



Ambassade de France au Japon
Service pour la Science et la Technologie
4-11-44, Minami-Azabu, Minato-ku,
Tokyo, 106-8514, Japon
Tel: 81-3-5798-6034
Fax: 81-3-5798-6050
<http://www.ambafrance-jp.org>

Domaine	: Réseaux sans fil opportunistes
Document	: Rapport de mission
Titre	: Réseaux de capteurs sans fil au Japon : <i>aperçu du contexte industriel et dernières avancées présentées à la conférence PowerMEMS 2008</i>
Auteurs	: Marise Bafleur et Jean-Marie Dilhac
Date	: Février 2009
Contact	: Pierre Dauchez (attache.stic@ambafrance-jp.org)

Mots clés	: Récupération de l'énergie, conversion de l'énergie, capteurs autonomes en énergie, réseaux, communication sans fil, MEMS.
------------------	---

Résumé	: Les réseaux de capteurs sans fil vont sans doute dans les dix années à venir constituer un développement technologique majeur apportant des solutions aux différents problèmes sociétaux liés à la santé, la sécurité, les transports, l'automatisation des bâtiments, etc. Le Japon est déjà entré dans l'ère de ces réseaux ubiquitaires et à la fois universités et industries sont très actives dans le domaine. Dans ce rapport, nous présentons, d'une part les activités de quelques industriels japonais sur ce thème et d'autre part, les avancées dans le domaine de la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil qui ont fait l'objet de présentations orales ou posters à la conférence PowerMEMS 2008. En résumé, il n'y pas vraiment d'application phare (« killer application ») mais certaines pourraient bien émerger, conséquence de réglementations dans les transports ou les bâtiments, par exemple. Un des verrous majeurs pour la large diffusion de ces réseaux de capteurs est celui de l'autonomie en énergie qui nécessite encore beaucoup de travaux de recherche, mais constitue un domaine d'investigation très actif comme le démontre la forte participation internationale à la conférence PowerMEMS.
---------------	---

Réseaux de capteurs sans fil au Japon : aperçu du contexte industriel et dernières avancées présentées à la conférence PowerMEMS 2008

Mission réalisée avec le concours de l'Ambassade de France au Japon
Service pour la Science et la Technologie
(Pierre Dauchez, Attaché en charge des STIC)
5-12 novembre 2008
Nagoya, Tokyo et Sendai

1. Introduction

Cette mission complète une première mission qui a eu lieu en mai 2008 sur les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks, WSN en anglais, acronyme que nous utiliserons dans le texte qui suit pour simplifier) dont le rapport est accessible via le site internet de l'Ambassade de France au Japon :

http://www.ambafrance-jp.org/article.php3?id_article=390.

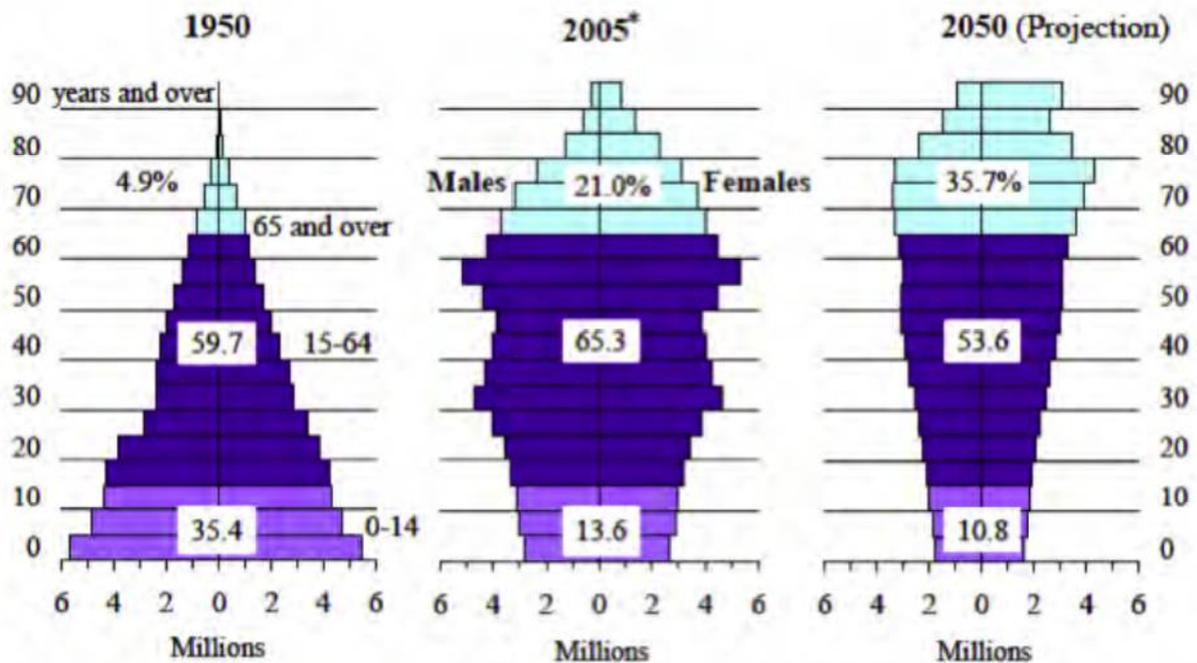
Lors de cette première mission, les aspects matériels des WSN avaient été peu abordés par manque de temps. L'objectif de cette nouvelle mission était donc de compléter le premier rapport avec ces aspects-là, d'une part par le biais de visites d'industriels impliqués dans la réalisation de modules WSN et d'autre part, en participant à la conférence PowerMEMS où sont présentés les développements les plus récents en termes de microsources d'énergie, récupération d'énergie, gestion de l'énergie et technologies associées.

Le groupe d'experts était constitué de :

- Mme Marise Bafleur, Directrice de Recherche au CNRS, responsable du groupe « Intégration des Systèmes de Gestion de l'Énergie » (ISGE) du LAAS-CNRS à Toulouse, chef de la délégation.
- M Jean-Marie Dilhac, Professeur des Universités à l'INSA de Toulouse, chercheur au LAAS-CNRS, dont les activités de recherche sont centrées sur la problématique de la récupération de l'énergie au sein du groupe ISGE du LAAS-CNRS.

Les industriels que nous avons visités se trouvaient tous dans Tokyo ou sa banlieue proche, à part Toyota qui est localisé à Nagoya. Ce qui nous a le plus frappés chez ces industriels, c'est leur philosophie d'entreprise centrée sur l'Homme, c'est-à-dire sur la mise à profit des nouvelles technologies, en l'occurrence les WSN, pour

améliorer le confort, la sécurité, l'autonomie des personnes, le diagnostic médical, la prévention des risques naturels... Le Japon est d'autant plus sensible à ces différents aspects que la pyramide des âges s'est déjà inversée, comme le montre la figure ci-après et que sa population est en décroissance. Par ailleurs, les phénomènes naturels (séismes, tsunamis) qui ont lieu couramment au Japon, constituent également un élément moteur pour le développement de moyens de prévention des risques.



Source : Statistics Bureau, Japan Ministry of Health, Labor, and Welfare

Ces différents facteurs font que les japonais sont déjà entrés dans l'ère des réseaux de capteurs ubiquitaires et que leur industrie a commencé à se développer dans ce domaine spécifique. C'est aussi pourquoi la robotique humanoïde au service de la personne est déjà bien acceptée, ce qui est loin d'être le cas en Europe. Un autre point marquant est le lien fort entre recherche universitaire et industrie dans ce domaine : en effet, la réalité de tels réseaux de capteurs sans fil ne sera possible que si le verrou de l'autonomie en énergie est levé. L'énergie solaire est certes la solution la plus efficace, déjà largement utilisée, mais pas toujours applicable. Dans ces cas-là, il faut alors récupérer de l'énergie à partir de l'environnement sous d'autres formes : vibrations mécaniques, acoustiques, ondes électromagnétiques, gradients de température... Ces solutions ne sont pas neuves en elles-mêmes, mais la nouveauté est qu'elles doivent être intégrées pour être compatibles avec la nécessaire miniaturisation de ces nœuds WSN. Des solutions sont en cours de développement dans les laboratoires. L'autre aspect concerne les différents capteurs qui seront

utilisés dans ces modules WSN : là encore, la solution viendra des laboratoires qui travaillent sur l'amélioration de la résolution de détection, la consommation, et bien sûr la miniaturisation et la réduction des coûts de fabrication par la mise en œuvre de technologies collectives et/ou par l'utilisation de substrats flexibles.

2. Visites industrielles

2.1.TOYOTA CENTRAL R&D LABS

NAGAKUTE-CHO, AICHI-GUN, AICHI-KEN, 480-1192, JAPAN

URL : <http://www.tytlabs.co.jp/>

Ce centre de recherche de Toyota, proche de Nagoya, traite un grand nombre de thèmes : les nanomatériaux, les microsystèmes, la gestion des polluants, les relations homme/machine, les télécommunications, les composants électroniques. Il focalise en ce moment une grande part de ses activités de recherche sur la gestion et la génération de l'énergie pour le véhicule hybride et à plus long terme, tout électrique. Outre les développements de nouveaux composants de puissance (IGBT sur silicium et GaN) plus performants, Toyota envisage également, dans l'objectif de réduire le poids du câblage, d'implémenter des réseaux de capteurs sans fil dans la voiture et, à long terme, d'assurer sans fil la transmission de puissance aux organes de propulsion.

Nous avons été reçus par le Dr Hiroshi Tadano, Division Manager, Information & Electronics Systems Division (qui avait visité notre laboratoire le 31 juillet 2003) et par le Dr Masayasu Ishiko, Principal Researcher, Power Device Laboratory. La confrontation des axes de recherche suivis par nos équipes respectives a montré une grande convergence d'intérêts dans le domaine de la gestion de l'énergie pour les réseaux de capteurs, et des nouveaux composants électroniques pour le transport.



Visite de Toyota au LAAS le 31 juillet 2003 : délégation menée par Dr Hiroshi Tadano (debout à l'extrême droite)



Marise Bafleur et Dr Masayasu Ishiko à Toyota Central R&D labs – Nagoya le 5 novembre 2008.



Présentation des activités du LAAS-CNRS par Marise Bafleur devant une assemblée d'une vingtaine d'ingénieurs de Toyota véhicule hybride et Denso à Toyota Central R&D labs.

2.2.AR'S

Yokohama Creation Square 13F

5-1 Sakaecho, Kanagawa-ku

Yokohama-shi, Kanagawa 221-0052, Japan

URL : <http://www.arsjp.com/>

Il s'agit d'une jeune société créée en 2001 qui emploie une vingtaine de personnes. Accompagnés par Pierre Dauchez, Attaché pour la Science et la Technologie, nous avons été reçus par le Directeur Hiraku Sato, la responsable de la recherche Ikuko Urushibara et Masayuki Inoue, responsable des ventes. Cette société propose des solutions intégrées pour les réseaux de capteurs sans fil à partir de concepts issus de la recherche universitaire ou industrielle. A noter que 10 universités ont déjà participé à ces actions de transfert technologique. Nous avons d'ailleurs eu la connaissance de cette société par l'intermédiaire du Pr Yoshito Tobe de l'Université Tokyo Denki qui collaborait avec AR'S dans le cadre du projet OSOITE (voir rapport *Un aperçu des réseaux de capteurs sans fil au Japon : de la gestion de l'énergie à l'architecture des réseaux* sur le site de l'Ambassade de France au Japon http://www.ambafrance-jp.org/article.php3?id_article=390).

Nous avons également remarqué les produits AR'S lors d'une journée Portes Ouvertes de l'Université de Tokyo en mai 2008. Les domaines d'application sont très divers : santé (laboratoire-sur-puce¹, mesure de paramètres vitaux, surveillance à domicile de personnes fragiles, mesure de glycémie et transfert sans fil chez le praticien...), suivi dynamique de la nage d'un sportif, mesure de température, vibrations et pression dans une installation industrielle. Dans tous ces produits, le

¹ T. Isoda et al, Development of a sensor-array chip with immobilized antibodies and the application of a Wireless antigen-screening system, *Sensors and Actuators*, B 129 (2008) 958-970.

premier souci est le coût tout en privilégiant les performances et la faible consommation. La plupart des clients de la société AR'S sont japonais, y compris de grandes sociétés, mais l'existence de clients israéliens et australiens a été mentionnée lors de la visite.

Un de leur produit phare est le One-tenth, qui est un module Zigbee, le plus petit au monde d'après AR'S (15mmx15mm), réalisé grâce à un assemblage de type SiP (Silicon-in-Package). Interfacé avec une source d'énergie et un capteur, il possède déjà toutes les fonctionnalités pour constituer un nœud complet fonctionnel d'un réseau de capteurs sans fil.

2.3.AZBIL, Yamatake Corporation

Tokyo Building, 2-7-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-6419
Fujisawa Technology Center, Yamatake Corporation
1-12-2 Kawana, Fujisawa City, Kanagawa, Japan 251-8522
URL : <http://www.azbil.com/>

Depuis le 1er octobre 2008, Azbil est le nouveau nom du conglomérat Yamatake Corporation créé en 1906, qui a donc fêté récemment ses 100 ans d'existence. Il propose principalement des solutions pour l'automatique industrielle et pour le bâtiment intelligent, mais aussi pour la santé et l'environnement. Leur philosophie : « human-centered automation » a pour ambition de développer la sécurité, le confort et l'épanouissement de l'homme avec comme souci le respect de l'environnement.

Nous avons été reçus par Tadashi Hirooka, Executive Officer et Chief Technology Officer, ainsi que par le Dr Taki Kuroiwa, Chief Researcher. Le Fujisawa Technology Center (FTC) est depuis 2006 le centre de R&D d'AZBIL avec actuellement 1612 employés. Parmi les produits proposés, on peut citer ceux concernant les économies d'énergie (chauffage, climatisation), la surveillance de personnes âgées, la sécurité (tremblements de terre, CO₂, incendie, ...). Pour ces applications, FTC développe et propose divers capteurs pour le contrôle de l'air, la détection d'incendie et toute une série d'autres capteurs. Basés sur des technologies MEMS avec une forte volonté de miniaturisation et de performance, on peut citer : un capteur de pression sur saphir capable de fonctionner à haute température et dans le vide, le plus petit capteur de pression piézoélectrique sur silicium, le capteur de gaz miniature μF^{TM} basé sur une technologie à membrane chauffante, un capteur d'hydrogène très sensible basé sur la technique des ondes acoustiques de surface et toute une gamme de biopuces pour la synthèse automatisée. A noter en ce qui concerne les biopuces, une collaboration avec le CEA-LETI pour le développement d'une puce à ADN actuellement commercialisée au Japon. L'évolution récente de ces produits vers les réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance de la structure de bâtiments amène les

responsables de la recherche à prendre en compte les deux demandes majeures de leurs clients : protocoles de transmission RF fiables et capteurs autonomes en énergie. Dans ce contexte, ils s'intéressent donc eux aussi aux techniques de récupération et de gestion de l'énergie.

Une petite anecdote à rapporter : lors de la discussion sur les réseaux de capteurs sans fil, nous avons mentionné la société AR'S que nous avons visitée la veille. Nos interlocuteurs ont été très intéressés par les produits d'AR'S qu'ils ne connaissaient pas, notamment le One-tenth.

3. PowerMEMS 2008 (<http://www.nanosys.mech.tohoku.ac.jp/powermems08/>)

SENDAI, JAPAN - NOVEMBER 9-12, 2008



PowerMEMS est un « workshop » annuel qui a été créé en 2000 et organisé à l'initiative de l'université du Tohoku à Sendai. L'édition 2008, à nouveau organisée à Sendai par cette grande université publique, en était le huitième volet, présidé par Hiroki Kuwano de l'Université du Tohoku. A l'origine, ce « workshop » était uniquement japonais. Depuis il a considérablement évolué, que ce soit en nombre de participants, ou au niveau des technologies mises en jeu et des applications étudiées. Il a eu lieu successivement à Tsukuba (2002), Makuhari (2003), Kyoto (2004), Tokyo (2005). Puis le « workshop » a affirmé sa dimension internationale : Berkeley (2006) et Freiburg (2007). Lors de l'édition 2008, il a été décidé que PowerMEMS 2009 aurait lieu à Washington DC. L'intérêt croissant de la conférence est confirmé par un nombre important de sponsors industriels et l'existence d'une mini-exposition avec 3 exposants offrant des filières technologiques d'intégration (MEMS CORE <http://www.mems-core.com/ehome/home.htm>, NTT AT <http://www.ntt-at.com/> et ELIONIX <http://www.elionix.co.jp/english/>).

Pour cette édition 2008, 137 papiers ont été soumis, ce qui correspond à une augmentation de 40% par rapport à 2007. 118 contributions ont été acceptées, sous forme de 38 papiers oraux et 80 posters. Il est intéressant de noter la provenance des papiers acceptés, l'Europe se trouvant à égalité avec l'Asie : 15,2% USA, 42,4% Asie, 42,4% Europe. On peut noter aussi la place remarquable de la France dans la liste des 4 pays qui ont soumis le plus de papiers : Japon 33 papiers, USA 16 papiers, Allemagne 16, France 10.

Au niveau des contributions par thématique, elles se distribuent comme suit :

- Récupération d'énergie : 41%

- Combustion et moteurs : 20%
- Piles à combustible et batteries : 14%
- Gestion de l'énergie : 8%
- μ MEMS : 4%
- Autres : 13%

Le programme technique comportait 7 papiers invités, dont 3 pour la 2^{ème} édition de la conférence Micro-Environmental Machine Systems (μ MEMS), consacrée à l'exploration des applications des MEMS et NEMS aux problèmes environnementaux.

- Papiers invités PowerMEMS :
 - Energy Harvesting for Tire Pressure Monitoring Systems: Design Considerations - Shad Roundy (LV Sensors Inc.)
 - Biomechanical Energy Harvesting - J. Maxwell Donelan, Veronica Naing and Qingguo Li (Simon Fraser University)
 - Study and Development of Micro Fuel Cells - A. Martinent-Beaumont¹, V. Faucheux¹, N. Martin¹, N. Karst², JY. Laurent¹ (¹Commissariat à l'Energie Atomique, ²STMicroelectronics)
 - Recent Progress of Wireless Transmission Systems Using Printed Plastic MEMS Switches and Organic Transistors - Takao Someya, Tsuyoshi Sekitani, Makoto Takamiya, and Takayasu Sakurai (The University of Tokyo)
- Papiers invités μ MEMS :
 - Use of MEMS/NEMS to Solve Environmental Problems - Hiroki Kuwano (Tohoku University)
 - Low Voltage Energy Harvesting For MEMS Applications - Daniel Guyomar, Lauric Garbuio and Mickaël Lallart (Université de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon)
 - Advanced clean lubrication of mems - Koji Kato (Nihon University)

La conférence PowerMEMS a démarré le lundi 10 novembre par 3 papiers invités qui ont permis de brosser une synthèse partielle des domaines de la récupération

d'énergie, ainsi que de la génération et du stockage.

Papier invité 1: *Energy harvesting for tire pressure monitoring systems: design considerations, par Shad Roundy de LV Sensors Inc.*

Il s'agit de la fonction de contrôle de la pression des pneus qui est obligatoire depuis 2007 sur toutes les voitures aux USA. C'est un produit largement commercialisé qui utilise à ce jour une pile comme source d'énergie. Néanmoins, il nécessite impérativement une solution alternative basée sur la récupération d'énergie à cause de la durée de vie limitée de cette pile et de son mauvais comportement en température (aussi bien pour les basses, -40°C , pour lesquelles la résistance interne s'élève considérablement produisant une chute du rendement de la batterie, que pour les hautes températures, $+125^{\circ}\text{C}$, pouvant conduire à des dégradations irréversibles). Notons que dans cette application, la consommation d'énergie est dominée par la transmission RF, bien qu'il n'y ait qu'une seule trame transmise par minute consommant un peu plus d'1 mJ/trame.

Dans le principe, notamment à cause de l'obligation réglementaire, cette application pourrait bien être la « killer application » offrant aux techniques de récupération d'énergie pour réseaux de capteurs un de leurs premiers champs de déploiement industriel. Le système de récupération pour être viable devrait alors présenter une durée de vie d'au moins 10 ans, pouvoir fonctionner sur toute la gamme de températures mentionnée plus haut, et n'être ni plus cher ni plus gros qu'une pile bouton. De plus, le stockage de l'énergie devrait être examiné de près, les accumulateurs rechargeables étant chers et peu fiables. Pour ce qui est de l'origine de l'énergie ambiante à récupérer, les vibrations constituent une source évidente : toutefois les spectres des vibrations mécaniques liées au roulement sont très dépendants de la vitesse du véhicule, interdisant tout circuit résonnant trop sélectif. De plus le système de récupération devra survivre à des chocs violents, peut-être peu compatibles avec un système optimisé pour récupérer l'énergie sous faibles accélérations. Enfin, une question importante concerne la technologie : MEMS ou pas MEMS ? Les MEMS sont certes à la mode et de petite taille, mais de toute façon les masses sismiques pour la récupération seront grandes, alors pourquoi ne pas avoir recours à la micromécanique ? En faveur des MEMS peut-être le coût, grâce à une technologie collective (ex : Wafer Level Packaging).

Papier invité 2: *Biomechanical Energy Harvesting par J. Maxwell Donelan et al (Simon Fraser University)*

L'application est la mise à profit de l'énergie que peut produire un humain dans une activité normale. Un exemple déjà ancien est celui de la montre à remontage automatique ($5\mu\text{W}$). Une contrainte est de ne pas solliciter d'effort supplémentaire trop important et pénalisant. L'exemple des chaussures à semelles récupératrices est

mentionné : le porteur a l'impression désagréable de marcher sur du sable.

Applications très larges : militaire, randonneur, équipes de secours en zone isolée. Le dispositif présenté met à profit l'énergie ambulatoire grâce une orthèse du genou ou de la cheville (c'est-à-dire des endroits où le corps met en jeu les quantités d'énergie les plus importantes) ne récupérant l'énergie que dans les phases de la marche les plus avantageuses pour le confort du porteur (celles pendant lesquelles l'articulation est en mode freinage du mouvement). Pour une vitesse de marche de 1,5m/s, la puissance générée peut être de 50W.

En conclusion de son exposé, le conférencier fait remarquer avec humour que ce dispositif ne sauvera pas la planète, mais qu'avec d'autres il peut avoir un impact social lié à la prise de conscience de la question de l'énergie pour l'avenir de nos sociétés : « c'est comme faire pousser ses légumes dans son propre jardin ou acheter un vélo électrique ». Ou comme le dit avec humour Le Figaro Magazine du 27 décembre 2008 au sujet de ce générateur : « Une nouvelle solution à la crise de l'énergie, c'est le pied ! »

Papier invité 3 : *Study and Development of Micro Fuel Cells par A. Martinent-Beaumont et al. (CEA-LITEN, STMicroelectronics)*

Il s'agit de génération d'énergie, grâce à une pile à combustible (PAC), destinée au remplacement des batteries Li-ion très majoritairement utilisées dans les téléphones cellulaires. La densité d'énergie de la PAC est de 600 Wh/kg à comparer à 200Wh/kg pour les batteries Li-ion (qui, contrairement aux PAC, constituent un système fermé, ne captant pas l'oxygène de l'air). L'étude présentée a abouti au développement d'une pile à combustible à hydrogène (PEMFC) basée sur une technologie silicium sur plaquette 6 pouces. La mise en série de 9 cellules permet de produire 2,2W à 35°C à l'air ambiant. Ces travaux ont démarré au LITEN il y a 8 ans avec le développement de différentes techniques de dépôt et de gravure, et l'étude des effets des paramètres externes non contrôlables (température et humidité de l'air). Le protocole de transfert industriel vers STM a été signé il y a 4 ans.

Après ce survol des papiers invités introductifs des différentes sessions de la conférence, nous nous focaliserons sur les aspects de récupération et de gestion d'énergie.

3.1.Récupération d'énergie (14 papiers oraux, environ 35 posters)

Il s'agit de la majorité des contributions à cette conférence. On peut classer les différents types de systèmes par leur mode de récupération d'énergie : vibratoire à l'aide d'électrets ou de matériau piézoélectrique, par couplage électromagnétique, thermique, thermophotovoltaïque et fluïdique.

a. Récupération de l'énergie vibratoire

Lors des différentes présentations concernant les systèmes qui récupèrent de l'énergie vibratoire, nous avons pu noter des interrogations communes et récurrentes à propos :

- du vieillissement du système (lorsque ceci est précisé, les plans d'expérience font mention de cycles de 10^7 oscillations seulement)
- du danger des accélérations extrêmes ou dans un plan différent de celui utilisé pour la récupération (dans le même ordre d'idée, l'utilisation de « stoppers » pour limiter dans ce cas l'amplitude du mouvement de la masse sismique n'est pas sans soulever elle aussi la question du vieillissement, car en cas de sollicitation les « stoppers » sont heurtés deux fois par cycle)
- des pertes de rendement liées à la récupération unidimensionnelle

Concernant ce dernier point, un papier de l'Université de Freiburg a présenté une nouvelle architecture circulaire de résonateur 2D, à masse sismique unique, dont les performances sont indépendantes de la direction des vibrations si elles se situent dans le plan de mouvement de la structure. L'architecture peut être utilisée indifféremment pour des générateurs électrostatiques, électromagnétiques ou piézoélectriques.

Dans le même esprit, une architecture de générateur piézoélectrique améliorant la sensibilité aux vibrations dans un plan a été proposée par Vestfold University College. Elle est composée de deux spirales d'Archimède indépendantes ayant chacune une grande masse sismique à leur extrémité libre et partageant le même ancrage au centre du dispositif. Une puissance maximum simulée de $25 \mu\text{W}$ est ainsi obtenue pour une charge de $630\text{k}\Omega$ sur une gamme de fréquences de 1 à 400Hz.

Un nombre de papiers très important concernait les possibilités de l'électret et les améliorations technologiques, ainsi que les architectures permettant d'augmenter les performances de ce matériau pour la récupération de l'énergie vibratoire. La plupart des auteurs étaient japonais, peut-être à cause de la naissance des électrets de synthèse au Japon au début du XX^e siècle. L'intérêt des générateurs électrostatiques à base d'électrets réside dans leur meilleure sensibilité à basse fréquence (<100Hz) par rapport aux générateurs par induction électromagnétique. Parmi les avancées remarquables, on peut citer :

1. Puissances générées : $0,3\mu\text{W}@37\text{Hz}$ pour un système complet avec convertisseur, $40\mu\text{W}@2\text{Hz}$ (marche humaine)
2. Innovations technologiques concernant les systèmes à électret :

- a. Nouvelles techniques de charge et de réalisation de l'électret :
 - i. « Free standing electret » (Université du Tohoku) : suppression de l'électrode métallique (backing plate) après la charge corona pour éviter l'effet négatif de la charge qui y est générée. Cela a pour effet de rediriger les lignes de champ électrique vers les électrodes en vis-à-vis (work electrodes) et conduit à une augmentation de la puissance générée d'un facteur 5.
 - ii. Méthode de charge d'une couche de SiO₂ par implantation et post traitement thermique (Hochschule Furtwangen University)
 - iii. Double-couche de SiO₂/Si₃N₄ déposée sur verre par PECVD et chargée négativement par méthode corona (Peking University).
 - iv. Electrode de garde en aluminium déposée sur un film de SiO₂ pour obtenir un potentiel de surface plus faible que l'électret et structure du SiO₂ creusée pour éviter la dérive de la charge vers l'électrode de garde (SANYO Electric Co.).
- b. Utilisation de roulement à microbilles (Ø320 µm) dans un rail de 5mm de longueur pour éviter le collage (SANYO Electric Co.) – application visée : vibrations de quelques Hz (human motion).
- c. Ressort réalisé grâce à de la gelée de fruit très flexible (Peking University) permettant une sensibilité accrue aux basses fréquences (<10Hz) et aux faibles accélérations (<0,1g).

b. Combinaison de générateurs piézoélectrique et électromagnétique

Afin d'augmenter les performances, l'Université de Freiburg a présenté une structure cantilever qui combine la génération piézoélectrique (PZT) et la transduction électromagnétique. La structure possède des dimensions millimétriques (poutre de 20mm de long et 5mm de large sur 500µm d'épaisseur) et n'est pas intégrée sur silicium. La puissance de sortie est ainsi améliorée de 150% par rapport à la génération piézoélectrique seule.

c. Récupération de l'énergie thermique

L'Université du Missouri-Columbia a présenté un thermogénérateur pouvant fonctionner à haute température. Il est basé sur une diode réalisée avec un matériau semiconducteur liquide (du sélénium qui est liquide à 221°C) qui résout les problèmes de résistance de contact. Le concept est de combiner dans un même

dispositif un thermogénérateur (effet Seebeck) et une jonction PN (ici une Schottky) pour séparer les porteurs générés thermiquement. Le démonstrateur présenté permet de récupérer $14\mu\text{W}$ à 350°C et offre une conductivité qui s'améliore avec la température.

3.2.Nouvelles technologies

Ces nouveaux composants qui devraient permettre une diffusion large d'objets et capteurs communicants sans fil en leur conférant l'autonomie en énergie, ne pourront voir le jour que si l'on dispose de technologies de fabrication performantes, collectives et bas coût. L'impression par jet d'encre constitue une de ces technologies clés.

Une nouvelle technique d'impression par jet d'encre appelée Superfine Inkjet a été présentée, d'une part lors du quatrième papier invité de la conférence donnant les dernières avancées dans la réalisation de systèmes de transmission d'énergie sans fil (University of Tokyo) et d'autre part, dans un papier utilisant cette technique pour la fabrication d'une micropile (University of California). Cette technologie a été développée par le professeur Murata du National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST- Japon). Le gros intérêt de cette technique appelée « Drop on demand » est, d'une part sa résolution submicronique avec le contrôle de gouttes de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ et d'autre part, la possibilité de réaliser facilement des structures 3D (piliers) dans une technologie dite « additive », c'est-à-dire alternative au classique remplissage de structures 3D en tranchées préalablement creusées. Cette technologie a fait l'objet d'un transfert industriel avec la création d'une start-up japonaise, SIJ Technology (<http://www.sijtechnology.com/>) pour la commercialisation d'un équipement industriel.

Des micropiles Zn-Ag à électrodes 3D en forme de piliers ont ainsi été réalisées, permettant une augmentation de 60% de la capacité en courant par rapport à des électrodes planaires. L'autre application concerne la transmission d'énergie sans fil intégrée sur un substrat flexible. L'objet à alimenter est détecté par couplage électromagnétique en utilisant une matrice de transistors organiques. L'énergie est transmise par induction grâce à des inductances en cuivre imprimées sur le substrat souple et pilotées par une matrice d'interrupteurs MEMS. L'efficacité de couplage de l'énergie obtenue est élevée (81,4%) et un niveau de puissance atteignant $40,5\text{W}$ a pu être transféré.

Une autre structure innovante a également été présentée : il s'agit d'un transpondeur à MEMS (Cornell University) dans lequel l'irradiation isotopique d'un bras de MEMS provoque la charge électrostatique de celui-ci, qui induit elle-même une déformation mécanique et une décharge lorsqu'un contact avec la masse est établi.

Après décharge, le bras reprend ensuite sa position initiale. Lors de cette décharge une onde RF est émise (315 MHz, 800 μ W, 10 μ s de durée, 3 min de récurrence), dont la fréquence correspond à l'onde de surface générée dans le MEMS. Cette fréquence, accordable, peut permettre d'identifier l'émetteur et de transporter le résultat d'une mesure. Le MEMS doit malheureusement être placé dans le vide ; la durée de vie de la source isotopique est estimée être 100 ans dans le cadre réglementaire limitant le niveau de radiations.

3.3. Conversion de l'énergie

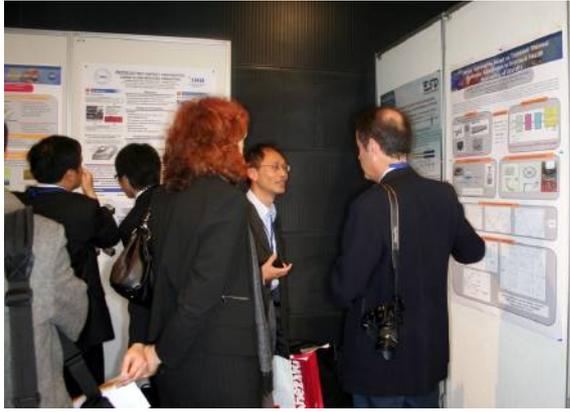
Quelques publications traitaient explicitement des circuits électroniques de conversion / gestion de l'énergie électrique. Plus précisément, il s'agit des circuits à placer entre la source d'énergie et la charge électrique ultime, directement liée à l'application et non aux opérations de traitement de l'énergie. Cette charge peut par exemple être constituée par une batterie d'accumulateurs, des condensateurs, ou bien directement les circuits de polarisation des étages de traitement du signal ou d'alimentation d'éventuels actionneurs.

La ligne directrice des concepts présentés est bien sûr d'optimiser le rendement de tous les transferts, tout en limitant la consommation d'énergie invariante d'échelle des composants impliqués, c'est-à-dire la consommation non directement impactée par l'amplitude de l'énergie convertie. De ce point de vue, si l'on rencontre des associations de circuits analogiques et numériques (microcontrôleurs, FPGA...) pour la réalisation de boucles d'asservissement (PID) par exemple, la solution du 100 % analogique est privilégiée par beaucoup.

Par ailleurs, l'optimisation du rendement peut impliquer :

- une adaptation dynamique entre la charge et l'impédance de sortie de la source,
- le découplage des batteries d'accumulateurs devant être chargées par un convertisseur DC/DC non fonctionnellement indispensable, mais qui permettra d'éviter d'imposer à la source une charge directe à tension constante pouvant être incompatible avec l'adaptation d'impédance.

Plus généralement, il est incontestable qu'une approche globale est indispensable pour l'optimisation des différents étages, et que des architectures très différentes sont imposées par l'association source d'énergie / charge / application.



La session poster de PowerMEMS



Jean-Marie Dilhac et Marise Bafleur devant leur poster



Banquet de PowerMEMS



Joueurs de shamisen pendant le banquet

4. Conclusion

Lors de cette mission qui comprenait des visites de sociétés industrielles et la participation à la conférence PowerMEMS 2008 à Sendai, nous avons pu noter quatre points importants concernant le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

Tout d'abord, quel que soit le domaine d'application (transport, bâtiment, santé, sécurité, etc.), les réseaux de capteurs sans fil sont de plus en plus envisagés pour apporter une solution efficace, performante, peu invasive et bas coût. Un des verrous majeurs à la large diffusion de ces réseaux, outre la protection de la vie privée, est alors l'autonomie en énergie de chaque nœud du réseau.

La première application majeure qui pourrait tirer parti des réseaux de capteurs sans fil est celle du contrôle de la pression des pneus en automobile. Cette application à fort volume est motivée par une réglementation de la loi américaine qui rend obligatoire la présence d'un tel dispositif de contrôle sur tous les véhicules. Actuellement, elle utilise une pile bouton comme source d'énergie mais il y a une forte demande pour que le dispositif dispose d'un système de récupération de

l'énergie (vibratoire, thermique ou RF, voire les trois) qui lui confèrerait une autonomie presque infinie.

Les industriels japonais qui développent des applications spécifiques pour les réseaux de capteurs sans fil s'appuient sur des résultats de laboratoires de recherche universitaires, à la fois dans les domaines des capteurs et de la récupération d'énergie. En général, les démonstrateurs présentés par les universitaires ont un caractère très abouti.

Enfin, il est intéressant de souligner l'explosion du nombre de publications dans le domaine de la récupération de l'énergie (+40% entre 2007 et 2008 pour la conférence PowerMEMS). Le niveau des contributions européennes qui est comparable à celui de l'Asie est également remarquable.

En conclusion, aussi bien en Europe qu'en Asie, les réseaux de capteurs sans fil vont sans aucun doute constituer dans les années à venir un champ privilégié pour une innovation puisant sa source dans l'interdisciplinarité. Le Japon est en train de transformer le handicap lié au vieillissement de sa population en un moteur de croissance, en innovant dans des domaines technologiques clés, comme ceux évoqués dans ce rapport, appliqués à l'aide aux personnes.