. Ann.*, vol. 7, p. 337, 1879.
- [4] G. H. Bolt, “Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of the electric double layer,” *Journal of colloid science*, vol. 10, no. 2, pp. 206–218, 1955.
- [5] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [6] J. LASSEGUES, *Supercondensateurs | Techniques de l'ingénieur*. 2001.
- [7] “Maxwell Technologies: Ultracapacitors - BCAP0025, BCAP0050, BCAP0150.” [Online]. Available: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_HC_series_1013793.pdf. [Accessed: 14-Sep-2010].
- [8] F. Beguin and Raymundo-Piñero, “Nouveaux développements dans le domaine des supercondensateurs,” Editions Techniques de l'ingénieur, 04-2008.
- [9] J. Chmiola, G. Yushin, Y. Gogotsi, C. Portet, P. Simon, and P. L. Taberna, “Anomalous Increase in Carbon Capacitance at Pore Sizes Less Than 1 Nanometer,” *Science*, vol. 313, no. 5794, pp. 1760-1763, Sep. 2006.
- [10] Y. Q. Jiang, Q. Zhou, and L. Lin, “Planar MEMS Supercapacitor using Carbon Nanotube Forests,” in *IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2009. MEMS 2009*, pp. 587–590, 2009.
- [11] J. Chmiola, C. Largeot, P. Taberna, P. Simon, and Y. Gogotsi, “Monolithic Carbide-Derived Carbon Films for Micro-Supercapacitors,” *Science*, vol. 328, no. 5977, pp. 480-483, Apr. 2010.
- [12] J. Sung, S. Kim, and K. Lee, “Fabrication of microcapacitors using conducting polymer microelectrodes,” *Journal of Power Sources*, vol. 124, no. 1, pp. 343-350, Oct. 2003.
- [13] J. Sung, S. Kim, and K. Lee, “Fabrication of all-solid-state electrochemical microcapacitors,” *Journal of Power Sources*, vol. 133, no. 2, pp. 312-319, Jun. 2004.
- [14] “ScienceDirect - Journal of Power Sources : Flexible micro-supercapacitors.”
- [15] Y. Xu, J. Wang, W. Sun, and S. Wang, “Capacitance properties of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/polypyrrole composites,” *Journal of Power Sources*, vol. 159, no. 1, pp. 370-373, Sep. 2006.
- [16] W. Sun and X. Chen, “Fabrication and tests of a novel three dimensional micro supercapacitor,” *Microelectronic Engineering*, Dec. 2008.
- [17] L. Chen, C. Yuan, H. Dou, B. Gao, S. Chen, and X. Zhang, “Synthesis and electrochemical capacitance of core-shell poly (3,4-ethylenedioxythiophene)/poly (sodium 4-styrenesulfonate)-modified multiwalled carbon nanotube nanocomposites,” *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 8, pp. 2335-2341, Mar. 2009.

- [18] P. Simon and Y. Gogotsi, "Charge storage mechanism in nanoporous carbons and its consequence for electrical double layer capacitors," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 368, no. 1923, pp. 3457–3467, Jul. 2010.
- [19] D. Bélanger, T. Brousse, and J. W. Long, "Manganese oxides: battery materials make the leap to electrochemical capacitors," *Electrochemical Society Interface*, vol. 17, no. 1, pp. 49–52, 2008.
- [20] J. Niu, B. E. Conway, and W. G. Pell, "Comparative studies of self-discharge by potential decay and float-current measurements at C double-layer capacitor and battery electrodes," *Journal of Power Sources*, vol. 135, no. 1, pp. 332–343, Sep. 2004.
- [21] B. W. Ricketts and C. Ton-That, "Self-discharge of carbon-based supercapacitors with organic electrolytes," *Journal of Power Sources*, vol. 89, no. 1, pp. 64–69, Juillet. 2000.
- [22] macke, "Kanthal Global, Double Layer Capacitors, Supercapacitors." [Online]. Available: <http://www.globar.com/ec/maxcap-double-layer-capacitors.html>. [Accessed: 15-Sep-2010].
- [23] "Gold Cap Electric Double Layer Capacitors - Panasonic." [Online]. Available: <http://www.panasonic.com/industrial/electronic-components/capacitive-products/gold-cap-electric.aspx>. [Accessed: 15-Sep-2010].
- [24] "CAP-XX." [Online]. Available: <http://www.cap-xx.com/products/products.php>. [Accessed: 14-Sep-2010].
- [25] Y. S. Yoon, W. I. Cho, J. H. Lim, and D. J. Choi, "Solid-state thin-film supercapacitor with ruthenium oxide and solid electrolyte thin films," *Journal of Power Sources*, vol. 101, no. 1, pp. 126–129, 2001.
- [26] H. K. Kim, S. H. Cho, Y. W. Ok, T. Y. Seong, and Y. S. Yoon, "All solid-state rechargeable thin-film microsupercapacitor fabricated with tungsten cosputtered ruthenium oxide electrodes," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 21, p. 949, 2003.
- [27] M. J. Lee et al., "Characteristics of thin film supercapacitor with ruthenium oxide electrode and Ta₂O₅+ x solid oxide thin film electrolyte," *Journal of Electroceramics*, 17, vol. 2, no. 4, pp. 639–643, 2006.
- [28] C. C. Liu, D. S. Tsai, D. Susanti, W. C. Yeh, Y. S. Huang, and F. J. Liu, "Planar ultracapacitors of miniature interdigital electrode loaded with hydrous RuO₂ and RuO₂ nanorods," *Electrochimica Acta*, 2010.
- [29] W. Sun, R. Zheng, and X. Chen, "Symmetric redox supercapacitor based on micro-fabrication with three-dimensional polypyrrole electrodes," *Journal of Power Sources*, 2010.
- [30] J. Chmiola, C. Largeot, P. Taberna, P. Simon, and Y. Gogotsi, "Monolithic Carbide-Derived Carbon Films for Micro-Supercapacitors," *Science*, vol. 328, no. 5977, pp. 480–483, Apr. 2010.
- [31] H. J. In, S. Kumar, Y. Shao-Horn, and G. Barbastathis, "Origami fabrication of nanostructured, three-dimensional devices: Electrochemical capacitors with carbon electrodes," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 8, pp. 083104–3, Feb. 2006.
- [32] C. C. Ho et al., "Dispenser Printed Electrochemical Capacitors for Power Management of Millimeter Scale Lithium Ion Polymer Microbatteries for Wireless Sensors."
- [33] S. W. Lee, B. Kim, S. Chen, Y. Shao-Horn, and P. T. Hammond, "Layer-by-layer assembly of all carbon nanotube ultrathin films for electrochemical applications," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, no. 2, pp. 671–9, Jan. 2009.
- [34] D. Pech et al., "Elaboration of a microstructured inkjet-printed carbon electrochemical capacitor," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 4, pp. 1266–1269, Février. 2010.
- [35] J. Sung, S. Kim, S. Jeong, E. Kim, and K. Lee, "Flexible micro-supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 2, pp. 1467–1470, Nov. 2006.
- [36] C. Shi and I. Zhitomirsky, "Electrodeposition and Capacitive Behavior of Films for Electrodes of Electrochemical Supercapacitors," *Nanoscale Research Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 518–523, 2010.
- [37] C. Ho, D. Steingart, J. Evans, P. Wright, and U. C. Berkeley, "Evaluation of Carbon Supercapacitors

Fabricated Using Pneumatic Dispenser Direct Write Printing Tailored for Small, Autonomous Electronic Devices.”

- [38] M. Esashi, “Wafer level packaging of MEMS,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, p. 073001, 2008.
- [39] M. Chen, L. Yuan, and S. Liu, “Research on low-temperature anodic bonding using induction heating,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133, no. 1, pp. 266-269, Jan. 2007.
- [40] W. C. Welch III and K. Najafi, “Gold–indium transient liquid phase (TLP) wafer bonding for MEMS vacuum packaging,” in *Proc. IEEE Micro Electro Mech. Syst. Conf.*, pp. 806–9, 2008.
- [41] F. Niklaus, G. Stemme, J. -. Lu, and R. J. Gutmann, “Adhesive wafer bonding,” *Journal of Applied Physics*, vol. 99, no. 3, pp. 031101-28, Février. 2006.
- [42] K. I. Kim, J. M. Kim, J. M. Kim, G. C. Hwang, C. W. Baek, and Y. K. Kim, “Packaging for RF MEMS devices using LTCC substrate and BCB adhesive layer,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 1, pp. 150–156, 2006.
- [43] J. Oberhammer, F. Niklaus, and G. Stemme, “Selective wafer-level adhesive bonding with benzocyclobutene for fabrication of cavities,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 105, no. 3, pp. 297-304, Août. 2003.
- [44] A. Jourdain, P. D. Moor, K. Baert, I. D. Wolf, and H. A. C. Tilmans, “Mechanical and electrical characterization of BCB as a bond and seal material for cavities housing (RF-)MEMS devices,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 7, pp. S89-S96, 2005.
- [45] D. Choi et al., “Study on bisbenzocyclobutene bonding for the development of a Si-based miniaturized reformer of fuel cell systems,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 7, p. 075013, 2009.
- [46] I. Zine-El-Abidine and M. Okoniewski, “A Low-Temperature SU-8 Based Wafer-Level Hermetic Packaging for MEMS Devices,” *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 2, pp. 448-452, 2009.
- [47] Y. Kim, E. Kim, S. Kim, and B. Ju, “Low temperature epoxy bonding for wafer level MEMS packaging,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 143, no. 2, pp. 323-328, Mai. 2008.
- [48] K. Marquardt et al., “Development of near hermetic silicon/glass cavities for packaging of integrated lithium micro batteries,” *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 7, pp. 1119-1129, Jul. 2010.
- [49] D. Pech et al., “Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon,” *Nature Nanotechnology*, vol. 5, no. 9, pp. 651–654, 2010.
- [50] J. R. Miller, R. A. Outlaw, and B. C. Holloway, “Graphene Double-Layer Capacitor with ac Line-Filtering Performance,” *Science*, vol. 329, no. 5999, p. 1637, 2010.
- [51] V. G. Kutchoukov, J. R. Mollinger, and A. Bossche, “New photoresist coating method for 3-D structured wafers,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 85, no. 1, pp. 377-383, Aug. 2000.
- [52] M. A. Rao, *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications*. シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2007.
- [53] L. L. Schramm, *Emulsions, foams, and suspensions: fundamentals and applications*. Wiley-VCH, 2005.
- [54] S. Osswald, G. Yushin, V. Mochalin, S. O. Kucheyev, and Y. Gogotsi, “Control of sp²/sp³ carbon ratio and surface chemistry of nanodiamond powders by selective oxidation in air,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 128, no. 35, pp. 11635–11642, 2006.
- [55] J. R. Miller, R. A. Outlaw, and B. C. Holloway, “Graphene Double-Layer Capacitor with ac Line-Filtering Performance,” *Science*, vol. 329, no. 5999, p. 1637, 2010.
- [56] G. Lota, T. A. Centeno, E. Frackowiak, and F. Stoeckli, “Improvement of the structural and chemical properties of a commercial activated carbon for its application in electrochemical capacitors,” *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 5, pp. 2210–2216, 2008.

4. Références chapitre 4

- [1] A. Erturk and D. J. Inman, "On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X07085639v1, 2008.
- [2] A. Erturk and D. J. Inman, "Comment on 'Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation'," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 5, p. 058001 (3pp), 2008.
- [3] A. Erturk and D. J. Inman, "Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 6, p. 065016 (14pp), 2008.
- [4] A. Erturk and D. J. Inman, "A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 130, no. 4, pp. 041002-15, 2008.
- [5] G. Ottman, H. Hofmann, A. Bhatt, and G. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 5, pp. 669-676, 2002.
- [6] N. Elvin and A. Elvin, "A General Equivalent Circuit Model for Piezoelectric Generators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X08089957, Mai. 2008.
- [7] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart Materials and Structures*, vol. 13, no. 5, pp. 1131-1142, 2004.
- [8] H. Boussetta, "Modélisations multi-physiques et simulations globales de systèmes autonomes sur puce," Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [9] M. Marzencki, "Conception de microgénérateur intégrés pour systèmes sur puce autonomes," UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, 2007.
- [10] A. Badel, "Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire," Université de Savoie, 2005.
- [11] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, vol. 26, no. 11, pp. 1131-1144, Juillet. 2003.
- [12] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [13] J. Niu, B. E. Conway, and W. G. Pell, "Comparative studies of self-discharge by potential decay and float-current measurements at C double-layer capacitor and battery electrodes," *Journal of Power Sources*, vol. 135, no. 1, pp. 332-343, Sep. 2004.
- [14] B. W. Ricketts and C. Ton-That, "Self-discharge of carbon-based supercapacitors with organic electrolytes," *Journal of Power Sources*, vol. 89, no. 1, pp. 64-69, Juillet. 2000.
- [15] J. Black and H. A. Andreas, "Effects of charge redistribution on self-discharge of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 13, pp. 3568-3574, Mai. 2009.
- [16] J. Huang, B. G. Sumpter, and V. Meunier, "A universal model for nanoporous carbon supercapacitors applicable to diverse pore regimes, carbon materials, and electrolytes," *Chemistry-A European Journal*, vol. 14, no. 22, pp. 6614-6626, 2008.
- [17] J. N. Marie-Francoise, H. Gualous, and A. Berthon, "Supercapacitor thermal-and electrical-behaviour modelling using ANN," in *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 153, pp. 255-262, 2006.
- [18] S. Buller, E. Karden, D. Kok, and R. W. De Doncker, "Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy," in *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, vol. 4, pp. 2500-2504, 2002.
- [19] W. G. Pell and B. E. Conway, "Voltammetry at a de Levie brush electrode as a model for electrochemical supercapacitor behaviour," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 500, no. 1, pp. 121-

133, 2001.

- [20] F. Belhachemi, S. Rael, and B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, vol. 5, pp. 3069–3076, 2002.
- [21] D. PETREUS, M. Daniel, R. GALATUS, and R. MUNTEANU, "Modeling and Sizing of Supercapacitors," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 2, 2008.
- [22] Chun-bo Zhu, Ren-gui Lu, Li-wei Song, Guo-liang Wu, and Qi Wang, "An Equivalent Circuit Model for Tractive Super-Capacitor," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, pp. 567–573, 2007.
- [23] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon, "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 928–934, Mar. 2007.
- [24] Y. Diab, P. Venet, H. Gualous, and G. Rojat, "Self-Discharge Characterization and Modeling of Electrochemical Capacitor Used for Power Electronics Applications," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, pp. 510–517, 2009.
- [25] M. J. Guan and W. H. Liao, "On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, no. 2, pp. 498–505, 2007.
- [26] W. Lajnef *et al.*, "Ultracapacitors modeling improvement using an experimental characterization based on step and frequency responses," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, vol. 1, pp. 131–134 Vol.1, 2004.
- [27] J. Black and H. A. Andreas, "Effects of charge redistribution on self-discharge of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 13, pp. 3568–3574, 2009.
- [28] J. M. Black and H. Andreas, "Modeling Activation Controlled Discharge at a Pore Tip in Presence of Charge Redistribution for Electrochemical Capacitor Electrodes," 2009.
- [29] R. Faranda, "A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 363–371, 2010.
- [30] C. Farcas, D. Petreus, I. Ciocan, and N. Palaghita, "Modeling and simulation of supercapacitors," in *Design and Technology of Electronics Packages, (SIITME) 2009 15th International Symposium for*, pp. 195–200, 2010.
- [31] A. Grama, L. Grama, D. Petreus, and C. Rusu, "Supercapacitor modelling using experimental measurements," in *Signals, Circuits and Systems, 2009. ISSCS 2009. International Symposium on*, pp. 1–4, 2009.
- [32] K. Tennakone and R. C. Buchanan, "Matrix Circuit Model for an Electric Double Layer Capacitor," *Journal of Power Sources*, 2010.
- [33] N. Bertrand, O. Briat, J. M. Vinassa, J. Sabatier, and H. El Brouji, "Porous electrode theory for ultracapacitor modelling and experimental validation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, pp. 1–6, 2008.
- [34] H. El Brouji, J. M. Vinassa, O. Briat, N. Bertrand, and E. Woirgard, "Ultracapacitors self discharge modelling using a physical description of porous electrode impedance," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, pp. 1–6, 2008.
- [35] N. Bertrand, J. Sabatier, O. Briat, and J. M. Vinassa, "Fractional non-linear modelling of ultracapacitors," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 15, no. 5, pp. 1327–1337, 2010.
- [36] J. Kowal *et al.*, "Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors," *Journal of Power Sources*, 2009.
- [37] M. Kaus, J. Kowal, and D. U. Sauer, "Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors," *Electrochimica Acta*, 2010.

- [38] B. E. Conway, W. G. Pell, and T. C. Liu, "Diagnostic analyses for mechanisms of self-discharge of electrochemical capacitors and batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 65, no. 1, pp. 53–59, 1997.
- [39] W. G. Pell, B. E. Conway, W. A. Adams, and J. de Oliveira, "Electrochemical efficiency in multiple discharge/recharge cycling of supercapacitors in hybrid EV applications," *Journal of Power Sources*, vol. 80, no. 1, pp. 134–141, 1999.
- [40] J. Niu, B. E. Conway, and W. G. Pell, "Comparative studies of self-discharge by potential decay and float-current measurements at C double-layer capacitor and battery electrodes," *Journal of Power Sources*, vol. 135, no. 1, pp. 332–343, 2004.
- [41] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon, "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 928–934, Mar. 2007.
- [42] M. Guan and W. Liao, "Characteristics of Energy Storage Devices in Piezoelectric Energy Harvesting Systems," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, no. 6, pp. 671–680, Juin. 2008.
- [43] W. Lajnef, J. Vinassa, O. Briat, S. Azzopardi, and E. Woïrgard, "Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources," *Journal of Power Sources*, vol. 168, no. 2, pp. 553–560, Jun. 2007.
- [44] Y. Wang, "Modeling of Ultracapacitor Short-term and Long-term Dynamic Behavior," The University of Akron, 2008.
- [45] R. Faranda, M. Gallina, and D. Son, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors," in *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on*, pp. 706–710, 2007.
- [46] J. Black and H. A. Andreas, "Prediction of the self-discharge profile of an electrochemical capacitor electrode in the presence of both activation-controlled discharge and charge redistribution," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 929–935, Feb. 2010.
- [47] N. Bailly, J. Dilhac, C. Escriba, C. Vanhecke, and M. Bafleur, "Energy Scavenging Based on Transient Thermal Gradients: Application to Structural Health Monitoring of Aircrafts," presented at the 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS2008, Sendai, Japan, 2008.