



HAL
open science

Electronique sans fil et sans pile

Simon Hemour

► **To cite this version:**

Simon Hemour. Electronique sans fil et sans pile : Des capteurs autonomes vers une possible technologie au service de la non-puissance?. Electronique. Université de bordeaux, 2022. tel-04559864

HAL Id: tel-04559864

<https://hal.science/tel-04559864>

Submitted on 25 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE RECHERCHE

En vue de l'obtention du diplôme

d'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Electronique

Simon Jacques Hemour

Maître de Conférences, Université BORDEAUX

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, IMS

Electronique sans fil et sans pile :
Des capteurs autonomes vers une possible technologie au
service de la non-puissance ?

Soutenance prévue le 20 octobre 2022

Après avis des rapporteurs :

Mme	Nathalie MITTON	Directrice de recherche	INRIA, Villeneuve d'Ascq
M.	Stéphane BILA	Directeur de Recherche	XLIM UMR 7252, Limoges
M.	Jean-Michel FRIEDT	Maître de conférences HDR	Univ. Franche-Comté, Besançon

Devant la commission d'examen composée de :

M.	David BARNONCEL	Responsable NDT & SHM	ArianeGroup, Saint Medard en Jalles
M.	Stéphane BILA	Directeur de Recherche	XLIM UMR 7252, Limoges
Mme	Corinne DEJOURS	Professeure des Universités	Bordeaux INP, Bordeaux
Mme	Daniela DRAGOMIRESCU	Professeure des Universités	INSA Toulouse, Toulouse
M.	Jean-Michel FRIEDT	Maître de conférences HDR	Univ. Franche-Comté, Besançon
M.	Alexander KUHN	Professeur des Universités	Bordeaux INP, Bordeaux
Mme	Nathalie MITTON	Directrice de recherche	INRIA, Villeneuve d'Ascq
M.	Dominique REBIERE	Professeur des Universités	Univ. Bordeaux, Bordeaux
M.	Ke Wu	Professeur des Universités	Ecole Polytechnique de Montréal

Avant-propos

Au regard de la circulaire relative au doctorat et à l'habilitation à diriger des recherches du ministère de l'éducation nationale et de la culture du 27 octobre 1992¹ ainsi que de l'article 1 de l'arrêté du 23 novembre 1988, le présent manuscrit sera constitué de trois chapitres suivants :

Chapitre 1

Stratégie de recherche dans un domaine large, caractère original de la démarche et obtention de contrats de recherche. Se rapporteront dans ce chapitre des liens à la cartographie thématico-temporelle donnée dans l'avant-propos

Chapitre 2

Synthèse basée sur des ouvrages et travaux publiés permettant de faire apparaître l'expérience du candidat dans l'animation d'une recherche, de son haut niveau scientifique et de sa capacité à encadrer de jeunes chercheurs de second et de troisième cycle.

Chapitre 3

Projets de recherche futurs

Un CV élargi est également proposé en annexe, il comprend des informations complémentaires, telles que :

- les activités d'enseignement,
- le cursus universitaire & déroulement de carrière, les prix et distinctions,
- le sujet des étudiants encadrés et leur carrière après la thèse ainsi que les publications générées,
- la synthèse bibliométrique.

¹ https://www.universite-paris-saclay.fr/sites/default/files/media/2020-01/2017-03-07-edeobe_infoshdr-circulaires.pdf



M1 Internship	M2 Internship	Scientific Sabbatical (Ukraine)	PhD Thesis (Grenoble)	Postdoctoral research (Montreal)	Research associate (Montreal)	Maitre de Conférences (Bordeaux)
---------------	---------------	---------------------------------	-----------------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------

2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022

Pedagogy/ Education Socio-constructivism [T1], [T2]

Antenna research Fractal antenna [N1] Periodic structure [N5], [C4] Wideband coupling circuit [N3-N4] Millimeter-wave rectifiers [C6-C7, C15-C16] Ferrite-loaded tunable filter [J9] [C8-C9] Optimal Angular coverage harvester [J21, J31] [C19, C27, C36, C41, C43-C44] Epidermal antenna [J32] Electronic Impedance Synthesizer [J16-J17, J20] History of microwave circuit (SHARP, Great Seal bug) [C34]

Learning Axis: RF circuit & antenna

RF circuit design

PhD Axis : RF circuit & instrumentation

Instrumentation

WPT & Implant WPT & BioFuel Cell

Research Axis #1: Wireless energy transmission & harvesting

Research Axis #2: Wireless Biomedical applications

Wireless Structure Health Monitoring

- Master student : Carlos H P Lorenz, Wei Wang, Lam Dinh, Arnaud Kuukuvi, Anthony Bres, Valentin Guillerat
- PhD students : Yangping Zhao, Xiaoqiang Gu, Erika Vandelle, Luigi Di Trocchio, Fiona Somorreau
- Postdoc : Lei Guo, Karan Gumber, Francesco Amato, Helena Ribeiro

Real time spectrometer [J2-J3], [N2, N6]

Power detector circuit

Hybrid radio wave + vibration harvester [J10], [C18], [P1] Low power Rectifier circuit mechanism [J8, J15], [C12-C13, C17] Reactive nonlinear circuit [C11]

RF-DC characterization: Magnetic Tunnel Junctions [J4-J5, J7, J11-J13], [C5-C10] Backward Tunnel Diodes [J14], [C14]

Nested ring resonator [P2-P3] Implant remote powering [J6], [P4]

Flow theory & Experience sampling method

Kung-Fu Smith, SDR hack, Hackathon coil design

Hybrid solar&RF

Hybrid harvester [J18-J19, J23] [C21, C25, C32]

Nonlinear conversion diode model [J25, J36, J37] [C20, C30-C31, C33, C37, C50, C52]

Low power RF-DC circuit [J25], [C22, C39, C45, C47-C48, J29]

Low power RF-RF & harmonic circuit [J22, J28, J34, 35] [C23-C24, C42, C46]

Negative resistance circuit [J16] 1 port mixer+gain circuit [J27], [C49]

Analog chirp generator [P7], [C54]

Non-linear Negative resistance device characterization [C40]

SAR reduction in remote Implant powering

WPT to deeply implanted devices [J22], [C29, C35, C38]

Integrated Bio fuel antenna [P5, P6] Integrated Bio fuel radio

Wireless rodent monitoring [J26], [C28]

Acoustic wave remote IMD powering + Wireless piezo [N8-N9], [J30], [C53]

Wireless Piezo [P8]

Table des matières

Chapitre 1	Stratégie de recherche.....	6
1.	Formation / toile de fond (Thèse et premier travail sur le détecteur de puissance à diode) 6	
2.	Ebauche de la stratégie de recherche.....	9
3.	Axe de recherche #1 : Collecte d'énergie électromagnétique radiofréquence (« radiofrequency electromagnetic Energy harvesting »)	11
3.1.	Cartographie du contexte: l'énergie, un enjeu sociétal.....	11
3.2.	L'émergence de la question de recherche.....	13
3.3.	Etat de l'art de la recherche en rectification radiofréquence en 2012	13
3.4.	Identification des indicateurs de performance (« metrics ») / paramètres essentiels .	14
3.5.	Plan de recherche/objectifs techniques	16
3.5.1.	Augmentation de \mathfrak{R}_{i_0} par l'utilisation de composants à forte non-linéarité.....	16
3.5.2.	Augmentation de la puissance d'entrée	16
3.5.3.	Capture de nouveaux signaux.....	17
3.6.	Extension de l'axe de recherche axis #1 au recyclage des signaux radiofréquences	17
3.6.1.	Réduction des pertes de conversions harmoniques.....	19
3.6.2.	Exploration de la pertinence de l'amplification « sub-volt » en réflexion.....	19
4.	Axe de recherche #2 : Systèmes micro-énergie sans fil pour le biomédical (wireless biomedical applications).....	19
4.1.	Contexte.....	20
4.2.	Indicateur de performance, représentation du besoin et état de l'art	21
4.3.	Faire un état de l'art exhaustif selon ces indicateurs (« where we stand ?)	22
4.4.	Objectif visionnaire & objectifs techniques à atteindre (« the vision / technical goals ») 23	
4.4.1.	Transmission de puissance sans fil par couplage magnétique résonant.....	23
4.4.2.	Combinaison de deux modes d'alimentation	23
4.4.3.	Générateur biopile / télémétrie / antenne dermique	24
4.4.4.	Transmission de puissance sans fil par ondes acoustiques	24

5. Conclusion	24
Chapitre 2 Contributions à l'état de l'art	26
1. Axe de recherche #1 : Capture et recyclage d'énergie électromagnétique ambiante	26
1.1. Exploration du potentiel de responsivité \mathfrak{R}_{I_0} des Jonctions Tunnel Magnétiques (MTJ) [C5, C10, C13, J4-J5, J7, J11-J13].....	27
1.2. Conception de circuits intégrant des diodes à effet tunnel [C14, C30, J14].....	30
1.3. La technologie thermo-ionique (diodes classiques), au service de notre modèle basse puissance, puis utilisées à des températures ambiantes froides (hiver) pour augmenter la non-linéarité [C39, C42, J25, J28, C12, C17, C20, J8]	32
1.4. Conversion collaborative ou hybride de plusieurs énergies [C18, C21, C25, C32, J10; J18-J19, J23].	33
1.5. Rectenna isotropique à fort gain [C19, C26-C27, C36-C37; C41, C43-C44, J21, J31]	34
1.6. Energie radiofréquence ambiante [C46-C48, C50, J29] et exploration de circuits de conversion à plus haute fréquence [C6-C7, C15, C16, C28, J34].....	37
1.7. Rétrodiffusion harmonique et pertes de conversion [C22-C24, C42, C45, J22, J28, J34]	38
1.8. Amplificateur à rétro-diffusion harmonique un port [C40, C49, J16, J27]	41
2. Axe de recherche #2 : Alimentation d'implants bioélectroniques.....	45
2.1. Transmission de puissance sans fil par couplage magnétique résonant [P2,P3], [J6], [P4]	46
2.2. Combiner plusieurs fonctions à l'antenne de manière à occuper moins d'espace tout en maintenant un haut facteur de qualité [C29, C35, J6, J32, P2-P3, P5-P6]	47
2.3. Confinement partiel du champ électrique [P6] du micro-résonateur	50
2.4. Télémétrie sans fil par transpondeur sans pile et sans fil [C28, J26]	51
2.5. Transmission de puissance sans fil par ondes acoustiques [C53]	52
Chapitre 3 Futures directions.....	54
1. Défis essentiels (impasse ?) de notre civilisation	54
2. Futur de l'électronique ?	56
3. Vision pour le futur technologique de la thématique	58
4. Transpondeurs numériques autoalimentés	60
4.1. Projet de récupération d'énergie : microgénérateur universel	61
4.1.1. Principe.....	61
4.1.2. Résultats préliminaires et plan de travail.....	63
4.2. Projet de recyclage d'énergie : transpondeurs à doubleur harmonique.....	64
4.3. Projets Modulation CSS (LoRaTunnel).....	65

4.3.1.	Principe	66
4.3.2.	Résultats préliminaires.....	66
4.3.3.	Plan de travail	69
5.	Transpondeurs analogiques passifs (sans pile).....	71
5.1.	Endovibrateur : l’aube nouvelle du capteur analogique	71
5.1.1.	Application à la transduction ultrasonore	72
5.2.	Application à l’économie d’énergie des bâtiments pour des capteurs de CO2.....	73
6.	Application au monitoring pour la résilience des structures et infrastructures.....	74
6.1.1.	Principe et résultats préliminaires	74
6.1.2.	Plan de travail	76
7.	Transpondeurs analogiques actifs sans pile et sans fil : Application biomédicale au développement d’un capteur de glucose intégré.....	77
7.1.	Rappel du contexte médical	77
7.2.	Concept et résultats préliminaires.....	78
7.3.	Objectifs du projet	80
	Nonpower electronics (Towards wireless batteryless sensors).....	84
	Annexes.....	Error! Bookmark not defined.

Chapitre 1 Stratégie de recherche

“To break the rules, you must first master them”

(Audemars Piguet)

L’objectif de ce chapitre est de présenter rapidement mon parcours pré-doctoral et doctoral, ainsi que l’esquisse du cadre stratégique qui a déterminé mes recherches des douze dernières années.

1. Formation / toile de fond (Thèse et premier travail sur le détecteur de puissance à diode)

C’est à l’époque du Lycée technique que l’électronique radiofréquence m’a tout d’abord attiré. Mon initiation commença avec la réalisation d’une antenne dipôle dédiée à un projet d’émetteur radio FM mené par un ami. Cette antenne avait été découpée dans un tube de récupération en aluminium selon les connaissances rudimentaires collectées sur les nombreux sites radioamateur qu’on trouvait alors sur l’internet de la fin des années 90. Porté par cette passion, j’ai naturellement continué mes études en IUT GEII option électronique (Institut Universitaire de Technologie, département Génie Electrique et Informatique Industrielle). A cette occasion, j’ai eu l’opportunité de faire un premier stage au cœur du monde de la recherche au centre européen pour la physique des particules (CERN). Deux ans plus tard, dans le cadre de mon stage de Master 1 j’ai pu, pour la première fois intégrer un laboratoire de recherche en électronique hyperfréquence (l’institut de la microélectronique, l’électromagnétisme et la photonique, IMEP-LAHC). Ce stage m’a permis de travailler à nouveau sur des antennes (bande RFID 900MHz), et d’être confronté à la rédaction d’un article de conférence [N1]. L’année suivante, au sein du même laboratoire, j’ai été impliqué en Master 2 dans des travaux préliminaires de conception d’un interféromètre aux fréquences sub-millimétriques [J1].

Une thèse CIFRE m’a ensuite été proposée sur la compatibilité électromagnétique au sein de ST Microelectronics. Cependant, mon cursus universitaire avait été jusque-là particulièrement axé sur l’aspect expérimental et j’avais alors soif de saveur théorique. Dans un choix difficile entre la stabilité et l’inconnu, j’ai décidé de prendre une année « sabbatique » et créé l’opportunité d’une expérience scientifique dans un ancien institut prestigieux de l’époque soviétique (Académie Nationale des Sciences d’Ukraine, et Université Polytechnique de Lviv, Lviv, Ukraine). En parallèle de mes cours d’ « Ukrainien Langue Etrangère », cette année académique a été consacrée aux techniques numériques, avec un accent particulier sur la Méthode des Moments (MoM) utilisant

la fonction de Green pour déterminer la matrice de paramètres [S] d'une simple jonction en T d'un circuit microstrip [C1-C3] sous la direction de M. I. Andriychuk.

De retour en France j'ai rejoint l'équipe de conception de circuits passifs du laboratoire IMEP-LAHC dans le cadre d'une thèse aux fréquences micro-ondes (0.3-5 GHz) [J2] et submillimétriques (19-25 GHz) [J3].

Sous la direction de P. Xavier & F. Podevin, j'ai ainsi participé au développement d'un analyseur de spectre basé sur le principe de l'interférométrie. L'instrument, nommé SWIFTS (Stationary Wave Integrated Fourier Transform Spectrometer), comporte des détecteurs de puissance répartis de manière périodique le long d'un guide d'onde radiofréquences (RF). Comme ce dernier est terminé par un court-circuit (Figure 1) le signal injecté en entrée de l'instrument interfère avec lui-même et développe une onde stationnaire qui peut être spatialement échantillonnée. L'interférence spatiale est ensuite convertie par transformée de Fourier (calcul FFT) pour obtenir son spectre, en manière large bande et en instantanée (contrairement aux analyseurs de spectre classiques qui balayent une zone du spectre à la fois) [N2-N6, C4]. L'idée de base de cet instrument a été proposée à Grenoble par Etienne le Coarer et Pierre Benech [1] sur le principe de la photographie interférentielle développé par Gabriel Lippmann un siècle plus tôt [2] et qui donna lieu au prix Nobel de Physique Français de 1908.

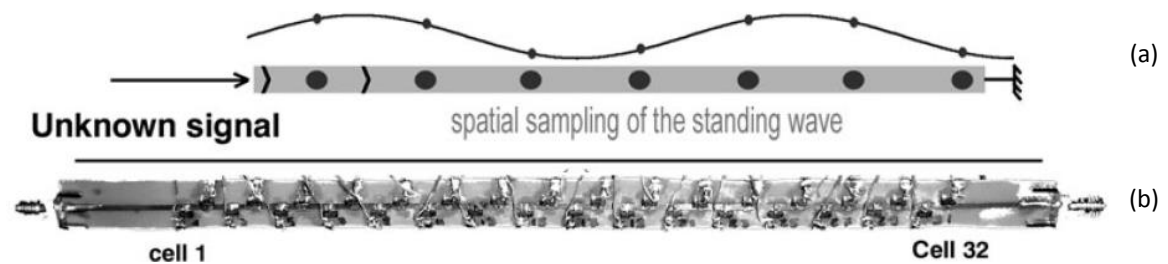


Figure 1: (a) principe d'échantillonnage de l'onde stationnaire (b) photographie de l'interféromètre radiofréquence. [3]

J'ai eu la chance de travailler sur les multiples aspects de cet instrument :

- interférences dans les domaines temporel, spatial (Figure 2-a) et fréquentiel (Figure 2-b) ;
- limites fondamentales de l'efficacité de l'instrument selon le taux de prélèvement de chacune des cellules d'échantillonnage spatial (Figure 3) ;
- conception, caractérisation, simulation et démonstration expérimentale du circuit d'échantillonnage radiofréquence (« cellule unitaire ») ;
- compensation des erreurs systématiques de l'instrument et exploitation des résultats.

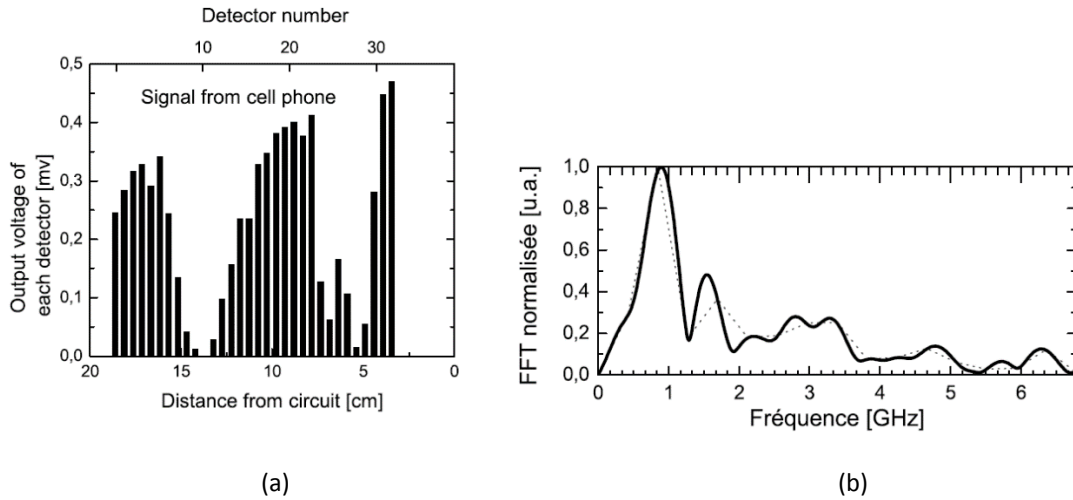


Figure 2 : (a) Interférence brute constituée des 32 tensions de sortie de chacun des détecteurs pour un signal GSM mesuré avec une antenne quart d'onde (b) FFT brute de cette interférence, en pointillé, et FFT avec interpolation, en gras. [J2]

Pour garantir la présence d'une onde stationnaire au sein de l'instrument, il convient de ne prélever qu'une partie de l'énergie présente sur la ligne de transmission principale visible sur la Figure 1. De plus, pour éviter tout phénomène de « miroir de bragg » [4], il est important que chaque cellule d'échantillonnage ne génère qu'une puissance réfléchie (Figure 3-a) minimum, soit un coefficient de réflexion S11 inférieur à -15dB pour chacune d'entre elles.

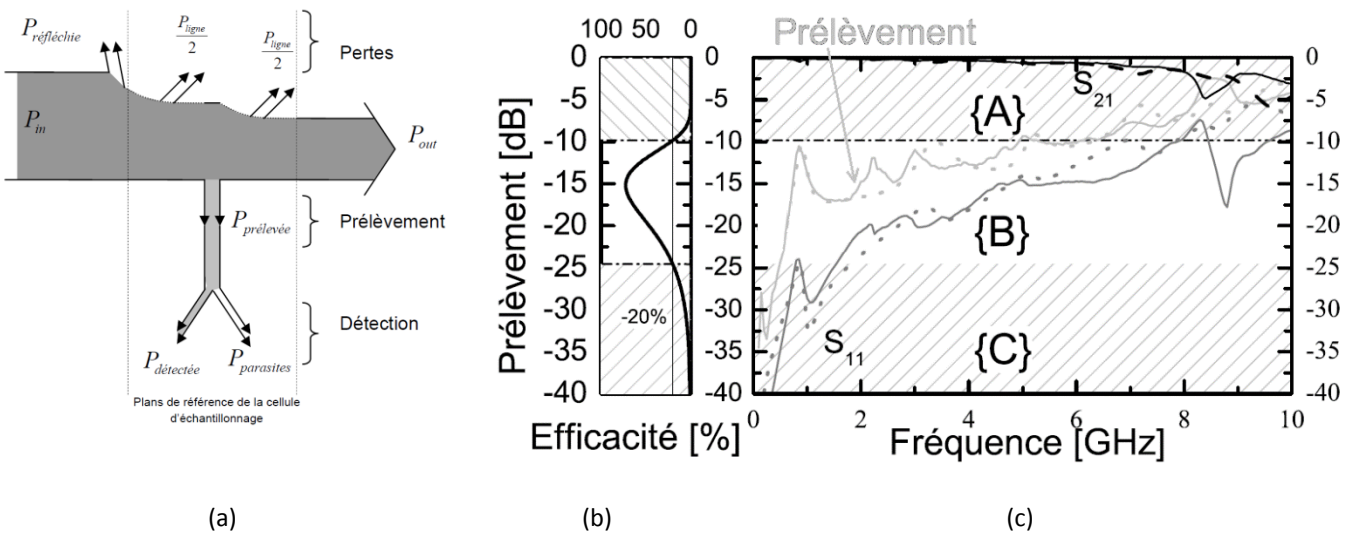


Figure 3 (a) L'instrument peut être vu comme une succession de cellules d'échantillonnage spatial dont la fonction est de prélever une partie du signal radiofréquence sur la ligne de transmission principale. Le taux de prélèvement est très important, car si l'onde incidente est trop diminuée, elle ne pourra pas se réfléchir et l'onde stationnaire ne pourra pas exister. (b) Efficacité de l'instrument pour 32 cellules d'échantillonnage en fonction du taux de prélèvement de chaque échantillonneur. (c) Gris clair : taux d'échantillonnage (simulé en pointillé et mesuré en trait plein) ; gris foncé : paramètre S11 correspondant au coefficient de réflexion de chaque cellule d'échantillonnage spatial. [3]

Enfin, pour compenser les erreurs systématiques de l'instrument, il convient de déterminer par une procédure de calibration les coefficients de correction pour chacun des détecteurs à diode, en fonction de la fréquence et de la puissance. J'ai donc dédié la fin de ma thèse à l'étude des principes de l'étalonnage des mesures radiofréquences, ainsi qu'à la compréhension de la

réponse **non-linéaire** des diodes Schottky utilisées, et notamment la sensibilité, c'est-à-dire le ratio entre la tension de détection et la puissance d'entrée (Figure 4).

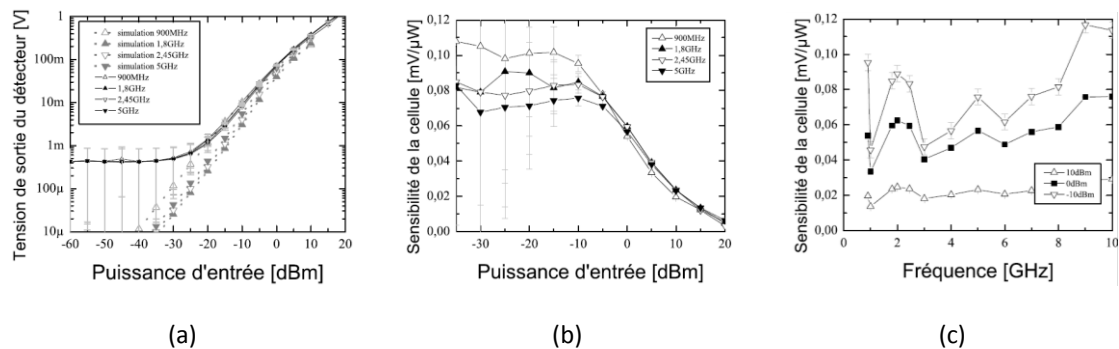


Figure 4 : (a) Comparaison des tensions $V(f, P_{in})$ mesurées avec les tensions issues de la simulation ; (b) sensibilité d'une des 32 cellules d'échantillonnage en fonction de la puissance disponible dans le guide d'onde principal ; (c) sensibilité d'une des 32 cellules d'échantillonnage en fonction de la fréquence. [3]

Ma thèse est soutenue le 17 septembre 2010 avec un objectif partiellement validé en ce qui concerne la modélisation des cellules de détection : si le modèle fréquentiel a été confronté avec succès aux mesures, le temps n'aura pas été suffisant pour établir de manière analytique la dépendance du circuit aux variations de puissance autrement que de manière phénoménologique. Néanmoins, mon travail sur la diode aura permis une ouverture sur la conversion de fréquence qui est à la base de mes activités de post-doctorat décrit au long de la section suivante.

2. Ebauche de la stratégie de recherche

J'ai eu la chance d'intégrer après ma thèse le laboratoire du professeur K. Wu, avec pour objectif de développer des recherches sur le transfert de puissance (Wireless Power Transfer, WPT) et la récupération d'énergie radiofréquence ambiante. Ce rôle étant nouveau pour moi, j'ai dû me façonner de nouveaux outils pour me permettre d'appréhender ce champ disciplinaire que je ne connaissais pas. Contrairement au cadre de ma thèse pour lequel la question de recherche était

déjà existante à mon arrivée², l'objectif était ici de déterminer la **question de recherche** qui **permettrait de dépasser** les meilleurs résultats de la **communauté scientifique** du domaine.³

- i. C'est donc progressivement (et à tâtons) que je suis arrivé à ébaucher ma stratégie de recherche. En regardant *a posteriori* le parcours emprunté, je pense pouvoir la formaliser selon les principales étapes décrites en suivant. Cartographie du contexte visé : il s'agit de faire un tour d'horizon du contexte de l'application.
- ii. Identification des indicateurs de performance (« metrics ») qui relie le domaine de recherche aux applications utiles à la société (ou au marché). C'est cette étape qui peut permettre d'identifier des pistes importantes qui auraient pu être omises par la communauté de recherche à cause de biais endogènes.
- iii. Etat de l'art exhaustif selon ces indicateurs (« where do we stand ? ») : avec comme grille de lecture les indicateurs identifiés dans l'étape précédente, il est possible de faire un « état des lieux » de la recherche dans le domaine. Cette longue étape « d'épluchage » de la littérature peut s'avérer lourde quand les indicateurs ne sont pas directement donnés dans les publications, mais elle permet d'agréger tous les résultats de la communauté sous forme de graphique élémentaire, support à l'émergence de l'idée visionnaire.
- iv. L'idée visionnaire & l'émergence de la question de recherche aboutissant aux objectifs techniques (« the vision ») : qu'est-ce qui nous retient pour dépasser l'état de l'art ? Quel espace reste-t-il entre ce qui est physiquement impossible et l'état de l'art ? Quels sont les verrous ? Quelle est la limitation profonde dans le domaine ? Quelles sont les limites fondamentales de la technologie ? Quelle direction devons-nous prendre pour faire avancer la recherche dans le domaine ? Quels continents inexplorés nous reste-t-il à découvrir ?
- v. Construction du plan de recherche, du chemin qui permettra de repousser les limites, ou d'aller là où personne n'a encore cherché : description des objectifs techniques nécessaires pour atteindre le but fixé par l'idée visionnaire.

Je me propose de détailler à présent ces aspects de ma démarche scientifique, dans le cadre des deux axes de recherches que je porte : 1/ collecte d'énergie électromagnétique radiofréquence, 2/ systèmes micro-énergie sans fil pour le biomédical.

² Dans le système de la recherche contractuelle utilisé aujourd'hui en France, la question de recherche est posée, formalisée lors de la demande de financement. Quand un personnel de recherche non-permanent est recruté dans le cadre d'un projet/contrat, il a généralement une posture de mise en œuvre et d'application. Notons au passage que cette approche est cohérente avec des durées de thèse de 3 ans, où l'ouverture n'est en général pas attendue du doctorant si ce n'est en fin de projet.

De manière opposée, il est des situations dans des alternatives au modèle Français, où le doctorant / postdoctorant est placé dans une position de chercheur dès son arrivée avec pour objectif de définir lui-même sa question de recherche. Face au vide que constitue une absence de directives cadrées et avec comme seul objectif concret de révolutionner le domaine, le doctorant / postdoctorant n'a d'autre alternative que de développer des outils de recherche performante... ou se réorienter.

³ L'ouverture à une nouvelle thématique de recherche est terriblement consommatrice de temps et demande de reconstruire le savoir accumulé par la communauté. Néanmoins, cette approche qui consiste à re-dérouler les questions de recherche pas-à-pas permet (m'a permis) de retrouver les résultats de l'état de l'art, et même parfois d'identifier des biais existant dans la communauté. Bien qu'il soit plus efficace de suivre les directions des grands visionnaires, cette approche « à rebours » permet l'émergence de pensées originales (« out of the box thinking ») qu'il est plaisant de découvrir.

3. Axe de recherche #1 : Collecte d'énergie électromagnétique radiofréquence
 (« radiofrequency electromagnetic Energy harvesting »)

Cet axe a donc été initié lors de mon séjour postdoctoral et a pour arrière-plan l'un des défis de ce début de siècle. Il me tient à cœur, car à travers lui j'espère apporter une modeste contribution à l'édifice global.

3.1. Cartographie du contexte: l'énergie, un enjeu sociétal

Le monde est confronté à une série de problèmes majeurs liés à l'énergie. A cause d'une industrialisation continue, elle-même liée à une consommation matérielle paraissant sans fin et parfois « self-centred », nous exposons nos sociétés au risque de pénurie. En tant qu'habitants de la même planète, il nous faut chercher un équilibre entre court terme et long terme. D'une part, il faut reconnaître que l'énergie est nécessaire pour soutenir le développement de toutes les sociétés humaines, de la productivité [5, 6] et de la santé [7, 8]. D'autre part, l'empreinte de nos sociétés humaines doit être réduite jusqu'à ce qu'il soit possible de maintenir les conditions de vie offertes par la nature, alors qu'actuellement, nous utilisons 74% de plus que ce que les écosystèmes de la planète peuvent régénérer, soit l'équivalent des ressources que produirait 1,7 Terre [9].

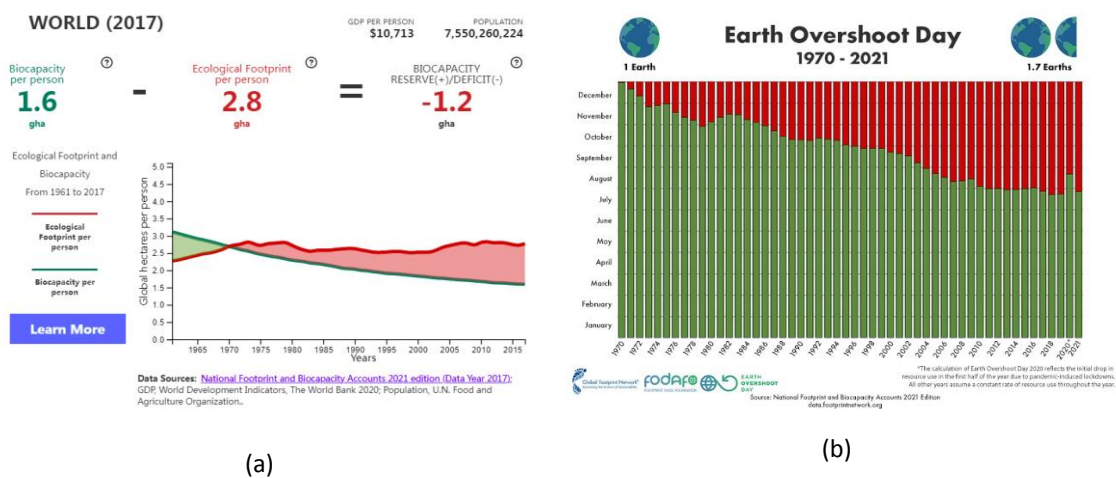


Figure 5 : (a) Déficit de la Bio-capacité renouvelable par rapport à l'utilisation (empreinte écologique) effective à l'échelle terrestre. (b) Information identique, mais tracée selon une différent perspective : selon les années, quel est « le jour du dépassement » où l'on bascule de l'utilisation d'une planète finie (zone verte) à des ressources empruntées aux générations futures. Données du Global Footprint Network [9].

Les premières centrales électriques ont été construites pour alimenter le développement de notre société moderne à une époque où la demande d'électricité était géographiquement concentrée. Cependant, le modèle de production, de consommation et de transport de l'énergie est très différent aujourd'hui [10] : la demande d'électricité connaît maintenant une augmentation sans précédent pour alimenter les appareils portables et intégrés, qui sont désormais géographiquement répartis, et « mobiles » pour beaucoup. Par exemple, les grandes centrales

électriques (centralisées) et les systèmes de transport lourds (réseaux) ne sont plus adaptés aux appareils mobiles, innombrables et dispersés.

La véritable solution à ce problème nécessite, entre autres, une mise en œuvre efficace (à l'endroit où l'énergie est amenée à être utilisée) de « micro-sources » de génération de courant, capables de récolter l'énergie ambiante, omniprésente, distribuée dans l'espace et qui est par définition renouvelable. Il s'agit là d'un véritable défi technologique car ce type d'énergie est généralement de faible densité (en W/m^2) et de très faible intensité par rapport à nos besoins électriques communs. Malgré tout, en prenant du recul sur les organismes biologiques présents sur terre, il apparaît que la collecte/récolte/capture/récupération de l'énergie environnante ou ambiante est la stratégie de survie naturelle de la plupart des espèces vivantes. Les énergies ambiantes les plus exploitables se trouvent dans le rayonnement solaire (électromagnétique) et les mouvements physiques (mécanique) et sont déjà exploitées avec succès par l'homme avec les panneaux solaires [11] (présents dans certaines calculatrices dès la fin des années 1970) et les collecteurs d'énergie cinétique [12] (la première montre à « remontage automatique » à être attestée par des documents dès 1777, est issue de l'atelier de Perelet au Locle, Suisse [13]), respectivement. Ceci étant, depuis l'apparition des communications sans fil, les activités humaines sont aussi baignées d'énergie électromagnétique servant à la transmission de données, qui peut donc elle aussi être exploitée. C'est d'autant plus vrai que de plus en plus de capteurs ou circuits nécessitant une faible puissance électrique (< microwatts ou mW) ont besoin d'être déployés dans l'espace de ces mêmes activités humaines.

Quelle que soit la source d'énergie primaire, la production ou utilisation de l'électricité implique quasi-systématiquement l'utilisation d'un composant – *la diode* – réagissant différemment selon le signe du courant qui la traverse, et permettant une conversion par commutation [14]. Les vertus de la diode sont certes devenues trop présentes dans notre vie pour être remarquées mais le développement de notre société moderne est si fortement lié à son évolution qu'elle ne peut être ignorée. Au total, 18 prix Nobel ont été décernés en relation avec la découverte et le développement de dispositifs redresseurs (diodes) et de leurs technologies [15-40]. La diode et le magnétron ont engendré le radar centimétrique [75], qui a donné à l'Alliance une supériorité technologique incontestablement associée à ses victoires pendant la seconde guerre mondiale [41]. Les technologies non linéaires dérivées de la diode sont directement liées à l'existence des signaux électroniques. Sans la diode, le courant électrique serait juste assez utile pour alimenter les moteurs, les chauffages et les ampoules à incandescence. Sans *l'effet diode*, il n'y aurait pas de transistors ni l'univers numérique qu'ils ont engendré.

La diode constitue aussi une pierre angulaire de l'énergie « verte ». Elle joue un rôle central dans les modules de conversion qui sont si importants dans le processus de récolte et de conversion. On trouve des diodes dans les capteurs de panneaux solaires, les capteurs d'énergie éolienne ou océanique, les capteurs thermiques, les capteurs d'énergie cinétique, les capteurs d'énergies RF et électromagnétique, etc.

3.2. L'émergence de la question de recherche

Peut-on ainsi améliorer les performances des micro-générateurs de courant capturant l'énergie ambiante de manière à libérer certains capteurs sans fil de leur batterie ? Quel est l'espace entre ce qui est physiquement impossible et l'état de l'art ? Où sont les zones de recherches insuffisamment exploitées qui présentent un potentiel de découvertes ?

Dans la perspective de pouvoir alimenter des capteurs sans fil et sans pile, nous allons chercher à agir sur la faible efficacité des dispositifs de récupération d'énergie électromagnétique radiofréquence ambiante. Observons tout d'abord les **meilleurs résultats de la communauté scientifique** du domaine. Le détail de leur fonctionnement et leurs **limites fondamentales** nous permettra alors de positionner notre **stratégie de recherche**

3.3. Etat de l'art de la recherche en rectification radiofréquence en 2012

Les recherches modernes sur la conversion de rayonnement RF en courant continu datent des années 1970. Déjà à cette période de très bons rendements avaient été démontrés (par exemple 82,5 % par William Brown pour le redressement d'un signal de 2,45 GHz), mais pour de fortes puissances d'entrée (8 W pour l'exemple cité ci-dessus). Un rendement élevé peut être obtenu à ce niveau de puissance car la diode Schottky à haute barrière fonctionne comme un interrupteur presque idéal : un circuit ouvert pour les tensions négatives et un quasi-court-circuit pour les tensions positives. Au fil des années, les recherches ont porté sur des puissances de plus en plus faibles mais avec des niveaux de rendement sans cesse plus difficiles à obtenir. La Figure 6 présente l'état de l'art en 2012, année à laquelle j'ai effectué cet « état des lieux » (les références des travaux repris dans cette figure pourront être trouvées en [J7]).

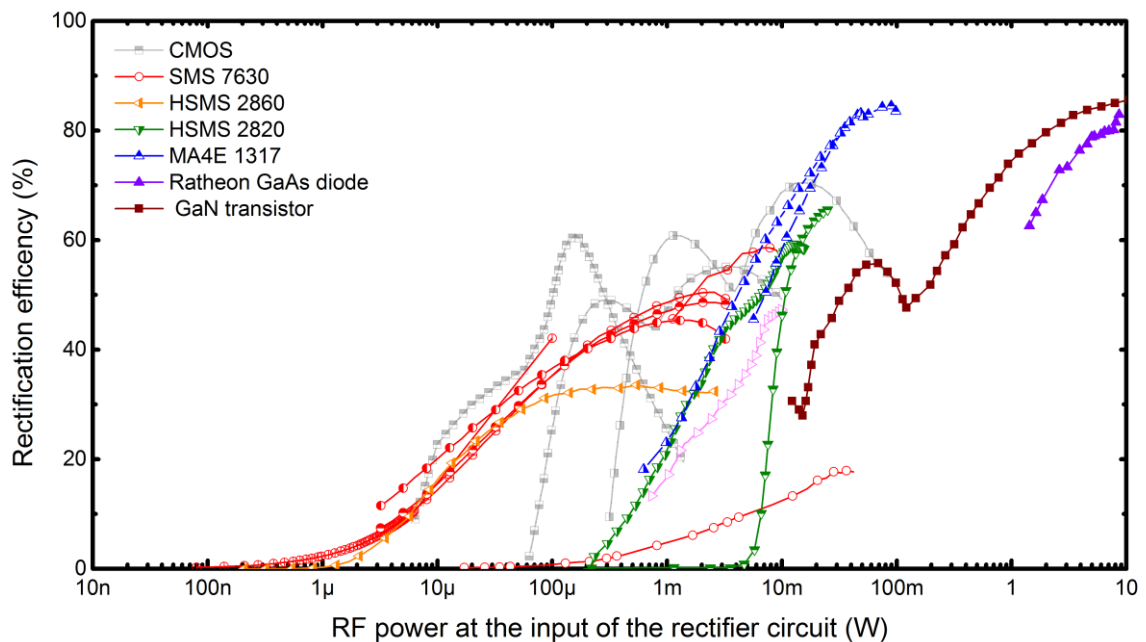


Figure 6 Circuits redresseurs hyperfréquences de pointe (mesures). La couleur/forme des points fait référence au dispositif non linéaire utilisé [J7]. Les redresseurs qui n'incluent pas les pertes du circuit d'adaptation et dont la fréquence de fonctionnement se situe en dessous du GHz ne sont pas rapportés ici.

Elle donne une très bonne image de l'efficacité maximale de conversion RF-DC qui peut être atteinte pour une large gamme de puissance RF. Bien que les travaux rapportés dans le graphique soient liés à de nombreuses architectures de circuit différentes (techniques de mise à impédances des harmoniques ou « harmonic termination » harmonique, substrats, fréquences, technologie...), les résultats semblent tous aboutir à la même tendance : plus la puissance d'entrée est faible plus le rendement l'est également.

Les dispositifs fonctionnant à une puissance supérieure à 10mW (transistor et diode Schottky à haute barrière) sont les seuls à pouvoir atteindre un rendement supérieur à 80%. En raison de la faible résistance à l'état passant, l'adaptation d'impédance est assez facile et la puissance continue peut être délivrée efficacement à la charge. Cependant, pour fonctionner comme un commutateur, le dispositif doit s'auto-polariser, ce qui nécessite de l'énergie (puissance d'entrée critique). Pour cette raison, ces dispositifs ne peuvent pas fonctionner avec une faible puissance d'entrée.

Quant aux redressements à faible puissance (μW et moins), le principe est sensiblement différent car il fonctionne autour du point de polarisation « zero-bias » (polarisation à 0 V). Ainsi, c'est seulement la non-linéarité à 0 V qui est effective dans le processus de conversion RF-DC.

Entre les très faibles et les fortes puissances, on observe une transition progressive de la non-linéarité à polarisation nulle au comportement de "commutation". Si la rectification à haute puissance n'est donc plus un défi depuis longtemps, il y a encore beaucoup à faire pour les scénarios à faible puissance correspondant aux niveaux présents autour de nous.

3.4. Identification des indicateurs de performance (« metrics ») / paramètres essentiels

L'efficacité d'un générateur électrique qui collecte l'énergie radio-électromagnétique ambiante est donc liée à sa capacité à convertir toute la puissance radiofréquence ($f = f_0$) capturée par une antenne en puissance continue ($f = 0$) :

$$\eta_{RF \rightarrow DC} = \frac{P_L|_{f=0}}{P_{ANT}|_{f=f_0}}, \quad (1.1)$$

avec $\eta_{RF \rightarrow DC}$ le rendement de conversion RF-DC, P_L la puissance « utile » dissipée dans la charge (le circuit à alimenter) et P_{ANT} la puissance RF en sortie d'antenne (de capture du signal). Aux côtés de Ke Wu et de Carlos Lorentz que je co-encadrais en MSc (Master of Science), et dans la lignée du travail de modélisation que j'avais commencé pendant ma thèse, nous avons montré [J7-J8] que dans le cadre de la récupération des faibles puissances ambiantes, le rendement de la conversion pouvait être simplifié en un produit de la puissance récupérée par l'antenne P_{ANT} , d'un rendement fréquentiel $\eta(f)$ dépendant du circuit radiofréquence implémenté ainsi que des parasites radiofréquences des composants utilisés, et enfin et surtout de \mathfrak{R}_γ la responsivité en courant du composant telle que proposée par Cowley et Sorensen [42], et qui décrit au premier ordre (pour de faibles puissances d'entrée) la non-linéarité du composant utilisé pour l'opération de conversion :

$$\eta_{RF \rightarrow DC} = \Re_I^2 \cdot \eta(f) \cdot P_{ANT} \Big|_{f=f_0}$$

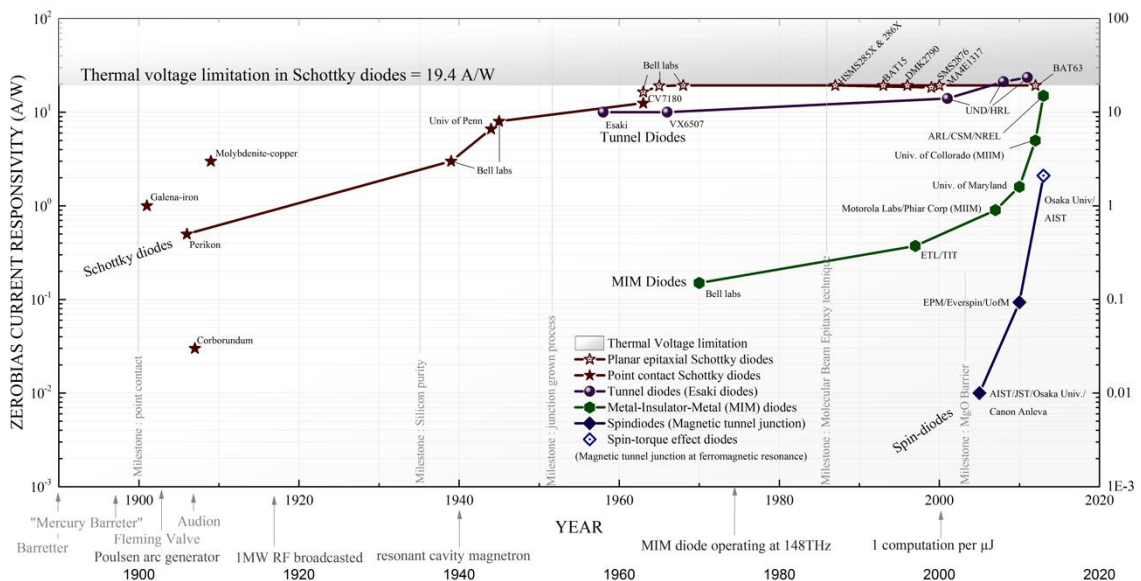
$$\text{avec : } \eta(f) = \left(\frac{\eta_M \cdot \sqrt{R_j}}{2 + 8 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C_j^2 \cdot R_j \cdot R_s} \right)^2 \quad (1.2)$$

où η_M est le rendement de la cellule d'adaptation d'impédance reliant l'antenne à la diode; R_j et C_j sont respectivement la résistance et la capacité de la jonction non-linéaire et R_s est la résistance équivalente série de la jonction.

Remarquons au passage qu'en accord avec ce que nous avons observé plus haut, cette relation décrit une augmentation du rendement avec la puissance radiofréquence. D'un point de vue thermodynamique, ce comportement peut être rapproché de l'augmentation de l'efficacité maximum d'une machine thermique à mesure qu'une puissance apportée *via* la température T_{chaud} est importante (théorème de Carnot) :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}} \quad (1.3)$$

A travers la responsivité, il apparaît évident que la non-linéarité des composants utilisés est primordiale pour récupérer l'énergie radiofréquence ambiante. Cependant, bien qu'il existe une abondante littérature sur les techniques permettant d'augmenter la puissance délivrée au composant non-linéaire ou de limiter les pertes des circuits fonctionnant au GHz, il m'est apparu que la question de la non-linéarité des composants utilisés était très peu questionnée dans la communauté. J'ai donc cherché à répertorier les dispositifs présentant un potentiel pour cette application. Comme un prototype n'est souvent qu'un cliché d'une technologie en développement continu (et que l'histoire me passionne), j'ai pris plaisir à les replacer dans une perspective temporelle. Ces évolutions de technologies sont présentées en Figure 7 et les histoires passionnantes qui l'accompagnent sont rapportées en [J7].



La Figure 7 permet ainsi d'identifier que la technologie dominante (diode semi-conducteur basée sur le transport thermo-ionique des électrons) a atteint un plateau de saturation depuis plus de 50 ans. Si cette position lui permet de jouir d'une maturité à toute épreuve, elle suggère aussi l'incapacité de cette technologie à progresser. Cette hypothèse se vérifie en déduisant la responsivité en courant « zero-bias » à partir de l'équation de Shockley, ce qui permet de réécrire l'efficacité de conversion RF->DC pour une diode :

$$\mathfrak{R}_{I_0} = \frac{q}{k_B \cdot T} = \frac{1}{V_t} ; \eta_{RF \rightarrow DC} = \frac{P_{ANT} \cdot R_j \cdot q}{4 \cdot n \cdot k_B \cdot T} \quad (1.4)$$

Ainsi, la non-linéarité de la diode PN et de la diode Schottky est physiquement limitée par la température à laquelle le circuit fonctionne. Et comme à cette époque tous les dispositifs de récupération d'énergie électromagnétique utilisaient cette technologie, c'était l'ensemble de l'état de l'art qui avait un rendement limité par la température.

3.5. Plan de recherche/objectifs techniques

La formulation analytique des limitations physiques de la conversion de puissance radiofréquence [J7-J8, J15, J36] nous permet donc maintenant de dérouler les chemins présentés en suivant pour améliorer les faibles rendements de l'état de l'art. Les résultats obtenus seront détaillés lors du prochain chapitre.

3.5.1. Augmentation de \mathfrak{R}_{I_0} par l'utilisation de composants à forte non-linéarité

Parmi les technologies présentées dans la Figure 7, nous pourrions ainsi retenir :

- La technologie de **Jonction Tunnel Magnétique (MTJ)** car elle présente un potentiel en rapide augmentation [C5, C10, C13, J4-J5, J7, J11-J13].
- La technologie basée sur **l'effet tunnel** car elle est la seule à dépasser aujourd'hui la technologie thermo-ionique (diodes classiques) même si elle reste difficile à implémenter à cause de la production très limitée de diodes tunnels [C14, C30, J14].
- La technologie thermo-ionique (diodes classiques), toutefois utilisée à des **températures ambiantes froides** (hiver) car la chaleur inhibe la conversion de puissance [C39, C42, J25, J28, J37']. A noter que dans ce cas l'augmentation de non-linéarité \mathfrak{R}_{I_0} s'accompagne d'une augmentation de résistance R_j qu'il convient de compenser par un réseau d'adaptation à haut facteur de qualité [C12, C17, C20, J8].

3.5.2. Augmentation de la puissance d'entrée

Sur la base de l'équation (1.2), deux moyens sont envisageables pour améliorer le rendement en augmentant la puissance d'entrée :

- Capter des énergies multiples et les concentrer dans un même dispositif non-linéaire de manière à effectuer une opération de **conversion collaborative ou hybride** [C18, C21, C25, C32, J10; J18-J19, J23].
- Capter plus d'énergie électromagnétique en utilisant un réseau d'**antennes à plus fort gain**, tout en proposant des solutions pour continuer de capter de manière **isotropique** [C19, C26-C27, C36-C37; C41, C43-C44, J21, J31].

3.5.3. Capture de nouveaux signaux

- Bien que l'écrasante majorité des signaux dédiés à la communication du grand public soit positionnée au GHz [C46-C48, C50, J29], les futures **bandes 5G** et millimétriques représentent indéniablement un nouveau potentiel de capture d'énergie qu'il est nécessaire d'explorer [C6-C7, C15, C16, C28, J34, J37].

3.6. Extension de l'axe de recherche axis #1 au recyclage des signaux radiofréquences

Il est possible d'étendre l'axe de recherche #1 à l'**autonomie des dispositifs sans fil** de manière plus générale, avec pour ambition d'aboutir à une nouvelle technologie d'objets communicants sans fil et **sans pile**. En effet, l'ingénierie électronique radiofréquence peut être mise au service de la capture et de la conversion de l'énergie RF d'une part, et de la transmission d'information « à énergie nulle » d'autre part. Cette direction est particulièrement opportune dans le contexte des capteurs sans fil dont les émetteurs (composés d'un oscillateur, d'une PLL, d'un amplificateur de puissance...), énergivores, consomment la part majoritaire de l'énergie embarquée dans la batterie.

Pour « économiser » sur la production locale du signal portant les informations transmises, il est possible d'implémenter la technique de « backscattering » qui permet, à condition d'être éclairé par un faisceau radio extérieur, d'encoder l'information dans une réflexion *modulée* du faisceau incident (on parle aussi de « rétro-modulation »). Il est fait mention de cette technique dès 1948 [44] et aujourd'hui l'entière industrie de la RFID est construite sur ce principe (RadioFrequency IDentification). Toutefois, bien que cette technologie soit très mature, l'instrumentation qu'elle nécessite du côté du « lecteur » (l'illuminateur-récepteur) est d'une complexité telle⁴ que son coût et sa taille limitent son déploiement. A ce problème s'ajoute une autre limitation : quand le lecteur illumine le transpondeur avec un faisceau radiofréquence, chaque objet de l'environnement tend à réfléchir le faisceau, si bien qu'il est difficile de déterminer parmi tous les signaux réfléchis, la part de la rétro-modulation et celle des réflexions parasites du reste de

⁴ Dans le cas d'une communication monostatique, le récepteur est aussi l'illuminateur, si bien que le signal reçu du transpondeur est parasité par les multiples réflexions de l'environnement, mais aussi par sa propre émission, ce qui nécessite l'utilisation d'un « self-interference cancellation circuit » qui occupe beaucoup de place et qui est difficilement adaptable en électronique intégrée. Dans les situations les plus difficiles, il faut compter jusqu'à 16 ordres de grandeur entre l'amplitude de l'illumination et la réception du signal « utile » rétro-modulé (<https://www.usenix.org/system/files/nsdi21spring-katanbaf.pdf>)

l'environnement ⁵. La quantité d'énergie renvoyée par la rétro-modulation limite ainsi grandement la distance de communication ⁶.

Parmi les méthodes de rétro-modulation, il est une technique qui permet de s'affranchir de la forte puissance de l'émetteur ainsi que des réflexions de l'environnement. Il s'agit de la rétrodiffusion harmonique (concept harmonic backscattering) qui consiste à n'« écouter » qu'une harmonique du signal d'illumination. De manière fort intéressante, la technologie de conversion (zero-bias / passive) harmonique est très similaire à la technologie de conversion RF->DC. La génération de courants dans un composant non-linéaire [J8] suivant l'application d'une tension $v_{\omega_0}(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t)$ linéaire est détaillée dans l'équation ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 i(V_b, t) = & i(V_b) \\
 & + \left[\frac{A^2}{4} \cdot i^{(2)}(V_b) + \frac{A^4}{64} \cdot i^{(4)}(V_b) + \dots \right] \cdot \cos(0) + \left[A \cdot i^{(1)}(V_b) + \frac{A^3}{8} \cdot i^{(3)}(V_b) + \dots \right] \cdot \cos(\omega_0 t) \\
 & + \left[\frac{A^2}{4} \cdot i^{(2)}(V_b) + \frac{A^4}{48} \cdot i^{(4)}(V_b) + \dots \right] \cdot \cos(2\omega_0 t) + \left[\frac{A^3}{24} \cdot i^{(3)}(V_b) + \frac{A^5}{384} \cdot i^{(5)}(V_b) + \dots \right] \cdot \cos(3\omega_0 t) \\
 & + \dots
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

avec $i^{(1)}, i^{(2)}, i^{(3)}, \dots$ les dérivées de la caractéristique courant-tension $i(v)$ par rapport à v du composant non-linéaire. De manière plus particulière, on peut voir que les mêmes paramètres (dérivée seconde et dans une moindre mesure dérivée quatrième) interviennent pour la génération DC et de la deuxième harmonique. Ainsi, le concept de responsivité développé plus tôt est aussi applicable au harmonic backscattering qui constitue donc une extension opportune dans la continuité de l'axe #1.

Bien entendu, la résistance non-linéaire ne contribue pas seule à la génération d'harmoniques. Dès lors que la fréquence de génération est non-nulle et suffisamment haute au regard de son impédance, toute non linéarité sur une autre composante réactive peut aussi contribuer à la conversion de puissance. A partir du modèle de Shockley, le rendement de conversion vers la deuxième harmonique d'une diode Schottky peut, sous certaines hypothèses [J22], être écrit tel que :

$$\eta = \frac{P_{2f_0}}{P_{f_0}} = \frac{P_{f_0}}{2} \cdot \left(\frac{\mathfrak{R}_{I0}^2}{4} + \frac{(2\pi f_0 C_{j0} M R_{j0})^2}{V_j^2} \right) \cdot \text{real} \left(\frac{Z_p^* \cdot Z_p}{Z_p^* + R_s + Z_{out}} \right) \tag{1.6}$$

où P_{2f_0} et P_{f_0} sont respectivement la puissance du second harmonique généré et la puissance fondamentale capturée; C_{j0} , M , V_j et R_{j0} sont la capacité de jonction à polarisation nulle, le coefficient de gradation de la capacité de jonction (non-linéarité capacitive), le potentiel de jonction et la résistance de jonction à polarisation nulle, respectivement ; Z_p est l'impédance

⁵ Et plus particulièrement quand le dispositif d'interrogation est en mouvement et/ou si l'environnement est lui aussi en mouvement.

⁶ Typiquement plusieurs mètres pour les dispositifs commerciaux et plusieurs dizaines de mètres pour les dispositifs militaires et du renseignement (impliquant des puissances largement supérieures à la régulation).

interne du circuit parallèle $R_j // C_j$ de la diode ; Z_{out} est l'impédance de sortie, qui est égale au complexe conjugué de l'impédance de la diode.

3.6.1. Réduction des pertes de conversions harmoniques

- On peut ainsi conclure de l'équation précédente qu'en choisissant une diode Schottky avec un **grand M** et un **petit R_s** , il sera possible d'atteindre une génération de second harmonique très efficace. Compte tenu des relations implicites entre η et R_j et C_j , une méthode plus précise que nous avons développée dans [C23] révèle qu'un plus **grand R_j** (c'est-à-dire un courant de saturation I_s plus faible) et un **faible C_j** sont aussi souhaitables pour augmenter le rendement de conversion [C22-C24, C42, C45, C52, J22, J28, J34-J36].

3.6.2. Exploration de la pertinence de l'amplification « sub-volt » en réflexion

- Avec les propriétés particulièrement intéressantes des diodes tunnel (non-linéarité et résistance négative), il paraît opportun d'étudier une solution qui pourrait permettre d'augmenter la puissance rétro-modulée (« Backward amplifier »). De plus, certaines diodes tunnel nécessitent une tension de polarisation de l'ordre de la centaine de mV, ce qui peut être particulièrement utile dans le contexte des faibles puissances capturées dans l'environnement (il convient de rappeler que le rendement de conversion des dispositifs cherchant à extraire des tensions de 1 à 3V nécessaires aux circuits actuels de l'internet des objets est particulièrement bas). Contrairement au transistor, la diode tunnel est un dispositif « 1 port », ce qui nécessite de repenser le processus de conception, mais qui s'accorde très bien avec le concept de l'internet des objets où chaque objet est un système 1-port [C40, C49, C54, J16, J27, P7].

En capturant les ondes électromagnétiques environnantes l'axe #1 permet de proposer des micro-sources d'énergie aisément distribuées dans l'espace et convient donc particulièrement aux réseaux de capteurs sans fils / internet des objets pour des applications telles que l'agriculture de précision, l'industrie 4.0, ... Néanmoins, il est un domaine d'application pour lequel le concept de Wireless Power (sans fil) est particulièrement pertinent : il s'agit de l'alimentation des dispositifs électroniques implantables (en anglais IMD, implantable medical device) que mon recrutement à l'université permet de développer et qui est détaillé dans la section suivante.

4. Axe de recherche #2 : Systèmes micro-énergie sans fil pour le biomédical (wireless biomedical applications)

A mon arrivée à l'université Bordeaux j'ai rejoint le laboratoire de l'intégration du matériau au système (IMS). Il s'agit d'un terrain formidablement fertile permettant de travailler aux cotés de disciplines proches au sens de l'ingénierie en général. Depuis 2015, j'ai ainsi eu l'opportunité d'interagir scientifiquement avec 9 des 10 groupes du laboratoire (Figure 8). J'ai eu la chance d'intégrer le groupe ONDES et l'équipe MDA, qui ont avant tout la pluridisciplinarité comme philosophie et mode opératoire. Grâce à mes nouveaux collègues du laboratoire, j'ai pu rejoindre

le Labex Amadeus, et ainsi rencontrer des électrochimistes et biologistes travaillant sur des solutions d'alimentation par récupération d'énergie chimique ambiante (pile à biocombustible). Dans ce contexte riche du campus bordelais, nous avons construit au fil des années une solide collaboration à l'interface entre l'électronique radiofréquence, la bioélectrochimie et la biologie de l'inflammation tissulaire, de manière à proposer des **solutions multidisciplinaires et intégrées aux problématiques de l'alimentation des IMD.**

10 Groupes	28 Equipes				
BIOELECTRONIQUE N. Lewis	Bio-EM Y. Percherancier	ELIBIO Y. Bornat	AS2N S. Saighi		
COGNITIVE J-M André	CIH J-M André	ERGO J. Petit	RUDII A. Lehmans	PMH_DySCo L. Arsac	
SIGNAL Y. Berthoumieu	MOTIVE J-P. Da Costa	SPECTRAL A. Giremus			
PRODUCTIVE Y. Ducq	MEI M. Traoré	ICO C. Merlo	LOCO2 R. Dupas		
AUTOMATIQUE X. Moreau	ARIA D. Henry	CRONE P. Melchior	FTG F. Cazaurang		
CONCEPTION D. Dallet	CAS F. Rivet	CSH N. Deltimple	CSN C. Jégo		
FIABILITE G. Duchamp	PACE H. Frémont	PUISSANCE J-M. Vinassa			
NANOELECTRONIQUE P. Mounaix	LASER J-P. Guillet	MODEL C. Maneux	III-V N. Malbert		
ORGANIQUE I. Dufour	ELORGA M. Abbas	PRIMS C. Ayéla			
ONDES Y. Ousten	MDA C. Dejours	EDMINA L. Béchou	MIM F. Demontoux		

Figure 8: Groupes et équipes de recherches du laboratoire IMS de Bordeaux. Le laboratoire IMS développe des actions de recherche originales et cohérentes dans les domaines suivants : (i) la modélisation et l'élaboration des matériaux, des capteurs et des microsystèmes, (ii) la modélisation, la conception, l'intégration et l'analyse de fiabilité des composants, circuits et assemblages, (iii) l'identification, la commande, le diagnostic, le traitement du signal et des images, la conduite des processus complexes et hétérogènes, (iv) L'ingénierie des systèmes neuromorphiques, l'interaction des champs électromagnétiques avec la matière vivante, la cognitive et l'ingénierie humaine (<https://www.ims-bordeaux.fr/fr/recherche/groupes-recherche>).

4.1. Contexte

Parmi les maladies chroniques non-transmissibles, les maladies cardiovasculaires, les affections neuronales et les troubles métaboliques causent à eux seuls 22 millions de décès chaque année dans le monde [45]. Ils résultent d'anomalies structurelles, biochimiques ou électriques du corps humain, qui ont un impact chronique sur la santé de plus de 51 millions de patients pour la seule Union Européenne. Parmi ces patients européens, 9 millions souffrent d'arythmie, autant de la maladie de Parkinson ou d'Alzheimer et d'autres démences, et 33 millions sont touchés par le diabète [46-48]. De plus, ces chiffres ne tiennent pas compte des personnes non diagnostiquées (jusqu'à un adulte sur deux) ni des aidants familiaux, qui sont lourdement impactés dans leur vie quotidienne (on estime que 50% des aidants décèdent avant les « aidés »). Globalement, les maladies cardiovasculaires, neuronales et métaboliques représentent une charge importante pour les systèmes de soins de santé, avec des coûts directs estimés à 400 milliards d'euros par an en Europe [49-51], et une incidence en augmentation.

Les mécanismes impliqués dans les maladies chroniques sont pour la plupart encore mal compris. Certes, les techniques actuelles basées sur des capteurs bioélectriques et biochimiques peuvent fournir une caractérisation détaillée des troubles internes, mais ces procédures sont trop invasives pour être applicables dans la vie quotidienne des patients. Pourtant, les performances des

biocapteurs se sont considérablement améliorées au cours des dernières décennies. L'exemple le plus connu est le celui du glucomètre, qui est devenu progressivement depuis 1980 un élément clé de la gestion du diabète de type 1 et du diabète sucré de type 2, car l'information qu'il délivre permet d'adapter le traitement de la maladie dans la vie quotidienne en fonction de l'activité métabolique du patient.

Pour garantir un bénéfice pour le patient, sans dégrader sa qualité de vie, les biocapteurs doivent être invisibles et ne doivent pas nécessiter de soins spécifiques, ils prennent ainsi le plus souvent la forme d'un dispositif médical implanté (IMD). Cela implique que le microsystème doit exécuter des tâches de mesure et de communication de manière autonome. Cependant, en raison de la longue durée d'implantation et de l'activité permanente de ces dispositifs, leurs sources d'énergie autonomes (généralement une pile) ont malheureusement une taille et un poids élevés, de sorte que très peu d'IMD potentiels ont un volume adapté à leur application. Ces inconvénients pourraient être encore acceptables pour les dispositifs transcutanés, mais pour les endroits profonds comme le cerveau, il n'y a tout simplement pas assez d'espace pour implanter le dispositif en raison de son volume trop important.

Ces besoins de puissance électrique sont bien évidemment aussi présents dans les autres types d'IMDs, tels les dispositifs électroceutiques (stimulation électrique), d'administration de médicaments (« drug delivery ») ou les organes artificiels. Ainsi, la construction d'un micro-générateur implantable, capable de subvenir aux besoins électriques des dispositifs implantables, constitue un Graal scientifique qui permettrait à beaucoup de technologies biomédicales existantes de pouvoir être (enfin) implantées.

4.2. Indicateur de performance, représentation du besoin et état de l'art

Dès lors, l'indicateur de performance capable de décrire l'objectif du micro-générateur implantable est donc le rapport entre la puissance DC fournie et le volume nécessaire pour produire le courant d'alimentation, ce qui correspond physiquement à une densité volumétrique de puissance :

$$FOM = \frac{P_{DC_{required}}}{Vol_{occupied}}$$

Il paraît évident que tous les types d'IMD ont des besoins de puissance différents. Néanmoins, dans la perspective d'acheminer de l'énergie à distance, la difficulté n'est pas la même selon la profondeur de l'IMD, il convient donc de chercher à représenter le besoin en densité de puissance consommée selon la profondeur de l'application (Figure 9). Parmi ces applications, on identifie trois familles de dispositifs ayant des besoins énergétiques croissants : les capteurs (a), les stimulateurs (b) et les organes artificiels (c).

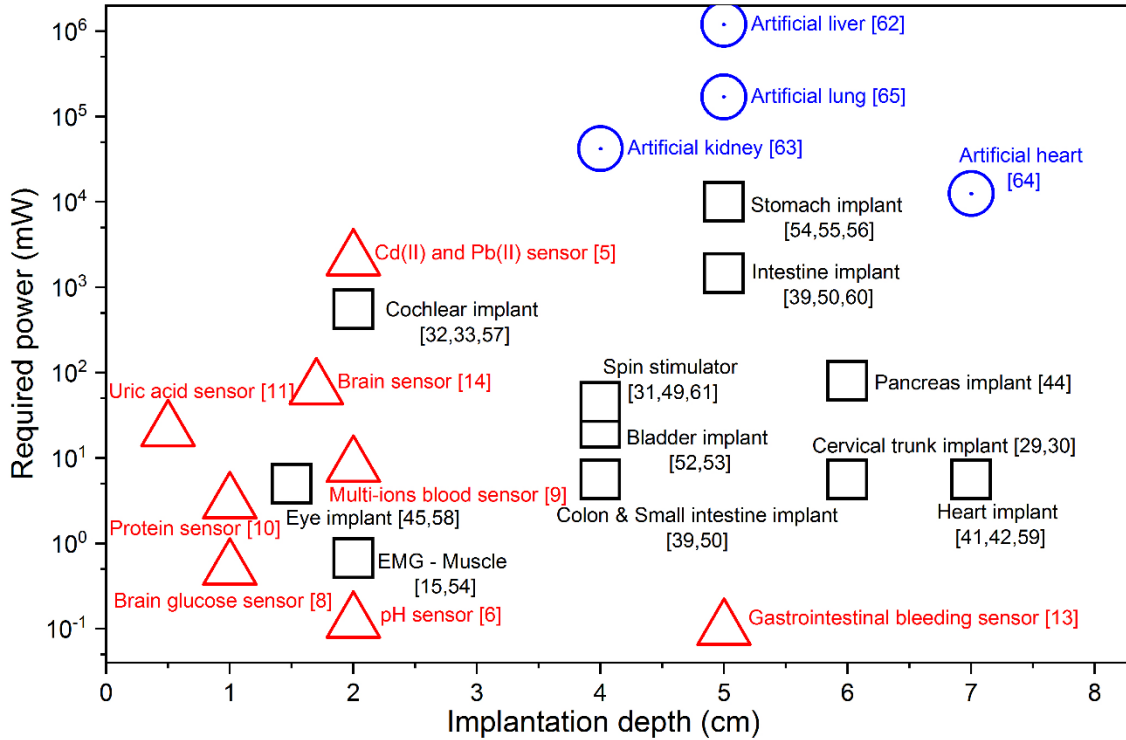


Figure 9: Puissance requise par différentes catégories de dispositifs implantables : les capteurs, les actionneurs et les organes artificiels. Voir références dans [130] et dans la thèse de Fiona Somoreau.

4.3. Faire un état de l’art exhaustif selon ces indicateurs (« where we stand ? »)

Contrairement aux piles qui sont des réservoirs dimensionnés pour soutenir une alimentation électrique pendant un temps déterminé (typiquement plusieurs années), les micro-générateurs implantables ont pour principe de convertir directement et continuellement une énergie « non-embarquée » en courant continu, permettant ainsi de supprimer les volumes considérables dédiés au stockage d’énergie. Parmi eux, on recense des générateurs à capture d’énergie localement présente dans le corps (mouvements de fluides ou musculaires, gradients de température, énergie chimique), ainsi que des générateurs nécessitant un apport d’énergie extérieure au corps (transmission d’énergie électromagnétique ou acoustique). La Figure 10 présente les trois méthodes qui sont physiologiquement viables et qui ont un potentiel de densité énergétique suffisant.

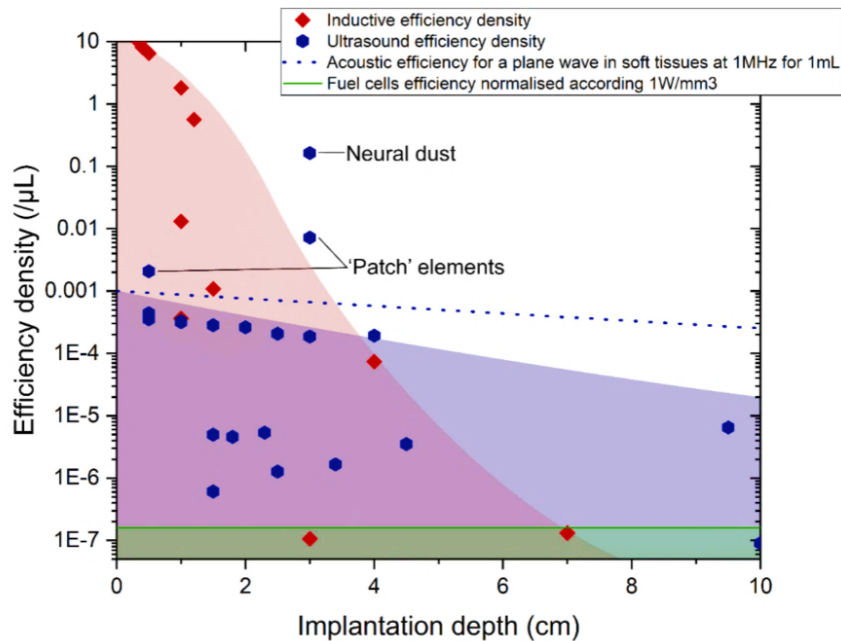


Figure 10: Etat de l'art des micro-générateurs dédiés aux IMD. La zone rouge correspond à la limite théorique de la transmission par couplage inductif, la zone bleue correspond aux puissances acoustiques, et la zone verte à la meilleure puissance récoltée par une pile à biocombustible. Voir les références dans [J30].

4.4. Objectif visionnaire & objectifs techniques à atteindre (« the vision / technical goals »)

Tous les efforts de recherche visant à réduire le volume (« footprint ») des IMDs sont bons à entreprendre dans ce domaine en pleine construction, et où beaucoup d'éléments (« building blocks ») sont encore manquants ou inadéquats. Néanmoins, il apparaît que l'enjeu est particulièrement critique pour les IMD à petit volume destinés à être implantés dans des zones exiguës. Nous nous fixons donc comme objectif de **fournir une forte densité de puissance volumique ($\mu\text{W}/\mu\text{L}$) aux capteurs et stimulateurs implantés**. Nous proposons d'explorer les trois technologies présentées dans la figure précédente dans des scénarii qui mettent en avant leurs avantages.

4.4.1. Transmission de puissance sans fil par couplage magnétique résonant

- Cette technique qui est capable d'excellents rendements en transmission transcutanée (Figure 10), permet non seulement d'atteindre de très petites tailles, mais aussi d'être, au besoin, au contact des tissus, pour servir de capteur. Les défis pour cette stratégie sont ainsi d'augmenter les distances de transfert en agissant sur la manière dont le champ magnétique est généré à l'extérieur du corps, tout en minimisant le débit d'Absorption Spécifique (DAS) [P4].

4.4.2. Combinaison de deux modes d'alimentation

Le couplage inductif peut être combiné à un autre apport d'énergie, ce qui ouvre la voie à plus de redondance (et donc résilience) et plus de flexibilité pour alimenter les implants malgré les fortes

contraintes du corps humain [C29, C35, J6, J32, P2-P3, P5-P6]. Deux voies sont proposées dans les paragraphes suivants.

4.4.3. Générateur biopile / télémétrie / antenne dermique

La pile à biocombustible (« BioFuel Cell » - BFC) présente l'immense avantage de fonctionner quelles que soient les conditions de position, de mouvement du dispositif, ce qui n'engendre pas de contraintes d'alignement contrairement aux méthodes de transmission de puissance. Elle fonctionne à toutes profondeurs d'implantation, à condition d'avoir un bon contact électrique entre les tissus et les électrodes, et à condition de ne pas générer de réaction inflammatoire du type « Foreign Body Reaction ». Le défi à moyen terme pour cette technologie est de faire fonctionner une électronique suffisamment faible tension pour être compatible avec les quelques centaines de millivolts qui sont générés (typiquement 0,5 V). Cela dit, comme cette technologie est limitée par la durée de vie des enzymes utilisées pour le transport des électrons, le défi à court terme est d'assurer le monitoring et de valider le bon fonctionnement de la biopile en environnement réel, c'est-à-dire *in-vivo* [C28, J26].

4.4.4. Transmission de puissance sans fil par ondes acoustiques

Comme l'indique clairement la Figure 10, la transmission de puissance par onde acoustique détient le meilleur potentiel pour télé-alimenter des IMD implantés profondément. Cependant, l'énergie reçue est limitée par deux facteurs : (i) Similairement au faisceau acoustique d'une échographie, les tissus mous servent de support au rayonnement de l'énergie acoustique dont malheureusement seule une partie parvient à l'IMD. (ii) En raison du fort contraste d'impédance entre les os et les tissus mous environnants, l'os joue le rôle d'écran aux ondes acoustiques. Comme la majeure partie des organes essentiels sont protégés par des os (cerveau, cœur, ...), la simple transmission acoustique par rayonnement dans les tissus paraît limitée [52, 53].

Pour contourner ces problèmes, la stratégie proposée est de propager l'énergie acoustique à l'intérieur du corps en utilisant les os comme guides d'ondes. Les os deviendraient ainsi un atout majeur plutôt qu'un inconvénient. Néanmoins, pour exciter acoustiquement l'os, il convient de transporter d'abord l'énergie jusqu'à lui. Les deux défis associés à cette stratégie sont donc :

- La transmission de puissance par couplage magnétique résonnant à travers la peau puis la conversion en énergie acoustique [J37].
- La propagation guidée de l'énergie acoustique dans l'os selon le mode acoustique permettant les plus faibles pertes de transfert (dépendant de la géométrie de l'os) [N8, N9, J30].

5. Conclusion

Ce chapitre s'est attaché à décrire les stratégies développées pour contribuer aux technologies des micro-générateurs, de capturant l'énergie radiofréquence ambiante (axe 1) ainsi qu'aux technologies de micro-générateurs dédiés aux dispositifs médicaux implantables (axe 2).

L'état de l'art concernant les défis décrits ci-dessus pour les deux axes a beaucoup évolué suite à notre travail. Les contributions scientifiques sont détaillées dans le cadre du chapitre suivant.

Chapitre 2

Contributions à l'état de l'art

“Think in term of power efficiency rather that in term of output power”

(Formulation libre d'après Francis Robbins Upton et Thomas Edison)

L'objectif de ce chapitre est de replacer les découvertes, victoires et résultats scientifiques obtenus dans le cadre des deux axes de recherche dans le contexte de la dynamique d'un travail d'équipe.

Bien qu'il m'ait été donné d'être impliqué dans d'autres projets plus ponctuels, j'ai choisi de n'évoquer ici que les travaux rentrant dans le cadre des deux axes présentés dans le chapitre précédent.

1. Axe de recherche #1 : Capture et recyclage d'énergie électromagnétique ambiante

Mes débuts travaux sur l'axe 1 ont débuté en février 2011 à l'occasion de mon postdoctorat à l'école polytechnique de Montréal, et ont continué après ma prise de fonction comme enseignant-chercheur à l'université de Bordeaux. Après 11 ans de travaux sur cette thématique, je perçois trois périodes distinctes. Pendant un an et demi, j'ai principalement cherché à proposer une stratégie de recherche, à établir des collaborations pour avoir accès à des « technologies non-linéaires » alternatives, et à construire un banc de caractérisation des composants non linéaires. Depuis 2012, j'ai co-encadré de jeunes chercheurs en Maîtrise (Carlos H P Lorenz, Anthony Bres, Valentin Guillerat), de jeunes chercheurs en thèse (Yangding Zhao, Erika Vandelle, Xiaoqiang Gu) et jeunes chercheurs en post-doctorat (Lei Guo, Karan Gumber) ou chercheur sen visite (Francesco Amato, Helena Ribeiro). Leurs contributions sont indiquées dans la Figure 11 selon leur code couleur. L'axe 1 est clairement la thématique la plus reconnue internationalement, et donne une visibilité supplémentaire au laboratoire IMS et au Campus Bordelais (par exemple à l'occasion des conférences organisées lors de la Wireless Power Week à Bordeaux en Juillet 2022)

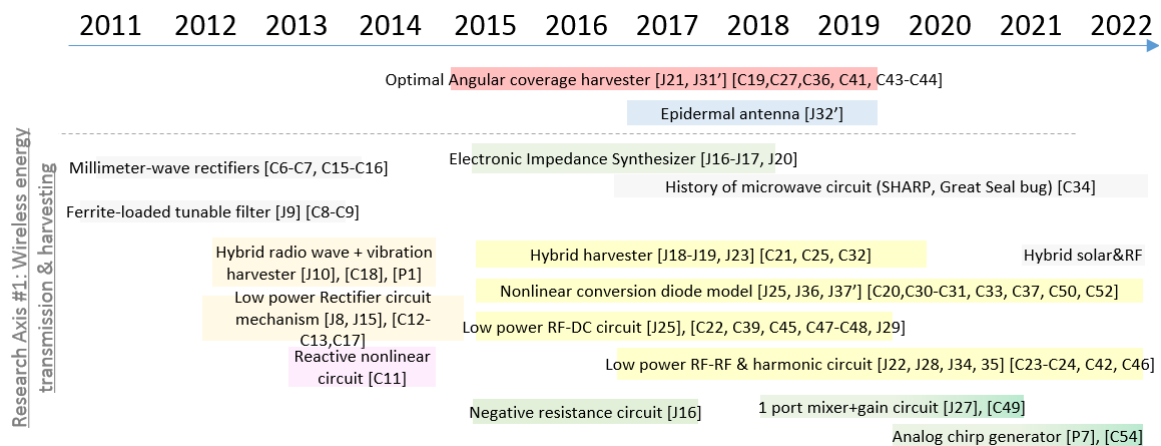


Figure 11: Activités de recherche sur l'axe 1.

1.1. Exploration du potentiel de responsivité \mathfrak{R}_{I_0} des Jonctions Tunnel Magnétiques (MTJ)

[C5, C10, C13, J4-J5, J7, J11-J13]

Démarrant mon travail post-doctoral par l'état de l'art des convertisseurs RF->DC (Figure 6), j'ai constaté le faible niveau d'avancement de la recherche pour les rendements à faible puissance. C'est pourtant un sujet de recherche essentiel car c'est précisément la gamme de puissance qui est visée par l'application de capture d'énergie électromagnétique ambiante. Comme les technologies à diodes classiques (thermo-ioniques) ne portent aucun potentiel d'amélioration du rendement (la responsivité en courant « plafonne » à 19,4 A/W à température ambiante, voir Figure 7), j'ai cherché à explorer d'autres technologies. A cette époque la « spintronique » venait d'être célébrée par un prix Nobel [39, 40]. Il m'apparut alors naturel qu'une conduction gouvernée par le spin de l'électron et non par sa charge puisse être la clef pour contourner les limites des diodes classiques.

Pour vérifier cette hypothèse, j'ai cherché à impulser des collaborations avec des experts du domaine pour avoir accès à cette technologie. Avec Ke Wu, nous avons ainsi construit le projet « Ambient Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Delivery Technologies » financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Dans ce contexte, nous avons collaboré avec l'équipe de Dimitri Houssameddine (Everspin Technologies, Chandler, AZ, USA) qui nous a fourni des mémoires « Magnetic Random Access Memories » (MRAM) en technologie « Magnetic Tunnel Junction » (MTJ), et avec l'équipe de Can-Ming Hu (University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada) qui possède une expertise reconnue en spintronique.



Figure 12 : Banc de caractérisation des jonctions tunnel magnétiques au sein du laboratoire PolyGrames. Les bobines de Helmholtz permettent d'appliquer un champ magnétique statique. Les pointes de test et l'analyseur de réseau permettent de faire des mesures d'impédance de DC jusqu'à 60 GHz. La source de tension et un multimètre 8.5 digits permettent de mesurer la réponse non linéaire de la courbe $I(V)$, la détection synchrone (lock-in amplif. SRS) permet de mesurer précisément la sensibilité de rectification du composant (en V/mW) et une fibre optique à lentille (dont l'ombre est visible à gauche sur l'écran de télévision fixée au mur) permet de mesurer la réponse du composant à l'exposition du faisceau laser infrarouge.

Dans la lignée des travaux de Cowley et Sorensen [42], j'ai d'abord cherché à vérifier le lien entre la caractéristique $I(V)$ statique des diodes et le rendement de conversion RF \rightarrow DC à faibles puissances. Les nombreux équipements du laboratoire Poly-Grames m'ont permis de rassembler des appareils de mesure performants en un banc dédié à mes mesures (Figure 12). A la marge des solutions d'instrumentation dominantes, j'ai développé les procédures de mesure et le code associé de manière à contrôler toute la chaîne de mesure, du calibrage au post-processing.

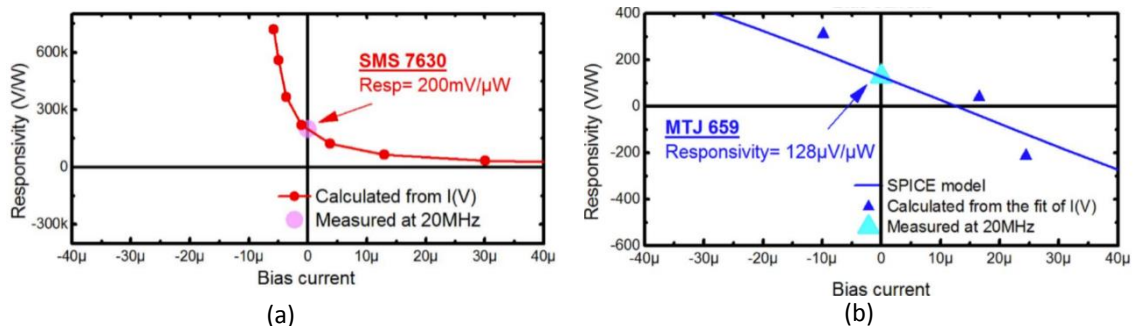


Figure 13: Sensibilité en tension (V/W) mesurée à 20 MHz en zero-bias et responsivité en tension (V/W) calculées à partir des dérivées des caractéristiques $I(V)$ pour (a) la diode SMS 7630 fabriquée par Skyworks et pour (b) une jonction tunnel magnétique fabriquée par Everspin Technologies. Illustrations issues de [54]. NB : la jonction tunnel magnétique n'est pas prévue pour fonctionner en tant que diode radiofréquence, mais a été fabriquée pour être utilisée comme mémoire MRAM.

Aux côtés de Yangping Zhao qui nous a par la suite rejoints pour une thèse, nous avons effectué des recherches passionnantes en cherchant à dévoiler le mécanisme de non linéarité et de conversion de fréquence des jonctions tunnel magnétiques à notre disposition. Au fur et à mesure de la montée en compétence de Yangping, je l'ai peu à peu laissé collecter les données expérimentales. Le modèle électrique ainsi que la variation de la résistance de jonction dans les deux états de la MTJ sont présentés dans la Figure 14. Outre sa responsivité qui est en augmentation à mesure que la technologie devient mature (Figure 7), ce type de composant se montre prometteur pour les deux raisons suivantes :

- La capacité d'interfaciale parasite [55] qui a un effet négatif dès 100MHz pour le composant montré en exemple dans la Figure 15, est tempérée par une résistance interfaciale qui en modère l'impact à plus haute fréquence. Cette propriété intéressante est absente dans les diodes classiques, et son exploitation est donc particulièrement intéressante pour les bandes millimétriques telles que la 6G.

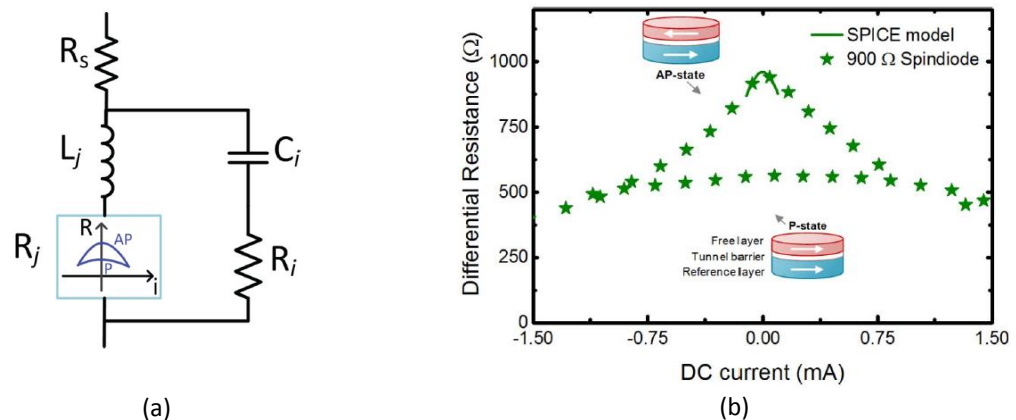


Figure 14:(a) Modèle électrique petit signal de la MTJ) et (b) Résistance de jonction calculée à partir des caractéristiques statiques $I(V)$ du composant). L'état AP (anti parallèle) revient à plus « filtrer les électrons » selon leur spin, et donc montre une plus forte résistance et non-linéarité autour de zero-bias. Illustrations issues de [54]

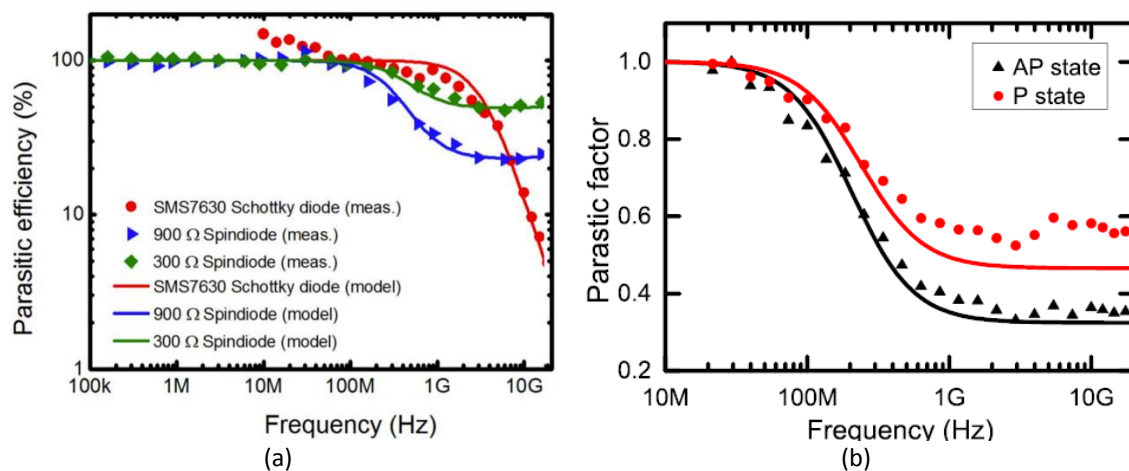


Figure 15: (a): Comparaison des réponses fréquentielles (effet « passe-bas ») d'une diode Schottky avec deux « spindioles » (MTJ) en échelle logarithmique. (b) Réponses fréquentielles des deux états stables de la spindiode, pour deux configurations des couches magnétiques, parallèle (P) et anti-parallèle (AP). L'efficacité décroît en suivant une réponse d'un filtre passe-bas de premier ordre pour la technologie classique tandis que la spindiode ne fait que passer à un plateau de quelques dB inférieur.

- Le transport par effet tunnel qui est dominant dans les MTJ, n'est pas directement affecté par la température (contrairement aux diodes PN, Schottky... dont la conduction est liée à l'activation thermique, et dont la non-linéarité est limitée par la température ambiante). De plus, pour les MTJ, l'effet tunnel dépend du spin des électrons, ce qui représente un degré de liberté supplémentaire et prometteur pour améliorer encore la non-linéarité et la responsivité en courant du composant à l'avenir.

Avec du recul, ces travaux semblent avoir eu un impact sensible auprès de la communauté spintronique et la communauté radiofréquence, et la proposition d'utiliser cette technologie MTJ comme « spindiode radiofréquence » est devenue une thématique de recherche à part entière. Des collègues de divers pays nous ont ainsi rapportés avoir obtenu des financements spécifiques à cette thématique suite à nos articles. Nous ne sommes aujourd'hui plus actifs sur cette thématique, pourtant, nos travaux continuent de générer chaque année près de 80 citations.

Si je devais à nouveau travailler dans ce domaine, je chercherai à développer une collaboration avec l'équipe Yoshishige Suzuki (Osaka University, Japan)⁷ qui est très active dans le domaine, mais qui n'a jamais cherché à optimiser ses jonctions tunnel magnétiques pour un fonctionnement zero-bias. Je serai aussi très curieux d'évaluer le potentiel des jonctions tunnel magnétiques à transfert de couple « Spin Torque Transfer » que la fonderie TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Taiwan) s'est mise à commercialiser⁸. Comme TSMC fabrique bon nombre de circuits RF et 5G⁹, il suffirait probablement de peu pour intégrer directement des spindiodes aux circuits CMOS RF actuels.

1.2. Conception de circuits intégrant des diodes à effet tunnel [C14, C30, J14]

L'exploration des technologies de diodes et la recherche des meilleures non-linéarités à zero-bias (Figure 7) m'a donné l'occasion d'interagir avec des dizaines d'équipes de recherche à travers le monde pour obtenir des compléments d'informations techniques sur leurs composants. Après avoir identifié la diode détenant le « record du monde » (Backward tunnel diode de l'équipe de P. Fay, Université de Notre Dame, IN, USA), nous avons initié une collaboration avec cette équipe dans le but de fabriquer un redresseur RF basé sur cette technologie et démontrer la viabilité de notre démarche.

A cette occasion, j'ai co-encadré Carlos Lorenz, un étudiant en maîtrise qui rejoint la dynamique de notre projet en 2013. Il est brillamment monté en compétence sur la conception radiofréquence de circuits rectifieurs et a très rapidement intégré l'enjeu de la conversion RF->DC à basse puissance. Grâce au circuit qu'il a conçu d'après nos échanges journaliers, nous avons démontré ce qui est encore considéré aujourd'hui comme le meilleur redresseur jamais réalisé (Figure 16) pour des puissances inférieures à 1μW.

⁷ <http://suzukilab.jp.org/>

⁸ <https://research.tsmc.com/english/research/memory/mram/publish-time-1.html>

⁹ <https://rf.tsmc.com/>

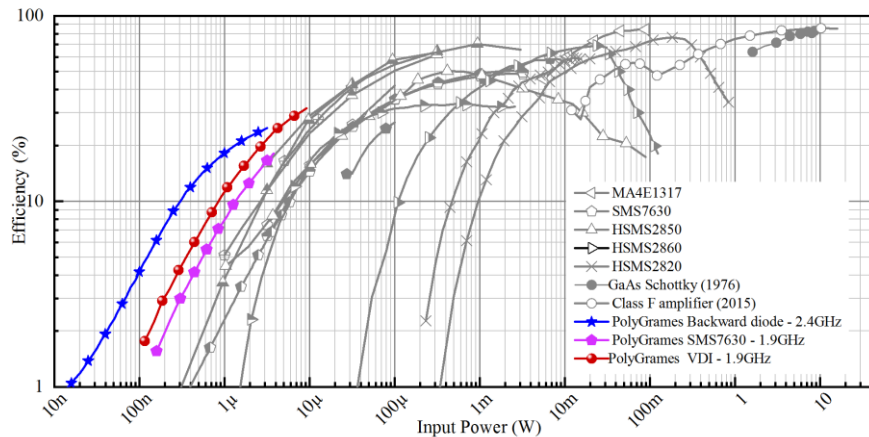


Figure 16 : Résultats mesurés de la backward tunnel diode (courbe bleue à gauche) comparés à l'état de l'art des autres diodes. [J14]

Nous avons également montré que la responsivité en courant pouvait atteindre un ordre de grandeur de plus que les technologies Schottky (projection prudente) rien qu'en optimisant la proportion d'aluminium dans l'anode de la diode tunnel fabriquée par l'Université de Notre-Dame (Figure 17). Cela offrirait un énorme potentiel à la fois pour la récolte d'énergie par ondes radio et pour la détection de puissance en général, c'est-à-dire la sensibilité des récepteurs radio dans le domaine des communications sans-fil.

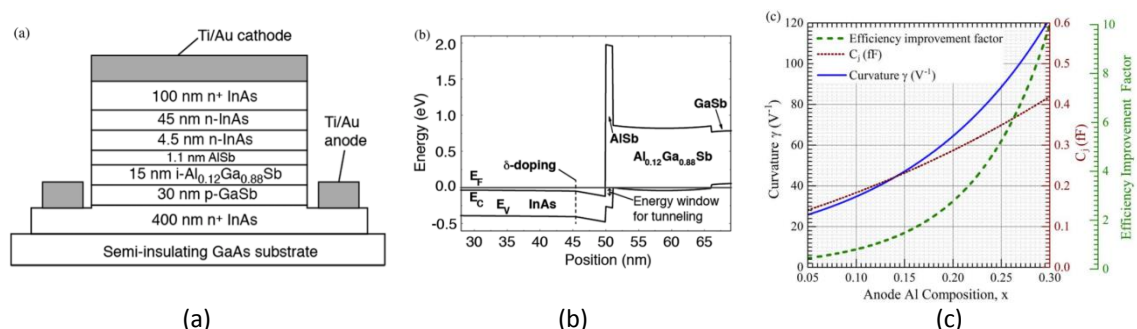


Figure 17 : (a) Schéma de la section transversale de la backward tunnel arrière à hétérostructure utilisée dans ce travail et fabriquée par l'Université de Notre Dame. La petite fenêtre d'effet tunnel se traduit par des caractéristiques courant-tension fortement non linéaires et une responsivité élevée. (b) Diagramme de bande d'énergie correspondant. (c) Amélioration attendue du rendement de conversion de puissance pour différentes compositions de l'anode. La section de la jonction de la diode a été calculée pour maintenir une résistance de jonction de 12,5 k Ω . Tiré de [J14].

La publication de ces travaux a eu beaucoup d'impact dans la communauté, c'est aujourd'hui mon troisième article le plus cité. Enthousiasmé par ces résultats prometteurs, beaucoup de chercheurs tentent de se procurer des diodes tunnel, mais celles-ci sont très difficiles à trouver. Du côté de l'université de Notre-Dame, l'absence de financement pour ce projet a malheureusement empêché toute poursuite des recherches, et notamment toute vérification de la projection de la Figure 17-c. Cela dit, s'il m'était donné de pouvoir continuer de travailler avec l'équipe de Patrick Fay sur de nouveaux dispositifs optimisés, j'aurais à cœur de démontrer leur pertinence pour de nombreuses applications radiofréquences.

1.3. La technologie thermo-ionique (diodes classiques), au service de notre modèle basse puissance, puis utilisées à des températures ambiantes froides (hiver) pour augmenter la non-linéarité [C39, C42, J25, J28, C12, C17, C20, J8]

Parallèlement à la quête du dispositif redresseur idéal, nous avons cherché avec Carlos à démontrer à la communauté la pertinence de notre approche en proposant un modèle un peu plus abouti que celui de l'équation 1.2, et en l'appliquant aux diodes Schottky. Nous avons ainsi proposé une méthodologie pour synthétiser un redresseur à diode Schottky à partir des spécifications de l'application. Ce partage de méthodologie nous a donné une grande visibilité auprès de la communauté.

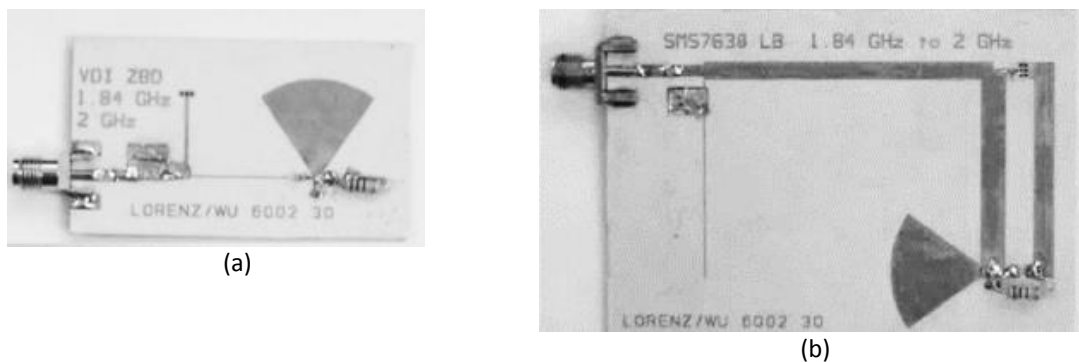


Figure 18 : (a) Circuits de rectification à 1,9 GHz utilisant la diode CVI ZBD et (b) la diode SMS 7630. Les résultats de ces circuits sont présentés en Figure 16 en rouge et violet, respectivement. [J15]

En 2015 Carlos a décroché un CDI auprès de MDA, la plus importante entreprise de satellite Canadienne. De mon côté, j'ai été recruté par l'Université de Bordeaux. Fort heureusement, le projet scientifique « Integrated Micropower Generation Through Collaborative Conversion of Hybrid Ambient Energy for Wireless Sensor Platform » que j'ai co-écrit avec Ke Wu a été financé en 2015 par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, ce qui a permis de financer un nouveau doctorant : Xiaoqiang Gu, que j'ai aussi eu l'honneur de co-encadrer. Ne pouvant être physiquement présent, il fut plus long d'aider Xiaoqiang à monter en compétences sur les aspects expérimentaux. Néanmoins, dans la continuité des travaux de Carlos, Xiaoqiang a merveilleusement bien repris en main le modèle de redressement aux faibles puissances et l'a amélioré pour prendre plus correctement en compte les effets de la température ambiante. Selon l'équation 1.2 présentée au premier chapitre, la responsivité en courant est inversement proportionnelle à la température. Xiaoqiang a donc conçu deux circuits (Figure 17) de redressement adaptés à cette nouvelle application et a développé seul la partie expérimentale pour valider cette hypothèse (Figure 19).

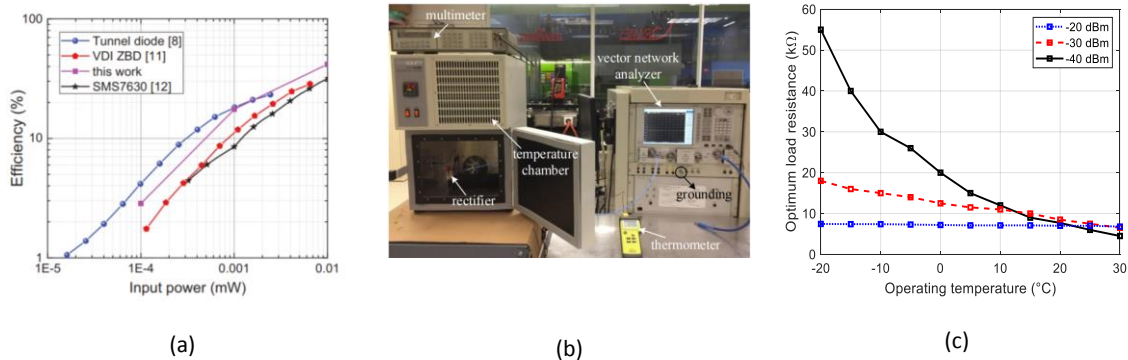


Figure 19 : (a) Selon l'équation de Shockley, la responsivité en courant (et donc l'efficacité de redressement à faible puissance) est inversement dépendante de la température de fonctionnement. Selon cette hypothèse, il est donc possible d'obtenir des performances supérieures à l'état de l'art sans utiliser une technologie alternative. (b) Les mesures sont faites avec une chambre climatique. Le signal RF est généré par un analyseur de réseau en mode CW (excitation mono-harmonique), ce qui permet de surveiller le coefficient de réflexion du montage en fonction de la température. (c) Valeurs des résistances de charge utilisées dans les mesures. [J25]

L'hypothèse n'a permis qu'une amélioration d'un facteur 2. En effet, à mesure que la température de la diode diminue, la résistance de jonction augmente avec la responsivité. Pour maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire de faire correspondre (« matcher ») la résistance de charge (load resistor) avec la résistance de jonction d'une part, mais aussi d'adapter l'impédance RF de la diode à celle du générateur 50Ω , ce qui n'a malheureusement pas été possible dans le cas des mesure reportées ici, raison pour laquelle le gain en efficacité est relativement faible. Notons qu'un réseau d'adaptation à très fort Q serait nécessaire pour adapter une résistance de jonction de $50 \text{ k}\Omega$ à un générateur de 50Ω .

Si j'avais la possibilité de retravailler sur cette hypothèse, je serais curieux d'explorer la pertinence de l'association d'une antenne de très haute impédance avec une diode Schottky à -10°C (haute résistance de jonction et forte responsivité en courant).

1.4. Conversion collaborative ou hybride de plusieurs énergies [C18, C21, C25, C32, J10; J18-J19, J23].

Un autre enseignement que nous avons tiré de notre modèle analytique du redresseur à faible puissance, est que le rendement dépend linéairement de la puissance d'entrée. Cela tendait à signifier que « $1+1 = 4$ » : en doublant la puissance d'entrée, le rendement de conversion double, la puissance de sortie quadruple.

Nous avons étudié cette hypothèse dans le cadre d'un rapprochement avec l'équipe de Fabien Formosa et Adrien Badel (laboratoire SYMME à Annecy, France), qui a abouti sur une collaboration informelle autour de la conversion d'énergie hybride (radiofréquences + vibrations mécaniques). Dans ce cadre, Weiqun Liu, doctorant du laboratoire Annécien est venu séjourner pendant un mois à Montréal, et a intégré la dynamique de notre équipe, en tandem avec Carlos. Leurs efforts expérimentaux ont permis de démontrer pour la première fois le potentiel de la conversion synergique d'énergies au sein d'une même diode. Ce principe est extrêmement pertinent pour les applications telles que le « Structural Health Monitoring » (SHM) d'ouvrage d'art, par exemple. Cette hypothèse est donc validée aux faibles puissances : la zone jaune de la Figure 20 montre des

efficacités à plus de 150% en comparaison avec l'utilisation d'une seule énergie, tandis que la Figure 21 rapport les stratégies d'évaluation de la partie vibratoire. En plus d'une efficacité de conversion plus élevée, la résilience de la production de courant continu est augmentée car les deux énergies ambiantes ne sont pas corrélées.

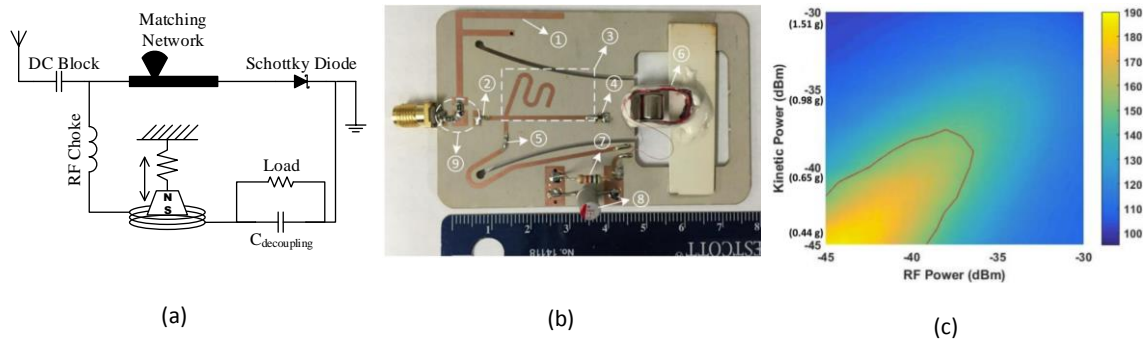


Figure 20 : (a) Schéma de principe, (b) prototype et (c) efficacité de conversion en fonction de l'accélération et de la puissance RF. Le circuit n'utilise qu'une seule diode Schottky (4) pour conversion synergique des deux énergies. L'antenne (1) est une « Printed Inverted F antenna » dont les courants basses fréquences sont bloqués par un condensateur de couplage (2). Le circuit d'adaptation d'impédance RF (3) vient faire correspondre l'impédance de l'antenne avec celle de la diode à la fréquence de fonctionnement, tandis que la self de choc RF (5) empêche le signal RF haute fréquence d'interférer avec le générateur cinétique. La cathode de la diode (4) est connectée au plan de masse afin de maximiser le courant RF en son sein. Le courant BF est généré par le couple aimant-enroulements (6) et circule à travers le condensateur de découplage (8) pour rejoindre la diode. Enfin, le courant DC rectifié par la diode à partir des courants RF et BF est absorbé par la résistance de charge (7).[J18]

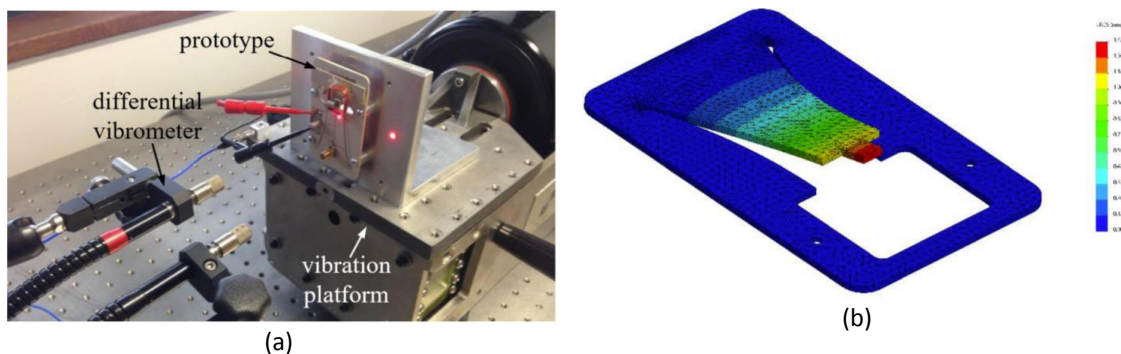


Figure 21 : (a) Banc de mesure pour le résonateur mécanique et (b) simulation par méthode des éléments finis (FEM) de la poutre vibrante découplée dans le substrat diélectrique. Ces deux illustrations proviennent de l'équipe du SYMME à Annecy [56][J19]

Ce concept a relativement bien été reçu par la communauté avec un peu plus d'une centaine de citations. Il pourrait être néanmoins intéressant de pousser le niveau de TRL du concept pour que le domaine du SHM se l'approprie dans le cadre de réseaux de capteurs autonomes. Il serait alors utile de pousser les investigations pour obtenir un gain en efficacité au-delà du microwatt.

1.5. Rectenna isotropique à fort gain [C19, C26-C27, C36-C37; C41, C43-C44, J21, J31]

Sans aller jusqu'à capter d'autres énergies que les ondes électromagnétiques, il est possible d'obtenir le même comportement (plus de puissance pour un meilleur rendement) en augmentant le gain antennaire d'une rectenna (**rectifying antenna**). Malheureusement, si la puissance reçue dans une direction peut être augmentée par une antenne plus directive, cela se

fait au détriment de la couverture angulaire (angles θ, φ) c'est-à-dire la perte de la capacité à capturer l'énergie électromagnétique ambiante de manière isotropique.

$$P_{ANT}(\theta, \varphi) = S(\theta, \varphi) \cdot \frac{\lambda_0^2}{4 \cdot \pi} \cdot D(\theta, \varphi) \cdot \eta_{rad} \quad (1.7)$$

Ainsi, dans l'équation (1.7), la puissance reçue P_{ant} à la fréquence $f_0 = C/\lambda_0$ n'augmente que si la directivité D est accrue dans la même direction que celle de la provenance de la densité de puissance S (η_{rad} correspondant à l'efficacité de rayonnement de l'antenne et C à la vitesse de la lumière).

A l'initiative de Tan Fu Vuong de l'université de Grenoble qui m'a proposé de participer à l'encadrement d'une thèse, nous avons lancé en 2016 des travaux visant à explorer ce potentiel et à résoudre la perte d'isotropie. J'ai ainsi eu la chance de co-encadrer les travaux d'Erika Vandelle intitulés « Exploration of antenna and passive beamforming techniques for wireless energy harvesting and transfer ». Dans ce cadre, nous avons cherché à faire cohabiter isotropie et gain d'efficacité à l'aide de techniques de modelage de faisceaux passifs. Nous avons tout d'abord cherché une base commune pour évaluer, quantifier et comparer les performances de toutes rectennas (efficacité de redressement, capture de la diversité des signaux ambiants en direction et en polarisation). Erika a proposé une nouvelle Figure-de-Mérite à partir du modèle de conversion RF-DC aux faibles puissances.

Ainsi, pour de faibles puissances et à une fréquence donnée, la probabilité pour une rectenna d'intercepter un signal ambiant venant d'un angle d'incidence et d'une polarisation inconnue et de le convertir en puissance DC peut être associée à la capacité de récolte (Harvesting Capability), donnée en %.stéradians (%.sr) :

$$C_{harvest}(P_{RF}) = \eta_{(RF \rightarrow DC)_{max}} \overline{\Gamma_p} \cdot \frac{\Omega_a}{4} \quad (1.8)$$

Avec $\eta_{(RF \rightarrow DC)}$ défini par l'équation (1.2), Γ_p représentant le décalage de polarisation (polarization mismatch) moyen et l'angle solide Ω_a représentant la couverture angulaire de la rectenna, en approximant le diagramme de rayonnement à 100% pour les régions dépassant la mi-puissance de son faisceau (half power beamwidth) et 0% sinon. Notons au passage que comme l'angle solide d'une sphère est de 4π , la capacité de récolte d'une rectenna ne peut dépasser $100 \cdot \pi$ steradian.

Pour maximiser cet indicateur de performance, il convient donc de maximiser le rendement de conversion, tout en gardant une couverture spatiale maximum. Nous avons donc développé un système de récupération d'énergie multiports permettant de combiner la puissance RF de plusieurs antennes avant le processus de redressement, sans pour autant réduire la couverture spatiale du système. Pour ce faire, Erika a associé des réseaux d'antennes à des réseaux interférométriques passifs (matrices de Butler miniaturisées) pour obtenir un diagramme de rayonnement multidirectionnel à fort gain, tout en concentrant l'énergie RF venant de directions différentes dans des circuits de conversions RF-DC différents (Figure 22). Cette solution inspirée des systèmes de radar, aboutit à une haute efficacité de conversion RF-DC ainsi qu'à une

couverture spatiale optimale. Grâce à ce prototype, nous avons ainsi démontré la plus grande capacité de récolte (Harvesting Capability) de l'état de l'art (Figure 23).

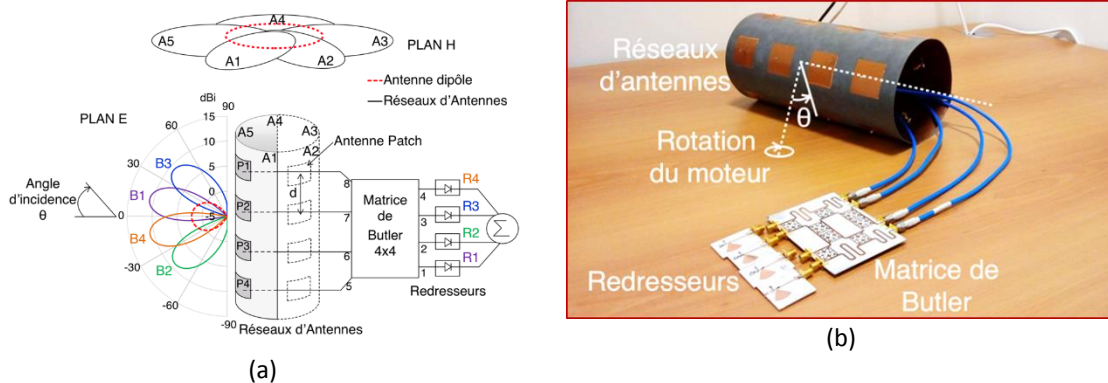


Figure 22 : (a) Principe de fonctionnement de la rectenna isotropique à fort gain et (b) prototype réalisé. Grâce au circuit interférométrique multiport (ici une matrice de Butler), les puissances d'un faisceau captées par plusieurs antennes sont additionnées et dirigées vers une unique diode, permettant ainsi une augmentation de l'efficacité de redressement en comparaison avec les rectenna qui couplent une diode à chaque antenne. [J21]

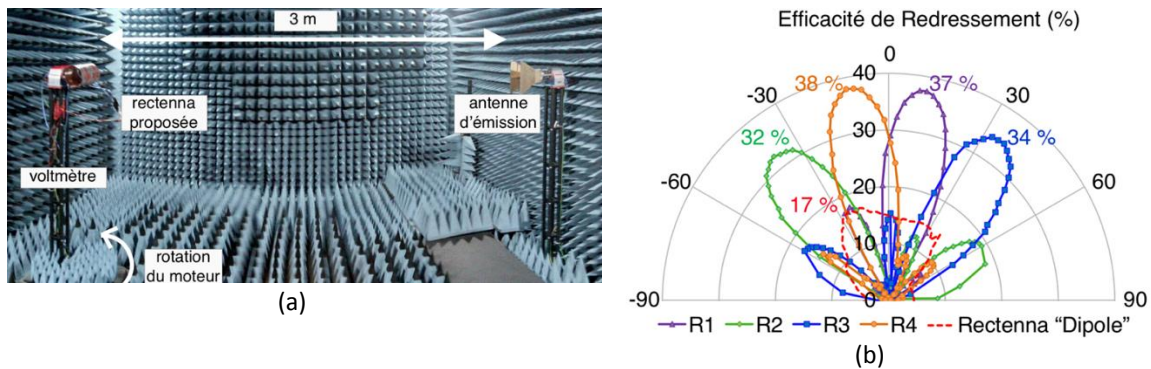


Figure 23 : (a) Banc de mesure en chambre anéchoïque et (b) mesure d'efficacité pour le quatre faisceaux (beam) de notre rectenna, comparée à une rectenna utilisant un simple dipôle. La densité de puissance considérée est de $S = 0,45 \mu W.cm^{-2}$, aboutissant à une puissance générée de $4,6 \mu W$ DC pour la rectenna utilisant un dipôle, et à une puissance DC de $16 \mu W$ pour le prototype proposé. La majorité des résultats pour cette thématique a été obtenue au laboratoire IMEP-LAHC de Grenoble. [J21]

Cette thématique de travail s'est arrêtée en 2019 avec la fin de la thèse d'Erika. Il semble néanmoins qu'une poursuite des travaux détiendrait un fort potentiel dans les directions suivantes :

- Evaluation du rapport pertes/dimensions avec l'augmentation de la fréquence, ce qui pourrait permettre aussi d'utiliser d'autres types de réseaux interférométriques
- Ajouter un récepteur « wake-up » pour déterminer l'angle d'incidence et en faire un capteur autonome
- Utilisation du même principe pour construire un réseau rétro-directif permettant les communications « backscattering »
- Il serait enfin intéressant de pousser la figure de mérite pour prendre en compte le volume ou la surface de la rectenna, de manière à obtenir un critère de comparaison universel permettant de prendre en compte la longueur d'onde de fonctionnement. Cette évolution permettrait par exemple, de montrer de manière élégante pourquoi le GHz est la bande idéale pour faire de la capture d'énergie électromagnétique ambiante.

1.6. Energie radiofréquence ambiante [C46-C48, C50, J29] et exploration de circuits de conversion à plus haute fréquence [C6-C7, C15, C16, C28, J34]

Parallèlement aux grandes directions de l'axe 1, il a semblé utile de vérifier l'amplitude des puissances radiofréquences disponibles dans l'environnement urbain. Ce type de données avait été initialement tiré de la littérature pour construire le modèle à basse puissance. Il est donc intéressant de vérifier si le modèle de rectification s'applique dans des conditions réelles. Remarquons que bien qu'ayant proposé cette étude et ayant participé à l'interprétation des résultats, les résultats ont été obtenus par Xiaoqiang, Louis Grauwin (en stage de PFE sous sa direction), et David Dousset (associé de recherche au laboratoire Poly-Grames). Par opposition aux mesures stationnaires de la littérature, nous avons choisi des mesures dynamiques. Pour réaliser cette campagne de mesure de puissances à l'analyseur de spectre, une antenne couvrant la bande 400 MHz – 2700 MHz a été montée sur un véhicule qui a parcouru la ville de Montréal.

Les résultats confirment les niveaux de puissance attendus ainsi que la validité de nos modèles basses puissances pour la conversion RF-DC d'énergie radiofréquence ambiante. Les bandes de communication cellulaires (GSM/LTE850 et LTE700) semblent être les plus appropriées pour Montréal (et par extension, potentiellement pour les villes nord-américaines). Les niveaux de puissances moyens les plus élevés des bandes GSM/LTE850 et LTE700 sont de -35,50 dBm et -36,95 dBm, respectivement. En revanche, dans les zones suburbaines où les signaux de communications cellulaires sont généralement faibles, la bande de la télévision numérique, avec un niveau de crête de -47,68 dBm, est la plus importante de toutes les bandes de fréquences.

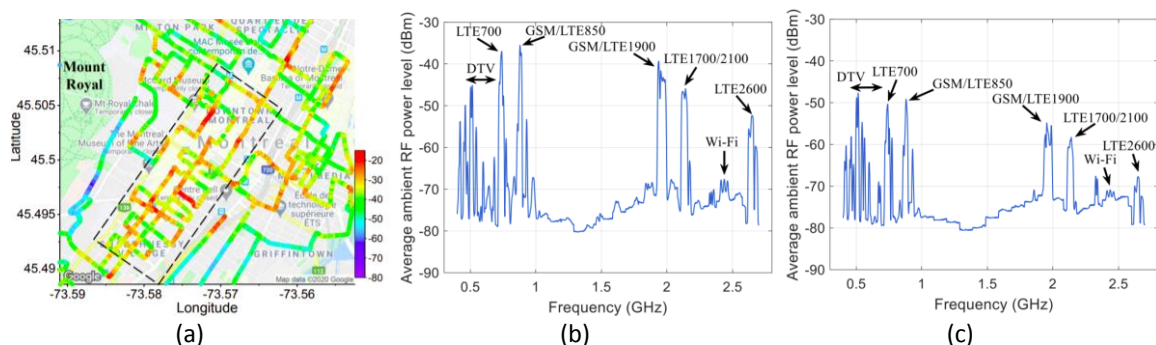


Figure 24 : (a) Niveaux de puissances mesurés sur la bande GSM/LTE850 (4G) au centre de Montréal. (b) Niveaux de puissances moyennes typiques au centre-ville et (c) en zone suburbaine (droite).[J29]

Parallèlement aux grandes directions de l'axe 1, il nous a aussi semblé intéressant d'explorer des rectenna à plus haute fréquence, soit par anticipation des bandes millimétriques de 5G et 6G, soit parce qu'elles pourraient donner lieu à de nouvelles applications, comme pour l'exemple ci-dessous. Dans cet exemple, Carlos et moi avons développé une rectenna à très faible encombrement capable d'être intégrée sur des micro-robots de taille millimétrique. La fréquence de 94 GHz a été choisie comme le meilleur compromis entre la taille de l'antenne de réception et la puissance d'émission disponible car nous disposons à Montréal d'un klystron d'une puissance de 100 W à cette fréquence. Partant du modèle de la diode VDI que j'ai développé à partir de mesures jusqu'à 110 GHz, Carlos a conçu la rectenna en technologie coplanaire n'utilisant qu'une seule couche de métallisation. Le prototype de redresseur présente une efficacité maximale de 37,7 % à 90 GHz mesurée à une puissance d'entrée de 3 dBm et une largeur de bande à demi-efficacité de 22 %. (Figure 25).

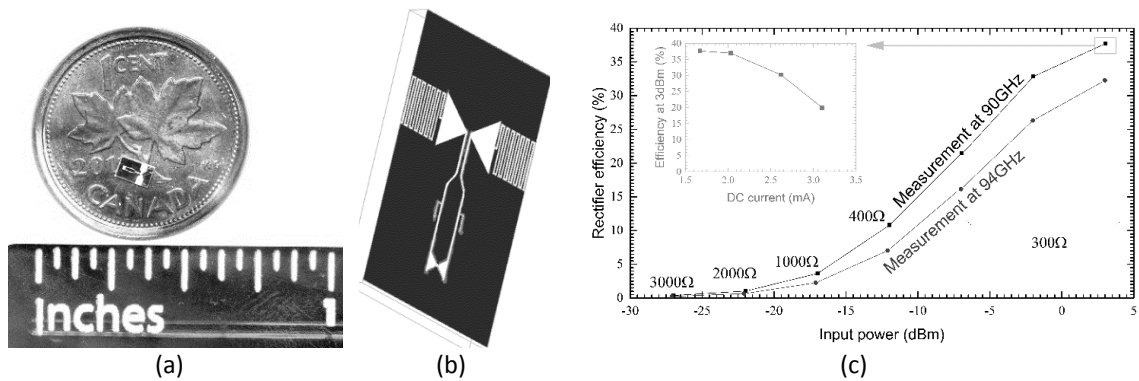


Figure 25 : Photographie de la rectenna construite sur un substrat d'alumine (gauche), vue 3D de la rectenna d'une surface totale de 5mm^2 (centre). A droite : Rendement du redresseur en fonction de la puissance d'entrée à 90 GHz et 94 GHz (mesure par sonde calibrée à l'entrée du circuit redresseur), la charge résistive optimale est indiquée pour chaque point de mesure. Dans l'encart, le rendement est représenté en fonction du courant continu dissipé dans la charge, pour un signal RF de 3 dBm à 90 GHz.[C15]

Le circuit a été particulièrement difficile à fabriquer avec une tolérance de fabrication suffisante, mais le résultat obtenu constitue encore aujourd'hui le record d'efficacité à cette fréquence extrêmement élevée. Avec mon départ de Montréal, nous n'avons malheureusement pas pu poursuivre les mesures et démontrer la transmission sans fil. Il serait toutefois intéressant d'accompagner ce projet un peu plus loin, jusqu'à l'alimentation de robots réels, ce qui permettrait de justifier tout le potentiel de cette technologie.

1.7. Rétrodiffusion harmonique et pertes de conversion [C22-C24, C42, C45, J22, J28, J34]

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, il est parfois préférable pour un objet connecté de communiquer en retransmettant l'harmonique d'un signal disponible plutôt que de le redresser en courant continu qui sera à son tour utilisé pour générer un nouveau signal radiofréquence (Figure 26). Comme la technologie non-linéaire nécessaire pour cette opération est très proche du redressement RF, nous avons cherché avec Xiaoqiang à étendre en 2017 notre modèle de conversion aux basses puissances en vue d'explorer la rétrodiffusion harmonique (harmonic backscattering). Celle-ci a été présentée dans équation (1.6) au chapitre précédent.

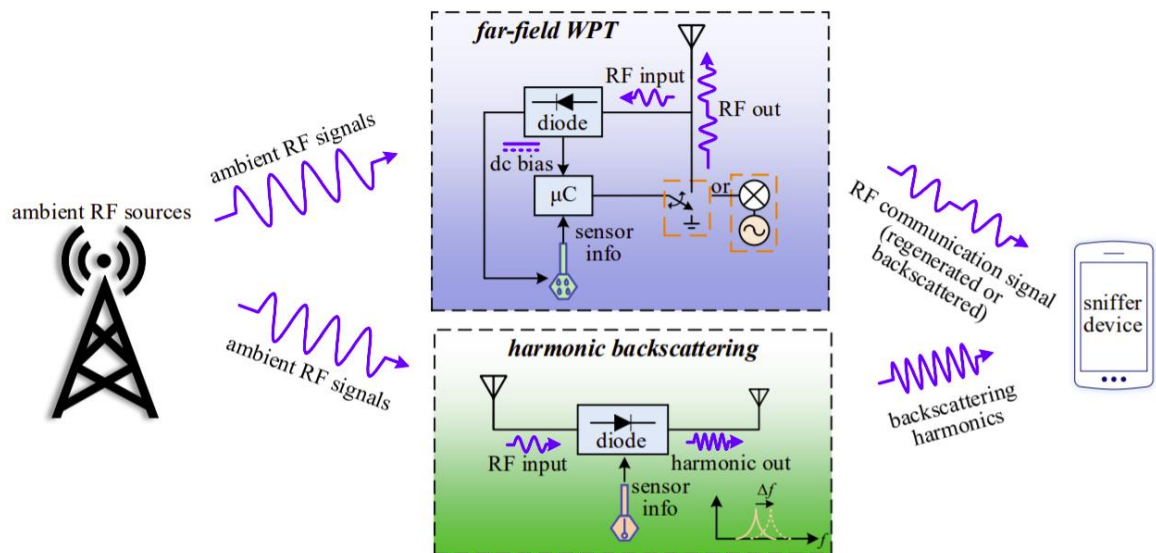


Figure 26 : La capture et conversion d'énergie électromagnétique ambiante en puissance DC ou en puissance harmonique sont deux stratégies utilisant un processus non linéaire (=diode).[J34]

La Figure 27 (a) présente une topologie de circuit typique de rétrodiffusion harmonique basée sur une seule diode Schottky. Les stubs quart-d'onde en court-circuit et en circuit ouvert sont placés de chaque côtés de la diode pour permettre de fonctionner en « 2-ports » (un port pour l'entrée et un port pour la sortie). Lorsque le signal fondamental entre dans le circuit, celui-ci voit un circuit ouvert RF (quart d'onde court-circuité) et atteint l'anode de la diode, tandis que la cathode de la diode voit un court-circuit RF en raison des longueurs soigneusement conçues par les deux stubs. Par conséquent, pour le signal fondamental, le circuit équivalent peut être simplifié comme représenté à la Figure 27 (b), où la diode absorbe la puissance. Après la conversion de fréquence de la composante fondamentale en composante de seconde harmonique, la diode peut être considérée comme une source d'énergie. À la fréquence de la deuxième harmonique, le stub court-circuité reste un court-circuit. Le circuit équivalent de la Figure 27 (c) illustre la situation de la diode agissant comme une source d'énergie de seconde harmonique.

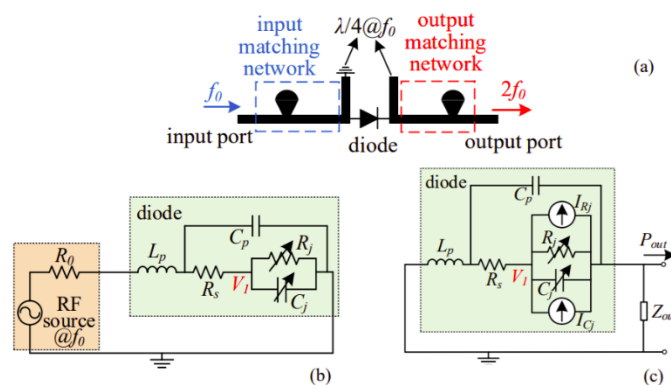


Figure 27 : (a) Topologie typique d'un circuit de rétrodiffusion des harmoniques. (b) La diode absorbe la puissance d'entrée RF injectée dans le circuit. (c) La diode devient à son tour une source de puissance à la deuxième harmonique pour l'impédance Z_{out} . [J34]

Contrairement au processus de rectification (conversion RF->DC), la puissance de sortie n'est pas générée uniquement par la résistance non-linéaire R_j , mais aussi par la capacité non-linéaire C_j dans le mode de fonctionnement « transpondeur harmonique » (conversion RF->2° harmonique).

Dans ce mode de fonctionnement, le courant entrant se divise entre R_j et C_j , conduisant à un point de fonctionnement à plus faible efficacité (Figure 28). En outre, le courant généré à la deuxième harmonique est sujet à plus de pertes car à plus hautes fréquence. Au résultat, le rendement de la diode SMS7630 prise en exemple est moins bon en mode transpondeur harmonique pour de faibles harmoniques, mais permet tout de même de valider le concept.

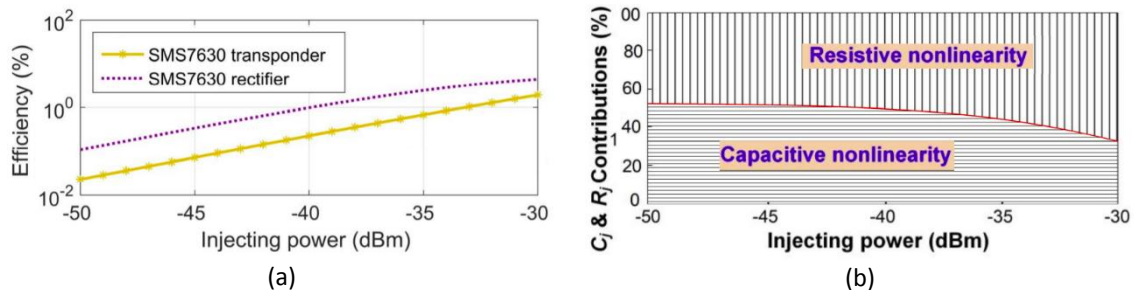


Figure 28 : (a) Comparaison des performances de conversion RF->DC et de conversion RF->2^o harmonique dans la diode SMS7630 en simulation « balances harmoniques ». (b) Contribution des non linéarités de la capacité de jonction et de la résistance de jonction dans la diode SMS7630 pour une puissance allant de -50 à -30 dBm à la fréquence de 3,5 GHz [J28].

Pour démontrer le potentiel de la rétrodiffusion harmonique, Xiaoqiang a proposé une architecture pour 3,5 GHz (bande 5G) basée sur un diplexeur de manière à utiliser une même antenne (bi-bande) pour la captation du signal à 3,5 GHz et pour la ré-émission de la deuxième harmonique à 7 GHz. Un doctorant externe au projet, Srinaga Nikhil, a fourni une antenne à fente spirale omnidirectionnelle à polarisation circulaire fonctionnant sur les deux bandes du circuit de conversion harmonique, de manière à construire un transpondeur complet et mesurer sa portée (Figure 29).

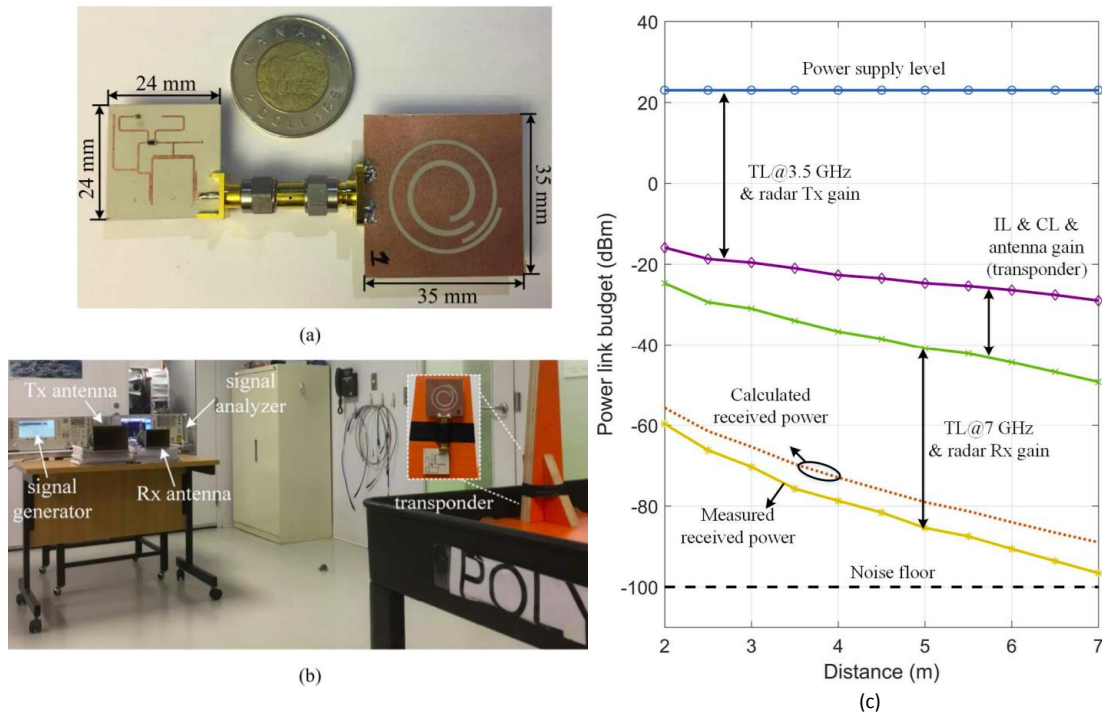


Figure 29 : (a) Prototype du transpondeur harmonique avec les parties circuit et antenne, conçues pour être intégrées « dos-à-dos ». (b) Banc de test du transpondeur avec les antennes TX d'illumination et RX de mesure. (c) Mesure du bilan de liaison lorsque le transpondeur est placé à une distance comprise entre 2 et 7 m de l'illuminateur et du récepteur. La conception et les mesures de cette thématique ont été menées au laboratoire Poly-Grames par Xiaoqiang [J28].

Le prototype passif a ainsi été illuminé par une puissance de 25 dBm, et sa rétro-diffusion à la deuxième harmonique a pu être mesurée jusqu'à 7 m, soit 14 m d'aller-retour, démontrant le potentiel de communication sans batterie par harmonique.

Comme montré sur la Figure 28, la même diode peut réaliser des fonctions de rectification ou de génération d'harmonique. Nous avons voulu intégrer les deux fonctions dans le même circuit reconfigurable. Pour ce faire, nous avons ajouté un interrupteur sur le stub en circuit ouvert près du port de sortie pour basculer le mode de fonctionnement (Figure 30). Ainsi, si l'interrupteur est fermé, la sortie de rétrodiffusion harmonique sera court-circuitée et le circuit fonctionnera en conversion RF->DC. Par contre, si l'interrupteur est ouvert, le circuit redevient identique au mode précédent, en conversion RF->2° harmonique. Il est à noter que la majeure partie de l'espace du circuit (> 90 %) de cette conception reconfigurable a été partagée par les deux fonctions de WPT en champ lointain et de rétrodiffusion harmonique ce qui représente *in fine* un gain de place très utile.

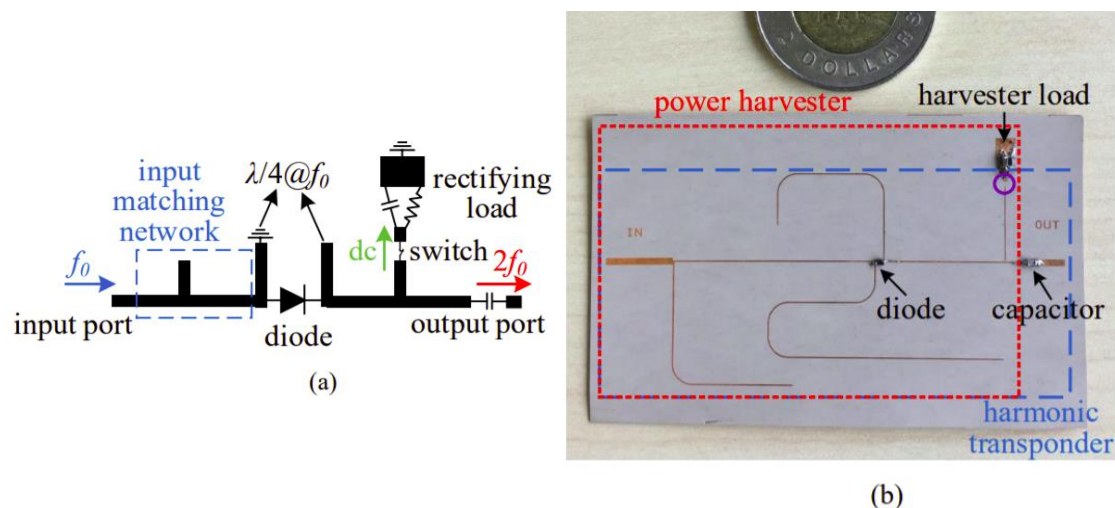


Figure 30 : Circuit non linéaire reconfigurable pour la récupération d'énergie électromagnétique (WPT en champ lointain) et la rétrodiffusion harmonique : (a) schéma de principe et (b) prototype [C45].

Les travaux sur ce circuit reconfigurable se sont arrêtés avec la fin de la thèse de Xiaoqiang. Malgré tout, j'espère pouvoir bientôt continuer son développement pour construire un capteur sans fil semi-passif qui fonctionnerait selon le principe suivant : en utilisant un interrupteur « normally ON », le circuit serait par défaut en mode redresseur, permettant de charger un condensateur/super-capacité à travers un DC/DC. Dès que la charge serait suffisante, un microcontrôleur pourrait numériser l'état d'un capteur, puis rétromoduler l'information sur la seconde harmonique en utilisant l'interrupteur.

1.8. Amplificateur à rétro-diffusion harmonique un port [C40, C49, J16, J27]

Je me souviens de l'émerveillement que j'ai eu pour la diode tunnel la première fois que je l'ai rencontrée. Un même composant capable à la fois de fonctionner comme interrupteur, comme mélangeur, et comme amplificateur a de quoi faire rêver plus d'un électronicien. Si l'on ajoute ces capacités à la démonstration de la conduction par effet tunnel, on comprend bien pourquoi un prix Nobel lui a été dédié, et pourquoi ce composant a fait tellement de bruit quand il a été inventé

[57, 58]. Malheureusement, ce composant a eu une carrière relativement courte : une décennie après son apparition, il fut détrôné par le transistor. L'électronique des années 70 était celle des télécommunications, nécessitant des blocs de fonctions 2-ports permettant d'avoir une entrée et une sortie avec une bonne isolation entre les deux ports, ce qui est assez difficile à réaliser avec un composant 1-port. Le contexte est aujourd'hui différent avec les objets connectés, qui sont des systèmes 1-port.

Je rêvais de travailler avec la résistance négative de ce composant depuis longtemps, mais ce sont les travaux d'un collègue de Georgia tech, qui m'ont motivé à passer à l'action. A l'occasion d'un travail de Yangping sur la synthèse d'impédance à l'aide d'un guide d'onde périodiquement chargé par des diodes varactors, nous avons donc implémenté un « backward amplifier » capable de sortir de l'abaque de Smith (Figure 31).

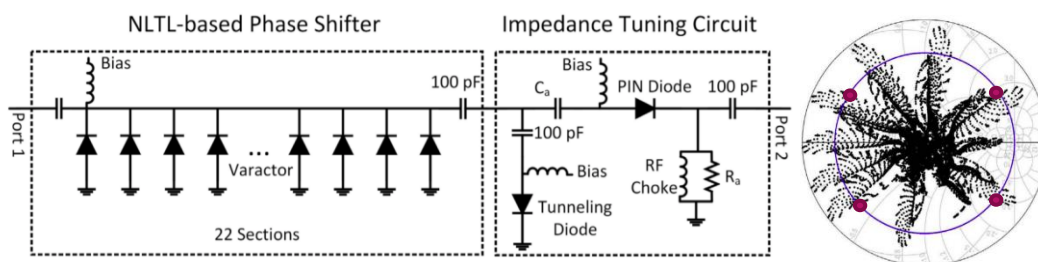


Figure 31 : Le tuner est constitué de deux parties : une impédance variable et un déphaseur qui permet de faire tourner le point d'impédance autour de l'abaque de Smith. A droite, tous les points noirs correspondent à des impédances mesurées pour différentes configurations du tuner pour la seule fréquence de 5 GHz. Les points rouges correspondent aux quatre configurations qui pourraient être utilisées pour une possible rétro-modulation en QAM (Quadrature Amplitude Modulation).[116]

Ces travaux se sont arrêtés avec la fin de la thèse de Yangping. Des développements sont en cours en partenariat avec l'université d'Aveiro pour poursuivre le développement de l'idée d'un circuit de rétro-modulation en phase et en amplitude.

Peu après mon arrivée à Bordeaux, Francisco Amato, étudiant en fin de thèse au sein l'équipe de Georgia tech s'est rapproché de moi pour postuler à une bourse de post-doctorat Marie Curie dans le cadre d'un projet sur l'agriculture de précision utilisant les diodes tunnel. A cette occasion, nous avons commencé des travaux sur ce composant au laboratoire IMS. J'ai invité Francesco à séjourner à Bordeaux à deux reprises, à la suite de quoi nous avons publié un article fondateur sur le potentiel des diodes pour les transpondeurs harmoniques à rétrodiffusion amplificatrice (amplified harmonic backscattering). Le potentiel de ce composant est illustré dans la Figure 32 : à 0 V bias (Figure 32-b), le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la fréquence fondamentale est inférieur à zéro car l'impédance de la diode est positive. Dans le même temps, on peut voir le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la 2^e et la 3^e harmoniques plus bas que -30 dB, ce qui correspond à une réponse plutôt linéaire. A 0,16 V bias (Figure 32-c) le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la fréquence fondamentale est maintenant positif, correspondant à une résistance différentielle négative. Dans le même temps, on peut voir le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la 2^e et la 3^e harmoniques qui ont augmenté de près de 30 dB, ce qui correspond à une réponse plutôt non-linéaire. La fréquence de coupure du composant étant de quelque centaine de MHz, la réponse est rapidement atténuée aux fréquences plus élevées. Enfin, à 0,23 V bias (Figure 32-d), le coefficient

de réflexion de la fréquence fondamentale à la fréquence fondamentale reste supérieur à zéro car l'impédance différentielle de la diode est positive. Dans le même temps, on peut voir le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la 2^e harmonique revenir quasiment à son niveau de départ de -30 dB, ce qui correspond à une dérivée seconde plutôt faible, selon l'équation (1.5), tandis que le coefficient de réflexion de la fréquence fondamentale à la 3^e harmonique, démontre une forte génération de la 3^e harmonique due à un coefficient de la dérivée 3^e en ce point selon l'équation (1.5).

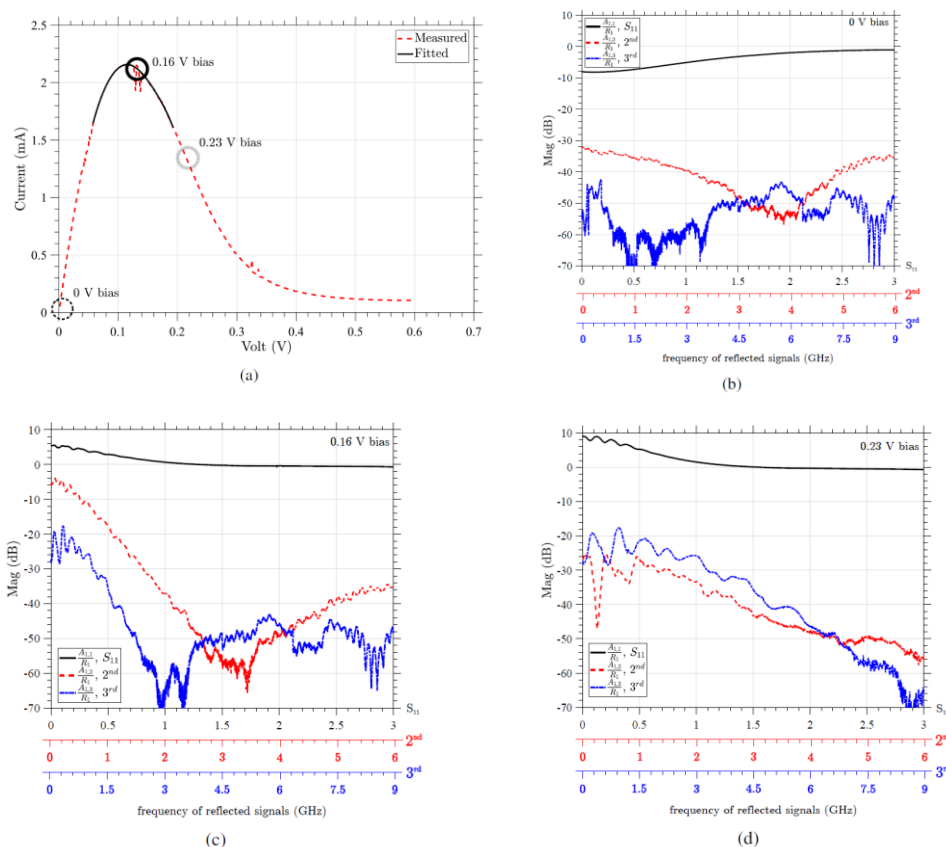


Figure 32 : (a) Caractéristique $I(V)$ de la diode tunnel AI301A fabriquée dans l'union soviétique en 1977 ; (b, c, d) Coefficients de réflexions à la fréquence fondamentale ($S_{11} = G_{\#1 \rightarrow \#1} = A_{1,1}/R_1$) en noir ; gain de conversion à la 2^e

harmonique en réflexion ($G_{\#1 \rightarrow \#2} = A_{1,2}/R_1$) en rouge ; gain de conversion à la 3^e harmonique en réflexion

($G_{\#1 \rightarrow \#3} = A_{1,3}/R_1$) en bleu. Les mesures sont données pour les polarisations : b) 0 V, c) 160 mV, et d) 230 mV.[C40]

D'une manière décourageante pour Francesco, sa demande Marie Curie a été sélectionnée, sans pour autant avoir pu être financée par contraintes budgétaires (en compensation, la commission européenne lui a décerné le « Seal of Excellence »). Francesco est donc retourné en Italie, et nous avons pu recruter deux ans plus tard Karan Gumber en post-doc pour continuer ce travail. Karan a ainsi rejoint l'équipe MDA à Bordeaux pour construire un circuit amplificateur à réflexion capable de fonctionner autant à la fondamentale qu'à la deuxième harmonique (Figure 33). Le circuit fonctionne avec moins de 150 mV, et draine une puissance DC de 144 μ W pour un gain de conversion à la deuxième harmonique mesuré de 18 dB.

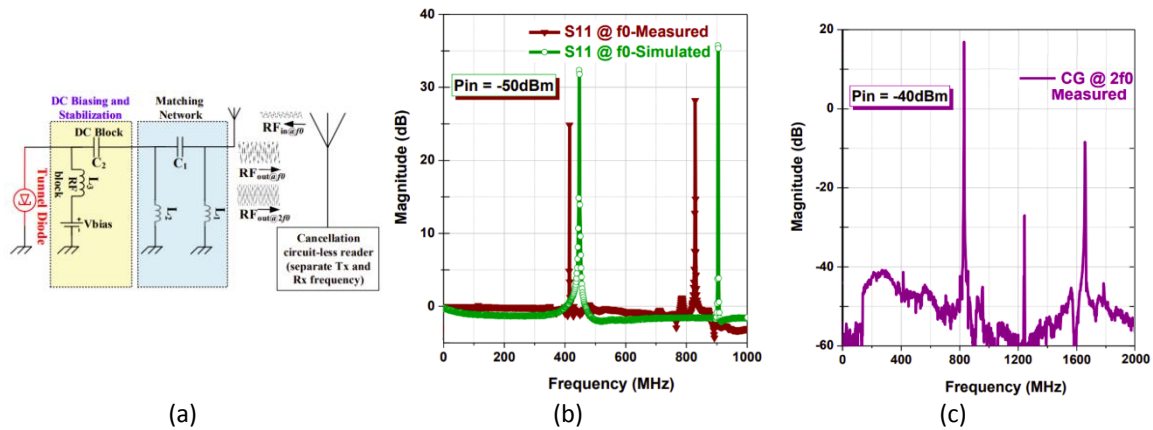


Figure 33 : (a) Schéma de principe de l'amplificateur harmonique en réflexion. (b) Gain en réflexion à la fondamentale et (c) à la seconde harmonique. [J27]

De la même manière que précédemment, nous avons aussi cherché à déterminer le bilan de liaison pour une communication sur une seule (cas I) ou double fréquence (cas II). Le calcul est reporté à la Figure 34. Sur le graphique du haut de la Figure 34-c est représentée la puissance de sortie relative mesurée (gain de réflexion) correspondant à une modulation OOK pour une séquence de bits arbitraire à f_0 , l'état '0' correspond à une impédance de circuit $Z = 5,6-j \times 0,2 \Omega$, tandis que l'état '1' correspond à $Z = -51,6-j \times 3,2 \Omega$. De la même manière, la puissance réfléchi au bas de la Figure 34-c représente $2f_0$ correspond aussi à une modulation OOK.

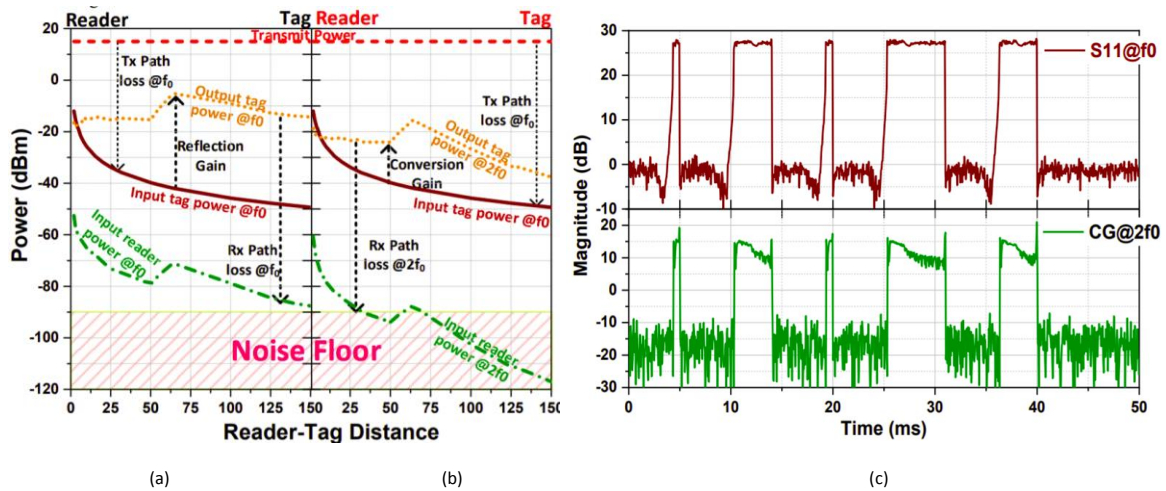


Figure 34 : Calcul du bilan de liaison pour le trajet aller-retour d'une communication avec le transpondeur harmonique (a) Cas I : le lecteur transmet f_0 (414,6 MHz) et le transpondeur réfléchit f_0 (414,6 MHz) avec un gain de réflexion ; (b) Cas II : le lecteur transmet f_0 (414,6 MHz) et l'étiquette réémet $2f_0$ (829,2 MHz) avec un gain de conversion harmonique. (c) Exemple d'une modulation OOK (On-Off keying) praticable avec le transpondeur, lorsque celui-ci est illuminé à la fréquence f_0 . L'état '0' correspond à $V_{bias} = 0 V$, tandis que l'état '1' correspond à $V_{bias} = 144 mV$. L'ensemble des mesures ont été effectuées sur la plateforme capteur de l'IMS (équipe MDA). [J27]

Il est important de mentionner que les mesures proposées ici ne sont pas dans les standards du domaine de l'ingénierie radiofréquence. Pour ces raisons, les instruments sont souvent poussés au-delà de leurs spécifications, entraînant des limites sur l'incertitude de certaines mesures. Avec le recul, je me rends aussi compte que ces mesures sont l'aboutissement de 10 ans d'expérience dans la mesure et le calibrage radiofréquence. Ces mesures ne pouvant pas être faites « clef-en-main », nous avons une « expertise d'avance » dans le domaine qui nous permet de rester compétitif à l'international face aux autres équipes de recherche de la communauté.

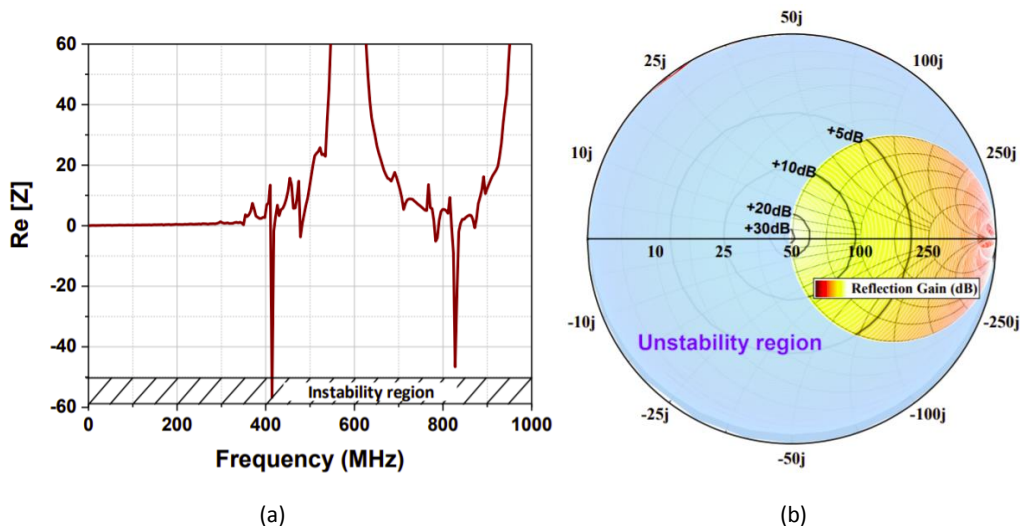


Figure 35 : (a) Impédance du circuit à -50 dBm avant bias optimal. Dans ces conditions, le circuit peut osciller à f_0 parce que son impédance est inférieure à -50Ω . La partie hachurée représente la zone instable de l'impédance de l'antenne $Z_{antenne} = 50 \Omega$. (b) Zones de stabilité et lignes de gain pour le circuit fabriqué. [J27]

Le dernier point qu'il est nécessaire de mentionner ici est la stabilité du circuit. Celle-ci est extrêmement critique pour les composants 1-port à résistance négative. Il leur est en effet très facile de « basculer en oscillation » si la résistance négative du circuit n'est pas maintenue au-dessus de la résistance de charge (Figure 35-a). La Figure 35-b montre bien la marge de manœuvre limitée de l'amplificateur en réflexion : plus le gain recherché est important, plus le point de fonctionnement doit se rapprocher de la zone d'instabilité.

Dans un sens, il est donc plus aisé pour la diode tunnel de fonctionner en oscillateur (zone d'instabilité). Comme il s'agit d'une thématique que j'aimerais développer, celle-ci sera évoquée plus en détail dans le chapitre 3.

2. Axe de recherche #2 : Alimentation d'implants bioélectroniques.

L'axe 2 de mes recherches constitue une tentative d'apporter une contribution à la société dans le domaine de la santé. Les premiers travaux n'étaient à l'origine qu'une exploration de transfert de puissance menée avec [Wei Wang](#) (jeune chercheur en maîtrise) sous la supervision de Ke Wu au sein du laboratoire PolyGrames. En cherchant à « façonner » le champ électrique et le champ magnétique de manière indépendante, j'ai eu à cœur de chercher à améliorer l'efficacité de la télé-alimentation des dispositifs médicaux implantables. Cette thématique a trouvé beaucoup de résonance à mon arrivée à Bordeaux. Et c'est ainsi que tour à tour, j'ai eu la chance de co-encadrer la thèse de [Luigi Di Trocchio](#) aux côtés de Corinne Dejous et Alexander Kuhn sur la transmission d'énergie au contact et à travers les tissus biologiques, ainsi que la thèse de [Fiona Somoreau](#) aux côtés d'Ollivier Tamarin, Corinne Dejous et Michel Castaings (Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux) sur la transmission d'énergie acoustique pour l'alimentation de dispositifs médicaux profondément implantés. J'ai aussi co-encadré le stage de Master de [Arnaud Kuakuvu](#) sur la télé-alimentation de transducteurs acoustiques piézoélectriques. Tous trois ont développé une expertise dans leur domaine, et ont contribué à faire progresser l'équipe sur cet axe de recherche. Leurs contributions à des publications sont indiquées en couleur dans la Figure 36

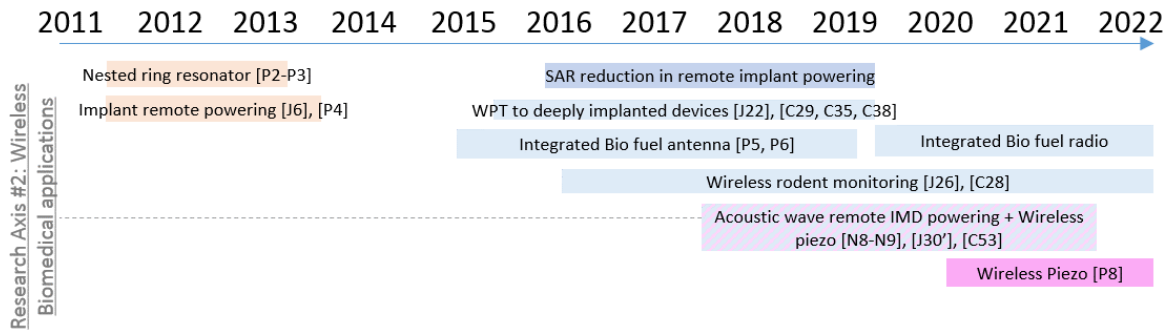


Figure 36: Activités de recherche sur l'axe 2.

2.1. Transmission de puissance sans fil par couplage magnétique résonant [P2,P3], [J6], [P4]

La télé-alimentation de dispositifs médicaux implantables (IMD : Implantable medical devices) est limitée aujourd'hui par la puissance drainée par les tissus et dissipée par effet Joule ainsi que par la taille du récepteur de puissance. Il est intéressant de travailler au GHz pour que la taille du récepteur soit petite. Wei a ainsi proposé une topologie originale d'émetteur permettant de développer un champ proche à forte dominante magnétique et de faible rayonnement en champ lointain [J6]. Le résonateur à cavité diélectrique partiellement ouverte est montré à la Figure 37.

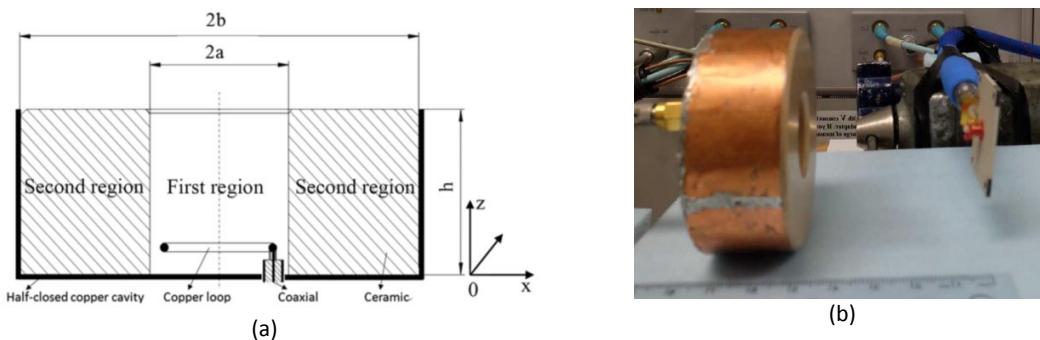


Figure 37: (a) Vue en coupe du résonateur à cavité ouverte et (b) photographie d'une cavité diélectrique ouverte couplée à un solénoïde de taille millimétrique. [J6]

De manière similaire aux résonateurs à solénoïde, l'efficacité de transmission à une distance correspondant au diamètre du résonateur est linéaire avec la taille du résonateur. On peut voir sur la Figure 38-a que, si les pertes radiatives et diélectriques ne dépendent pas du diamètre du résonateur, les pertes par conduction deviennent prédominantes pour un petit diamètre de la cavité (indépendamment de la rugosité de la surface et de l'oxydation du cuivre). La Figure 38 montre la distribution de la densité volumétrique d'énergie du champ électrique et du champ magnétique du mode TE₀₁ à l'extérieur de la cavité cylindrique. En raison de la permittivité élevée du substrat céramique, la majeure partie de l'énergie électrique est confinée à l'intérieur de la cavité, la densité d'énergie magnétique à l'extérieur de la cavité est ainsi presque 50 fois plus élevée que la densité d'énergie électrique, ce qui est très favorable aux applications de télé-alimentation des implants car il permet de limiter l'intensité du SAR généré par le champ électrique du résonateur.

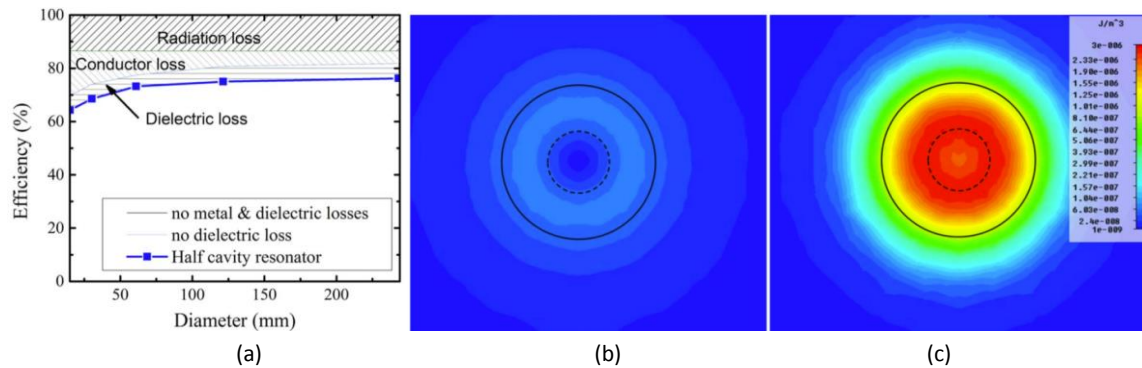


Figure 38 : (a) Efficacité de transmission entre deux résonateurs identiques espacés d'une distance égale au diamètre des résonateurs. Les valeurs d'efficacité sont données pour différentes valeurs de diamètre pour choisir la géométrie optimum. Densités volumiques d'énergie électrique (b) et magnétique (c) pour le mode TE₀₁ à la distance correspondant au rayon du résonateur. Les données des trois figures ont été obtenues par simulation électromagnétique par la méthode aux éléments finis. [J6]

Une efficacité de transmission supérieure à 65 % a ainsi pu être obtenue pour deux cavités identiques espacées d'une distance comparable au diamètre du résonateur (60,5 mm). Dans le cas du couplage avec un solénoïde récepteur de 3 mm de diamètre, Wei a mesuré une efficacité de 34 % à une distance de 20 mm et de 8,2 % à une distance de 40 mm, démontrant ainsi les performances de cette nouvelle géométrie. Le concept de ce résonateur a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

2.2. Combiner plusieurs fonctions à l'antenne de manière à occuper moins d'espace tout en maintenant un haut facteur de qualité [C29, C35, J6, J32, P2-P3, P5-P6]

Comme indiqué au chapitre précédent, un des plus grands défis à relever pour que les IMD continuent leur progression au service de la santé est la miniaturisation des capteurs et stimulateurs intelligents, afin de permettre la mise en place de l'implant à l'endroit souhaité du corps, sans provoquer de déplacement des tissus, de dommages ou d'altération des fonctions biologiques. Quelques années après le développement avec Wei de résonateur pour émetteur de transmission sans fil par couplage magnétique résonant, j'ai eu la possibilité de proposer un sujet de thèse sur la miniaturisation du micro résonateur de réception (d'un volume de plusieurs μ -litres, ou millimètres cube).

Nous avons la chance de compter au sein du campus de Bordeaux, une équipe issue des laboratoires CRPP, ISM et BIOTIS, mondialement reconnue pour ses travaux sur les biopiles enzymatiques. Ces dispositifs capturent l'énergie chimique dans le corps (typiquement glucose et oxygène) et la convertissent en puissance DC. Dans ce contexte, l'objectif de la thèse de Luigi Di Trocchio a donc été de proposer une antenne-biopile, un dispositif hybride capable de tirer parti de deux sources d'énergies différentes, et d'assurer la communication avec l'extérieur du corps.

Néanmoins, comme toute (très) petite antenne, ce type de dispositif résonant est extrêmement sensible à toute présence métallique à proximité, à tel point que sa simple connexion à un câble de mesure relève du défi. La première étape a donc été de développer des méthodes de mesures fiables pour réaliser nos tests.

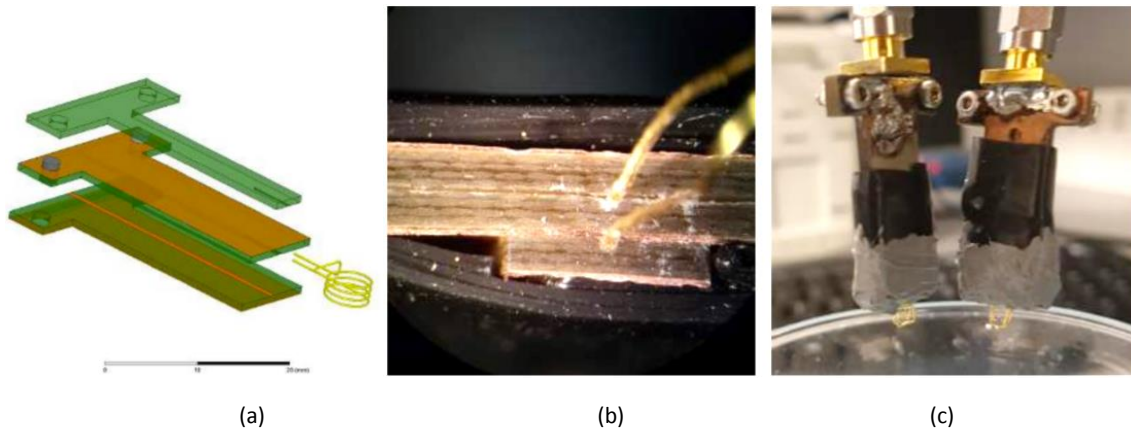


Figure 39 : (a) Vue 3D de la monture tri-plaque personnalisée permettant de connecter le micro-résonateur (en jaune) aux appareils de mesures. (b) Gros plan des encoches prévues pour le micro-résonateur. (c) Vue de la monture tri-plaques prête à être semi-immergée.[59]

La Figure 39 montre la monture de test (basée sur une ligne de transmission tri-plaques) développée pour tester chacun de nos micro-résonateurs. Mentionnons au passage qu'un kit de calibrage S.O.L. (short/open/load) a aussi été développé pour permettre de « placer » le plan de mesure au bout de la ligne de transmission tri-plaques. La routine de montage en vue de la mesure implique le positionnement du résonateur à tester dans la monture, puis son revêtement par un mastic silicone ($\epsilon_r = 2,83$, $\tan \delta = 0,0001$) permettant de plonger l'ensemble dans une solution PBS (Phosphate-Buffered Saline), soit le scénario le plus défavorable en termes de permittivité et de pertes diélectriques.

L'objectif de la preuve de concept du projet antenne-biopile est de façonner les deux électrodes de la biopile enzymatique en deux solénoïdes capables de se coupler avec des résonateurs extérieurs au corps (Figure 40). Ainsi, l'anode, dont la surface est recouverte de l'enzyme Glucose Oxidase (capture du glucose) est construite pour résonner à 144 MHz. D'autre part, la cathode, dont la surface est recouverte par un dépôt de Bilirubin Oxydase (capture de l'oxygène), est construite à 288 MHz. Le scénario retenu pour la démonstration de l'antenne-biopile est une communication harmonique où la transmission de puissance depuis l'extérieur du corps serait effectuée à la fréquence fondamentale, tandis que la communication d'information vers l'extérieur serait effectuée à la seconde harmonique, d'après les techniques non linéaires évoquées dans la section 1.7. Dans le cadre de la mesure proposée à la Figure 40, l'efficacité de transmission de puissances sans fil est mesurée à l'analyseur de réseau. L'isolation RF entre les ports 1 et 2 est assurée par deux circuits de polarisation (bias-T). Ceux-ci permettent aussi au courant généré par la biopile enzymatique de circuler dans le potentiostat qui représente la charge « DC load » correspondant au futur dispositif implantable à alimenter.

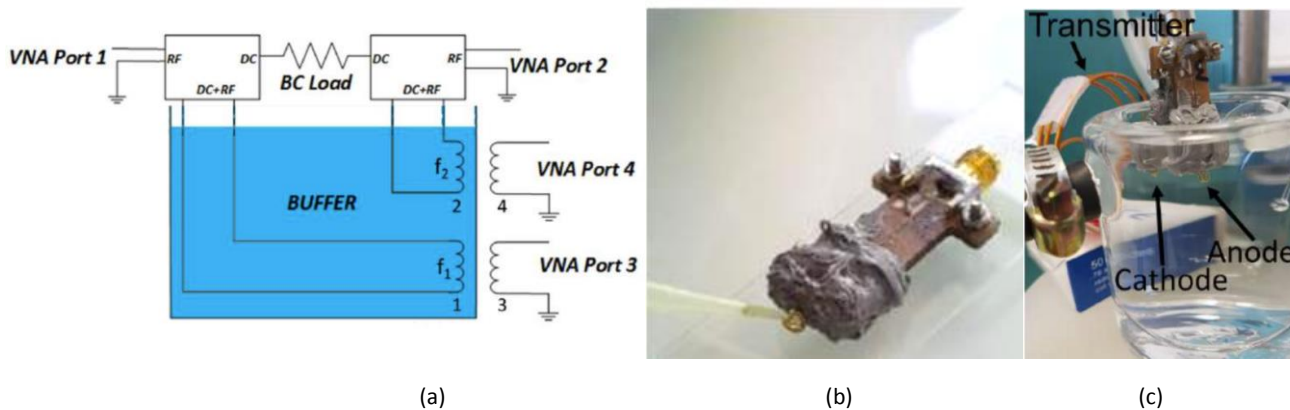


Figure 40 : (a) Schéma de principe de la preuve de concept proposée pour une antenne-biopile, (b) dépôt de l'enzyme sur l'anode avant séchage pendant 8h à 4°C, (c) configuration de la mesure comprenant les résonateurs extérieurs et micro-résonateurs. La fabrication de la biopile ainsi que sa caractérisation ont été réalisées par l'équipe du CRPP.[J26]

Pour valider le bon fonctionnement des électrodes, l'équipe du CRPP les a immergées dans du PBS saturé en argon pour mesurer les courbes $I(V)$ à l'aide d'un potentiostat (Figure 41-a). La figure montre la présence de deux pics négatifs, à environ $-0,08$ V pour l'anode et $0,3$ V pour la cathode, signe de la présence des enzymes sur les électrodes. La solution est ensuite saturée en oxygène et sa concentration en glucose est amenée à 40 mM pour tester les réponses de courant-potential des deux électrodes indépendantes (Figure 41-b), confirmant la présence de la réaction. Les deux électrodes sont ensuite connectées à une charge résistive variable à travers les deux bias-T pour mesurer la puissance DC délivrée par la biopile enzymatique.

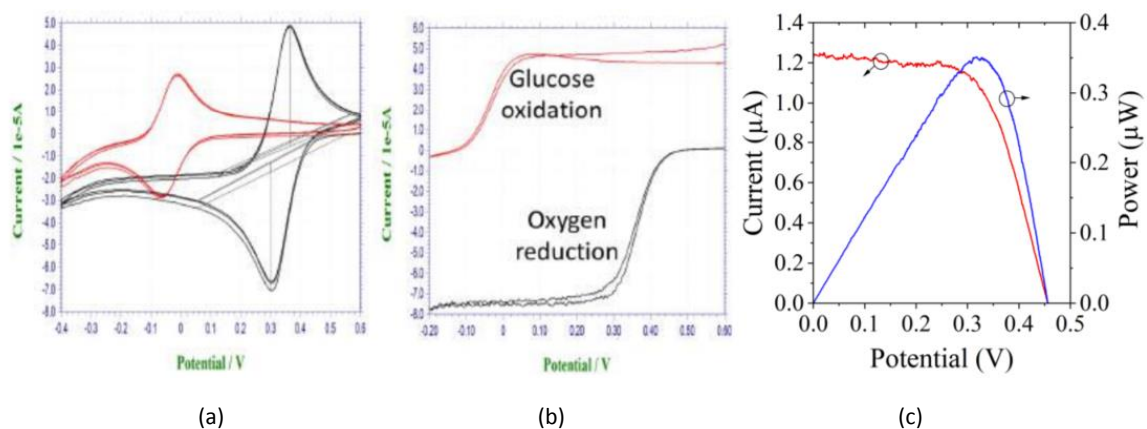


Figure 41 : Résultats électrochimiques : (a) caractérisation des électrodes dans l'argon et (b) en présence de glucose et d'oxygène ; la courbe rouge représente l'anode et la courbe noire la cathode. ; (c) Puissance délivrée par la BFC. (Données expérimentales encore non-publiées)[59]

L'aspect générateur à bio-combustion enzymatique est donc validé dans cette preuve de concept avec un courant généré d'environ $1,2 \mu\text{A}$ et un pic de puissance de $0,35 \mu\text{W}$. Ces résultats sont plutôt faibles, mais ne peuvent être traités que de manière qualitative car n'ayant fait l'objet d'aucune optimisation. En parallèle de la mesure de l'activité de la biopile par l'équipe du CRPP, Luigi a mesuré les performances du couplage magnétique résonant entre les résonateurs extérieurs et les micro-résonateurs immergés dans le PBS pour des distances de 2 cm et $0,5$ cm (Figure 42).

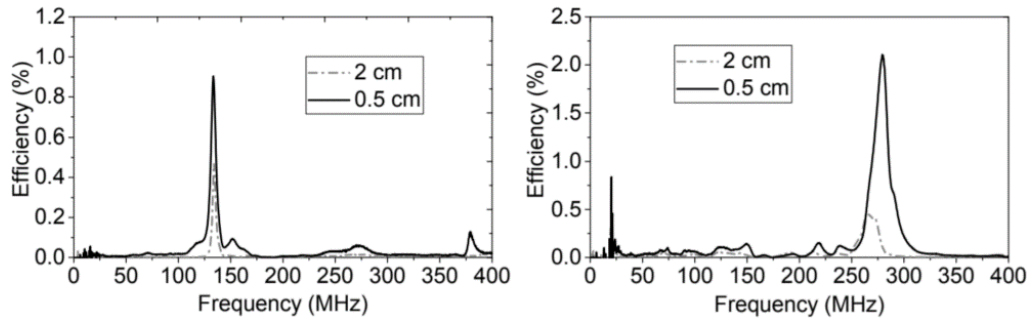


Figure 42 : Efficacité de transfert de puissance sans fil pour (a) l'anode et (b) la cathode.[59]

L'efficacité pour les deux micro-résonateurs culmine à 0,95 % et 2,1 % pour l'anode et la cathode, respectivement. Bien évidemment, celle-ci décroît considérablement avec la distance, pour atteindre seulement 0,47 % et 0,45 % à 2 cm de séparation. Ces résultats sont assez similaires aux valeurs typiques de la littérature pour des structures similaires [111]. Leur faiblesse s'explique principalement par le fait qu'aucun revêtement n'empêche le champ électrique de pénétrer dans la solution dans laquelle les hautes fréquences sont fortement atténuées. Les résultats sont donc fortement dégradés par les propriétés du PBS. Néanmoins, ces résultats démontrent la faisabilité du concept, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 3 pour un projet futur.

2.3. Confinement partiel du champ électrique [P6] du micro-résonateur

Dans le but d'augmenter l'efficacité de la récupération d'énergie sans fil en champ proche, Luigi a proposé l'utilisation d'une structure diélectrique à géométrie particulière. Son rôle est d'empêcher au maximum le champ électrique (produit par le résonateur) de pénétrer dans les tissus (pour éviter les pertes diélectriques) tout en maintenant un contact électrique entre l'antenne et les tissus (de manière à pouvoir servir d'électrode). Cette structure, qui ressemble à une vis afin d'optimiser l'occupation de volume interne à la bobine, est localisée à l'intérieur de l'antenne implantable et plus particulièrement entre les spires où le champ électrique est maximal. Son volume a été optimisé en prenant en compte le facteur de qualité du récepteur ainsi que le facteur de couplage entre le transmetteur externe et l'implant, et le volume total d'implantation.

Les structures ont été fabriquées par impression 3D au laboratoire LAAS à Toulouse, et mesurées dans de la viande fraîche hachée, pour simuler les tissus musculaires humains. Bien que cette méthode puisse sembler singulière, c'est la plus largement utilisée dans la communauté car elle permet de soumettre les structures électromagnétiques aux pertes typiques des tissus biologiques environnant les dispositifs implantables. Les mesures de facteur de qualité ont permis de valider les simulations par éléments finis, confirmant l'obtention d'une structure optimale. Ces résultats ont fait l'objet d'un dépôt de brevet international et n'ont pas encore été publiés. A ce titre, ils ne sont pas présentés ici.

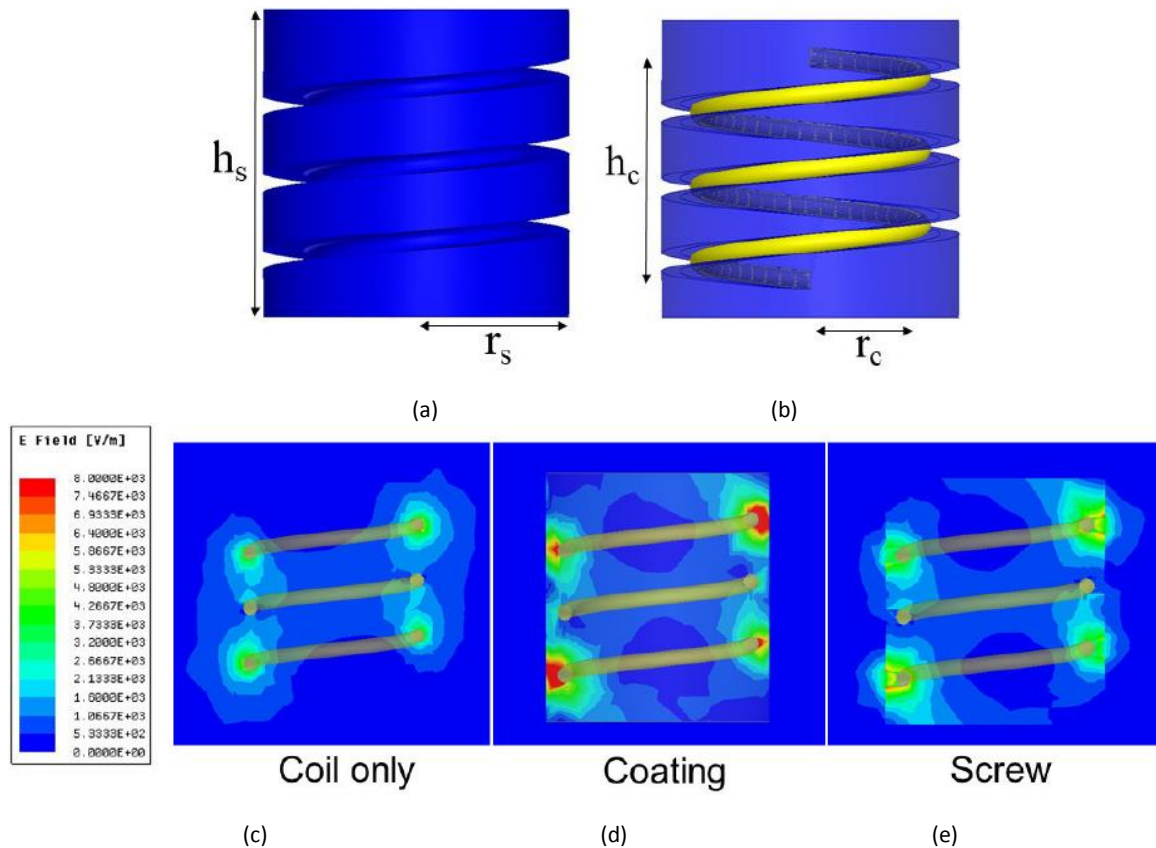


Figure 43 : (a) Structure diélectrique de confinement proposée (TFG, Threaded-Furrow Geometry), (b) structure TFG représentée avec le micro-résonateur métallique. Champ électrique généré par le micro-résonateur pour différents environnements : (c) dans le tissu, (d) entouré d'un revêtement diélectrique et (e) au sein de la structure TFG.[59]

2.4. Télémétrie sans fil par transpondeur sans pile et sans fil [C28, J26]

De manière inattendue, le projet d'antenne biopile nous a aussi poussés vers les capteurs sans fils et sans batterie. Dans le contexte multi-disciplinaire du fonctionnement de l'antenne-biopile, de manière totalement autonome et implantée, il est primordial de valider le bon fonctionnement de chacune des fonctions, et notamment de la biopile elle-même. Ainsi, Luigi a développé une solution « voltmètre sans pile et sans fil » à partir du chip RFID SL900A de la fonderie AMS. Ce dispositif permet la surveillance en continu d'une biopile implantée dans un rongeur (rat) de laboratoire, sans perturber ses activités par une cage trop petite ou par un fil qui le connecterait en permanence à un instrument de mesure (Figure 44).

Le dispositif de mesure est constitué d'une antenne connectée à un lecteur RFID et placée au-dessus de la cage du rat. Grâce à elle, le lecteur interroge et alimente le transpondeur dont Luigi a conçu la « wearable antenna ». Celui-ci est positionné sur un gilet, spécialement développé pour être porté par l'animal. La puce RFID est connectée aux électrodes de la biopile implantées sous la peau du rat. De cette façon, l'activité de la biopile est enregistrée en continu, sans fil, pendant que l'animal est libre de se déplacer à l'intérieur de la cage.

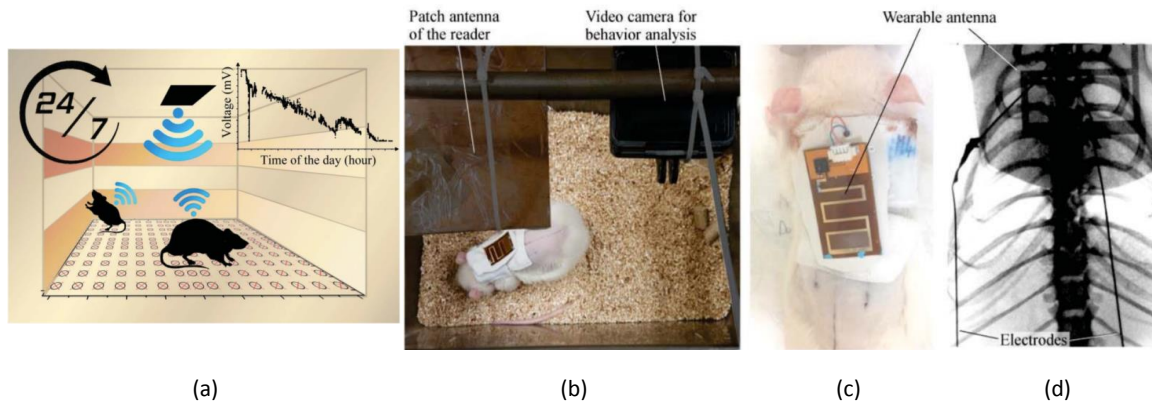


Figure 44 : (a) Principe du dispositif télémétrique de mesure de la tension générée par la biopile implantée. L'animal porte sur un gilet, un transpondeur RFID chargé de la mesure, et est de ce fait libre de se déplacer à l'intérieur de la cage, tandis que la tension délivrée par une cellule à biocarburant glucose/O₂ implantée est surveillée en continu et sans fil. (b) Photographie de l'environnement de mesure. (c) Vue du transpondeur constitué de l'antenne, du chip RFID (en noir) et du bornier où sont connectées l'anode (bleu) et la cathode (rouge). (d) Photographie aux rayons X prise juste après l'implantation des électrodes. [J26]

Grâce au financement du Labex Amadeus et à la conjugaison des efforts de toute l'équipe de l'IMS, du CRPP, de l'ISM et de BIOTIS, nous avons ainsi pour la première fois effectué un enregistrement *in-vivo* et continu de la biopile enzymatique développée et fabriquée sur le campus bordelais.

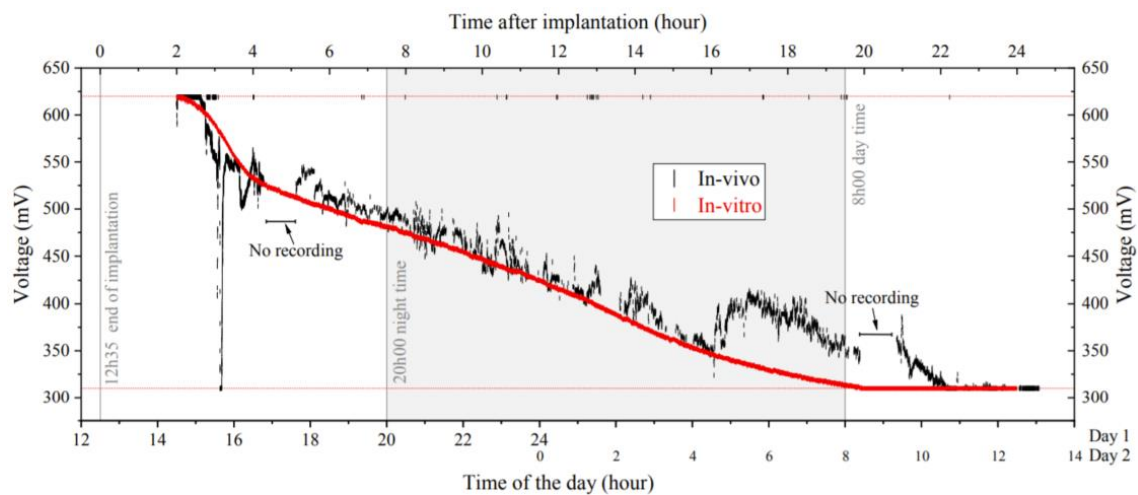


Figure 45 : Mesure sans fil de la tension de la biopile aux bornes de l'ADC du chip RFID SL900A *in vitro* (courbe rouge) et *in vivo* (courbe noire). [J26]

L'enregistrement, d'une durée de plus de 24H est présenté en Figure 45. En particulier, les valeurs de tensions enregistrées *in vitro* et *in vivo* montrent une très bonne concordance. En outre, la mesure *in vivo* démontre la capacité à surveiller l'animal dans n'importe quel endroit de la cage où il se trouve, validant ainsi la conception proposée. Nous présenterons dans le chapitre 3 la suite de ce travail dans le cadre de ses perspectives.

2.5. Transmission de puissance sans fil par ondes acoustiques [C53]

Outre la dynamique de recherche sur la biopile enzymatique, le campus bordelais est un terrain fertile pour une multitude d'études transdisciplinaires. Partant du constat décrit dans le paragraphe 4.3, selon lequel la transmission de puissance par onde acoustique détient le meilleur potentiel pour télé-alimenter des IMD implantés profondément, nous avons voulu explorer avec

des collègues du laboratoire I2M la possibilité d'utiliser l'os comme conduit de propagation d'énergie acoustique à travers le corps humain. Un projet exploratoire a été financé par le département Science et Technologies de l'Université de Bordeaux. La majeure partie des travaux de cette thèse sont restés théoriques, orientés sur la modélisation de l'os et des tissus mous avoisinants, ainsi que sur l'identification de modes les plus propices au transport de l'énergie. L'enjeu est double : pour délivrer la puissance le plus loin possible, le mode idéal doit guider l'énergie acoustique le long de l'os sans rayonner dans les tissus mous alentours, le mode de guidage doit être lui-même à faible atténuation. Une mesure de preuve de concept a néanmoins pu être effectuée et publiée lors de WPW à Bordeaux en juillet 2022 (Figure 46).

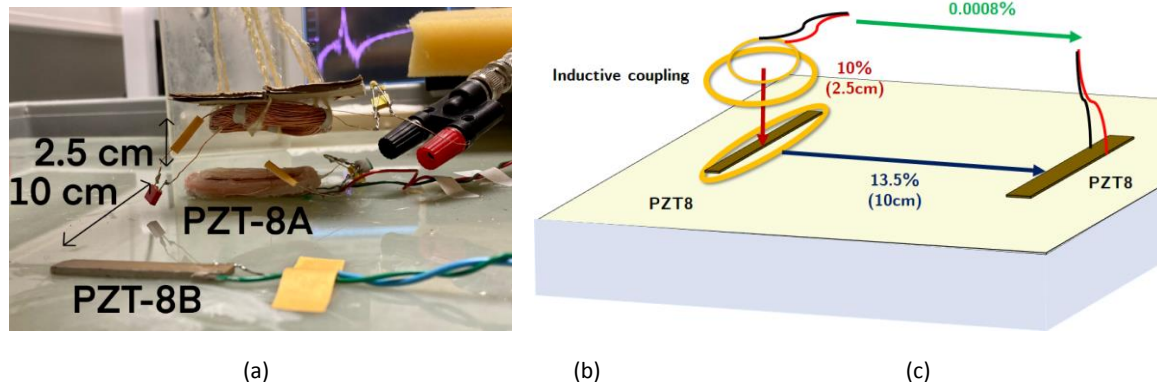


Figure 46 : (a) Photographie et (b) diagramme descriptif de la mesure en transmission totale, soit 2.5 cm dans l'air par couplage magnétique puis 10 cm par propagation acoustique guidée dans l'os fantôme (verre epoxy)[C53]

Le scénario pour la preuve de concept est le suivant : un premier transfert d'énergie sans fil est réalisé par couplage magnétique résonant pour permettre de traverser la peau et les premières couches de graisses jusqu'à l'os le plus proche. L'énergie magnétique est ensuite convertie par un premier transducteur piézoélectrique en énergie acoustique guidée, qui se propage dans l'os jusqu'à un second transducteur qui reconvertit l'onde acoustique en courant électrique. La démonstration illustrée en Figure 46 a ainsi permis de mettre en œuvre l'ensemble de la chaîne pour un rendement total de 0,01 %. Notons ici que plusieurs éléments de la chaîne n'ont pas été développés pour l'expérimentation et sont donc largement sub-optimaux. En ce qui concerne les deux éléments dont nous cherchions à montrer le potentiel, la preuve de concept a permis de montrer un rendement de 14 % (simulation) pour la propagation du mode acoustique sur 10 cm de distance et de 11 % (mesure) pour le couplage magnétique résonant. Ce travail a permis de mettre en évidence l'attractivité du concept de transducteur piézoélectrique excité à distance, ce qui présente une immense opportunité pour le domaine du suivi de structure sans fil (Wireless Structural Health Monitoring), comme nous le verrons au chapitre 3.

Chapitre 3

Futures directions

« Only through freely chosen discipline can life be enjoyed and still kept within the bounds of reason » Mihaly Robert Csikszentmihalyi

Pour ce dernier chapitre dédié aux enjeux futurs des transpondeurs « sans-fil & sans-pile », j'aimerais commencer par identifier les défis essentiels qui me semblent se poser au monde que nous avons construit à l'échelle de la planète (« Spaceship earth ») avant de détailler les *innovations de l'électronique* qui pourraient nous permettre de les relever ...

Malheureusement, je crains que la marge de manœuvre que pourraient apporter des nouvelles innovations en électronique soit réduite devant l'immensité de l'enjeu auquel nous faisons face.

1. Défis essentiels (impasse ?) de notre civilisation

D'une part, notre société industrielle est essentiellement fondée sur l'exploitation de deux ressources non renouvelables : les énergies fossiles et les métaux. Mais depuis le début du siècle et que les gisements de grande pureté se sont taris, nous dépensons toujours plus d'énergie par tonne de métal produite. C'est aussi vrai pour l'extraction des énergies fossiles de moins en moins accessibles qui entraînent à leur tour un besoin accru en métaux et en énergie. On parle alors de retour sur investissement énergétique (EROI : Energy Return on Energy Invested) en baisse [60]: Pour mettre la même quantité de métaux et d'énergie à la disposition de notre société, nous brûlons¹⁰ toujours plus d'énergie fossile, conduisant à une augmentation des émissions à effet de serre. Bien évidemment, ce phénomène est problématique car la consommation mondiale d'énergie ne fait que progresser (Figure 47), et risque à moyen terme de mener à la pénurie.

D'autre part, le rapport du groupe de travail I de l'AR6 du GIEC sur les bases scientifiques du changement climatique, sorti le 9 Aout 2021 [61] établit une relation quasi-linéaire entre la quantité cumulée de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le réchauffement climatique : chaque Terra-tonne (Tt) d'équivalent CO2 supplémentaire augmente la température de surface mondiale moyenne d'environ 0.45°C¹¹ (Figure 48). Le rapport relève une augmentation de la fréquence des événements météorologiques et climatiques extrêmes (des chaleurs extrêmes dont la fréquence a doublé depuis les années 1980, des épisodes de sécheresses, de fortes précipitations, des inondations, des feux de forêt, des inondations, des ouragans...). Ces

¹⁰ L'énergie principalement utilisée dans l'exploitation des gisements est d'origine fossile.

¹¹ <https://theshiftproject.org/article/climat-synthese-vulgarisee-giec-wg1-shifte/>

événements posent un problème de sécurité des personnes mais aussi de ressources alimentaires créant des pénuries épisodiques sur le court-terme (la pénurie de moutarde de l'été 2022 est principalement due au dôme de chaleur extrême de l'été 2021 au Canada qui a vu sa récolte divisée par deux), engendrant des défis énergétiques (la production hydroélectrique qui fournit 17 % du courant produit en Chine, a chuté de 26 % en juillet 2022 par rapport à juillet 2021¹²) et de dangereux risques alimentaires sur le moyen terme (lié aux risques d'effondrement de la biodiversité terrestre et marine).

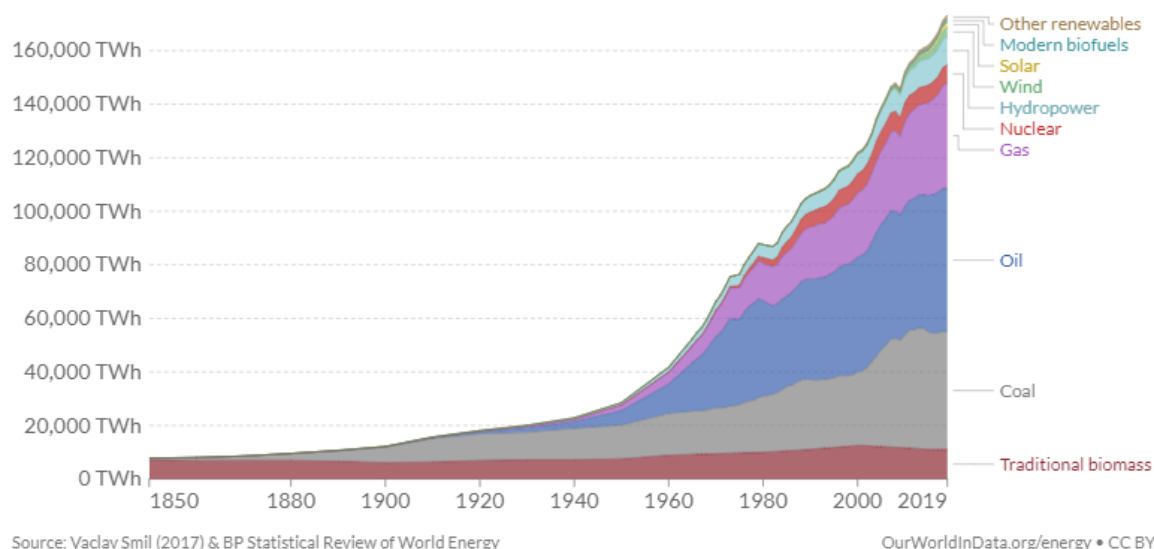


Figure 47 : Consommation mondiale d'énergie primaire par source (en prenant en compte les inefficacités de la production des combustibles fossiles en convertissant l'énergie non fossile en intrants énergétiques requis s'ils avaient les mêmes pertes de conversion que les fossiles). Tiré de <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption#global-energy-consumption>

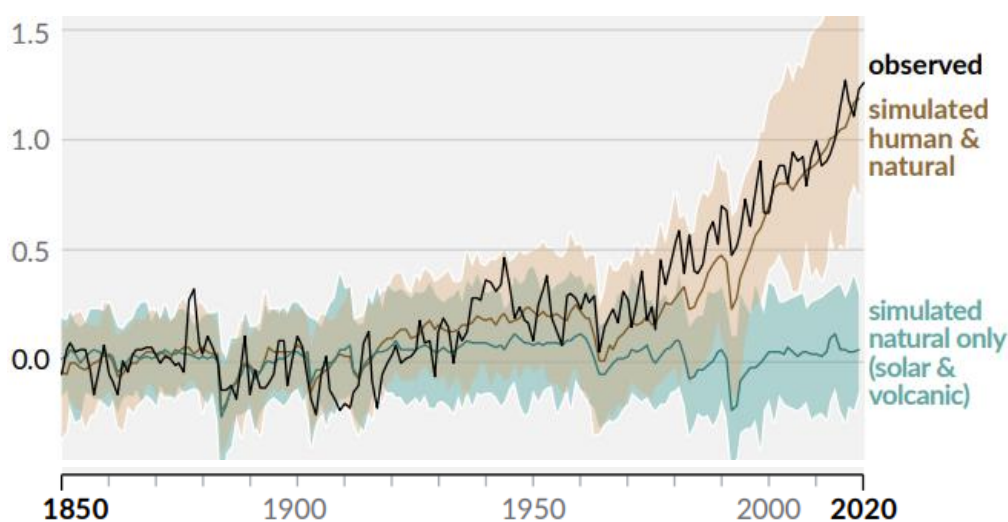


Figure 48 : Changement de température de surface mondiale observée utilisant les facteurs humains et naturels (en brun) et naturels uniquement (en vert) [61]

¹² https://www.lemonde.fr/international/article/2022/08/19/en-chine-une-secheresse-sans-precedent-menace-la-croissance_6138446_3210.html

2. Futur de l'électronique ?

Il y a un problème associé à l'utilisation de masse qui est faite des technologies de l'électronique dans nos sociétés. La seule part de l'électronique liée au numérique est déjà responsable du rejet d'autant de gaz à effet de serre que l'ensemble des rejets de l'aviation [62]. La consommation énergétique mondiale de ces technologies (Figure 49) concerne autant la fabrication de nouveaux appareils, en lien avec leur l'obsolescence technique et culturelle [63], que l'utilisation intensive qui en est faite [64]. De plus, la présence de l'électronique est toujours en augmentation, avec une projection en 2025 de rejets d'eqCO₂ équivalents à ceux de la toute flotte mondiale de voitures [62].

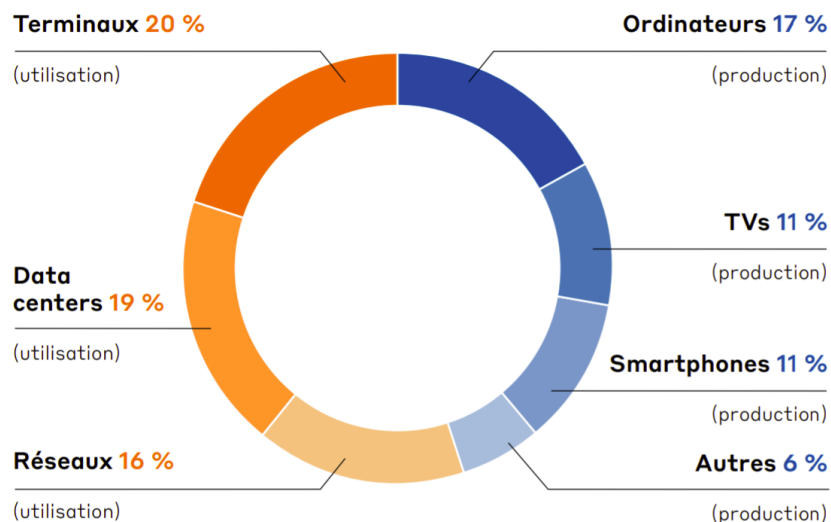


Figure 49 : Distribution de la consommation d'énergie finale du numérique par poste pour la production (en bleu) et l'utilisation (en orange) en 2017 [62].

Il peut être intéressant de comparer le rôle de l'électronique dans notre société avec le regard porté par Jacques Ellul, ancien professeur de l'université de Bordeaux [65] :

« Je voudrais rappeler une thèse qui est bien ancienne, mais qui est toujours oubliée et qu'il faut rénover sans cesse, c'est que l'organisation industrielle, comme la « post-industrielle », comme la société technicienne ou informatisée, ne sont pas des systèmes destinés à produire ni des biens de consommation, ni du bien-être, ni une amélioration de la vie des gens, mais uniquement à produire du profit. Exclusivement. »

Les deux postes (fabrication & utilisation) de la Figure 49 semblent en effet résulter du modèle commercial de l'électronique/numérique grand public. Ils font aussi écho à deux dangers de viabilité à moyen terme pour nos sociétés qui ont pour point commun de résulter en une croissance énergétique en accélération :

- D'une part, l'utilisation croissante des ressources terrestres (appauvrissement en ressources matérielles) expose notre société à une pénurie ou un décrochage économique qui impacterait durement de nombreuses générations.
- D'autre part, l'emprise croissante du numérique sur les mécanismes de fonctionnement de nos sociétés (administration de nos institutions), et sur la population (capture de

l'attention à une échelle de masse), place nos démocraties en danger de décrochage institutionnel.

Si le danger lié aux ressources est identifié depuis longtemps par le grand public, le deuxième peine à rentrer dans le débat. L'industrie du numérique, qui se finance par la publicité, a construit une économie de l'attention [64], dont l'objectif est de maximaliser l'occupation de « temps de cerveau disponible »¹³ dans une logique de consommation de masse [66]. Bien que les méthodologies de la mercatique (marketing) datent du siècle passé¹⁴, les technologies du numérique offrent la possibilité de cerner chaque utilisateur avec une finesse jamais égalée. Ainsi, nombre d'entreprises se retrouvent aujourd'hui en compétition dans l'influence de nos comportements [67] jusqu'à chercher à placer l'utilisateur dans des situations de dépendance par l'activation récurrente de son striatum [68].

C'est ainsi que structurellement couplée aux mécanismes de croissance par la loi de Moore, la recherche en électronique continue encore aujourd'hui de développer la « haute technologie » de « demain » permettant l'obsolescence des technologies d'aujourd'hui, ce qui conduit à l'utilisation exponentielle de ressources terrestres. La recherche en électronique a développé les serveurs servant de cocon au monde digital. La recherche en électronique a développé les smartphones et ses capteurs capables de « profiler » chaque usager du numérique *in situ* dans sa vie de tous les jours. La question se pose donc simplement en terme : **l'électronique est-elle durable ?**

Osons même porter le questionnement encore plus loin dans le cadre de ce troisième chapitre consacré aux directions de recherches futures: Est-il possible pour un chercheur en ingénierie de l'électronique de contribuer positivement à notre société sans la dégrader par ailleurs ?

A défaut de pouvoir répondre à la question, il est possible d'explorer la piste suivante : la libre fertilité de notre cerveau (et les outils/technologies qui en découlent) peut probablement être vue comme celle d'une espèce vivante s'adaptant à son environnement et non comme une source de prédation. Ainsi, contrairement à Jacques Ellul qui voyait la technologie comme exclusivement liée au profit, il nous appartient à nous tous, à l'échelle de la société, de déterminer **en complète autonomie** la finalité de nos propres actions, par l'usage de notre libre arbitre.

A rebours des développements commerciaux passés, conjugués en termes de profit (%), de débit (Gb/s) et de puissance (W), est-ce que l'autonomie au sens le plus large du terme ne pourrait pas être un objectif ?

¹³ Selon l'expression formulée en 2004 par Patrick Le Lay, alors président-directeur général du groupe TF1 : « Or, pour qu'un message publicitaire soit perçu, il faut que le cerveau du téléspectateur soit disponible. Nos émissions ont pour vocation de le rendre disponible : c'est-à-dire de le divertir, de le détendre pour le préparer entre deux messages. Ce que nous vendons à Coca-Cola, c'est du temps de cerveau humain disponible » — Extrait tiré du livre Les dirigeants face au changement, Éditions du Huitième jour, 2004.

¹⁴ « Le marketing est l'ensemble des processus mis en œuvre par une organisation [...], destiné à comprendre, influencer dans le sens de ses objectifs et contrôler les conditions de l'échange entre elle-même et d'autres entités, individus, groupes ou organisations. » Pierre-Louis Dubois, Alain Jolibert, Marie-Laure Gavard-Perret, Christophe Fournier, Le Marketing. Fondements et Pratique, 5e édition, Economica, 2013.

Peut-être existe-t-il un modèle permettant de favoriser cette autonomie, que Ivan Illich inscrivait dans le concept de « convivialité », et qui s'oppose à la productivité [69]¹⁵:

« Une société conviviale est une société qui donne à l'homme la possibilité d'exercer l'action la plus autonome et la plus créative, à l'aide d'outils moins contrôlables. La productivité se conjugue en termes d'avoir, la convivialité en termes d'être. [...] L'outil est convivial dans la mesure où chacun peut l'utiliser, sans difficulté, aussi souvent et aussi rarement qu'il le désire, à des fins qu'il détermine lui-même. L'usage que chacun en fait n'empiète pas sur la liberté d'autrui d'en faire autant. Personne n'a besoin d'un diplôme pour s'en servir ; on peut le prendre ou non. »

Ainsi, une autre électronique serait-elle possible ? Il est possible que ce soit la direction prise par des courants du Low Tech [70] des modèles FabLab [71, 72], de l'innovation frugale [73, 74] voire de la fabrication modulaire [75] ou encore de la mouvance « Repair » [76]. Néanmoins, placée en regard de la situation de décrochage qui pourrait se produire au cours de la décennie à venir, cette électronique peut aussi être vue comme un outil pour la gestion d'urgence ou de post-désastre [77, 78] ou enfin comme l'électronique de la **résilience**, qui définit la capacité d'un système dynamique à s'adapter avec succès aux perturbations qui menacent le fonctionnement, la viabilité ou le développement du système [79][80].

3. Vision pour le futur technologique de la thématique

Ainsi, le futur de l'électronique peut être envisagé comme celui d'un profond changement de paradigme non pas engendré par lui (par le changement de technologie), mais en réponse aux changements de notre environnement naturel et sociétal. Alors que les générations 3G, 4G, 5G (et peut-être 6G avec l'incorporation des communications satellites) étaient poussées par des objectifs de rendement, de débit et de profits, les nouvelles générations de télécommunication pourraient être tournées vers l'autonomie, la résilience, la créativité, la convivialité.

La nouvelle G (correspondant chronologiquement à la 7G) de télécommunication sans fil serait ainsi ni « Techno-push » (quand une nouvelle technologie apporte un gain jusqu'alors inconnu pour le consommateur et qu'un nouveau marché est développé spécifiquement pour ce produit via la création d'un besoin consommateur), ni « Market-pull » (quand une nouvelle technologie apporte un gain en réponse à un besoin/problème du consommateur) mais « Humanity-pull » (quand une technologie s'inscrit dans la réponse à court, moyen et long terme, contribuant au fonctionnement de la communauté). La nouvelle G serait ainsi tournée vers le bénéfice pour

¹⁵ « Je distingue deux sortes d'outils : ceux qui permettent à tout homme, plus ou moins quand il veut, de satisfaire les besoins qu'il éprouve, et ceux qui créent des besoins qu'eux seuls peuvent satisfaire. Le livre appartient à la première catégorie : qui veut lire le peut, n'importe où, quand il veut. L'automobile, par contre, crée un besoin (se déplacer rapidement) qu'elle seule peut satisfaire : elle appartient à la deuxième catégorie. De plus, pour l'utiliser, il faut une route, de l'essence, de l'argent, il faut une conquête de centaines de mètres d'espaces. Le besoin initial multiplie à l'infini les besoins secondaires. » **Ivan Illich**, entretien au mensuel LGO, numéro 9, juillet 1973.

l'humanité¹⁶, et agglomérerait les tendances citées précédemment. Essayons de décliner par exemple le principe d'autonomie dans le domaine de l'électronique sans fil :

- autonomie énergétique des dispositifs sans fil (autonomie/résilience au sens large)
- autonomie vis-à-vis de l'obsolescence programmée (réparabilité, modularité)
- autonomie (liberté ?) vis-à-vis du numérique et du marketing
- autonomie face à un réseau centralisé (internet par exemple) qui concentre pouvoir et point d'accès possiblement fragiles.
- autonomie face au risque de déconnexion (crise, attaque des systèmes de communication)
- autonomie face à une situation post-décrochage dans lequel les télécommunications centralisées ne sont plus possible (réseau maillés plutôt que cellulaire)
- autonomie (résilience) face à des changements imprévus.

*Pour conclure sur ma place en tant que chercheur dans les sciences de l'ingénierie électronique, j'entrevois deux buts : l'un technologique, l'autre applicatif. Le premier consiste à contribuer au développement d'une boîte à outils de technologies sans fil & sans pile, tandis que le deuxième consiste à puiser dans les outils les plus pertinents pour les mettre au service de la société, dans le cadre de la nouvelle G. Par exemple, la résilience d'un dispositif passe par son autonomie énergétique. Mais celle-ci passe aussi par sa possible (trans)portabilité et la non-dépendance à un réseau centralisé. C'est la raison pour laquelle je pense que les **technologies sans fil et sans pile** seront potentiellement des contributions scientifiques utiles à la société sur le moyen et le long terme.*

Les transpondeurs à zéro puissance nette (soit le bilan entre puissance utilisée et puissance récoltée) sont connus depuis longtemps. Néanmoins, leurs distances limitées et la difficulté

¹⁶ Les Nations Unies définissent ainsi les Objectifs de Développement Durable (<https://sdgs.un.org/goals>)

Objectif 1. Éradication de la pauvreté

Objectif 2. Lutte contre la faim

Objectif 3. Bonne santé et bien-être

Objectif 4. Accès à une éducation de qualité

Objectif 5. Égalité entre les sexes

Objectif 6. Accès à l'eau salubre et à l'assainissement

Objectif 7. Énergies fiables, durables et modernes, à un coût abordable

Objectif 8. Accès à des emplois décents

Objectif 9. Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation

Objectif 10. Réduction des inégalités

Objectif 11. Villes et communautés durables

Objectif 12. Consommation et production responsables

Objectif 13. Lutte contre les changements climatiques

Objectif 14. Conserver et exploiter de manière durable les océans et les mers aux fins du développement durable

Objectif 15. Vie terrestre

Objectif 16. Justice et paix

Objectif 17. Partenariats pour la réalisation des objectifs

d'implémenter leurs communications asymétriques, empêchent leur application en dehors de la niche de l'identification de « tag » de la RFID. Au sein de la communauté, nous portons la conviction que cette technologie pourrait bénéficier à d'autres pans d'applications qui ont vitalement besoin des caractéristiques « sans fil » et « sans pile », notamment les capteurs IoT de surveillance des structures et implants biomédicaux évoqués plus haut. Nous nous proposons de distinguer les transpondeurs selon la classification de la Figure 50 ci-dessous et de décrire les projets futurs selon cet agencement, en réduisant notre analyse aux applications de capteurs sans fils et sans pile. Ces travaux s'appuient bien sûr largement sur les recherches et résultats précédents, en leur offrant de nouvelles perspectives scientifiques et technologiques, privilégiant des approches et perspectives applicatives en ligne avec notre philosophie d'une électronique du futur pour une société durable.

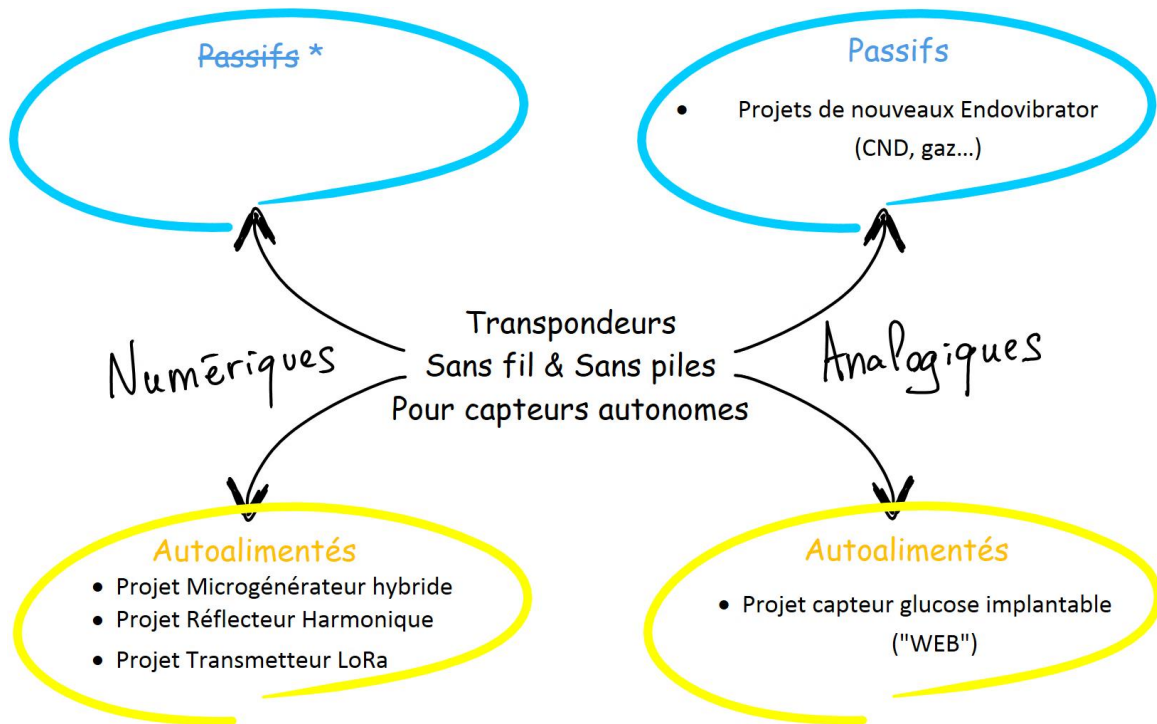


Figure 50 : Organisation des projets potentiels à venir en fonction du type de transpondeurs.

*La catégorie de transpondeurs numériques passifs n'existe pas conceptuellement car tout traitement numérique nécessite une source d'énergie (ou serait qualifiée d'analogique dans le cas contraire)

4. Transpondeurs numériques autoalimentés

Ce type de transpondeur transcrit des informations numériques (temps réel ou stockées numériquement) par rétro-modulation d'un signal RF existant (« backscatter modulation techniques ») ou par transmission directe d'un signal généré localement. Pour être autonome sans utiliser de pile, ce type de transpondeur intègre un générateur électrique. Nous souhaiterions ainsi développer dans ce cadre les trois projets suivants :

4.1. Projet de récupération d'énergie : microgénérateur universel

Titre du projet	Financement possible	Collaborations
μ -GENERATOR	(UB) BEST 4.0	IMS, I2M, LCPO, Symme

4.1.1. Principe

Une manière d'améliorer la résilience des capteurs électroniques est de puiser dans l'énergie ambiante pour répondre aux besoins de puissance d'alimentation. Ces sources à micro-échelle doivent ainsi être capables de récolter cette énergie à l'endroit de fonctionnement du capteur. Pour pallier la faible densité présente dans notre environnement, il faut implémenter plus largement la conversion collaborative hybride évoquée au chapitre 1. Le principe est présenté dans la Figure 51.

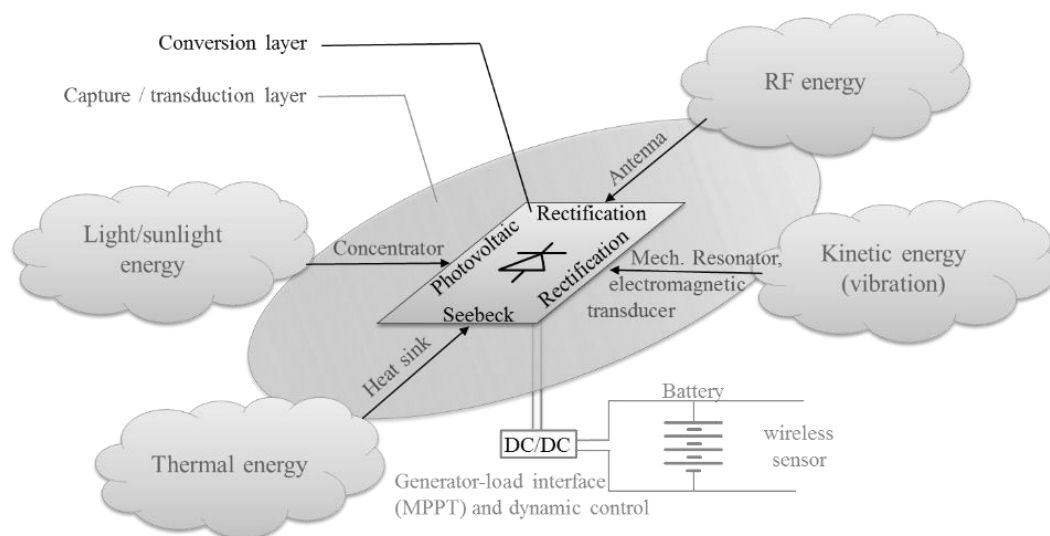


Figure 51 : Le principe du micro-générateur universel est de collecter jusqu'à 4 types d'énergie ambiante et de les concentrer dans un seul dispositif de conversion. Selon le principe proposé, l'efficacité de conversion est rehaussée par le processus de conversion collaboratif (rectification RF + rectification BF + effet photovoltaïque + effet Seebeck). Le courant continu généré est transmis à un convertisseur CC/CC qui contrôle le processus de conversion par « Maximum-Power-Point-Tracking » de la meilleure impédance de sortie. L'énergie récoltée est stockée dans une micro-batterie pour être utilisée par le capteur sans fil.

Comme montré lors du premier chapitre, l'efficacité de conversion lors du redressement d'un signal alternatif dépend fortement de la concentration d'énergie (c'est-à-dire de la densité d'énergie) dans la diode. Bien que la récupération de plusieurs énergies en parallèle ait déjà été étudiée, combiner la puissance générée par plusieurs sources [81, 82] ne permet pas d'améliorer le rendement. La vision du projet μ Generator sera de concentrer toute l'énergie disponible dans l'environnement dans un seul dispositif de conversion spécialement conçu, où elle interagira pour exacerber le processus de conversion non linéaire, et ainsi l'efficacité de la conversion. Pour arriver à cette fin, il faudra développer une nouvelle plateforme de mesure pour la caractérisation de la non-linéarité du dispositif en fonction des multiples physiques en présence.

Heureusement, l'effet photoélectrique [83] existe naturellement dans la plupart des diodes, faisant de la lumière une énergie plutôt facile à exploiter avec des semi-conducteurs. Les deux technologies de diodes précédentes sont également sensibles à la lumière grâce à l'effet tunnel assisté par les photons [84].

Les cellules solaires conventionnelles ont un comportement similaire à celui des diodes utilisées pour le redressement de signaux alternatifs de puissance, mais en raison d'une capacité de jonction extrêmement importante due à leur surface sensible, elles ne peuvent pas être utilisées pour la conversion d'énergie RF. Aussi, l'étude d'une cellule solaire spécifique de taille adaptée pourrait être une solution attrayante pour la conversion d'énergie solaire, RF et vibratoire, selon une proposition de structure schématisée sur la Figure 52. Le courant périphérique parasite dû à la recombinaison dans la tranche en dehors de la zone du dispositif devra être particulièrement analysé pour une variété de conditions de fonctionnement car il pourrait menacer l'efficacité dans certains cas. On s'attend également à ce que les photodiodes rapides (Lee, 2002 #335) puissent être appropriées pour rectifier les signaux RF et AC, ainsi que pour générer des paires trou-électron à partir de photons incidents.

Comme le collecteur proposé concentre ces trois énergies dans la jonction du dispositif de conversion non linéaire, il est très probable que les pertes entraînent une augmentation de la température. Le dissipateur thermique illustré sur la Figure 52 pourrait favoriser un gradient de température lui aussi exploitable en utilisant l'effet Seebeck (contrepartie de l'effet Pelletier). En plaçant le collecteur dans un endroit naturellement soumis à une différence de température (une fenêtre, par exemple), ce gradient peut même être augmenté.

La récolte d'énergie thermique serait une partie exploratoire de ce projet car, bien qu'il existe de nombreuses zones potentielles présentant une différence de température autour de nous, la limite de Carnot [85] stipule qu'une efficacité de conversion significative ne peut être atteinte qu'avec une différence de température de plusieurs centaines de degrés. Cependant, de grands coefficients Seebeck inhabituels et intéressants ont récemment été signalés dans la jonction tunnel magnétique (MTJ) [86]. On s'attend donc à ce que les jonctions tunnel magnétiques puissent potentiellement être intéressantes pour la conversion de multi-énergies.

Capture de l'énergie

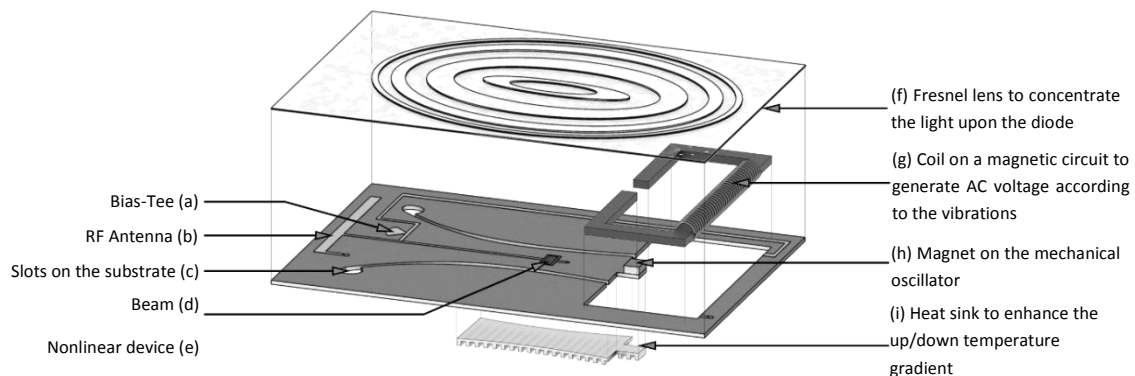


Figure 52 : Vue empilée d'une possible implémentation du générateur intégré. Une antenne capte les ondes radio ; un générateur électromagnétique (Faraday) transforme la vibration de l'aimant en courant alternatif. Une lentille de Fresnel pourrait concentrer le flux solaire dans le dispositif non linéaire monté sur un dissipateur thermique, qui sert de balancier à l'oscillateur mécanique et de référence thermique à température ambiante pour la conversion par effet Seebeck.

Mécaniquement, la partie la plus limitante du micro-générateur proposé est le transducteur de vibrations électromagnétiques. La Figure 52 montre un exemple d'intégration possible des quatre éléments de capture/transduction dans un format de carte de crédit, étendu d'après l'exemple du chapitre 1. Le transducteur de vibrations électromagnétiques à profil bas est constitué d'une

poutre (d) encastrée dans la carte en découpant des fentes (c) dans le substrat, d'un aimant permanent (h) et d'un noyau de fer (g). Afin de fournir un fort coefficient de couplage électromécanique et la tension et la puissance de sorties requises, un aimant permanent avec un fort champ rémanent sera utilisé. Notons qu'alternativement, un élément piézoélectrique pourrait être utilisé pour la transduction de vibrations mécaniques en courant alternatif. Les vibrations à basse fréquence (30-100 Hz) sont couplées sur le résonateur mécanique constitué d'une poutre découpée dans le substrat PTFE et de la « masse » associée, aimant ou élément piézo. La capture d'énergie radioélectrique est effectuée par une antenne planaire (b). Un défi technique important sera de concevoir un circuit basé sur un té de polarisation et des filtres (a) pour combiner les signaux RF et AC dans la diode. Au sommet de cette implémentation, une lentille de Fresnel (f) concentrera la lumière du soleil dans le dispositif de conversion. Un dissipateur thermique (i) sera en outre utilisé sous la diode pour augmenter la différence de température à l'emplacement du dispositif non linéaire. Au niveau système, un module de gestion de l'énergie (comprenant un convertisseur DC/DC) assurera l'interface entre le générateur de micro-énergie et la batterie.

4.1.2. Résultats préliminaires et plan de travail

Les captures d'énergies collaboratives de vibration (AC) et électromagnétique (RF) ayant déjà été démontrées en [J19], le prochain défi est la capture collaborative de puissance optique combinée à une rectification d'un signal alternatif (AC). Nous avons au sein du campus Bordelais un potentiel très intéressant pour développer les activités de récupération d'énergie ambiante. Notamment, le groupe ORGANIQUE du laboratoire IMS a développé une expertise internationale dans l'optoélectronique organique. Une rapide étude préliminaire a permis la mesure fréquentielle des cellules photovoltaïques développée par l'équipe de Guillaume Wantz (Figure 53). La fréquence de coupure des dispositifs existants est évaluée à 6 kHz, ce qui est déjà suffisant pour la rectification de puissance AC liée à l'énergie vibratoire, mais trop peu pour les fréquences radio.

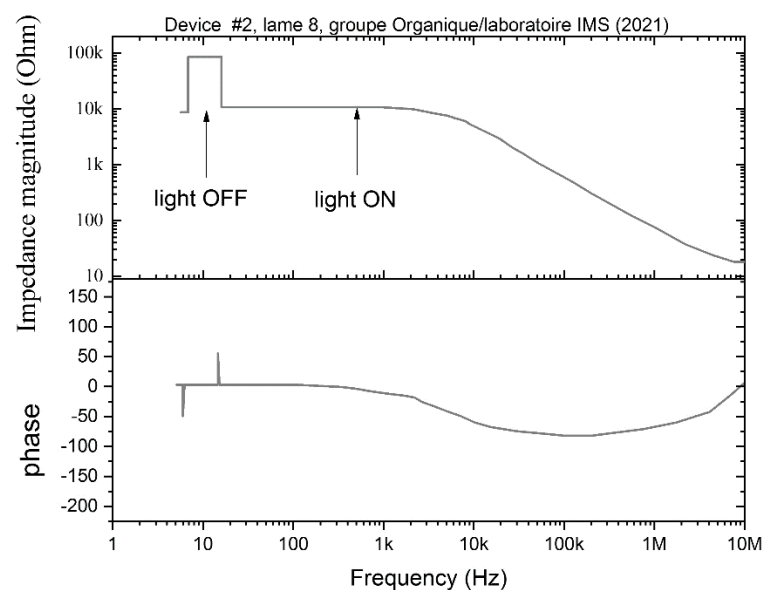


Figure 53 : Réponse fréquentielle de l'impédance d'une diode photovoltaïque organique fabriquée au sein du groupe ORGANIQUE du laboratoire IMS (module en haut et argument en bas)

Les objectifs techniques pour cette piste de recherche liée à la génération de puissance DC à partir de multiples énergie ambiantes disponibles dans l'environnement immédiat (lumière, ondes radio, thermique et vibration) sont donc :

- La démonstration d'un transducteur biénergie (vibration et lumière) à partir de dispositifs existants permettant la validation expérimentale de l'étude théorique
- Le développement d'une cellule photovoltaïque capable de fonctionner jusqu'au GHz et du circuit RF associé
- Le développement analytique de l'expression du rendement de conversion global multi-énergie en fonction des puissances en présence
- La fabrication d'un transducteur multi-énergie intégré pour capturer l'énergie ambiante avec une grande efficacité
- Le développement du circuit de pilotage des dispositifs non linéaires en mode de conversion collaborative (Maximum Power Point Tracking).

Au-delà de la première phase de ce projet qui permettra à deux équipes du laboratoire IMS de se rapprocher sur cette thématique, il y a probablement la possibilité de profiter de la dynamique de BEST 4.0 sur ce projet interdisciplinaire, susceptible de susciter des interactions constructives entre les différents acteurs de la récupération d'énergie du campus bordelais (incluant les chercheurs en énergie, en matériaux...), autour d'un axe visible à l'échelle régionale puis nationale.

De plus, il convient de surligner le potentiel pédagogique de la capture (et quantification) de l'énergie ambiante. Comme la production d'énergie électrique se fera dans leur environnement, les utilisateurs pourraient être plus conscients de la valeur de l'énergie, ce qui pourrait les inciter à l'économiser (un watt économisé vaut mieux qu'un watt produit). Ainsi, en donnant une réalité quantitative à l'énergie utilisée par le citoyen (ou en milieu scolaire), le microgénérateur permettrait de contribuer au vaste changement d'état d'esprit, et au changement des habitudes de consommation d'énergie, vers une meilleure utilisation et un gaspillage minimal.

4.2. Projet de recyclage d'énergie : transpondeurs à doubleur harmonique

Titre du projet	Financement possible	Collaborations
HARMONIC HORNET	Projet européen	INRAe, Politecnico di Torino, PolyMTL

Des exemples de circuits non-linéaires permettant de générer une deuxième harmonique à partir d'une fréquence fondamentale ont été présentés au chapitre 2. Dans la prolongation du travail déjà effectué nous nous proposons comme première piste de travail :

- L'exploitation du principe de rétrodiffusion numérique harmonique (« shift keying harmonic backscattering ») au « recyclage » du fond électromagnétique commercial ambiant par capture de cette énergie et re-radiation (par opposition à conversion).

Néanmoins, il serait maintenant opportun de mettre les connaissances générées ces années passées au profit d'autres applications, comme le traçage d'insectes et de petits vertébrés. Par exemple, bien qu'ils fassent partie des 60 % de toutes les espèces terrestres qui soient, ceux-ci sont systématiquement sous-représentés dans les études du vivant. Cette différence frappante

entre la richesse des espèces et le nombre d'espèces suivies n'est probablement pas due à un manque d'intérêt mais plutôt à l'absence de solutions techniques. En effet, la précision et la vitesse des méthodes de monitoring utilisées par les biologistes ne sont pas en mesure de suivre le comportement en temps réel, particulièrement pour les insectes volants.

Parmi toutes les techniques de détection sans fil, le système du radar harmonique mesurant des réflexions associées à une impédance non linéaire offre une grande robustesse au brouillage radar, et permet la mesure de très petites cibles à de grandes distances [87]. Dans l'exemple de la Figure 54, le radar développé par l'équipe de Riccardo Maggiora (1 kW @ 9,4 GHz) permet de localiser des transpondeurs de 12 mm à plusieurs centaines de mètres de distance¹⁷ [88]. Dans ce contexte, nous nous proposons de porter un travail de développement en collaboration avec l'équipe italienne avec pour objectif :

- L'amélioration des performances de conversion harmonique du transpondeur : analyse de la conversion par non-linéarité résistive et capacitive, amélioration de l'adaptation d'impédance de la diode, ...



Figure 54 : Transpondeur (à gauche) positionné sur le thorax d'un frelon asiatique (à droite) à l'aide d'un petit support en papier fixé par une colle orthodontique. Cette colle se polymérise en quelques secondes à l'aide d'une lampe à lumière ultraviolette à haute intensité. L'installation dure moins de 20 secondes sans anesthésie. Certains frelons ont été observés jusqu'à 2 semaines après l'opération.[88]

Remarquons enfin que les techniques harmoniques proposées ci-dessus peuvent être mise à profit pour une meilleure compréhension scientifique du monde des insectes. Alors que nous assistons à ce que certains nomment la sixième extinction de masse, fort probablement engendrée par la destruction des écosystèmes liée aux activités humaines, une meilleure connaissance des insectes et de leur comportement pourrait permettre une meilleure sensibilisation du public sur ces questions importantes [89].

4.3. Projets Modulation CSS (LoRaTunnel)

Titre du projet	Financement possible	Collaborations
ELPWAN	Prématuration AST	IMS groupe SIGNAL

¹⁷ Selon l'article : le transpondeur développé est constituée d'un fil métallique de 0,25 mm de diamètre, plié en forme de "J", avec une longueur de 4 mm et 12 mm pour les deux bras, respectivement ; une diode Schottky est soudée dans la boucle du J. Le poids du transpondeur est de 15 mg, la hauteur totale correspond au bras le plus long, soit 12 mm, le socle en papier est un carré de 3 mm de côté. Un poids aussi léger peut être manipulé par plusieurs insectes, des abeilles domestiques aux bourdons.

4.3.1. Principe

Pour que les capteurs sans fil puissent fonctionner de la manière la plus efficace qui soit, il est nécessaire de considérer aussi la manière dont l'information est encodée dans le signal radiofréquence. C'est typiquement le cas de la modulation par étalement de spectre (Chirp Spread Spectrum, CSS), qui permet la communication sans fil avec un haut rendement énergétique. Ce type de modulation permet typiquement de lutter contre le bruit du côté du récepteur jusqu'à moins de -140 dBm, comme dans le cas de la technologie brevetée Long Range (LoRa) [90] [91]. Grâce à l'ajustement possible de ses paramètres de modulation, tels que la largeur de bande, le taux de codage et le facteur d'étalement, la modulation CSS adresse déjà une multitude d'applications de capteur sans fil. Il est très intéressant de noter que plusieurs communications peuvent être supportées sur la même fréquence et le même canal en utilisant différents facteurs d'étalement, puisqu'ils sont orthogonaux.

La modulation CSS permet donc de communiquer plus loin avec la même quantité de puissance émise, ou de communiquer à distance constante avec moins de puissance émise. Aussi, il nous semble intéressant d'étudier la génération de signaux dans le contexte d'une alimentation par capture d'énergie ambiante. Le principal problème des "micro-sources" détaillée plus haut, réside dans le fait que sous des conditions d'efficacité maximale de conversion de l'énergie, la tension de sortie est généralement trop faible pour les systèmes intégrés aux composants (System on Chip, SoC). Par exemple, les puces radiofréquences LoRa ont généralement besoin de 3 V pour fonctionner. Bien qu'il existe des stratégies pour augmenter la tension de sortie de la micro-source (conversion DC-DC, multiplieurs de tension...), celles-ci conduisent inexorablement à la réduction de l'efficacité globale.

Notre proposition est de concevoir un modulateur CSS ultra-basse tension capable de fonctionner avec des niveaux de l'ordre de la centaine de millivolts. Notre circuit est basé sur la conversion de charges accumulées dans un condensateur en rampes de fréquence (« chirp »), où chaque section de chirp est générée par une décharge. Ce circuit comprend un générateur de rampe et un oscillateur à diode tunnel commandé en tension.

4.3.2. Résultats préliminaires¹⁸

Le circuit est bâti autour d'une diode tunnel (Figure 55-a) dont la résistance négative permet la génération d'une oscillation à très faible tension. Dans l'exemple de la Figure 55 le VCO est prévu pour fonctionner de 290 mV à 300 mV, mais les résistances dynamiques de certaines diodes tunnel, notamment les diodes « backward » ont des comportements négatifs dès 50 mV ce qui pourrait permettre d'adapter l'idée proposée à de plus faibles tensions.

¹⁸ communiqué lors de la conférence WPW2022 [C54]

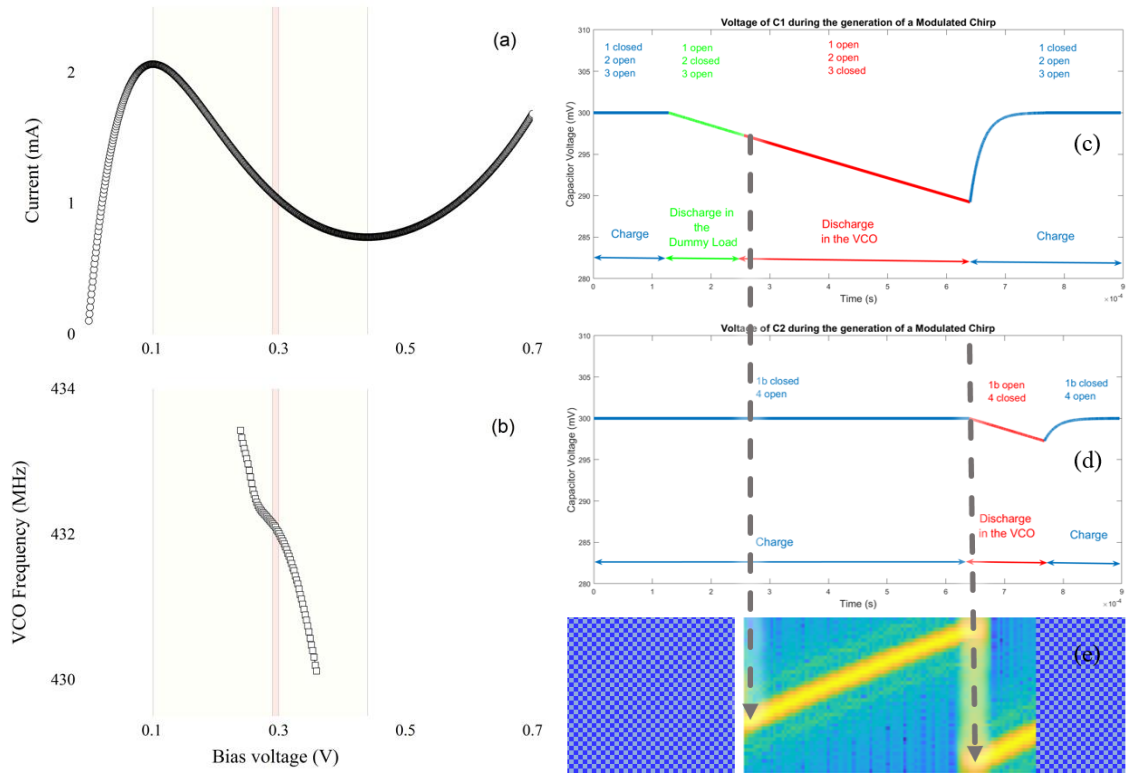


Figure 55 : L'oscillateur contrôlé en tension est l'une des deux briques de base du démonstrateur préliminaire. Il utilise une diode tunnel 3N306E ayant une résistance dynamique négative 0,1 à 0,4 volts (a) et est caractérisée par une sensibilité en tension minimum à 0,3 V (b). La deuxième brique de base est constituée de plusieurs générateurs de rampes en tension (c) et (d) de manière à synthétiser chaque section du symbole dont le spectrogramme fréquence = f (temps) est illustré en (e).[C54]

Comme la valeur de la résistance dynamique ($R_d = dV/dI$) varie pour chaque tension de polarisation, et que le condensateur de jonction parasite de la diode varie lui aussi en fonction de la tension de polarisation, la diode tunnel est naturellement appropriée pour fonctionner en oscillateur contrôlé en tension (VCO). La réponse *fréquence-tension* de la Figure 55-b a été obtenue en modifiant le circuit de l'amplificateur en réflexion (présenté au chapitre 2) pour qu'il fonctionne en dehors de sa zone d'instabilité (Figure 35). Pour contrôler la fréquence d'oscillation, le circuit à diode tunnel est adjoint à plusieurs générateurs de rampes chargés de synthétiser chaque section des symboles (Figure 55-c ,d).

La communication CSS utilisée typiquement dans le protocole propriétaire LoRa est basée sur une rampe de fréquence (« chirp ») découpée en deux parties et assemblée en ordre inversé, l'information étant contenue dans la position du découpage. Un symbole peut alors être vu comme une juxtaposition de deux sections de chirps transitionnant au moment du découpage (Figure 55-e). Pour chaque symbole nous utilisons donc deux générateurs de rampes analogiques basés sur des décharges de condensateur (Figure 55-c et Figure 55-d), dont un exemple de circuit est illustré en Figure 56.

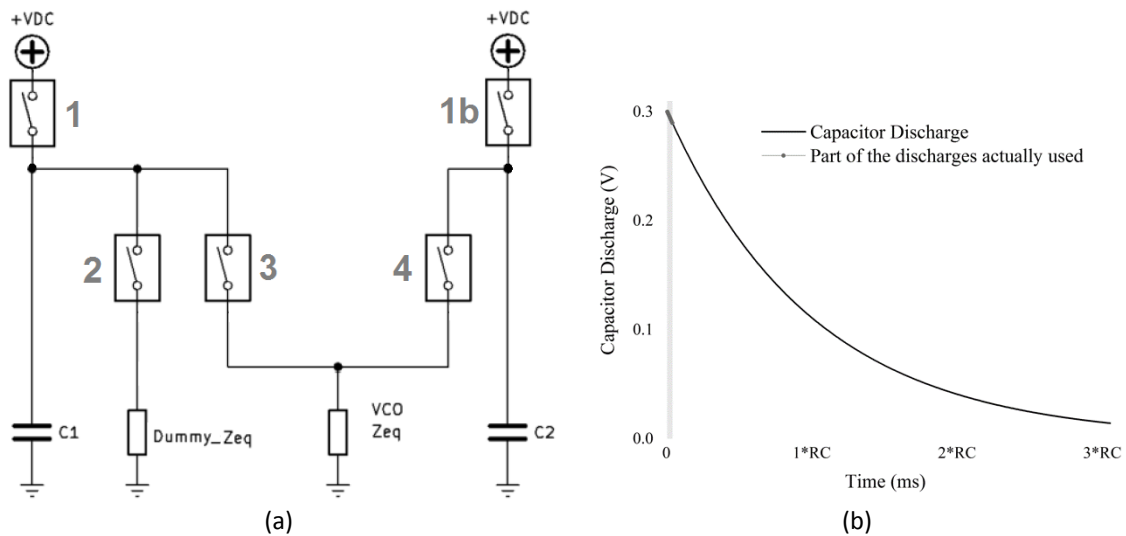


Figure 56 : (a) Schéma de deux générateurs de rampes capables de piloter le VCO pour créer un symbole. La séquence d'actionnement est indiquée sur la Figure 55-c et -d : tous les interrupteurs sont normalement ouverts et sont ouverts à la fin de chaque phase. Pendant la phase initiale, les condensateurs C1 et C2 sont chargés via les interrupteurs 1 et 1b jusqu'à 300 mV. Juste avant la génération de la première section de chirp, le condensateur C1 est déchargé pour atteindre sa valeur de départ (en actionnant l'interrupteur 2). La première partie du symbole peut alors commencer, la fermeture de l'interrupteur 3 permet la décharge du condensateur C1 dans la diode tunnel (d'impédance VCO_Zeq) jusqu'au moment de la transition. L'interrupteur 4 prend alors le relais et décharge le condensateur C2 dans le VCO pour produire le deuxième segment du symbole. (b) La décharge des condensateurs C1 et C2 est utilisée sur seulement 4% de la décharge en tension pour produire une rampe pseudo linéaire.[C54]

Pour pouvoir contrôler les interrupteurs par des temporisations (évitant le monitoring des tensions de C1 et C2), il est important que les combinaisons possibles de C1 et C2 avec VCO_Zeq et $Dummy_Zeq$ aboutissent systématiquement aux mêmes constantes de temps. Dans le démonstrateur construit ici, les condensateurs ne sont déchargés que de 100% à 96% de leur valeur initiale de manière à générer un chirp pseudo-linéaire. En façonnant la réponse du VCO, il est possible d'obtenir une courbe en U, ce qui permet de générer des rampes de fréquences ascendantes et descendantes. Cette fonctionnalité est par exemple nécessaire pour la génération du préambule LORA qui inclut des *up-chirp* et des *down-chirps*. La Figure 57 illustre la génération d'une trame complète pour une puissance consommée par le VCO de 210 μW .

Remarquons enfin que les bandes LoRa ne sont pas les seules à considérer pour de futures applications, et que les bandes ISM à 2,4 GHz pourraient offrir un bon compromis entre les pertes de propagation et la taille des antennes. Il conviendra alors peut-être d'utiliser les diodes au-delà de leur fréquence de coupure naturelle [92].

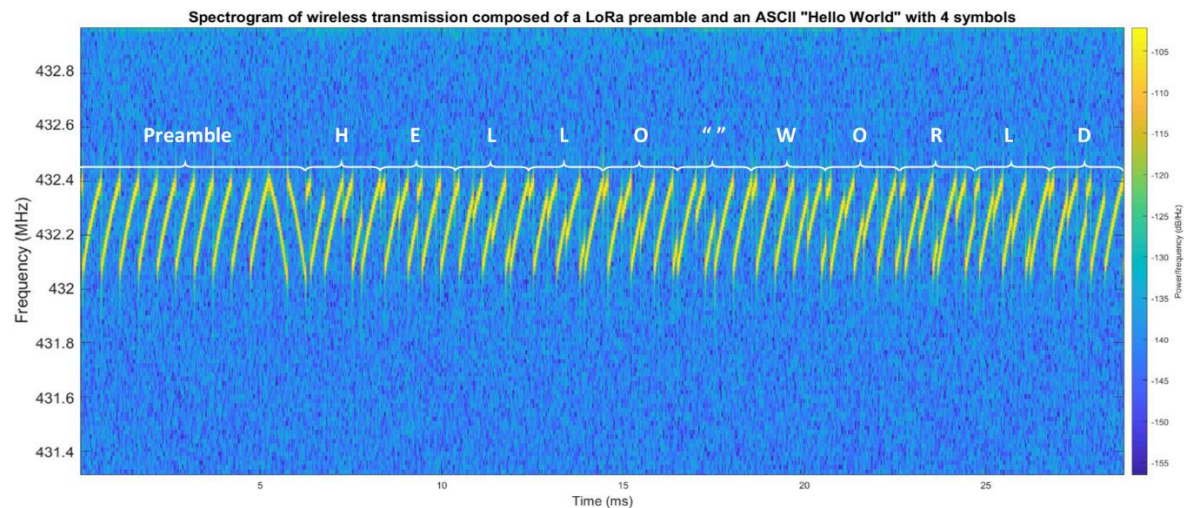


Figure 57 : Spectrogramme d'une transmission sans fil en modulation CSS, composé d'un préambule LoRa (utilisant des rampes ascendantes de fréquences) ainsi que du message « HELLO WORLD » codé en ASCII sur 4 symboles. [C54]

4.3.3. Plan de travail

Le marché / l'application actuelle du LoRa est principalement sur les émetteurs IoT. Il y a notamment un besoin important pour des « beacon » LoRa (mode TX uniquement) avec des efficacités spectrales non critiques, mais avec une durée de vie extraordinairement grande, pour des objets auxquels l'accès ne sera plus possible après déploiement.

Les grandes directions de travail pour cette recherche sont :

- (i) La formulation analytique du système de communication, de la modulation à la réception de l'information : celle-ci permettra de déterminer une figure de mérite capable de quantifier la distance parcourue par quantité d'énergie nécessaire à la génération de chaque bit ($m/\mu J$)
- (ii) La réduction de puissance consommée par l'émetteur (en μW) ainsi que l'amélioration de son efficacité (puissance RF/puissance DC)
- (iii) La réduction du taux d'erreur binaire de la communication.

Sur le plan théorique, il est nécessaire de déterminer les limites physiques du principe de modulation par décharge de condensateur en termes de nombre de bits maximum par symbole en considérant la plage de décharge utilisée (le démonstrateur utilise 4% de la décharge).

Sur le plan Hardware TX & low-power :

- Il sera intéressant d'utiliser un circuit de contrôle très faible puissance (FPGA ?) et des interrupteurs capables de fonctionner aux mêmes faibles tensions que le VCO (utilisation de technologies CMOS ?).
- En ce qui concerne la puissance consommée par le VCO, il pourra être intéressant d'implémenter des diodes « backward » qui ont la particularité d'avoir une tension de pic plus faible (50 mV), correspondant aussi à un courant plus faible de manière à utiliser une puissance DC inférieure au microwatt pour l'oscillation. Dans ces conditions, il faut s'attendre à une puissance RF TX de l'ordre de -40 dBm, ce qui, en considérant une puissance RX pouvant aller jusqu'à -140 dBm, permettrait 100 dB de pertes de

propagation, soit une distance allant jusqu'à 3 km en champ libre à une fréquence de 1 GHz (« Free Space Path Loss ») avec des antennes de gain unitaires.

- Enfin, il sera intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser des batteries au lieu de condensateurs (pour un courant de fuite faible), c'est-à-dire deux batteries par symbole à envoyer. Dans pareille configuration, on attendrait d'avoir chargé la multitude de micro batteries avant de lancer une transmission.

Sur le plan Hardware TX & communication :

- Les modèles analytiques et circuits complets du VCO permettront de mieux façonner sa réponse pour fonctionner à une fréquence compatible avec les bandes ISM (430,050 à 434,790 MHz et 868 à 870 MHz) et à l'intérieur de la bande de 250 kHz utilisée par le protocole LoRa. Au besoin, la stabilité en fréquence du VCO pourra être renforcée (notamment sa dérive en fonction du temps ou de la température) par l'utilisation de résonateur à fort coefficient de qualité (quartz ?). L'amélioration du *bias-T* permettra d'éviter la perturbation du VCO par variation d'impédance (« impedance pulling ») dans le circuit en bande de base (développement & validation du Bias-T). Enfin, un façonnage symétrique de la réponse du VCO permettra d'obtenir le même comportement en rampe fréquentielle ascendante et descendante.
- L'augmentation de l'efficacité spectrale du dispositif pourra être améliorée alors que le démonstrateur ne permet de coder que $N = 4$ bits par symbole. Pour passer à $N = 64$ et contrôler finement la discontinuité de chaque symbole, il sera nécessaire de maîtriser parfaitement le timing des interrupteurs, nécessitant un circuit de contrôle fonctionnant à une fréquence plus élevée, ainsi que la fréquence du VCO. Dans le cas illustré en Figure 57, le démonstrateur était piloté par un circuit ATMEGA328P cadencé à une fréquence d'horloge de 8 MHz.
- Augmenter la linéarité des rampes de tension pourra se faire en utilisant des condensateurs de grande capacité. L'amélioration de la précision des rampes sera effectuée *via* l'unification des constantes de temps de chaque générateur de rampe (« tuning » des valeurs de capacités et résistances ? « trimming » laser à la fabrication ? Une autre piste à étudier sera l'implémentation d'un convertisseur DC/DC qui permettrait de piloter directement la tension appliquée au VCO sans avoir besoin de « dummy load », le challenge étant de générer la bonne tension au bon moment avec une très bonne précision. Il pourrait être envisageable dans le même sens de chercher à implémenter un DAC, qui devra être très basse tension, et présenter une bonne résolution (par exemple MAX5522 avec 1,8 V & 8 μ A).
- Alternativement, il pourrait être envisageable de mettre le minimum de contraintes sur la partie « communication » de l'émetteur pour maximiser le rendement énergétique.

Sur le plan Software RX & communication :

- Les éléments susceptibles d'entraver la bonne interprétation des symboles envoyés (et donc la capacité à transmettre une information à longue portée) sont un décalage en fréquence, la largeur de bande du signal reçu ainsi que la linéarité des symboles. Le traitement du signal reçu est capital car il permettra de relâcher les contraintes hardware,

autorisant une grande part de variabilité dans la fabrication des émetteurs et facilitant ainsi leur réalisation et un faible coût.

- Les effets fréquentiels, pourront être traités par des algorithmes appropriés et seront pris en compte de manière différente selon que la stabilité soit maintenue pendant la durée de la trame ou non.
- Pour remédier aux problèmes de linéarité des symboles, il convient de traiter le problème en deux phases. Les effets de pseudo-linéarité des rampes de tension sont liés aux décharges de condensateur et dépendent donc du temps. Aussi, il pourrait être utile d'étudier les possibilités de faire une transformée dans le plan conforme de chacune des sections composant la trame afin de compenser les effets de décharge capacitive (ce qui peut être vu comme une distorsion temporelle). Cette technique pourrait en outre permettre de prendre en charge la particularité de chacun des générateurs de rampe de tension (le démonstrateur utilisait 2x3 générateurs de rampes de tension dans l'exemple de la Figure 57).
- Enfin, il conviendra de déterminer la nature du préambule nécessaire pour ce fonctionnement « dégradé » dans lequel chaque émetteur est unique (le moins standardisé possible) et la résilience du réseau est poussée à son maximum. Cette façon de concevoir l'électronique s'inscrit dans la nouvelle philosophie visant à permettre l'avènement du paradigme de la résilience (contre celui du débit aujourd'hui).

5. Transpondeurs analogiques passifs (sans pile)

5.1. Endovibrateur : l'aube nouvelle du capteur analogique

Au jeu de l'efficacité énergétique, les dispositifs analogiques passifs sont rois. Ils ne nécessitent en effet aucune capture ni stockage d'énergie simplifiant ainsi la complexité des systèmes. Ce type de dispositif se montrera essentiel dans le futur pour surveiller et maintenir nos structures et infrastructures dans un contexte de résilience. Ce type de capteur peut ainsi être vu comme un simple transducteur, bien souvent linéaire qui transforme une variable physique en communication sans fil (par exemple un déplacement, un changement de permittivité...).

C'est le cas d'un micro espion inventé vers la fin de la guerre par Léon Théremin, citoyen Soviétique et inventeur de l'instrument de musique du même nom. Ce micro est connu des annales de l'espionnage pour avoir été en service dans les locaux de l'ambassade des USA à Moscou pendant six ans, caché à l'intérieur d'une sculpture en bois du Grand Sceau des États-Unis. Conçu à partir d'une cavité micro-onde résonante coaxiale dont une face est remplacée par un diaphragme, son fort coefficient de qualité lui permet de présenter un pic d'absorption très fin, et dont la fréquence dépend directement de la position temps réel du diaphragme. A l'utilisation, le dispositif est éclairé par un puissant faisceau directif radiofréquence continu (« Continuous Wave », CW) dont une infime partie est réfléchi par le dispositif. Cette réflexion variant en fonction de la position du diaphragme, l'onde réfléchi est modulée en amplitude par le son présent dans la pièce [93]. La Figure 58 illustre ce dispositif qui, par sa technologie, marque aussi l'histoire des capteurs analogiques passifs, et donc sans batterie.

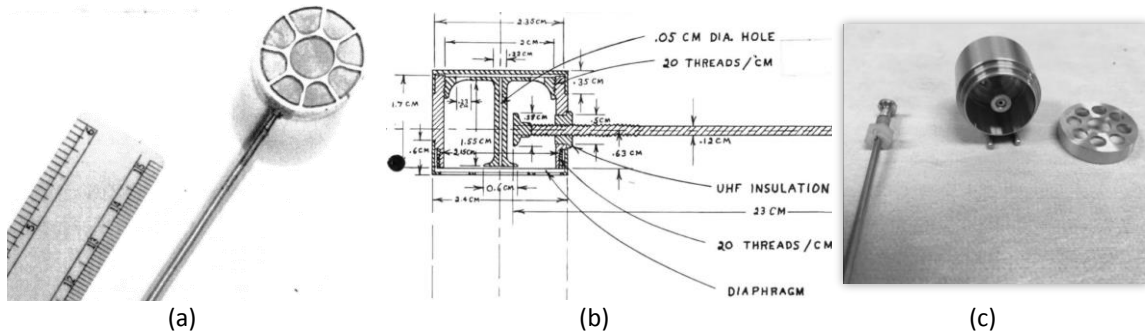


Figure 58 : (a) Vue du dispositif découvert en 1951 dans l'ambassade des USA à Moscou. (b) Schéma de construction (confidentiel jusque 2020) produit pour le FBI, et (c) réplique construite au laboratoire IMS par Serge Destor.

Pour cette raison, nous pensons que les endovibrateurs sont à l'aube d'une renaissance. Etant naturellement passifs, ces dispositifs sont extrêmement résilients non seulement à l'infrastructure réseaux mais aussi aux agressions électromagnétiques qui pourraient endommager les dispositifs implémentant des composants actifs, tels que ceux évoqués à la section précédente. Ainsi, nous proposons ici quelques pistes de recherche basées sur ce principe.

5.1.1. Application à la transduction ultrasonore

Titre du projet WIRELESS CND	Financement possible UB	Collaborations I2M
---------------------------------	----------------------------	-----------------------

Comme les ondes ultrasonores se propagent particulièrement bien dans les matériaux, celles-ci sont souvent implémentées pour le contrôle non destructif (CND) des matériaux et des structures de petite à grande échelle. Pour exciter les modes de propagation acoustique et les mesurer, une des méthodes utilisée sur le campus Bordelais au sein du laboratoire I2M est la transduction à couplage air [94] présenté sur la Figure 59.

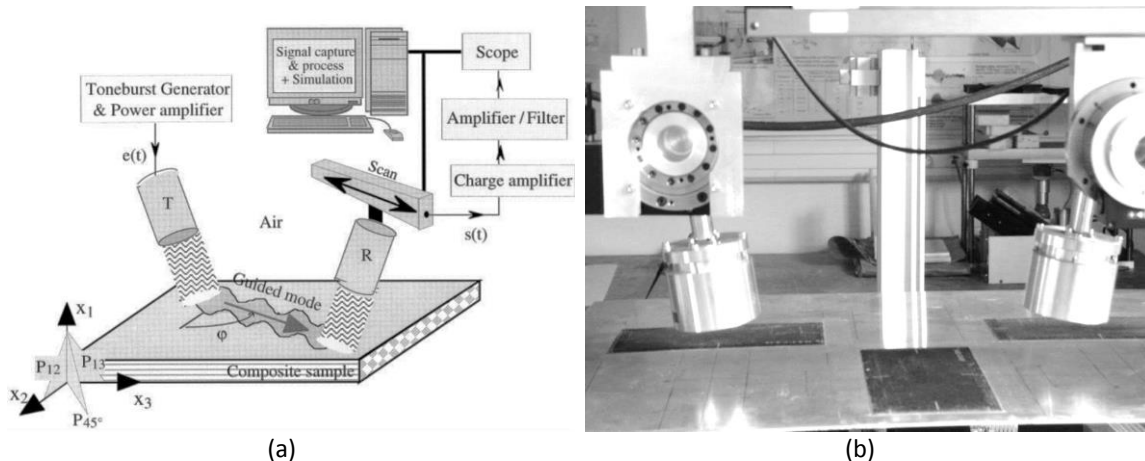


Figure 59 : (a) Méthode de transduction à couplage air déployé au laboratoire I2M pour mesurer les propriétés de propagation d'ondes acoustiques dans les plaques et (b) photographie d'un banc de mesure.

Le principe de cette piste de recherche est de fusionner les techniques de mesure CND utilisées au laboratoire I2M avec les techniques de mesures sans fil de la cavité résonante, de manière à faire un premier pas vers la « SHM sans fil » (suivi de structure ou « Structural Health Monitoring », SHM). Notons que l'endovibrateur étant passif, il ne peut être utilisé pour exciter un mode

acoustique dans un matériau, mais peut tout à fait être implémenté pour la réception du signal. La réplique de l'endovibrateur de la Figure 58 à l'échelle 3:1 sera utilisée dans un premier temps, car très proche de la géométrie des transducteurs actuellement implémentés. Dans un deuxième temps, il sera utile d'étudier d'autres structures d'endovibrateurs permettant de simplifier la fabrication et réduire leur coût, tout en gardant une forte sensibilité aux vibrations acoustiques ultrasonores (l'exemple d'un endovibrateur « frugal » est illustré en Figure 60).

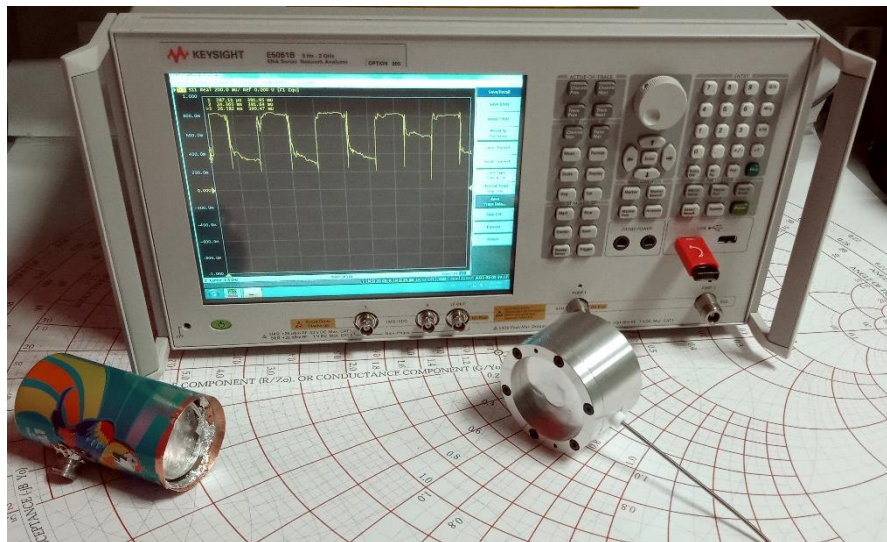


Figure 60 : Photographie de deux endovibrateurs construits selon le principe de la cavité résonante de la Figure 58. Le dispositif visible en bas à gauche a été réalisé avec une cannette de soda et une feuille d'aluminium par Pierre GRASSET et Lucien MIARA dans le cadre d'un projet tuteuré de la licence Pro CAFIEM. Le dispositif de droite a été fabriqué par Serge Destor au laboratoire IMS.

5.2. Application à l'économie d'énergie des bâtiments pour des capteurs de CO₂

Titre du projet WIRELESS LOVE	Financement possible MDA	Collaborations Univ. Guyane
----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------

Dans le même principe, il serait intéressant d'envisager la conversion de résonateurs à ondes acoustiques de surface (notamment très bien maîtrisés par l'équipe MDA du laboratoire IMS) en endovibrateurs. Deux étapes sont nécessaires : transformer les circuits deux ports en circuits 1 port et adjoindre une antenne avec son réseau d'adaptation. Une application pourrait notamment être envisagée pour la détection de gaz, pourquoi pas le CO₂ qui est un marqueur de l'utilisation des pièces dans un bâtiment.

Afin de fonctionner avec un système de mesure similaire à celui des endovibrateurs (modulation AM par variation d'une quantité physique dans le temps), il pourrait être opportun de placer ce capteur dans un flux de manière à être exposé en permanence à des variations. Des états stables peuvent aussi être mesurés, avec des dispositifs un peu plus complexes mettant en œuvre des techniques telles que le radar à balayage de fréquence (FMCW).

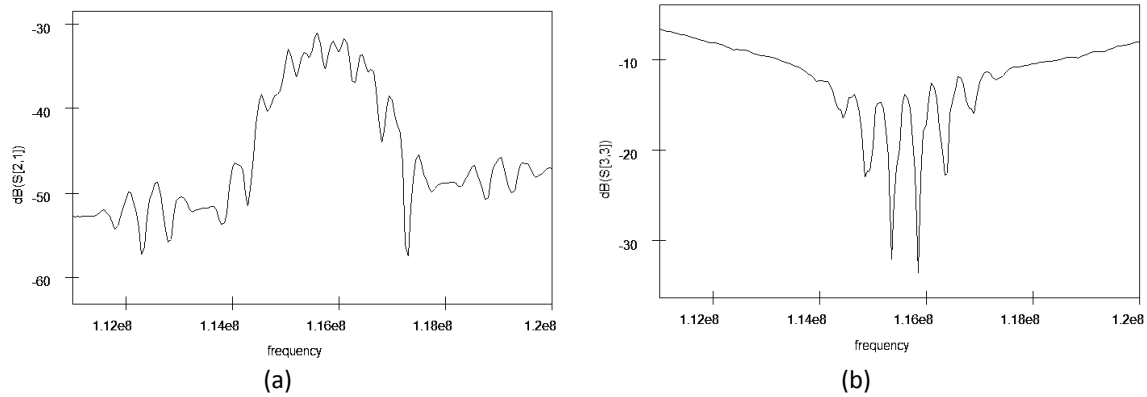


Figure 61 : (a) Transmission S_{21} d'un Capteur acoustique à onde de Love R21B_01H de l'équipe MDA mesuré en 2 ports et (b) simulation (logiciel ADS) du paramètre de réflexion S_{11} après intégration d'un déphaseur pour fonctionner en absorption sur 1 port.

6. Application au monitoring pour la résilience des structures et infrastructures

6.1.1. Principe et résultats préliminaires

Titre du projet WIRELESS PZT	Financement possible ArianeGroup	Collaborations ArianeGroup, I2M
--	--	---

La dernière piste de recherche liée au principe d'endovibrateur consiste à remplacer la cavité micro-onde par une cavité acoustique excitée par un transducteur piézoélectrique. Nous menons cette étude avec ArianeGroup qui est intéressée par des mesures permettant d'évaluer l'intégrité de la structure de la fusée Ariane 6. Cette mesure, classiquement réalisée à l'aide d'une clé dynamométrique, n'est pas assez précise à cause des frictions non linéaires entre les différentes parties des assemblages. Le capteur de tension de boulon sans fil proposé pour cet axe est illustré à la Figure 62. Le résonateur interne est fabriqué à partir du boulon lui-même, collé à un transducteur piézoélectrique. Le boulon métallique se comporte comme un guide d'ondes acoustiques très efficace. Il est terminé par une forte discontinuité d'impédance, de sorte d'une onde acoustique stationnaire se forme, avec des interférences constructives et destructives, et qui permet d'aboutir à un facteur de qualité acoustique suffisamment élevé pour être utilisé pour une mesure sans fil. Lorsque le boulon est tendu par le serrage, la vitesse de l'onde acoustique diminue, ce qui a un impact sur la longueur acoustique effective du résonateur et sa fréquence de résonance (Figure 62-b).

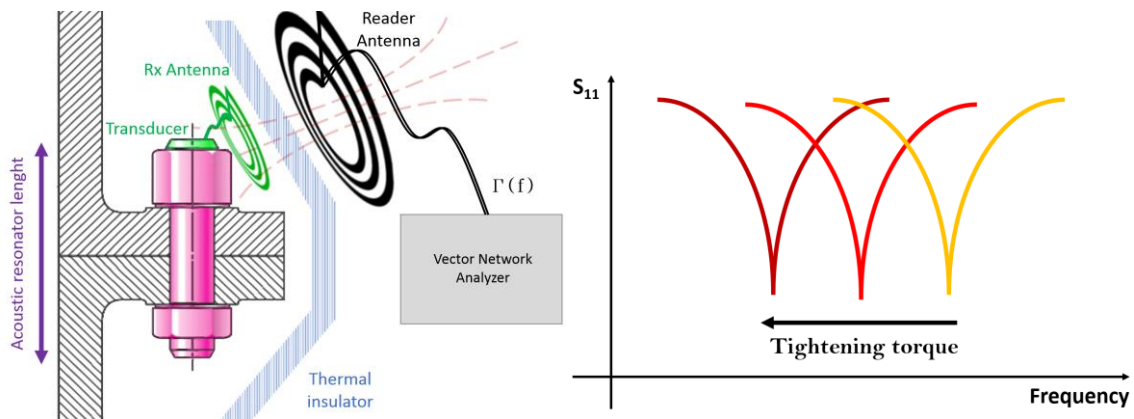


Figure 62 : Principe de fonctionnement de l'endovibrateur permettant de mesurer la tension d'un boulon grâce au déplacement du pic de résonance ou pic d'absorption.

En pratique, du point de vue électrique, le transducteur piézoélectrique est connecté via un réseau d'adaptation à une spirale permettant de réaliser une liaison de transfert d'énergie sans fil (WPT) couplée magnétiquement (champ proche) sur quelques centimètres. Cela permet d'échanger efficacement de l'énergie entre le résonateur acoustique interne et le lecteur externe. Enfin, la lecture de l'endovibrateur se fait simplement en suivant la fréquence de résonance - ou d'absorption - sur les mesures du coefficient de réflexion (S_{11}).

Pour valider le principe de « l'endovibrateur CND », des mesures préliminaires ont été effectuées avec une distance de transmission de 2 cm en chambre thermique afin de faire varier facilement les paramètres de propagation acoustique dans une vis. Cette technique permet en effet de simuler facilement différents couples de serrage sur la vis sans nécessiter d'installation mécanique complexe. La Figure 63 représente la fréquence d'absorption mesurée pour 6 températures différentes, montrant une pente de $-800 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$.

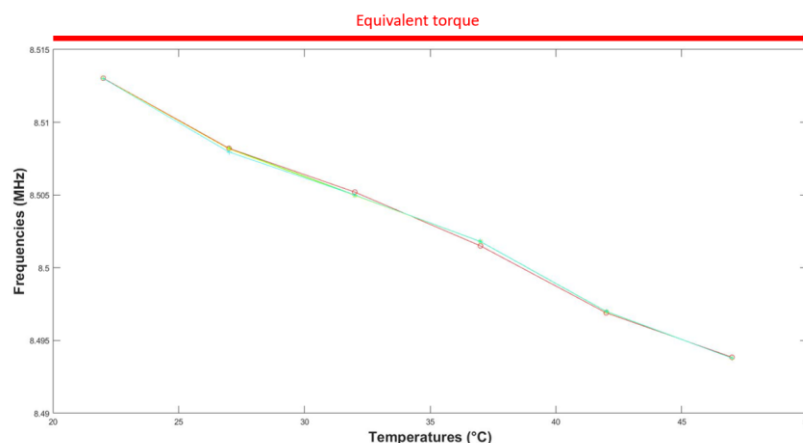


Figure 63 : Fréquence de résonance de l'endovibrateur CND pour différentes températures, « simulant » différents couples de serrage.

Remarquons enfin que les mesures rapportées ici sont statiques (tension du boulon en régime permanent uniquement). Mais la technologie de l'endovibrateur excelle dans la mesure de l'état dynamique, ce qui suggère que la mesure de la contrainte mécanique en temps réel sera possible dans un avenir proche, que ce soit dans des conditions d'émission acoustique ou éventuellement en vol.

6.1.2. Plan de travail

Le plan de travail pour l'aboutissement à un démonstrateur industriel se décline en trois points :

Description théorique (analytique et modèle électrique) de l'ensemble du système, de la résonance acoustique au couplage magnétique, de manière à déterminer les limites physiques en termes de rendement énergétique et de sensibilité. Il sera notamment intéressant d'étudier plus en profondeur les effets d'interférences sur des axes différents de manière à potentiellement être en mesure de découpler les effets en fonction de la tension et la température d'après la signature spectrale.

Développement hardware de l'endovibrateur, pour renforcer les capacités à mesurer le phénomène à grande distance (c'est-à-dire amélioration du rendement du transfert de puissance tout en minimisant la taille de l'antenne pour une meilleure intégration dans la vis) et à mesurer les phénomènes physiques avec une grande sensibilité et résolution (c'est-à-dire amélioration du facteur de qualité acoustique en minimisant les pertes). Pour un meilleur fonctionnement, il sera en outre nécessaire d'aligner la fréquence de résonance du résonateur acoustique avec les fréquences optimales de la transduction piézoélectrique et de la fréquence optimale de la transmission par couplage inductif.

Post-traitement du signal pour renforcer la résilience de la mesure. Il est en particulier envisageable d'effectuer de nombreuses mesures à des distances différentes (donc pour des coefficients de couplages différents) de manière à extraire l'impact du couplage dans le résultat de la mesure. Il serait aussi souhaitable d'effectuer des mesures supplémentaires pour définir les limites des incertitudes de mesure. Dans le cadre du post-traitement, une méthode devra ensuite être définie et implémentée, pour suivre plusieurs centaines de vis au cours de la vie d'un lanceur.

Enfin, il reste à mener une étude plus poussée pour évaluer dans quelles conditions nous sommes en mesure de réaliser une mesure rapide et précise à la fois en étant en mesure de récupérer toutes les informations utiles (dans l'idéal dans l'ordre de la seconde mais cela reste à déterminer).

Dans l'optique d'identifier les vis sondées dans le cadre de mesures à grande échelle / simultanées par exemple, il est possible d'assigner à chaque vis un identifiant qui lui est propre en utilisant un tag RFID (Radio-Frequency Identification). Le système, pouvant être de très petite taille et opérant à de plus ou moins longues distances en fonction de la puce choisie, comprend un émetteur-récepteur (transpondeur) RFID pour l'interrogation et la réception, et une radio-étiquette passive. L'émetteur envoie un signal numérique d'interrogation à l'étiquette passive qui, au moyen d'une micropuce intégrée, répond en renvoyant son identifiant au récepteur. Le système doit être accompagné d'un système de traitement numérique ou au moins d'un démultiplexeur pour ensuite assurer les correspondances nécessaires. Le tag est seulement « alimenté » par couplage électromagnétique par le transpondeur lors de son interrogation. Cette amélioration significative apportée au sondage des transducteurs pourrait à terme rendre l'ensemble du système industrialisable et ce pour d'autres domaines tels que le génie civil (détection de défauts sur les bâtiments et structures diverses).

7. Transpondeurs analogiques actifs sans pile et sans fil : Application biomédicale au développement d'un capteur de glucose intégré

L'ensemble de cette partie est issue d'une demande ANR dont je suis le porteur. Les travaux sont dans leur toute première phase, ils me tiennent particulièrement à cœur car ils constituent un très bel exemple de mise à disposition des résultats de plusieurs directions technologiques au service d'une application utile pour la société. Intitulé « Wireless Endogenous parameter Bio-transduction », le projet WEB concerne en effet une niche médicale pour laquelle il est possible de capter l'énergie du corps pour alimenter un circuit électronique analogique.

Titre du projet	Financement possible	Collaborations
WEB	ANR	BIOTIS, CRPP, ISM

7.1. Rappel du contexte médical

Comme indiqué dans le chapitre 1, les biocapteurs doivent être invisibles et ne doivent pas nécessiter de soins spécifiques pour bénéficier au maximum au patient, sans dégrader sa qualité de vie. Cette rhétorique se traduit le plus souvent sous la forme d'un dispositif médical implanté (IMD en anglais). Cela implique que le microsystème doit exécuter des tâches de mesure en autonomie. Cependant, en raison des réactions du corps suite à l'implantation, la précision de la mesure diminue progressivement (celle-ci peut être maintenue au prix de nombreuses mesures supplémentaires effectuées par le patient lui-même pour recalibrer le système, ce qu'il perçoit comme une charge lourde au quotidien [95]). Les biocapteurs implantés fonctionnent avec des sources d'énergie autonomes, typiquement une batterie. Malheureusement, la taille de celle-ci et son poids sont généralement assez élevés, de sorte qu'un IMD électriquement fonctionnel n'est pas bien adapté à la plupart des applications implantées. Ces inconvénients pourraient être acceptables pour les dispositifs transcutanés, mais pour les endroits profonds comme le cerveau, il n'y a tout simplement pas assez de place pour implanter le dispositif en raison de son volume trop important.

Notre hypothèse est que les verrous technologiques des biocapteurs implantables sans fil (qui empêchent aujourd'hui les patients de profiter pleinement de leurs avantages) sont les capacités simultanées d'auto-calibrage et la réduction de la taille de l'IMD. À ce jour, ces questions n'ont pas été abordées mutuellement dans le monde de la recherche, car elles dépendent de deux communautés distinctes (algorithmes pour le traitement des capteurs et des signaux d'une part, tenant rarement compte des exigences en matière de consommation énergétique, et conception de microsystèmes d'autre part, qui est souvent conditionné par la culture de l'empilement de blocs fonctionnels). Pourtant, l'intégration des fonctions et des physiques pourrait permettre de réduire la taille des structures et de contrôler la réponse des détecteurs avec des dispositifs auto-calibrés.

De plus, nous pensons que l'utilisation de biocapteurs implantables permettrait une amélioration significative de la façon dont les maladies chroniques sont traitées et comprises. Pour démontrer comment l'amélioration de la précision et la réduction de la taille de ces capteurs peuvent être réalisées simultanément dans un domaine médical donné, nous avons choisi comme exemple

l'application à la surveillance continue du glucose (CGM, « Continuous Glucose Monitoring »). Le diabète est un grand problème de santé publique, susceptible de provoquer de nombreuses complications de santé invalidantes [48]. Il mérite donc d'être traité de manière prioritaire dans le cadre de ce projet, pour lequel nous visons simultanément une meilleure précision de la lecture du glucose et une taille réduite (tableau 1). Cependant, le concept que nous proposons est généralisable au suivi d'autres maladies, au-delà de la surveillance CGM.

Tableau 1: Comparaison de la technologie proposée avec les appareils commerciaux existants.

Device	Dexcom G6 [96]	Abbott Freestyle Libre [97]	WEB Device from this proposal
Weight	Heavy battery	Tiny battery	No battery-> lightweight
Type	Active	Semi-passive (phone-flashed)	Self-powered
Self-triggered glycaemia alerts	Yes	No	Yes
Self-calibration	Good	Poor	Good capabilities (sensing electrochemical fatigue & fibrosis)
Accuracy (MARD*)	9.9%	9.4%	<<10% (expected)
Lifetime	7-10 days (heavy)	10-14 days (lightweight)	>14days (expected)
PPrice	Very expensive	Not expensive	Cheap (expected)

*MARD: Accuracy is best measured by looking at MARD – Mean Absolute Relative Difference. This represents the difference between "fingerstick" calibrations and glucose sensor values, so a lower MARD is better.

7.2. Concept et résultats préliminaires

Le chapitre 2 a été l'occasion de présenter les travaux de notre « équipe projet Biopile » à l'intersection de l'électromagnétisme, de l'électrochimie et de la biologie. Néanmoins, ces travaux ont abouti aux mêmes écueils que les technologies CGM commerciales actuelles, c'est-à-dire que les données recueillies avaient une fiabilité limitée en raison de l'absence de capacités d'auto-calibrage mais surtout, l'antenne était trop encombrante pour une implantation complète et la tension de la BFC était trop faible pour alimenter directement un circuit électronique.

Les travaux sur les VCO à diode tunnel, sur la transmission sans fil, et sur la biopile nous ont néanmoins permis de proposer trois innovations que nous souhaitons exploiter dans ce projet :

Réduction de la taille. Nous avons réussi à faire fonctionner une électrode simultanément comme une anode BFC et comme une antenne spirale à 20 MHz (Figure 64). Puisque l'antenne est habituellement l'élément le plus grand dans un IMD et puisque la BFC a besoin d'une grande surface active, nous espérons économiser un grand volume avec cette stratégie.

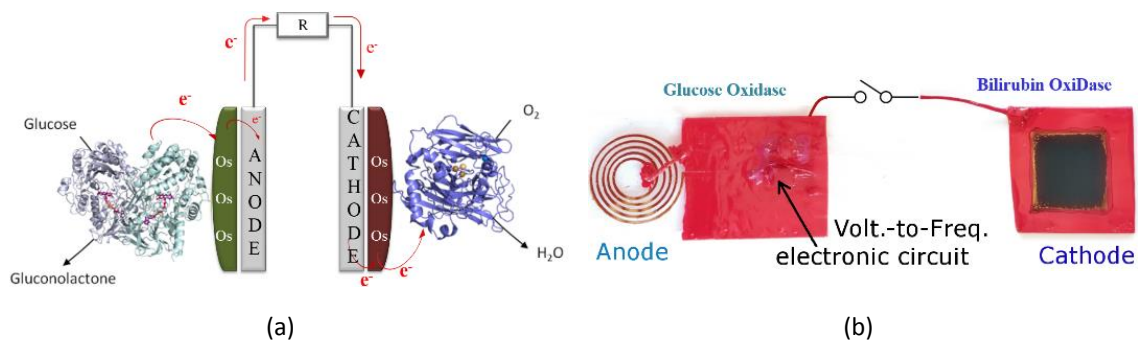


Figure 64 : (a) Schéma de principe du fonctionnement d'une pile à biocarburant. L'oxydation du glucose est catalysée à l'anode par l'enzyme « glucose oxydase », tandis qu'à la cathode, l'oxygène est réduit par l'enzyme « bilirubine oxydase ». L'échange d'électrons entre les électrodes poreuses et les sites de réaction enzymatique est réalisé par un médiateur redox (agent de navette), un polymère d'osmium dans notre cas. (b) Dans nos résultats préliminaires, l'anode a été modelée en forme de spirale. Lorsque l'interrupteur est déclenché, le circuit électronique convertit le flux d'électrons en un signal radiofréquence, transmis par la spirale (du vernis rouge est utilisé pour imperméabiliser tous les matériaux sauf les électrodes). Dans nos premiers tests, l'information sans fil a été reçue à une distance de 5 cm.

Mesure de la déplétion transitoire du glucose. Alors que les systèmes GCM de Dexcom et d'Abbott reposent sur la mesure d'un courant en régime permanent (ampérométrie), nous avons constaté que la mesure des variations transitoires du courant (à partir du moment où l'interrupteur de la Figure 64 est déclenché) est plus riche en informations. Nous prévoyons d'extraire la concentration de glucose d'après la durée du transitoire et d'extraire la cinétique électrochimique à partir de la forme de ce transitoire (Figure 65, courbes violettes, mesures câblées).

Traduction directe du transitoire en signal RF. Le VCO à résistance négative permet de traduire les 0,18 à 0,4 V du potentiel électrique de la BFC en un signal de fréquence 20 à 24 MHz. Grâce à l'antenne électrode, nous avons pu mesurer l'émission haute fréquence à une distance de 5 cm (Figure 65, courbes orange, mesure sans fil). Nous pensons que la traduction des valeurs transitoires de la déplétion en glucose en valeurs fréquentielles est la clé d'une transmission d'information robuste. Ce signal de type CSS pourrait aussi avoir des capacités de transmission plus longue, comme nous l'avons évoqué pour le projet LoRa.

Il reste néanmoins des défis majeurs à relever, car l'électrode doit maintenant être optimisée pour obtenir simultanément : son intégration (volume minimal), une distance de transmission maximum (soit la génération maximale de champ magnétique), des pertes minimales (les tissus corporels sont généralement transparents au champ magnétique, mais pas aux champs électriques, et présentent de fortes pertes diélectriques), une très bonne biocompatibilité (liée à la forme et aux matériaux utilisés), et enfin une stabilité enzymatique la plus longue possible (liée à la vitesse de diffusion du substrat, et à la durée de vie des enzymes).

De plus, les transitoires étaient dépendants d'un contrôleur externe et d'un circuit de commutation pour déclencher les décharges. Nous identifions le besoin de transformer le circuit « monotransitoire » en un circuit continu auto-opérant. Enfin, le fonctionnement visé en mode pulsé pourrait avoir un impact négatif sur la durée de vie de l'enzyme qu'il convient de déterminer. A ce jour, on ne sait pas quels types d'effets néfastes les décharges de courant catalytique pulsé pourraient avoir sur la stabilité de l'enzyme.

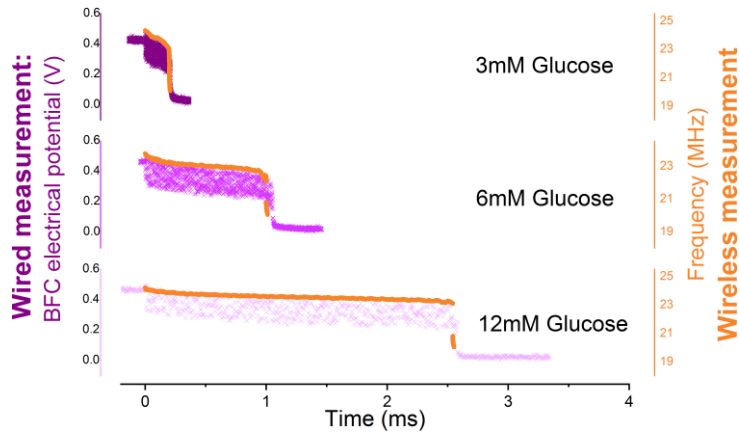


Figure 65 : Mesures réalisées par une connexion physique (violet) et de manière sans fil (orange) de la même biopile pour trois concentrations de glucose différentes, pertinentes sur le plan physiologique. Le potentiel électrique de la BFC filaire est bien traduit en fréquence de l'onde radio sans fil. Le fonctionnement transitoire peut être décrit comme suit : lorsqu'il est déchargé dans une résistance électrique de faible valeur, le potentiel électrique de la BFC chute immédiatement avec une durée de motif directement liée à la concentration de glucose. Si un convertisseur tension-fréquence (VCO) remplace la résistance, la majeure partie de la décharge en tension de la biopile sera convertie en balayage fréquentiel, préservant ainsi la forme et la durée du transitoire pour une analyse post-réception.

7.3. Objectifs du projet

Notre approche pour le nouveau type de surveillance de glucose (CGM) va être de repenser complètement l'architecture : toutes les fonctions numériques (conversion analogique-numérique, mémoire, traitement des données et calibrage à la volée, alertes d'hypo/hyperglycémie...) seront situées dans le dispositif de lecture externe et seront toujours disponibles pour l'utilisateur. Les fonctions du capteur sans fil implanté seront entièrement dédiées à la mesure périodique du taux de glucose et des paramètres endogènes associés permettant la correction des mesures. Cela implique des études à plusieurs niveaux, décrites en suivant.

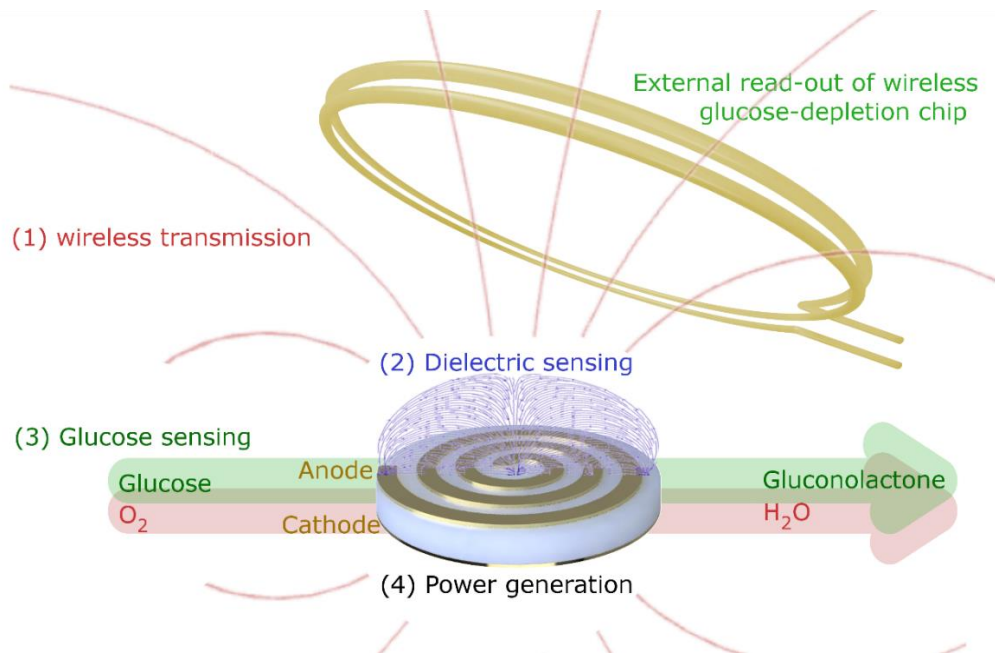


Figure 66 : Au niveau de l'empreinte, une électrode multifonctionnelle implantable combinera les fonctions de transmission sans fil, de détection diélectrique, de détection du glucose et de génération d'énergie (BFC).

AU NIVEAU GEOMETRIQUE, nous allons développer une électrode multifonctionnelle (Figure 66). La réduction de la taille par rapport aux dispositifs actuels sera obtenue par la suppression du volume de la batterie, remplacée par un micro-générateur à énergie électrochimique puisée dans le corps (BFC, pile à biocarburant enzymatique glucose/O₂). Pour garantir que la puissance de sortie de la BFC dépende uniquement de la concentration de glucose dans le corps, ses électrodes seront de surfaces asymétriques (pour s'assurer qu'il y aura toujours plus de capacité de réduction de l'oxygène que d'oxydation du glucose). L'électrode responsable de l'oxydation du glucose aura la forme d'une spirale pour générer un champ magnétique élevé pour un courant de haute fréquence, tout en étant conductrice pour le courant de très basse fréquence provenant de la réaction électrochimique de la BFC. Pour assurer un rendement maximal de la BFC, les électrodes seront nanostructurées avec des pores qui augmenteront la surface effective de l'électrode, assurant également un transport de masse rapide du substrat et le confinement des enzymes. Enfin, pour recueillir des informations dynamiques sur l'évolution des tissus environnants, l'électrode multifonctionnelle sera également conçue pour être sensible aux propriétés diélectriques avoisinantes.

En effet, tout résonateur électromagnétique génère un champ électrique traversant le tissu (dans un tel résonateur, l'énergie magnétique est convertie en énergie électrique et vice versa à chaque période d'oscillation). A ce jour, la pratique courante est d'éviter que ce champ électrique parasite des tissus, car il est source de pertes électriques et de réduction de la distance de communication. Nous proposons de tirer parti des effets de la permittivité complexe des tissus (constante diélectrique et pertes diélectriques) sur la réponse spectrale du résonateur, pour effectuer à la fois la caractérisation de la glycémie et celle des tissus sur la même électrode physique. Cette caractéristique est importante, car les systèmes qui utilisent des électrodes supplémentaires (comme Abbott Freestyle 2) [98] peuvent ne pas être sensibles aux mêmes variations (locales). On s'attend que, par cette méthode, la friction et les micro-mouvements puissent être distingués de la réaction au corps étranger, les premiers se produisant sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que les secondes. La biocompatibilité de l'électrode multifonctionnelle et la fonction de détection diélectrique seront évaluées *in vivo*. Une corrélation en temps réel du mouvement du corps et de la surveillance diélectrique interne sera effectuée sur des rongeurs de laboratoire afin d'approfondir la compréhension du phénomène et d'évaluer les performances de la fonction de détection tissulaire de l'électrode multifonctionnelle.

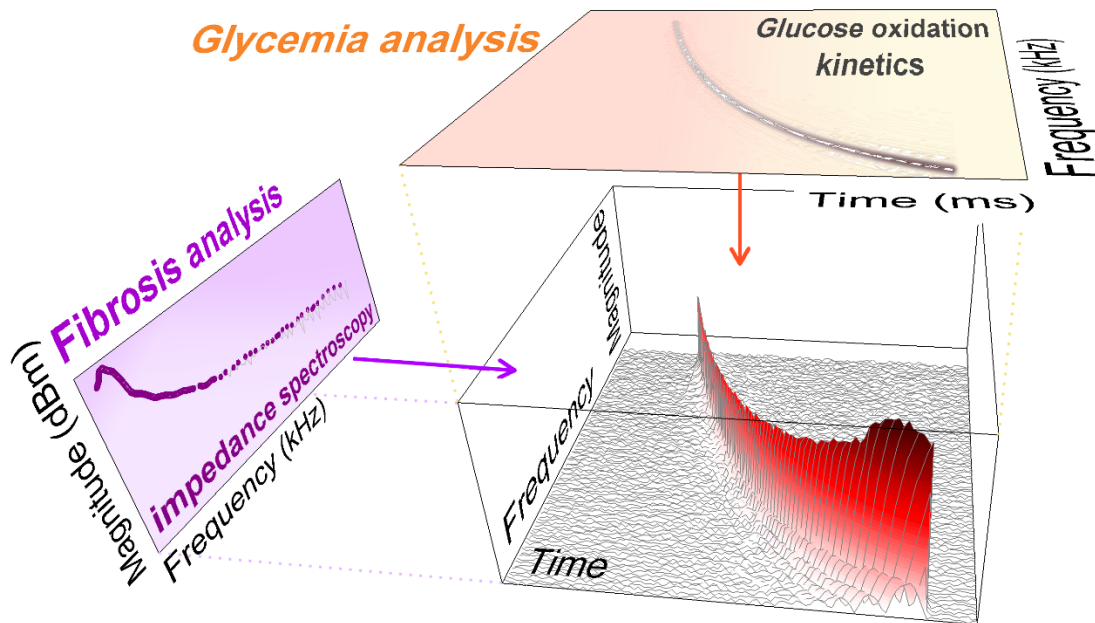


Figure 67 : Au niveau du signal, l'information sur la fibrose (spectroscopie scalaire d'impédance dans le plan amplitude-fréquence) sera fusionnée avec l'analyse de la glycémie (cinétique d'oxydation du glucose dans le plan temps-fréquence). Le signal à spectre étalé résultant sera transmis par l'antenne-électrode multifonctionnelle.

AU NIVEAU DU SIGNAL, nous allons développer une transmission par balayage de fréquence de la déplétion du glucose. Pour recueillir simultanément des informations sur la concentration de glucose et l'altération de la réaction électrochimique, lente, la BFC sera exploitée en décharges transitoires périodiques (par opposition aux mesures ampérométriques utilisées dans les dispositifs CGM commerciaux actuels [99]) mettant ainsi en jeu l'épuisement du glucose dans la couche de diffusion de l'électrode dû à sa consommation. Dans le cas des biocapteurs électrochimiques classiques, le signal généré dépend de la quantité et de l'activité de l'enzyme immobilisée ainsi que de la concentration de l'analyte au site de l'enzyme qui, à son tour, est fonction du gradient de concentration entre le réservoir de l'analyte et le compartiment du capteur, ainsi que du transport de masse par diffusion vers la couche de détection. Ce transport de masse par diffusion est éventuellement aussi modulé par la formation de couches supplémentaires (fibrose) en réponse à l'implantation du capteur. Par conséquent, le signal analytique du capteur diminue avec le temps en raison des changements inévitables des propriétés du transport de masse. Au lieu de lutter contre ces phénomènes, nous allons tirer profit de ces signaux transitoires et extraire des informations analytiques utiles. En effet, la décharge BFC traduit une dépolarisation temporaire de l'interface électrode/électrolyte, et la forme de ces courbes transitoires est encore plus riche en informations que les simples mesures de courant, souvent utilisées en biodétection classique. L'échelle de temps du transitoire est effectivement corrélée à la cinétique de l'accumulation du gradient de concentration devant l'électrode, qui à son tour est directement liée à la concentration absolue de glucose, tandis que la forme caractéristique du transitoire est corrélée aux contraintes diffusionnelles. Pour assurer une interaction directe avec la biopile, toute l'électronique interne du capteur implantable sera conçue pour fonctionner entre 150 mV et 600 mV. L'analyse de la glycémie et celle de la fibrose seront fusionnées dans le même signal à spectre étalé (Figure 67) : d'une part, le VCO traduira le transitoire électrochimique en transitoire de fréquence, d'autre part, ce signal à spectre étalé sera

"modulé en amplitude" par la réponse en fréquence de l'électrode-antenne multifonctionnelle (en référence à l'endovibrateur). Ceci doit être compris comme un effet d'absorption du tissu dû aux pertes diélectriques, qui a une signature fréquentielle pour chaque étape de la réaction inflammatoire. Le déclenchement périodique du transitoire de déplétion sera assuré par un mécanisme de commutation fonctionnant avec la tension de la biopile dont la fréquence d'oscillation (< 100 mHz) s'adaptera automatiquement à la variation de la concentration en glucose. Pour plus de flexibilité sur le déclenchement des décharges de la biopile, un pilotage radiocommandé (externe) des transitoires est également envisagé.

AU NIVEAU APPLICATIF, nous allons développer un récepteur permettant de recevoir à l'extérieur du corps chacune des brèves transmissions de manière fiable. Nous prévoyons aussi de valider le microsystème (auto-alimenté, détection de la glycémie, détection de la fibrose) *in vivo* avec des modèles animaux sains et diabétiques, d'évaluer la biocompatibilité du dispositif et de valider la fiabilité des mesures par rapport au mouvement des rongeurs actifs.

Ce projet devrait permettre de briser le plafond de verre de la taille des implants sans fil, qui est intrinsèquement lié à l'employabilité des implants en général. Grâce aux capacités de mesure de tension *in situ*, les résultats de ce projet WEB devraient également permettre de franchir des étapes technologiques vers la détection électrophysiologique et potentiellement nous guider vers la surveillance de l'activité cérébrale neuronale.

Conclusion

Nonpower electronics (Towards wireless batteryless sensors)

Les efforts de recherche orientés vers des technologies sans fil et sans pile sont longtemps restés à la marge de leurs communautés respectives (micro-onde, électronique de puissance, microsystème...). Néanmoins, ces thématiques se sont peu à peu rapprochées et convergent de plus en plus en courant interdisciplinaire commun. Une bonne illustration de cette dynamique est l'avènement de la conférence « Wireless Power Week » qui a rassemblé près de 800 personnes en 2021 au format virtuel. Pour l'année 2022, nous avons été au laboratoire IMS porteurs de l'organisation de cette conférence. Accueillir à Bordeaux le plus grand rassemblement de la thématique à l'échelle internationale a été une grande chance et une belle reconnaissance pour les activités de recherche françaises et bordelaises. Ce fut aussi une opportunité pour accroître la visibilité des équipes de notre laboratoire IMS. Grâce aux financements récemment obtenus pour notre programme de recherche, nous allons pouvoir recruter des jeunes chercheurs postdoctoraux et faire avancer les idées qui nous semblent avoir un fort potentiel. Ces recrutements permettront d'atteindre une taille critique et de bénéficier d'une dynamique de groupe féconde et productive sur le plan des idées. Nous allons très bientôt bénéficier aussi de l'achat d'un banc de mesure non-linéaire très important (NonLinear Vector Network Analyser) qui permettra d'accélérer la vérification de nos idées et le développement de nos prototypes. Cette plateforme de mesure, de même que certains sujets exploratoires seront l'occasion de renforcer les interactions avec nos collègues électroniciens du laboratoire. Ce sera enfin (et surtout) l'occasion de prendre du plaisir à avancer **ensemble** sur des projets excitants technologiquement, et permettant une contribution à la « Nouvelle G ».

Depuis son avènement, l'électronique sans fil est passée du statut de magie à celui d'outil omniprésent de transformation de notre monde, contribuant aussi bien au rapprochement des hommes, qu'à leurs guerres. Les multiples technologies sans fil ne sont pourtant pas toutes tournées vers la puissance et une autre électronique est possible. S'il appartient à la société de décider (en autonomie) de l'utilisation qu'elle veut en faire, il appartient à la communauté de recherche de préparer ces technologies d'avenir. Dans le cadre formel de l'institution, ce manuscrit relate des efforts de recherche dans la thématique du « **zeropower** electronics » (technologies sans piles). Pourrait-il aussi constituer un point de départ pour une réflexion vers la « **nonpower** electronics » (en écho à la « non-puissance » de ELLUL) ? Le futur de la recherche en électronique résiliente et conviviale sera une exploration difficile car en position de non-puissance : elle ne correspond pas à des objectifs économiques (et de financement de la recherche). Elle n'est pas identifiable sous forme de Roadmap technologique et ne constitue pas un domaine de recherche identifiée par les institutions. Mais d'un autre côté, elle constitue peut-être un effort « amont » où tout reste à découvrir et à construire... bref, un terrain idéal pour un chercheur.

Bibliographie

- [1] E. le Coarer *et al.*, "Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier-transform spectrometry," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 8, pp. 473-478, 2007/08/01 2007.
- [2] G. Lippmann, "Photographie des Couleurs par la Méthode Interférentielle," *CR Hebd. Seances Acad. Sci.*, vol. 112, pp. 274-275, 1891.
- [3] S. J. Hemour, "Analyseur de spectre large bande, bas cout et temps réel basé sur l'interférométrie microonde," 2010.
- [4] K. Hongjoon, A. B. Kozyrev, A. Karbassi, and D. W. v. d. Weide, "Linear tunable phase shifter using a left-handed transmission line," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 5, pp. 366-368, 2005.
- [5] M. A. Toman and B. Jemelkova, "Energy and Economie Development: An Assessment of the State of Knowledge," *The Energy Journal*, pp. 93-112, 2003.
- [6] A. Grubler *et al.*, "Energy primer," *Global Energy Assessment-Toward a Sustainable Future*, pp. 99-150, 2012.
- [7] T. B. Johansson, A. P. Patwardhan, N. Nakićenović, and L. Gomez-Echeverri, *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, 2012.
- [8] J. M. Gohlke *et al.*, "Estimating the global public health implications of electricity and coal consumption," *Environmental health perspectives*, vol. 119, no. 6, p. 821, 2011.
- [9] WWF. (2021, 2021-11-09). *Le jour du dépassement*. Available: <https://www.wwf.fr/jour-du-depassement>
- [10] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, 2010.
- [11] M. Green, "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," (in English), *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 15-19, 2007/10/01 2007.
- [12] A. Khaligh, Z. Peng, and Z. Cong, "Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 3, pp. 850-860, 2010.
- [13] R. Watkins, *The Origins Of Self-Winding Watches 1773 - 1779*. 2016.
- [14] J. M. Carrasco *et al.*, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, 2006.
- [15] J. J. Thomson, "Carriers of negative electricity," *Nobel lecture*, 1906.
- [16] K. F. Braun, "Electrical oscillations and wireless telegraphy," *Nobel Lecture, December*, vol. 11, no. 1909, pp. 226-245, 1909.
- [17] G. Marconi, "Wireless telegraphic communication," *Nobel Lecture, December*, vol. 11, 1909.
- [18] M. Planck, "The genesis and present state of development of the quantum theory," *Nobel lecture*, vol. 2, 1920.
- [19] N. Bohr, "The structure of the atom," *Nobel lecture*, vol. 11, p. 1922, 1922.
- [20] L. De Broglie, "The wave nature of the electron," *Nobel lecture*, vol. 12, pp. 244-256, 1929.
- [21] W. Heisenberg, "The development of quantum mechanics," in *Scientific Review Papers, Talks, and Books Wissenschaftliche Übersichtsartikel, Vorträge und Bücher*: Springer, 1984, pp. 226-237.
- [22] I. Langmuir, "Surface Chemistry," *Chemical reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 147-191, 1933.
- [23] E. Schrödinger, "The fundamental idea of wave mechanics," *Resonance*, vol. 4, no. 2, pp. 92-103, 1999.
- [24] P. A. Dirac, "Theory of electrons and positrons," *Nobel lecture*, vol. 12, 1933.

- [25] E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, and F. Rasetti, "Artificial radioactivity produced by neutron bombardment," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, pp. 483-500, 1934.
- [26] W. Pauli, *Exclusion principle and quantum mechanics*. Springer, 1994.
- [27] P. W. Bridgman, "General survey of certain results in the field of high-pressure physics," *Nobel Lecture, December*, vol. 11, p. 1946, 1946.
- [28] P. Kusch and H. Foley, "The magnetic moment of the electron," *Physical Review*, vol. 74, no. 3, p. 250, 1948.
- [29] W. H. Brattain, "Surface Properties of Semiconductors," *Science (New York, NY)*, vol. 126, no. 3265, pp. 151-153, 1957.
- [30] J. Bardeen, "Research leading to point-contact transistor," *Science*, vol. 126, no. 3264, pp. 105-112, 1957.
- [31] L. Néel, "Magnetism and the local molecular field," *Science*, vol. 174, no. 4013, pp. 985-992, 1971.
- [32] L. Esaki, "Long journey into tunneling," *Reviews of Modern Physics*, vol. 46, no. 2, pp. 237-244, 1974.
- [33] P. W. Anderson, "Local moments and localized states," *Reviews of Modern Physics*, vol. 50, no. 2, pp. 191-201, 1978.
- [34] N. Mott, "Electrons in glass," *Science*, vol. 201, no. 4359, pp. 871-875, 1978.
- [35] J. Van Vleck, "Quantum mechanics-The key to understanding magnetism," *Reviews of Modern Physics*, vol. 50, no. 2, pp. 181-189, 1978.
- [36] Z. I. Alferov, "Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology," *Reviews of modern physics*, vol. 73, no. 3, pp. 767-782, 2001.
- [37] H. Kroemer, "Quasi-electric fields and band offsets: teaching electrons new tricks," *Nobel Lecture, December*, vol. 8, 2000.
- [38] J. S. C. Kilby, "Turning potential into realities: The invention of the integrated circuit (Nobel lecture)," *ChemPhysChem*, vol. 2, no. 8-9, pp. 482-489, 2001.
- [39] A. Fert, "Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics," *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, no. 4, pp. 1517-1530, 12/17/ 2008.
- [40] P. A. Grünberg, "From spinwaves to Giant Magnetoresistance (GMR) and beyond," *Nobel Lecture*, pp. 92-108, 2007.
- [41] E. f. I. H. Center). (2008, 2021-08-21). *Radar during World War II*. Available: https://ethw.org/Radar_during_World_War_II
- [42] A. M. Cowley and H. O. Sorensen, "Quantitative Comparison of Solid-State Microwave Detectors," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 12, pp. 588-602, 1966.
- [43] S. Hemour and K. Wu, "Radio-Frequency Rectifier for Electromagnetic Energy Harvesting: Development Path and Future Outlook," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 11, pp. 1667-1691, 2014.
- [44] H. Stockman, "Communication by means of reflected power," *Proceedings of the IRE*, vol. 36, no. 10, pp. 1196-1204, 1948.
- [45] G. World Health Organization. (2016, accessed 11 November 2020). *Global health estimates 2016: deaths by cause, age, sex, by country and by region*. Available: https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/estimates/en/
- [46] M. Zoni-Berisso, F. Lercari, T. Carazza, and S. Domenicucci, "Epidemiology of atrial fibrillation: European perspective," (in eng), *Clinical epidemiology*, vol. 6, pp. 213-220, 2014 2014.
- [47] G. Deuschl *et al.*, "The burden of neurological diseases in Europe: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017," *The Lancet Public Health*, vol. 5, no. 10, pp. e551-e567, 2020.

- [48] B. International Diabetes Federation. (2016, accessed 1 April 2021). *9th edition IDF Diabetes ATLAS*. Available: <https://diabetesatlas.org/en/>
- [49] S. Allender *et al.*, "European cardiovascular disease statistics," 2008.
- [50] A. Wimo *et al.*, "The economic impact of dementia in Europe in 2008—cost estimates from the Eurocode project," *International Journal of Geriatric Psychiatry*, vol. 26, no. 8, pp. 825-832, 2011.
- [51] P. Zhang *et al.*, "Global healthcare expenditure on diabetes for 2010 and 2030," *Diabetes Research and Clinical Practice*, vol. 87, no. 3, pp. 293-301, 2010.
- [52] H. Basaeri, D. B. Christensen, and S. Roundy, "A review of acoustic power transfer for bio-medical implants," *Smart Materials and Structures*, vol. 25, no. 12, p. 123001, 2016/11/10 2016.
- [53] S. Ozeri and D. Shmilovitz, "Ultrasonic transcutaneous energy transfer for powering implanted devices," *Ultrasonics*, vol. 50, no. 6, pp. 556-566, 2010/05/01/ 2010.
- [54] S. Hemour *et al.*, "Towards Low-Power High-Efficiency RF and Microwave Energy Harvesting," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 4, pp. 965-976, 2014.
- [55] Y. P. Zhao *et al.*, "Interfacial properties and their impact on magnetic tunnel junction at microwave frequencies," *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 18, p. 182404, 2015.
- [56] X. Gu *et al.*, "Hybridization of Integrated Microwave and Mechanical Power Harvester," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13921-13930, 2018.
- [57] H. Lowry, J. Giorgis, E. Gottlieb, and R. Weischedel, "Tunnel diode manual," *General Electric, Liverpool New York*, 1961.
- [58] W. F. Gabriel, "Tunnel-Diode Low-Level Detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 15, no. 10, pp. 538-553, 1967.
- [59] L. Di Trocchio, "Batteryless solutions for implantable and wearable wireless medical devices," Université de Bordeaux, 2019.
- [60] D. J. Murphy and C. A. Hall, "Year in review—EROI or energy return on (energy) invested," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1185, no. 1, pp. 102-118, 2010.
- [61] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), *IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA). 2021, p. 3–32.
- [62] H. Ferreboeuf *et al.*, "LEAN ICT—Pour une sobriété numérique," *Rapport Intermédiaire du Groupe de Travail—The Shift Project; Agence française de développement and the Caisse des Dépôts: Paris, France*, 2018.
- [63] P. Bihouix, *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable: Vers une civilisation techniquement soutenable*. Média Diffusion, 2014.
- [64] B. Patino, *La civilisation du poisson rouge: petit traité sur le marché de l'attention*. Grasset, 2019.
- [65] J. Ellul, *Le Bluff Technologique*. Hachette, 1988.
- [66] G. Bronner, *Apocalypse cognitive*. Presses universitaires de France, 2021.
- [67] T. Harris, "How technology hijacks people's minds—from a magician and Google's design ethicist," *Medium Magazine*, 2016.
- [68] S. Bohler, *Le bug humain: pourquoi notre cerveau nous pousse à détruire la planète et comment l'en empêcher*. Robert Laffont, 2019.
- [69] I. Illich, *La convivialité*. Editions du Seuil Paris, 1973.
- [70] H. Hirsch-Kreinsen, "'Low-tech' innovations," *Industry and innovation*, vol. 15, no. 1, pp. 19-43, 2008.

- [71] B. Mikhak, C. Lyon, T. Gorton, N. Gershenfeld, C. McEnnis, and J. Taylor, "Fab Lab: an alternate model of ICT for development," in *2nd international conference on open collaborative design for sustainable innovation*, 2002, vol. 17, pp. 1-7.
- [72] N. A. Gershenfeld, *Fab: the coming revolution on your desktop--from personal computers to personal fabrication*. Basic Books (AZ), 2005.
- [73] T. Weyrauch and C. Herstatt, "What is frugal innovation? Three defining criteria," *Journal of Frugal Innovation*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2016/12/27 2016.
- [74] J. S. Cybulski, J. Clements, and M. Prakash, "Foldscope: origami-based paper microscope," *PloS one*, vol. 9, no. 6, p. e98781, 2014.
- [75] A. Kusiak and C.-C. Huang, "Development of modular products," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, vol. 19, no. 4, pp. 523-538, 1996.
- [76] L. Houston, S. J. Jackson, D. K. Rosner, S. I. Ahmed, M. Young, and L. Kang, "Values in repair," in *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, 2016, pp. 1403-1414.
- [77] B. S. Manoj and A. H. Baker, "Communication challenges in emergency response," *Communications of the ACM*, vol. 50, no. 3, pp. 51-53, 2007.
- [78] L. Yang, S.-H. Yang, and L. Plotnick, "How the internet of things technology enhances emergency response operations," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 9, pp. 1854-1867, 2013.
- [79] S. M. Southwick, G. A. Bonanno, A. S. Masten, C. Panter-Brick, and R. Yehuda, "Resilience definitions, theory, and challenges: interdisciplinary perspectives," *European journal of psychotraumatology*, vol. 5, no. 1, p. 25338, 2014.
- [80] G. Mark and B. Semaan, "Resilience in collaboration: Technology as a resource for new patterns of action," in *Proceedings of the 2008 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 2008, pp. 137-146.
- [81] 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, 2009.
- [82] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641-2654, 10// 2011.
- [83] D. Brust, "Band-Theoretic Model for the Photoelectric Effect in Silicon," *Physical Review*, vol. 139, no. 2A, p. A489, 1965.
- [84] S. Grover and G. Moddel, "Engineering the current-voltage characteristics of metal-insulator-metal diodes using double-insulator tunnel barriers," *Solid-State Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 94-99, 1// 2012.
- [85] M. A. Alam and M. R. Khan, "Fundamentals of PV efficiency interpreted by a two-level model," *American Journal of Physics*, vol. 81, no. 9, pp. 655-662, 2013.
- [86] Z. H. Zhang *et al.*, "Seebeck Rectification Enabled by Intrinsic Thermoelectrical Coupling in Magnetic Tunneling Junctions," *Physical Review Letters*, vol. 109, no. 3, p. 037206, 07/18/ 2012.
- [87] D. Milanese, M. Sacconi, R. Maggiora, D. Laurino, and M. Porporato, "Design of an harmonic radar for the tracking of the Asian yellow-legged hornet," *Ecology and Evolution*, vol. 6, no. 7, pp. 2170-2178, 2016.
- [88] R. Maggiora, M. Sacconi, D. Milanese, and M. Porporato, "An Innovative Harmonic Radar to Track Flying Insects: the Case of *Vespa velutina*," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 11964, 2019/08/19 2019.
- [89] R. Billé, P. Cury, M. Loreau, and V. Maris, *Biodiversité : vers une sixième extinction de masse* (Collection 360). Montreuil: La Ville Brûle, 2014, p. 199.
- [90] Semtech. *SX1202 LoRa Core™ Digital Baseband Chip for LoRaWAN network gateways*. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1302>

- [91] L. T. Tu, A. Bradai, Y. Pousset, and A. I. Aravanis, "Energy Efficiency Analysis of LoRa Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1881-1885, 2021.
- [92] S. V. Jaskolski and T. K. Ishii, "Above cutoff frequency circuit principles for microwave tunnel diode oscillators," *Solid-State Electronics*, vol. 8, no. 11, pp. 869-879, 1965/11/01/ 1965.
- [93] F. Laboratory, "Russian Resonant Cavity Microphone, Drawing and Photographs," 1952.
- [94] M. Castaings and B. Hosten, "Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates," *NDT & E International*, vol. 34, no. 4, pp. 249-258, 2001/06/01/ 2001.
- [95] M. Lind *et al.*, "Sustained Intensive Treatment and Long-term Effects on HbA_{1c} Reduction (SILVER Study) by CGM in People With Type 1 Diabetes Treated With MDI," *Diabetes Care*, p. dc201468, 2020.
- [96] FCC_declaration_Dexcom. (2019). *G6 Firefly Transmitter Teardown Internal Photos x Dexcom*. Available: <https://fcc.report/FCC-ID/PH29688>
- [97] FCC_declaration_Abbott_Diabetes_Care. (2014). *Abbott Diabetes Care Freestyle Libre Glucose Monitoring System LIB01*. Available: <https://fcc.report/FCC-ID/QXS-LIB01>
- [98] S. Alva *et al.*, "Accuracy of a 14-Day Factory-Calibrated Continuous Glucose Monitoring System With Advanced Algorithm in Pediatric and Adult Population With Diabetes," *Journal of Diabetes Science and Technology*, p. 1932296820958754, 2020.
- [99] I. Lee, D. Probst, D. Klonoff, and K. Sode, "Continuous glucose monitoring systems - Current status and future perspectives of the flagship technologies in biosensor research," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 181, p. 113054, 2021/06/01/ 2021.

Book chapter

- [B2] **E. Vandelle**, G Ardila, TP Vuong, K Wu, **S Hemour**, "Rectenna Optimization Guidelines for Ambient Electromagnetic Energy Harvesting" Chapter 12 , from the book "Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics", 04 February 2020 John Wiley & Sons, Inc. (ISBN: ISBN: 9781119578543); <https://doi.org/10.1002/9781119578598.ch12>
- [B1] **S Hemour**, **X Gu**, K Wu, "Efficiency of Rectenna" pp. 95-132 , from the book "Recent Wireless Power Transfer Technologies via Radio Waves", April 2018, River Publishers (ISBN: 9788793609242)

Patents

- [P8] **S. Hemour**, D. Barnoncel, M. Castaings, J-L Lachaud, C. Dejous, "Système pour la génération d'un signal radiofréquences comprenant au moins un chirp et procédé de mise en œuvre d'un tel système." (*projet de brevet en phase d'arbitrage PI ArianeGroup / Univ. Bordeaux depuis février 2022*)
- [P7] **S. Hemour**, G. Ferre, "Système pour la génération d'un signal radiofréquences comprenant au moins un chirp et procédé de mise en œuvre d'un tel système." (undisclosed) French patent application # 35375 FR (26/06/2022)
- [P6] **S. Hemour**, **L. Di Trocchio**, J-L Lachaud, Dejous, "Implantable system comprising a filling device, system and method thereof" (undisclosed) French patent application # FR 19 01114 (05/02/2019)
- [P5] **S. Hemour**, A. Kuhn, N. Mano, L. **Di Trocchio**, C. Dejous, J-L Lachaud, S. Bichon, "Implantable system, communication system and associated process". *French patent application # 17 57328* (2017-07-31) , granted & PCT patent filled in 2018.

- [P4] **W. Wang, S. Hemour**, K. Wu, “Resonator for wireless power transmission”, U.S. provisional patent application #62119878 (2015-02-24)
- [P3] **W. Wang, S. Hemour**, K. Wu, “Resonator with edge concentrated nested capacitor load rings”, *CN patent application #CN201410362842.1* (applied on 2014-07-28), granted on 3016-07-27.
- [P2] **W. Wang, S. Hemour**, K. Wu, “Resonator with edge being equipped with capacitor loading rings in densely nested manner”, *CN patent application #CN201420419501.9* (applied on 2014-07-28), granted on 3016-07-27.
- [P1] **S. Hemour, C. H. Lorenz**, K. Wu, “Device for harvesting radiowave and mechanical vibrations”, *CN patent application # 201510112263.6* (applied on 2014-03-13), granted on 2017-08-29

Journal Publications

- [J37'] V. Palazzi, NB Carvalho, R. Correia, **X. Gu, S. Hemour**, K. Wu, A. Costanzo, D. Masotti, E. Fazzini, A. Georgiadis, H. Kazemi, R. Pereira, N. Shinoara, D. Schreurs, JC Chiao, A. Takacs, D. Dragomirescu, “Radiative Wireless Power Transfer: where we are and where we want to go” (Submitted to microwave magazine)
- [J36] **X Gu, S Hemour**, K Wu, “Far-Field Wireless Power Transfer: Nonlinear Modeling, Rectenna Design, and Emerging Applications”, *Proceedings of the IEEE*, 110(1), January 2022, pp. 56 – 73, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3127930>, **IF=10.96**, *Invited article*
- [J35] **X Gu**, J Virgilio de Almeida, **S Hemour**, R Khazaka, K Wu, “Nonlinearity and Parametrization of Schottky Diodes-Based Battery-Free Harmonic Transponder for Millimeter-Wave 5G Applications”, *Applied Physics Letters*, 119, 063504 (2021) (<https://doi.org/10.1063/5.0055501>) **IF=3.79**, *Invited article*
- [J34] **X Gu**, P Burasa, **S Hemour**, K Wu, “Recycling Ambient Radiofrequency (RF) Energy: Far-Field Wireless Power Transfer and Harmonic Backscattering” *IEEE Microwave magazine*, *IEEE Microwave Magazine* 22 (9), pp. 60-78, September 2021 ([HTTPS://DOI.ORG/10.1109/MMM.2021.3086335](https://doi.org/10.1109/MMM.2021.3086335)), **IF=3**
- [J33] M-L Andreola, B Becquart, W Jomaa, P. Verhoeven, G. Baldacchino, **S. Hemour**, and D-Mask consortium, “The properties of hot household hygroscopic materials and their potential use for non-medical facemask decontamination, *PLoS ONE* 16(9): e0255148. September 2021 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255148>), **IF=3.24**
- [J32'] **L Di Trocchio**, J-L Lachaud, C Dejous, **S Hemour**, “Foldable Sticker for RFID Frugal Antenna Deployment Towards Massive Body Temperature Monitoring During Pandemic Crisis”, *IEEE antenna and propagation letter* (paper awaiting revisions after rejection)
- [J31'] **E Vandelle**, G Ardila, TP Vuong, K Wu, **S Hemour**, “New Figure-of-Merit For Rectennas - Operating at Ambient RF Power Levels with Arbitrary Direction of Arrival of the Radiations”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (paper awaiting revisions after rejection)
- [J30'] **F Somoreau**, O Tamarin, C Dejous, M Castaings, S Hemour, “Wireless Power Transfer for Implanted Medical Devices (IMD): Challenges and Future Directions”, *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, (paper awaiting revisions after rejection).
- [J29] **X Gu**, L Grauwin, D Dousset, **S Hemour**, K Wu, Dynamic Ambient RF Energy Density Measurements of Montreal for Battery-Free IoT Sensor Network Planning, *IEEE Internet of Things Journal*, (DOI: 10.1109/JIOT.2021.3065683) **IF=9.47**
- [J28] **X Gu**, W Lin, **S Hemour**, K Wu, “Readout Distance Enhancement of Battery-Free Harmonic Transponder”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 69 (7), pp 3413-3424. March 2021 (DOI: 10.1109/TMTT.2021.3068291) **IF=3.76**
- [J27] **K Gumber**, C Dejous, **S Hemour**, Harmonic Reflection Amplifier for Widespread Backscatter Internet-of-Things, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 69 (1), 774-785 December 2020 (DOI: 10.1109/TMTT.2020.3038222) **IF=3.76**

- [J26] **L Di Trocchio**, C Carucci, K R Sindhu, C Morel, J-L Lachaud, S Bichon, S Gounel, N Mano, C Boiziau, C Dejous, A Kuhn, **S Hemour**, "Wireless *In Vivo* Biofuel Cell Monitoring", IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, vol. 5, no 1, pp. 25-34, May 2020. (DOI: 10.1109/JERM.2020.2998325) **IF pending**
- [J25] **X Gu, L Guo, S Hemour**, K Wu, "Optimum Temperature for Enhanced Power Conversion Efficiency (PCE) of Zero Bias Diode-based Rectifiers", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), 4040 – 4053, (DOI: 10.1109/TMTT.2020.2992024) **IF=3.76**
- [J24] **S. Hemour** and Z. Chen, "Guest Editorial", Nikhil, "Guest Editorial," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 5, pp. 1663-1664, May 2019. (DOI: 10.1109/TMTT.2019.2907799), **IF=3.76**
- [J23] **L. Guo, X. Gu, P. Chu, S. Hemour** and K. Wu, "Collaboratively Harvesting Ambient Radiofrequency and Thermal Energy," in IEEE Transactions on Industrial Electronics (DOI: doi: 10.1109/TIE.2019.2914627) **IF=7.5**
- [J22] **X Gu, S Nikhil, L Guo, S Hemour, K Wu**, "Diplexer-based Fully Passive Harmonic Transponder for Sub-6 GHz 5G-Compatible IoT Applications", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), (DOI: 10.1109/TMTT.2018.2883979) **IF=3.76**
- [J21] **E Vandelle**, DHN Bui, TP Vuong, G Ardila, K Wu, **S Hemour**, "Harvesting Ambient RF Energy Efficiently with Optimal Angular Coverage" IEEE Transactions on Antennas and Propagation (DOI: 10.1109/TAP.2018.2888957). **IF=2.95**
- [J20] **Y Zhao, S Hemour, T Liu, K Wu**, "Nonuniformly Distributed Electronic Impedance Synthesizer", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 66 (11), 4883-4897, (DOI: 10.1109/TMTT.2018.2868941) **IF=3.76**
- [J19] **X Gu, W Liu, L Guo, S Hemour, F Formosa, A Badel, K Wu**, "Hybridization of Integrated Microwave and Mechanical Power Harvester", IEEE Access 6, 13921-13930 (DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2814003) **IF=3.24**
- [J18] **X Gu, S Hemour, L Guo, K Wu**, "Integrated Cooperative Ambient Power Harvester Collecting Ubiquitous Radiofrequency and Kinetic Energy", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), (10.1109/TMTT.2018.2842723) **IF=3.76**
- [J17] **Y. Zhao, S. Hemour, H. Chen, T. Liu, and Ke Wu**, "Power-Handling Capacity and Nonlinearity Analysis for Distributed Electronic Impedance Synthesizer", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 65 (4), 1340-1348, (DOI: 10.1109/TCSI.2017.2756020). **IF=2.4**
- [J16] **Y. Zhao, S. Hemour, T. Liu, K. Wu**, "Negative Resistance-Based Electronic Impedance Tuner", IEEE Microwave and Wireless Components Letters (DOI: 10.1109/LMWC.2017.2779879). **IF=1.95**
- [J15] **C. H.P. Lorenz, S. Hemour, and K. Wu**, "Physical Mechanism and Theoretical Foundation of Ambient RF Power Harvesting for Wireless Devices", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), vol. 63, no. 7, pp. 2146- 2158, July 2016 (DOI: 10.1109/TMTT.2016.2574848). **IF=3.76**
- [J14] **C. H.P. Lorenz, S. Hemour, and K. Wu**, "Breaking the Efficiency Barrier for Ambient Microwave Power Harvesting With Heterojunction Backward Tunnel Diodes", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), vol. 63, no.10, pp. 4544 - 4555 , (DOI : 10.1109/TMTT.2015.2495356). **IF=3.76**
- [J13] **Y. Zhao, S. Hemour, D. Houssameddine, L. H. Bai, Y. S. Gui, C. M. Hu, and K. Wu**, "Interfacial Properties of Magnetic Tunnel Junction at Microwave Frequencies," Applied Physics Letters, 106, 182404, 2015 (DOI : 10.1063/1.4919869). **IF=3.52**
- [J12] **Y. Gui, Y. Xiao, L. Bai, S. Hemour, Y. Zhao, D. Houssameddine, K. Wu, H. Guo, C-M Hu**, "High sensitivity microwave detection using a magnetic tunnel junction in the absence of an external applied magnetic field" Applied Physics Letters, 106, 152403, 2015. (DOI: 10.1063/1.4918677). **IF=3.52**

- [J11] Z. Zhang, L. Bai, C-M. Hu , **S Hemour** , K. Wu , X. Fan , D. Xue , D. Houssameddine, "The tunneling magnetoresistance current dependence on cross sectional area, angle and temperature", AIP Advances, 5, 037134, **2015** (DOI: 10.1063/1.4916584). **IF=1.59**
- [J10] **C. H.P. Lorenz, S. Hemour**, and K. Wu, "Hybrid Power Harvesting for Increased Power Conversion Efficiency," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol.25, no. 10, pp. 687-689, 2015. (DOI: 10.1109/LMWC.2015.2463229) **IF=1.95**
- [J9] S. Adhikari, **S. Hemour**, A. Ghiotto, and K. Wu, "Magnetically Tunable Ferrite-Loaded Half-Mode Substrate Integrated Waveguide," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol. 25, no 3, pp. 172-174, 2015. (DOI: 10.1109/LMWC.2015.2391997) **IF=1.95**
- [J8] **S. Hemour**, K. Wu, "Radiofrequency rectifiers for Electromagnetic Energy Harvesting: development path and future Outlook", Proceedings of the IEEE. vol. 102, pp. 1667-1691 [25 p.], 2014. (*invited article*) (DOI: 10.1109/JPROC.2014.2358691) **IF=10.96**
- [J7] **S. Hemour, Y. Zhao, C. H.P. Lorenz**, D. Houssameddine, Y. Gui, C-M Hu, K. Wu, "Towards Low-Power High-Efficiency RF and Microwave Energy Harvesting", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT) vol. 62, pp. 965-976, 2014.(DOI: 10.1109/TMTT.2014.2305134) **IF=3.76**
- [J6] **W. Wang, S. Hemour**, K. Wu, "Coupled Resonance Energy Transfer Over GHz Frequency Range Using Ceramic Filled Cavity For Medical Implanted Sensors", Transaction on Microwave Theory and techniques (T-MTT), vol. 62, pp. 956-964, 2014. (DOI: 10.1109/TMTT.2014.2305401) **IF=3.76**
- [J5] L. Fu, Z. X. Cao, **S. Hemour**, K. Wu, D. Houssameddine, W. Lu, S. Pistorius, Y. S.Gui, C.-M. Hu, "Microwave reflection imaging using a magnetic tunnel junction based Spintronics microwave sensor", Applied Physics Letters, Volume: 101 , no. 23, p 232406, 2012 **IF=3.52**
- [J4] Z. H. Zhang, Y. S. Gui, L. Fu, X. L. Fan J. W. Cao, D. S. Xue, P. P. Freitas, D. Houssameddine, **S. Hemour**, K. Wu, and C.-M. Hu, "Seebeck Rectification Enabled by Intrinsic Thermoelectrical Coupling in Magnetic Tunneling Junctions, Phys. Rev. Lett. 109, 037206, 2012 **IF=7.73**
- [J3] **S. Hemour**, F. Podevin, P. Xavier, E. Le Coarer, and P. Benech -"A wide-band standing wave based spectrometer SWIFTS for the 22GHz water-line detection", Microwave and Optical Technology Letters, vol 53, no. 01, pp 62-65, John Wiley & Sons, 2011 **IF=0.95**
- [J2] **S. Hemour**, F. Podevin, P. Xavier, E. "An RF spectrometer for fast wide band measurement", International Journal of Microwave and Wireless Technologies 1 (6), 537-542, 2009 **IF=0.98**
- [J1] **S. Hemour**, F. Podevin, and P. Xavier, "Stationary waves integrated Fourier transform spectrometer" Microwave and Optical Technology Letters, vol 49, no. 05, pp 1138-1142, John Wiley & Sons, 2007 **IF=0.95**

Conference Papers and Workshop Presentations (54)

- [C54] **A. Bres, V. Guillerat**, G. Ferré and **S. Hemour**, "Towards Battery-Free Wide Area Network With Ultra-Low Voltage Chirp Spread Spectrum Modulation," 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 558-562. (<https://doi.org/doi:10.1109/WPW54272.2022.9853895>)
- [C53] **F. Somoreau**, M. Castaings, O. Tamarin, A. Kuakivi, C. Dejous and **S. Hemour**, "Hybrid Wireless Power Transmission For Deeply Implanted Devices," 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 670-674. (<https://doi.org/10.1109/WPW54272.2022.9854026>)

- [C52] **X. Gu**, J. V. De Almeida, **S. Hemour**, R. Khazaka and K. Wu, "Thermal Effects on Low-Power RF-to-dc Voltage Multiplier for Battery-Free Sensing and IoT," 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 29-32. (<https://doi.org/doi:10.1109/WPW54272.2022.9853993>)
- [C51] M. Rube, O. Tamarin, **S. Hemour**, M. Sebeloue, A. Choudhari, I. Sadli, L. Linguet, D. Rebiere, C. Dejous "A behavior-descriptive model of Love Wave sensor in liquid medium for circuit-design and analysis with QucsStudio", 2021 IEEE Sensors conference, 31 October - 03 November 2021, <https://doi.org/10.1109/SENSORS47087.2021.9639606>
- [C50] **S. Hemour**, **X. Gu**, K. Wu, "The Etheric Energy fields and the ocean of interconnected devices", International Microwave Symposium (WFI workshop on Theory and Applications of Wireless Power Transfer), Atlanta, USA, 2021 (*invited lecture*)
- [C49] **K Gumber**, **F Amato**, C Dejous, **S Hemour**, "Nonlinear negative resistance-based harmonic backscatter", IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 603-606, 2020
- [C48] **X Gu**, **S Hemour**, K Wu, "Wireless Powered Sensors for Battery-Free IoT Through Multi-Stage Rectifier, URSI GASS 2020, Rome, Italy, 29 August - 5 September 2020 (*Young Scientists Award*)
- [C47] **X Gu**, D Dousset, L Grauwain, **S Hemour**, K Wu, "Ambient Radiofrequency Energy Mapping of Montreal for Far-Field Wireless Power Harvesting", 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 1577-1578, 2020
- [C46] **X Gu**, K Wu, **S Hemour**, Remote Temperature Sensing Based on Battery-Free Harmonic Backscattering, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 1429-1430, 2020 (*invited talk*)
- [C45] **X Gu**, **S Hemour**, K Wu, "Reconfigurable nonlinear circuit for wireless power harvesting and backscattering", 49th European Microwave Conference (EuMC), 543-546, 2019
- [C44] **E Vandelle**, TP Vuong, G Ardila, K Wu, **S Hemour**, "Modular and Reconfigurable Rectenna Unitcells with Beam-Forming Properties", 49th European Microwave Conference (EuMC), 109-112, 2019 (*Best paper finalist*)
- [C43] **E Vandelle**, TP Vuong, G Ardila, **S Hemour**, K Wu, "Miniaturized antenna on a paper substrate", 49th European Microwave Conference (EuMC), 73-76, 2019
- [C42] **X Gu**, **S Hemour**, K Wu, Improving Conversion Loss Performance of Fully Passive Harmonic Transponder at Low Temperature, 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 395-398, 2019
- [C41] **E Vandelle**, G Ardila, **S Hemour**, K Wu, TP Vuong, "Compact Dual-Band Rectenna on a New Paper Substrate Based on Air-Filled Technology", 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 307-311, 2019
- [C40] **F Amato**, and **S Hemour**, "The Harmonic Tunneling Tag: a Dual-Band Approach to Backscattering Communications". IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Sep 2019, Pisa, Italy (*invited talk*)
- [C39] **X. Gu**, K. Wu, and **S. Hemour**, "Low Thermally Activated Schottky Barrier Rectifier: A New Class of Energy Harvester" IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Sep 2019, Pisa, Italy (*invited talk*)
- [C38] **Luigi Di Trocchio**, **S. Hemour**, "µL coil", International Microwave Symposium (WFI workshop on Theory and Applications of Wireless Power Transfer), Boston, USA, 2019 (*invited lecture*)
- [C37] **S Hemour** "Environment-Aware Adaptive Energy Harvesters" Wireless Power School, London, 2019 (*invited lecture*)
- [C36] **X Gu**, **E Vandelle**, G Ardila, TP Vuong, K Wu, and **S Hemour** "Environment-Aware Adaptive Energy Harvesters for IoT Applications" sixth IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IEEE IWS 2019) May 19-22, 2019 in Guangzhou, China (*invited talk*)
- [C35] **S. Hemour**, **Luigi Di Trocchio**, "millimeter-size implant powering", European Microwave Conference (workshop on electroceuticals), Paris, France, 2019 (*invited lecture*)

- [C34] **S. Hemour**, "Presentation of the SHARP experiment", WPTC2018, Montreal, QC, Canada, 2018.
- [C33] **S. Hemour**, "Ambient RF energy recycling", Wireless Power Transfer Conference (workshop on backscattering techniques), Montreal, QC, Canada, 2018. (*Invited lecture*)
- [C32] **X. Gu, S. Hemour** and K. Wu, "Enabling Far-Field Ambient Energy Harvesting Through Multi-Physical Sources," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, 2018, pp. 204-206. (*Invited talk*)
- [C31] **S. Hemour**, "How RF energy harvesting can be fundamentally improved, and how we can improve our current practical RF energy harvesting", Wireless Identification and Sensing Platform (WISP) workshop 2018, Seattle, 2018 (*keynote speech*)
- [C30] **S. Hemour**, "RF energy-harvesting: the many ways to break the glass ceiling of efficiency", RFID 2018, Orlando, FL, USA, 2018 (*Hot topic Invited speech*)
- [C29] **L. Di Trocchio**, J-L Lachaud, C. Dejous, A. Kuhn and **S. Hemour**, "High-Q Implantable Resonator for Wireless Power delivery", IMBioC 2018, Philadelphia, USA, 2018.
- [C28] **L. Di Trocchio**, J-L Lachaud, O. Chassande, C. Dejous, A. Kuhn and **S. Hemour**, "Wireless Power Transfer Link for RFID Telemetry System Applied to Laboratory Rodent Monitoring" WPTC2018, Montreal, QC, Canada, 2018.
- [C27] **E Vandelle**, TP Vuong, G Ardila, **S Hemour**, K Wu, "Microstrip Rectenna with an Enhanced Aperture Efficiency and a Bi-directional Pattern for Ambient RF Energy Harvesting", WPTC2018, Montreal, QC, Canada, 2018.
- [C26] **E Vandelle**, D. H. N. Bui, G Ardila, **S Hemour**, K Wu, TP Vuong, "Folded Patch Antenna on Paper with High Gain for RF Energy Harvesting and Sensing Applications", ATC 2018, Ho Chi Minh city, Vietnam", 2018.
- [C25] **X Gu, L Guo, S Hemour**, K Wu, "An Accurate Analytical model for a Low-Power Hybrid Thermal and RF Energy Harvester", IMS 2018, Philadelphia, USA, 2018.
- [C24] **X Gu, L Guo, S Hemour**, K Wu, "Novel Diplexer-based Harmonic Transponder for 5G-Compatible IoT Applications" WPTC2018, Montreal, QC, Canada, 2018. (*Best paper finalist*)
- [C23] **X Gu, L Guo, S Hemour**, K Wu, "Analysis and Exploitation of Diplexer-based Fully Passive Harmonic Transponder for 5G Applications", IMWS-5G, Dublin, Ireland, 2018.
- [C22] **L Guo, X Gu, S Hemour**, K Wu, "Reactive frequency downconverter for low power harvesting applications", Proc. IEEE International Wireless Symposium (IWS), Beijing, China, 2018.
- [C21] **X Gu, S Hemour**, K Wu, "Cooperative Radiofrequency (RF) and Piezoelectric Energy Harvesting for Global Efficiency Enhancement", Proc. 32nd URSI GASS, Montreal, QC, Canada 1-1, 2017
- [C20] **S. Hemour**, "rectenna synthesis", 7th COST WiPE Meeting, 2017, Kosice, Slovakia, 2017 (*Keynote speech*)
- [C19] **E Vandelle**, PL Doan, DHN Bui, TP Vuong, G Ardila, K Wu, **S Hemour**, "High gain isotropic rectenna", Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2017 IEEE, 1-4 (*Best student paper*)
- [C18] **X Gu, S Hemour**, K Wu, "Integrated cooperative radiofrequency (RF) and kinetic energy harvester, Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2017 IEEE, 1-3 (*Best student paper*)
- [C17] **S. Hemour**, C.H.P. Lorentz, K. Wu, "Ambient RF energy harvester synthesis", International Microwave Symposium (WFI workshop on Theory and Applications of Wireless Power Transfer), San Francisco, USA, 2016 (*invited lecture*)

- [C16] K. Wu, P. Burasa, **S. Hemour**, S. Ladan, "Millimeter-Wave Power Harvesting : From CMOS Circuits to Diode Platforms" International Microwave Symposium (WSF workshop on Advanced ICs and Systems for Wireless Charging and Energy Harvesting), San Francisco, USA, 2016 (*invited lecture*)
- [C15] **S. Hemour**, C. H. Lorenz, K. Wu, "Small-Footprint Wideband 94GHz Rectifier for Swarm Micro-Robotics", Proc. IEEE International Microwave Symposium (IMS) 2015, Phoenix, USA [3 p.], 2015,
- [C14] **C. H. Lorenz, S. Hemour**, P. Fay, K. Wu, "Overcoming the Efficiency Limitation of Low Microwave Power Harvesting with Backward Tunnel Diodes", Proc. IEEE International Microwave Symposium (IMS) 2015, Phoenix, USA [3 p.], 2015.
- [C13] **S. Hemour**, K. Wu "Harvesting ambient RF energy with emerging rectifier technology", International Microwave Symposium (WFH workshop on Wireless Power Transmission and Scavenging), Phoenix, USA, 2015 (*invited lecture*)
- [C12] **C. H. Lorenz, S. Hemour**, K. Wu, "Influence of the Matching Network Insertion Losses in Ambient Microwave Power Harvesters" IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave and Terahertz Applications (NEMO) 2015, [4 p.], 2015, (*invited talk*)
- [C11] **S. Hemour**, K. Wu, "Reactive Nonlinearity for Low Power Rectification", International wireless Symposium (IWS) 2015, [4 p.], Shenzhen, China.
- [C10] **S. Hemour**, K. Wu, "The new dawn of Spintronics: From Memory to RF Diode applications" XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium Beijing, China [4 p.], 2014, (*invited talk*)
- [C9] **S. Hemour**, S. Adhikari, A. Ghiotto, K. Wu, "Low magnetic biased SIW-based isolator: Effect of the rising temperature on the performance of the isolator" Proc. IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (Wamicon) 2014, Tempa, USA [3 p.], 2014.
- [C8] S. Adhikari, A. Ghiotto, **S. Hemour**, K. Wu, "Tunable Non-Reciprocal Ferrite Loaded SIW Phase Shifter" Proc. IEEE International Microwave Symposium (IMS) 2013, Seattle, USA [3 p.], 2013.
- [C7] S. Ladan, **S. Hemour**, K. Wu, "Towards Millimeter-Wave High-Efficiency Rectification for Wireless Energy Harvesting", Proc. IEEE International Wireless Symposium (IMS), Beijing, China, [3 p.] 2013.
- [C6] S. Ladan, **S. Hemour**, K. Wu, "A Millimeter-Wave Wideband Microstrip RF and DC Grounding" Proc. European Microwave Conference (EuMC) 2012, Amsterdam, Netherland [4 p.], 2012
- [C5] **S. Hemour**, D. Houssameddine, R. Whig, J. M. Slaughter, K. Nagel, S. Aggarwal, Y. S. Gui, C. -M. Hu, K. Wu, "Spintronics-Based Devices for Microwave Power Harvesting" Proc. IEEE International Microwave Symposium (IMS) 2012, Montreal, Canada,
- [C4] **S. Hemour**, F. Podevin, and P. Xavier, "A broadband standing wave RF interferometer for fast and low-cost spectral analysis," Microwave Conference, 2009. EuMC 2009. European. pp. 938-941[4 p.], 2009.
- [C3] M.I. Andriychuk, and **S. Hemour**, "Application of space domain integral equation approach for electromagnetic analysis of microstrip structures" Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2008. MMET 2008. 12th International Conference on, pp. 340-342 [3 P.], 2008
- [C2] M.I. Andriychuk, and **S. Hemour**, "Combination of analytical and numerical approaches for determination of the microstrip structures impedance matrix", Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, 2008 Proceedings of International Conference on, pp 181. 184. [4 p.], 2008
- [C1] M.I. Andriychuk, and **S. Hemour**, "Evaluation of Impedance Matrix Elements for Microstrip T-Junction Discontinuity", Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, 2007 XIIth International Seminar/Workshop on, 54-58 [4 p.], 2007

National-level Conference Publications

- [N9] **F Somoreau**, O Tamarin, C Dejous, D Rebiere, **S Hemour**, M Castaings, "Simulation and experimental propagation of guided waves in a phantom bone", Forum Acusticum 2020–15ème Congrès Français d'Acoustique, 2020
- [N8] **F Somoreau**, O Tamarin, C Dejous, D Rebiere, **S Hemour**, M Castaings, « Propagation of guided waves in bones », Anglo-French Physical Acoustics Conference (AFPAC) 2020
- [N7] **E Vandelle**, PL Doan, DHN Bui, TP Vuong, G Ardila, K Wu, **S Hemour**, Une Rectenna Multi-Faisceaux A Fort Gain Pour La Récupération d'Énergie RF » JNM'17 - 19ème Journée Nationales Microondes, (written in French) 2017
- [N6] **S Hemour**, F Podevin, P Xavier, « Amélioration de la dynamique d'un corrélateur analogique 300 MHz - 5 GHz par correction mono-harmonique », JNM'11 - 17ème Journée Nationales Microondes, (written in French) 2011
- [N5] **S. Hemour**, F. Podevin, and P. Xavier, "SWIFTS : RF interferometry for real time spectrum analysis," 16ème Journée Nationales Microondes, [4 p.], (written in French) 2009.
- [N4] **S. Hemour**, F. Podevin, and P. Xavier, «RF dosimetry using low cost interferometer», STIC et environnement, [4 p.], (written in French) 2009
- [N3] **S. Hemour**, F. Podevin, P. Xavier, P. Benech, et E. Le Coarer, «Wideband fourier transform spectrometer using standing wave (SWIFTS) » 10èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Limoges [3 p.], (written in French) 2008
- [N2] T. Hostache, **S. Hemour**, F. Podevin, and P. Xavier, «SWIFTS : a real time dosimeter », Journée scientifique sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements non ionisants, organisée par la Société Française de RadioProtection, La Tronche [1p.], (written in French) 2008
- [N1] **S. Hemour**, J. Dansou, «Fractals antennas for RFID applications », Radio Frequency IDentification RFID 2005,Paris, [7 P.] (written in French) 2005