

DOCUMENT DE SYNTHÈSE

Présenté à l'Université Montpellier 2, Sciences et techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Soutenue publiquement le 8 Mars 2015

**« MICROMECHANIQUE ET MICROTHERMIQUE, MICRO ET
NANOSYSTEMES POUR LES SCIENCES DU VIVANT »**

par

Benoît CHARLOT

Jury :

Pr. Elie Lefeuvre

Pr. Bruno Le Pioufle

Dr. Vincent Senez

Pr. Pascal Nouet

Pr. Fabien Pascal

Pr. Alain Giani

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier les rapporteurs de ce document qui ont passé un temps précieux à le lire et à analyser mes travaux. Merci Bruno, Vincent et Elie pour votre temps. Je remercie aussi bien sur Pascal Nouet, Fabien Pascal et Alain Giani pour leur participation à ce jury.

Je remercie tous mes collègues avec qui j'ai travaillé pendant toutes ces années dans les différents laboratoires qui m'ont accueillis.

Au laboratoire TIMA, à Grenoble, Salvador Mir et Bernard Courtois qui ont été à mes côtés pendant mes premières années de laboratoire et au cours de ma thèse. Sans oublier également Damien Veychard, Fabien Parrain, Guillaume Prenat, Zein Juneidi, Nicolas Galy, Christian Domingues et tous les autres thésards de l'époque de la salle 120.

Je voudrais aussi remercier Kholdoun Torki pour ses précieux conseils ainsi que toute l'équipe du CMP, Alexandre Chagoya l'homme qui n'a jamais froid, pour sa gentillesse et sa compétence et son comparse Hubert Delori, sans oublier évidemment Isabelle et Chantal et tout le staff de TIMA.

Au cours de la seconde période à TIMA, je voudrais remercier tout particulièrement Skandar Basrouf, le maître des expressions, avec qui nous avons fait tant de choses et l'équipe que nous avons formé autour du projet VIBES: Marcin, Yasser, Libor et Mikael qui a rejoint l'équipe. Je les ai laissés pour m'envoler vers le Japon, ils ont terminé le travail.

La période Tokyoïte a été aussi riche de rencontres. Je tiens à exprimer mes remerciements à toute l'équipe du LIMMS : Yumi, Sachie et l'équipe du LIMMS office. Hiroshi Toshiyoshi et le Pr. Fujita qui m'ont accueilli dans leur équipe. Mes collègues du Toshilab, Winston, Alexander, Kiyotaka, Shimaru, Higo, Johnny, Daisuke et tous les autres.

Je tiens également à remercier mes collègues du LIMMS, Bruno Le Pioufle et Christian Bergaud qui ont animé le LIMMS pendant mon séjour. Vincent Senez et Dominique Collard qui ont été mes premiers contacts au LIMMS. Enfin Tarik Bourouina et Gilbert Reyne pour leurs conseils avisés. Agnès Tixier et Yoshio Mita enfin pour leur accueil et leur bonne humeur.

Enfin tous les post docs, permanents et thésards du LIMMS de l'époque : Nazare, Denis, Christophe, Fabrice, Vincent, Franck ... pour la bonne ambiance qu'ils ont su insuffler au laboratoire.

Pour mon retour à Montpellier, je tiens à remercier mes deux collègues Alain et Philippe avec qui besogne avec hardiesse quotidiennement. Quelques mots également pour la Famille Garraud Alexandra et Nicolas, qui vivent maintenant avec des alligators. Laurent Bernaud qui nous fait rire tous les jours. La CTM team : Fred Pichot, Jean Lyonnet et Jean-marie Peiris. Enfin une pensée pour Serge Sorli et Serge Vena de la fondation M@Cumba, Mamadou, Florian et David, sans oublier Fabrice Bardin et Lambert paris qui chante aussi bien qu'il cultive les neurones .

Enfin je remercie mes collègues biologistes avec qui je travaille, en tout premier lieu Etienne Schwob de l'IGMM, puis mes collègues de l'institut des Neurosciences de Grenoble, de l'INM, du MMDM et du CBS.

TABLE DES MATIERES

Introduction	7
I Micromécanique	
1. Capteur d'empreintes digitales intégré à micropoutres (1999-2005)	12
2. Alimentation de capteurs autonomes par récupération des vibrations de l'environnement (2002-2005)	28
3. Détection des déplacements d'un micro résonateur par jauge à émission de champ (2005-2007)	40
4. Les mémoires nanomécaniques (2005-2007)	48
5. Conclusions	59
II Microthermique	
6. Thermique des circuits intégrés (2002-2005)	64
7. Éléments pyroélectriques	75
8. Conclusions.	85
II Microsystèmes pour la biologie cellulaire	
9. Contraintes physiques à l'échelon cellulaire : impact sur la différenciation de cellules souches mesenchymateuses	91
10. Microsystèmes pour les neurosciences	97
11. Assemblage ordonné et peignage de l'ADN par dépôt par capillarité	105
12. Conclusions	111
Publications	119
13. CURRICULUM VITÆ	125

INTRODUCTION

Ce document résume mon activité de recherche sur environ 10 années et dans trois laboratoires différents. Il n'a pas été facile de choisir parmi les nombreux sujets de recherche que j'ai abordé pendant ces années, ceux qui pourraient fournir une trame commune avec un but scientifique unique. Mon domaine de recherche, le développement de microsystèmes innovant, n'a pas un objectif scientifique particulier. Ce thème est étroitement lié aux applications possibles de ces systèmes et aux challenges scientifiques qu'ils abordent. C'est pourquoi ce document offre un champ thématique assez large, passant de l'électronique intégrée à la mécanique, la thermique, pour finir par la microfluidique pour la biologie cellulaire.

J'ai commencé mon activité dans un laboratoire de conception de circuits intégrés en faisant de la micromécanique et des circuits intégrés en me basant sur des filières microélectronique industrielles. Ma thèse a porté sur le test et l'auto test des microsystèmes, ou comment s'assurer du bon fonctionnement d'un microcapteur à moindre coût. En s'inspirant des techniques développées pour les circuits intégrés analogiques et numériques, nous avons développé des microsystèmes auto testables et à partir de la in capteur d'empreintes digitales intégré, avec toutes étapes de traitement de l'image permettant de mesurer et de reconnaître une signature d'empreinte.

Je me suis ensuite rapproché des technologies de microfabrication pour développer avec mon collègue Skandar BASROUR u laboratoire TIMA l'axe de recherche sur les micro sources d'énergie. Nous avons été parmi les premiers à développer des micro sources d'énergie pouvant recueillir un peu d'énergie (l'objectif était $1\mu\text{W}$) de l'environnement, en l'occurrence les vibrations de la structure sur laquelle il était monté.

J'ai ensuite tourné mon activité entièrement vers les micro et nanotechnologies au cours de mon séjour au Japon. Au sein de l'équipe du Pr. Toshiyoshi j'ai rejoint un projet en cours, la détection des mouvements de micro résonateurs par l'adjonction d'une jauge de déplacement à émission de champ. En parallèle j'ai développé un projet de recherche plus personnel, à savoir des points mémoires nanomécaniques, basés sur l'utilisation d'une nanopoutre bistable.

A mon retour en France j'ai naturellement voulu retrouver une activité centrée sur les micro et nanotechnologies. Montpellier étant une place forte pour le secteur biologie santé, j'ai orienté alors mon activité vers les micro technologies pour la biologie, ce qui est actuellement mon activité de recherche principale et forme mon projet de recherche qui est détaillé dans la troisième partie de ce document.

Ce document suivra donc la trame suivante :

I Micromécanique

1. Capteur d'empreintes digitales (1999-2005)
2. Micro sources d'énergie pour la récolte des vibrations (2002-2005)
3. Micro résonateurs (2005-2007)
4. Mémoires nanomécaniques (2005-2007)
5. Conclusions

II Micro thermique

6. Thermique des circuits intégrés (2002-2005)
- 7 Elements pyroelectriques (2007-2012)
- 8 Conclusions

III Projet : Micro dispositifs pour la biologie cellulaire

9. Stimulation mécanique des cellules souches
10. Microsystèmes pour les Neurosciences
11. Dépôt par capillarité de molécules d'ADN
- 12 Conclusions

13 CV

Partie I

Micromécanique

Introduction

La micromécanique et les MEMS, pour *Micro Electro Mechanical Systems* sont apparus dans les années 70 à partir des développements de la filière microélectronique. Les technologies et outils de dépôt et de gravure de couches minces, développées pour définir les pistes de routage des circuits intégrés ont été ainsi détournés de leur usage principal pour développer et construire des systèmes micromécaniques mobiles. On date souvent le début de l'histoire des MEMS par le RGT, ou *Resonant Gate Transistor* qui est considéré comme le premier MEMS à avoir été construit. Il s'agit d'un transistor dont la grille est suspendue au dessus du canal. Les vibrations mécaniques de la grille au dessus du canal modulant le courant traversant le transistor. A partir de la, de nombreux microsystèmes furent développés avec une grande diversité de techniques de microfabrication. Ces dernières étant basées la plupart du temps sur l'empilement de couches isolantes ou conductrices puis gravées par lithographie et suspendues par retrait d'une couche sacrificielle ou d'une partie du substrat. De nombreux transducteurs, capteurs et actionneurs furent développés, profitant de la fabrication collective et du faible coût associé à ce mode de fabrication en série.

Les MEMS ont alors eu un développement rapide avec quelques succès commerciaux comme les buses d'imprimantes jet d'encre, les accéléromètres capacitifs équipant de nos jours la plupart des terminaux mobiles, et les afficheurs vidéo à miroir oscillant[2] (DMD de Texas instrument) sans compter les innombrables applications de niche qui ont vu l'essor de solutions micromécanique remplaçant des technologies classiques. En contrepartie nombre de composants n'ont pas eu le succès applicatif envisagé. Ce fut le cas par exemple des coupleurs de fibres optiques ou des micro relais radiofréquence.

Au niveau scientifique, les technologies MEMS ont également permis l'élaboration d'expériences de physique fondamentales comme par exemple la mise en évidence par l'équipe de Roukes des quanta de conductivité thermique dans une expérience célèbre de transfert de chaleur au sein d'un micro dispositif suspendu [3]. Les MEMS ont également été utilisés pour la démonstration de l'effet Casimir entre deux surfaces micro usinées [5] et enfin plus récemment par l'utilisation de la mécanique quantique au sein de nanostructures[4] ce qui illustre l'évolution des MEMS vers les NEMS, dont les dimensions tendent vers le nanomètre.

Au delà de la miniaturisation des composants électroniques quel est, au fond, l'intérêt de développer des objets de taille micro ou nanométrique avec toutes les difficultés qui y sont associées? La première réponse qui vient est sans doute celle qui est associée à la célèbre citation de Richard Feynman « There's plenty of room at the bottom », qui peut se traduire par « il y a beaucoup de place aux petites échelles » et qui pointe l'intérêt majeur des micro et nanotechnologies qui veut que faire petit veut dire faire nombreux. En effet les faibles dimensions des composants autorisent la mise en réseau d'un très grand nombre de ces derniers, comme dans les mémoires ou les micro processeurs. Cet aspect est moins intéressant pour les capteurs ou actionneurs uniques.

La prépondérance des effets de surface par rapport aux volumes et aux masses

Les distances qui rendent efficaces les actionnements électrostatiques (en $1/r^2$)

Les effets thermiques aussi qui peuvent dans certains cas changer de régime aux petites distances, notamment par l'apparition de transferts balistiques ou de couplage d'ondes évanescentes.

Dans le domaine optique par le couplage d'ondes de surfaces et le couplage optique-plasmons

Enfin l'emploi du silicium monocristallin qui dans le registre mécanique permet de travailler dans des zones purement élastique (pas de déformation plastique) et donc sans fatigue.

Au début de mon activité de recherche, je me suis intéressé aux aspects système de ces micro dispositifs en travaillant sur l'intégration entre des éléments micromécaniques avec de l'électronique intégrée. Cette intégration fut monolithique dans un premier temps avec mes travaux sur le développement d'un capteur d'empreintes digitales à micropoutres avec donc son électronique de traitement intégrée sur le même substrat que la partie micro mécanique. Puis intégration hybride avec les développements de micro générateurs de puissance récoltant l'énergie de l'environnement, en l'occurrence les vibrations. Dans ce projet nous avons développé la partie micro mécanique et commencé le développement d'un circuit de gestion de l'énergie produite sur une puce séparée. Enfin, avec mon déplacement à Tokyo, j'ai orienté mes travaux vers la partie micromécanique seule avec le développement de micro résonateurs et leur couplage avec un système de détection des déplacements par émission de champ.

Ce sont ces trois projets qui vont être décrits dans les chapitres suivants, regroupés sous le chapeau micromécanique.

1. Capteur d'empreintes digitales intégré à micropoutres (1999-2005)

1.1. Préambule

Les microsystèmes intégrés ont été le cœur de mon activité de recherche pendant ma présence au laboratoire TIMA à Grenoble. Il s'agit d'associer de manière monolithique ou hybride des systèmes micro-électro-mécaniques avec une électronique intégrée. L'idée est de concevoir des systèmes, au sens d'un ensemble de capteurs et d'actionneurs qui sont gérés par un circuit électronique qui opère plusieurs fonctions comme le balayage des pixels (dans le cas d'un réseau de capteurs), l'amplification, le filtrage et la conversion analogique numérique. J'ai mis en œuvre ces principes dans le développement de microsystèmes intégrés qui ont été développés par l'équipe *Micro and Nano Systems* du laboratoire TIMA, dont je vais décrire le fonctionnement dans cette section.

Cette activité de recherche a débuté en 1999, et a fait l'objet de deux thèses. La première étude a concerné le développement du capteur d'empreintes et a été soutenue en décembre 2002 par Fabien PARRAIN. La seconde thèse, préparée par Nicolas GALY, a été dédiée au développement et à l'implémentation d'algorithmes de reconnaissance d'empreintes digitales spécifique au capteur que nous avons développé. Cette thèse a été défendue en Avril 2005. Dans les deux cas, j'étais officiellement co-encadrant, le directeur de thèse étant Bernard Courtois. Ce projet a été mené à termes en 2005.

Le but de ce projet de recherche a été de concevoir un capteur d'empreintes digitales tactile en technologie microsystèmes. Ce dispositif doit intégrer l'électronique et le logiciel nécessaire à la mesure et la reconnaissance des empreintes digitales pour obtenir un système complet d'identification. Le projet visait des applications embarquées dans des objets portables (téléphone cellulaire, assistants personnels, carte à puce, etc...). Les résultats obtenus in fine, bien que très satisfaisants, n'ont toutefois pas suffi à entrer en compétition (ce à quoi il n'était pas destiné) avec les solutions développées par des industriels comme STmicroelectronics ou ATMEL, pour ne citer que les entreprises Françaises. Pendant la durée de ce projet, nous avons été en contact au niveau technique avec la société ATMEL à Grenoble qui a développé un capteur d'empreintes digitales à éléments pyroélectriques. Il n'y a pas eu toutefois de projet de recherche conjoint avec cette Société.

1.2. Biométrie, identification et empreintes digitales

La biométrie [6] est l'extraction des caractères physiques ou comportementaux propres à une personne en vue de son identification de manière fiable. Il existe plusieurs caractéristiques biologiques qui sont utilisées dans les systèmes biométriques. Ce sont par exemple l'iris de l'œil, le réseau veineux de la paume de la main, la voix, les traits du visage et bien entendu les empreintes digitales. Ces caractéristiques sont uniques et donc plus fiables que les méthodes traditionnelles d'identification basées sur ce que l'on sait (un code) ou ce que l'on possède (une clé). La biométrie apparaît maintenant dans différents aspects de notre vie quotidienne comme par exemple le contrôle d'accès aux bâtiments ou l'ouverture de session d'un ordinateur.



Figure 1. Composition d'une empreinte digitale, minuties de terminaison et de bifurcation

De toutes ces techniques biométriques, c'est l'utilisation des empreintes digitales qui est la plus répandue avec pratiquement la moitié du marché de l'identification biométrique [7]. Cette technique n'est plus associée systématiquement avec l'investigation policière et reste acceptée par la population.

Une empreinte digitale, comme celle visible sur la Figure 1 est composée d'un ensemble de sillons localement parallèles décrivant une arche ou une boucle. Il existe dans le motif formé par ces sillons des points singuliers, de bifurcation ou de terminaison appelés minuties. C'est l'ensemble des positions relatives de ces points singuliers qui vont fournir la signature de l'empreinte et permettre l'identification d'un utilisateur. Cet ensemble des positions, type et orientation des minuties est appelé la signature et elle est universelle, permanente et unique pour chaque personne [8]. Dans notre cas, nous cherchons à vérifier l'identité de l'utilisateur par rapport à une signature préenregistrée, cette procédure s'appelle la vérification.

1.3. Les capteurs d'empreintes digitales

La mesure des empreintes digitales existe depuis une centaine d'année et est toujours utilisée par la police comme méthode d'identification. Les empreintes sont traditionnellement prises avec de l'encre sur le doigt puis numérisé. Récemment les mesures d'identification aux frontières adoptées par certains pays ont eu recours à l'emploi de systèmes optiques. Plus récemment encore, et grâce aux développements des microtechnologies, des capteurs d'empreintes digitales miniaturisés sont apparus permettant l'implémentation de cette technique dans des appareils portatifs tels que des ordinateurs ou des téléphones.

1.3.1. Capteurs macroscopiques

La majorité des capteurs d'empreintes digitales optiques exploitent la modification de l'indice de réflexion de la surface d'un prisme lorsque les reliefs du doigt sont en contact une des faces du prisme. Le principe de fonctionnement de ce type de capteur est représenté de manière simplifiée sur la Figure 2.

De nombreux systèmes de ce type sont actuellement commercialisés par des sociétés comme Identix ou Sagem Du fait de l'utilisation de lentilles et de capteurs optiques intégrés (capteurs matriciels de type CCD ou APS). Ces capteurs sont relativement encombrants et d'un coût généralement élevé (de l'ordre de 100 € à 1000 € environ).

L'image issue de ces capteurs possède généralement une bonne définition mais souffrent de plusieurs défauts. En effet les images provenant de ces capteurs possèdent relativement peu de contraste et peuvent être facilement parasitées par les poussières et autres salissures ; notamment les traces résiduelles d'empreintes. De plus l'écrasement du doigt à la surface du capteur induit une distorsion de l'image parfois importante qui peut soulever différents problèmes lors de la phase d'appariement de l'empreinte digitale.

Malgré ces défauts, les capteurs d'empreintes digitales optiques sont à l'heure actuelle les systèmes macroscopiques les plus utilisés et les plus aboutis.

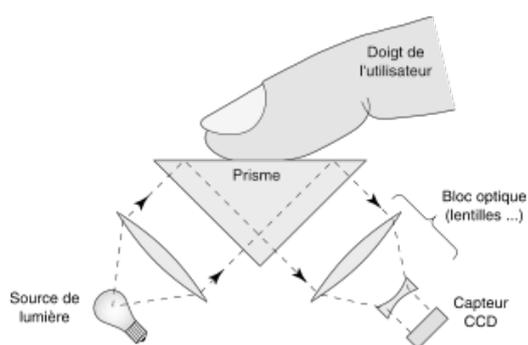


Figure 2. Principe de fonctionnement d'un capteur d'empreintes digitales optique.

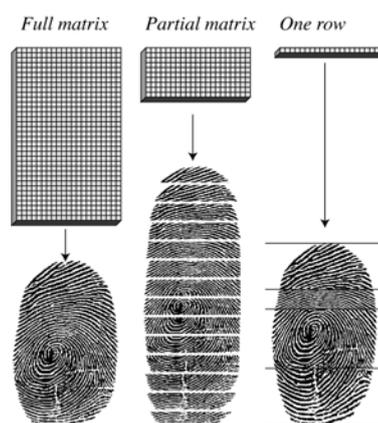


Figure 3. Schéma de principe de l'acquisition des empreintes digitales par des capteurs à matrice entière, matrice partielle et capteurs à ligne unique.

1.3.2. Capteurs intégrés

La plupart des capteurs intégrés d'empreintes digitales ont été développés en utilisant les technologies de fabrication collective de la microélectronique. Ils sont donc fabriqués à partir d'un substrat de silicium et de composants implantés à sa surface. Il existe plusieurs méthodes d'acquisition d'une empreinte. La principale est l'utilisation d'un capteur matriciel offrant une surface équivalente à celle d'un doigt et où l'utilisateur presse son doigt à la surface en le maintenant en position statique. L'image est donc fournie instantanément

dans les bonnes dimensions et sans distorsions mis à part d'éventuelles rotations ou erreurs d'alignement. Le problème est que ces capteurs nécessitent de larges surfaces (>1cm²) ce qui mène à des coûts importants. Pour éviter cela, les capteurs à balayage ont été développés [22]. Ces derniers ont recours à des matrices partielles (typiquement de 8 à 40 lignes) ou des lignes uniques ; ainsi l'image finale est obtenue par reconstruction d'un ensemble de captures. Cela entraîne donc une baisse drastique des coûts puisque la surface de capteur est largement plus faible. Cependant, la méthode de capture par balayage introduit de nombreuses distorsions de l'image qui nuisent aux performances finales du capteur. Ces trois modes de balayage, matrice entière, matrice partielle et ligne unique sont illustrés sur la Figure 3.

Au niveau du principe de la mesure de l'empreinte, plusieurs techniques sont couramment utilisées. La plus répandue est la mesure capacitive[10][11][12][13][14] avec des variations au niveau du nombre d'électrodes utilisées. Ces capteurs procèdent à l'acquisition de l'empreinte en mesurant soit les perturbations locales du champ électrique provoqué par la présence de la peau à la surface de deux électrodes contiguës (Figure 4), soit la variation de capacité entre une unique électrode de mesure et la peau suivant que cette dernière est en contact ou non avec la surface du système (Figure 5).

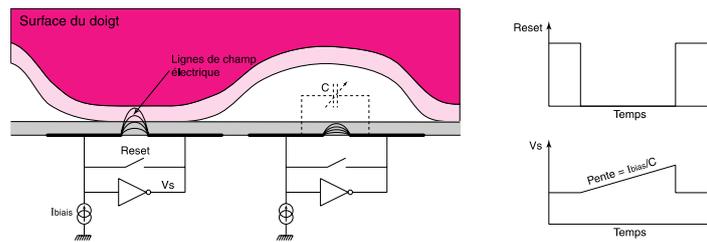


Figure 4 : Capteur capacitif utilisant des pixels à double électrode

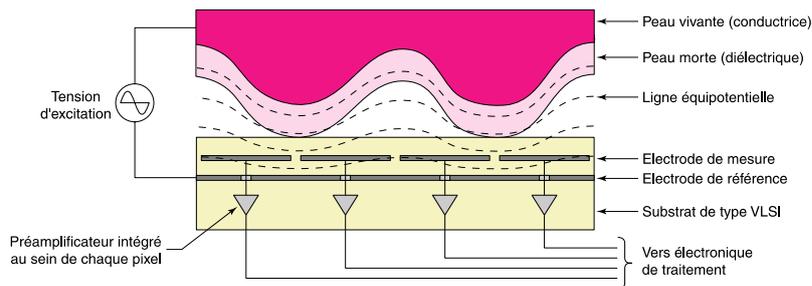


Figure 5 : Capteur capacitif utilisant des pixels comportant une unique électrode de mesure

Il existe également d'autres principes de mesure parmi lesquels la mesure thermique [15]-[16], qui exploite la chaleur de la peau. Ces capteurs, développés principalement par la société ATMEL, utilisent un matériau pyroélectrique comme élément sensible. Un matériau pyroélectrique voit sa polarisation interne changer lorsqu'un changement de température est appliqué à ce dernier. Ce capteur fonctionne naturellement en dynamique et est composé d'une matrice partielle. Lorsque le doigt est balayé à la surface du capteur, la peau en contact avec le capteur induit un transfert de chaleur dans le matériau et donc une augmentation de température. Cette variation de température produit alors un courant pyroélectrique qui est collecté par les électrodes.

Enfin des méthodes optiques [17]-[18] et mécaniques ont également été développées[19]-[20] avec succès.

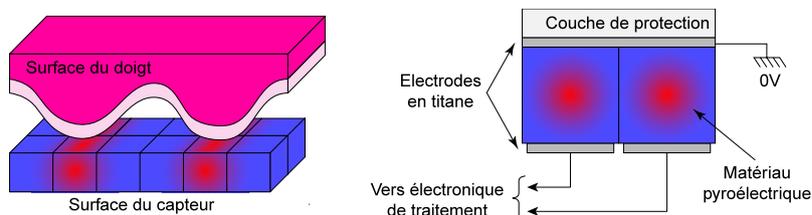


Figure 6 : Capteur thermique utilisant une couche de matériau pyroélectrique.

1.4. Capteur tactile d'empreintes digitales

Les principales caractéristiques, qui donnent à ce capteur son aspect innovant par rapport aux solutions en développement chez les industriels, sont le principe de mesure mécanique des reliefs du doigt. Ce principe de mesure est basé sur une solution inédite utilisant des micropoutres ainsi que le mode de mesure du

capteur qui n'est composé que d'une seule rangée d'éléments sensibles à la place d'une matrice de grande surface. Ce dernier point permet de construire un capteur de surface minimale et donc à bas coût. La Figure 7 montre un schéma du capteur. Il se compose d'un bloc monolithique de silicium doté d'une rangée de 1,28 cm de long comportant 256 éléments sensibles. Les micro-poutres, visibles en détail sur la Figure 8 mesurent 100 μ m de long pour 30 μ m de large et sont espacées les unes des autres de 50 μ m. Ces dimensions fournissent une résolution spatiale de 508 points par pouce ce qui permet d'avoir entre 5 et 10 points entre chaque ride d'une empreinte.

Les micropoutres sont encastrées à leur base au-dessus d'une cavité micro-usinée dans le silicium. Lorsque le doigt de l'utilisateur balaye la surface du capteur, perpendiculairement à la rangée de micro-poutres, ces dernières sont défléchies vers le bas par la pression exercée par les reliefs de la peau. Une jauge de contrainte placée à la base de chaque micro-poutre permet la mesure de la flexion de la poutre et par conséquent la mesure du relief du doigt.

Le microsystème intègre un circuit électronique permettant le balayage de la rangée de micropoutres (à une fréquence de 100 kHz), l'amplification du signal ainsi que la conversion vers un signal numérique sur 8 bits.

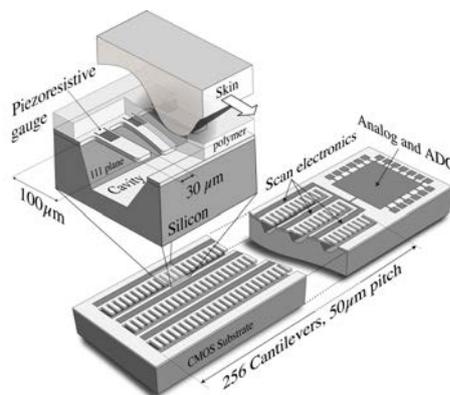


Figure 7. Schéma du capteur tactile d'empreinte digitale. La puce contient plusieurs rangées de 256 micropoutres (une seule n'étant active pendant la mesure).

La Figure 8 montre une vue au microscope d'une micropoutre suspendue, on note la présence à la base de la poutre de la jauge de contrainte piezorésistive qui permet la mesure de la déflexion de la poutre. On peut également noter la présence d'une résistance de chauffe qui, en dissipant de la chaleur, permet d'actionner la poutre en flexion par effet bilame thermique. Cette résistance a été ajoutée en complément pour introduire un système d'autotest du capteur. Une procédure spéciale permet, en utilisant ce stimulus électrothermique, de détecter la présence de défauts de fabrication tels que des poutres cassées ou insuffisamment gravées [p-76].

1.4.1. Procédé de fabrication

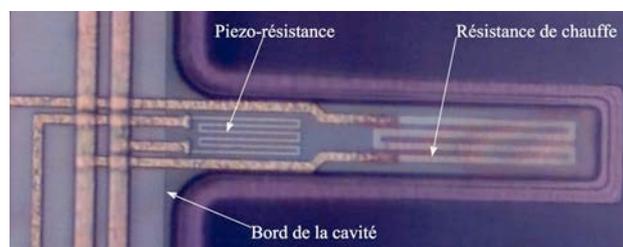


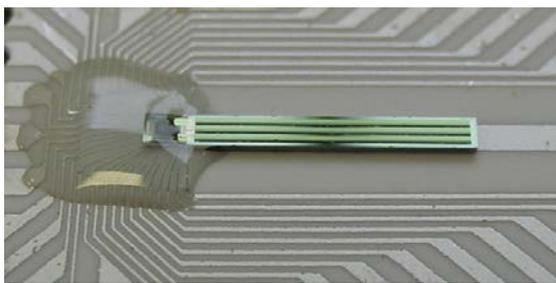
Figure 8. Image au microscope d'une micropoutre. On remarque par transparence la jauge de contrainte à la base de la poutre, située non loin de l'encastrement ainsi que la résistance de chauffe servant à l'auto-test du capteur.

Le capteur, que l'on voit en entier sur la Figure 9(a), est fabriqué à partir d'une technologie CMOS à laquelle est adjoint des étapes *post process* permettant de libérer les microstructures par micro usinage en volume. La technologie employée est la CMOS 0,6 μ m triple métal du fondeur Austriamicrosystems. Le circuit a été fabriqué par le service circuit multi projets (CMP) à Grenoble. La technique de micro usinage en volume consiste à dessiner des zones où le silicium du substrat sera à nu au terme du procédé de fabrication. En pratique cela consiste à définir une zone, au niveau du layout, qui empilera les ouvertures dans les différentes couches d'oxydes et de passivation de la technologie CMOS. Après la fabrication, le wafer est scié et nous recevons des puces nues que nous allons alors plonger dans une solution de gravure anisotrope du silicium.

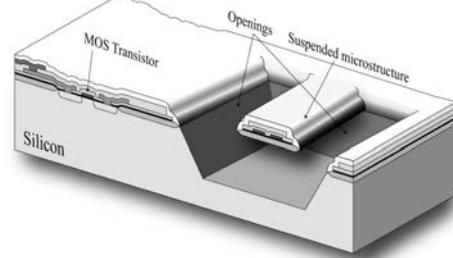
La solution, du TMAH, permet d'attaquer le silicium à travers les ouvertures précédemment définies et, grâce à son importante sélectivité chimique, de ne pas attaquer la couche de passivation et le métal des plots, apparents en surface. La gravure anisotrope du silicium permet alors d'obtenir une cavité pyramidale inverse qui est circonscrite à la plus grande ouverture mais également de suspendre des micro-poutres. L'intérêt de cette méthode, outre sa compatibilité avec le procédé CMOS, est qu'elle se pratique au niveau puce et sans étape de lithographie additionnelle.

Les poutres sont donc composées d'un sandwich des différentes couches déposées pendant le procédé CMOS. Il s'agit de la couche d'oxyde thermique d'isolation, de l'oxyde de grille, des oxydes inter-niveaux et enfin de la couche de passivation en nitrure de silicium. Les micro poutres contiennent en outre des lignes de polysilicium et d'aluminium. L'épaisseur totale étant d'environ 4 microns.

Ce procédé, dont une vue en coupe est visible sur la Figure 9(b), permet l'intégration de structures micromécaniques avec de l'électronique intégrée de manière monolithique.



(a)



(b)

Figure 9. Capteur d'empreintes digitales, (a) photo de la puce montée en chip on board (b) coupe technologique.

La Figure 10 montre des images prises au microscope électronique à balayage des micropoutres suspendues au-dessus de la cavité micro usinée. La puce est ensuite montée sur un circuit imprimé en céramique puis câblée. Les câbles sont en enfin protégés de l'arrachage par de la résine, que l'on peut observer sur la Figure 9(a).

1.4.2. Jauges de contraintes

La mesure tactile [19][20] est basée sur l'utilisation de micro poutres contenant une jauge de contrainte piezorésistive. La peau du doigt, lorsqu'elle entre contact avec les micro poutres va induire une déflexion des de celles ci vers le bas. Lorsqu'il n'y a pas de contact, les micropoutres restent horizontales dans le plan. Ce schéma de mesure fonctionne puisque les dimensions des micropoutres sont inférieures à la distance inter sillons, mais également grâce au fait que la peau, avec une élasticité donnée, ne pénètre que de façon limitée dans les cavités micro usinées. Cela limite de facto la déformation mécanique imposée aux micropoutres. La déflexion de la poutre introduit donc un champ de contraintes dans le matériau. La jauge de contrainte est composée de polysilicium qui est le matériau utilisé pour les oxydes de grille. La jauge est placée près de l'encastrement de la poutre, région de contraintes maximum. De plus, la couche de polysilicium étant située sur la partie basse de l'empilement, la jauge se trouve sous la fibre neutre et subit donc une contrainte de compression lorsque la poutre est défléchie vers la cavité. La contrainte mécanique appliquée au polysilicium va alors introduire une variation de résistivité via les coefficients de piezoresistivité transverse et longitudinale. La variation de résistivité maximale que nous avons observée est d'environ 6%, ce qui est important.

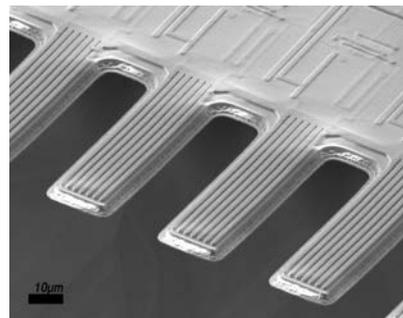
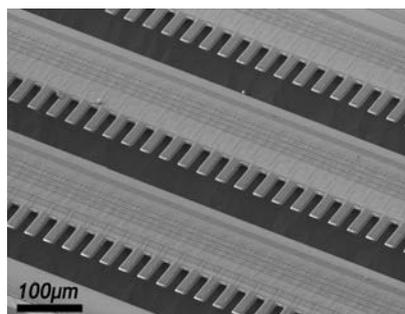


Figure 10. Image au microscope électronique des micropoutres

La table 1, ci dessous, résume les paramètres technologiques des micropoutres.

Paramètres des micropoutres	Valeur
Longueur	100 μ m
Largeur	30 μ m
Epaisseur	~4 μ m
Pas	50 μ m
Raideur hors plan (calculée)	186Nm ⁻¹
Raideur dans le plan (calculée)	10075Nm ⁻¹
Sensibilité	171 – 295 N ⁻¹
Fréquence de résonance	690kHz
Largeur de la cavité	210 μ m
Paramètres de la jauge de contrainte	Valeur
Longueur	1.2 μ m
Largeur	8x28 μ m
Résistance nominale	6.5k Ω
Dispersion de la résistance nominale	1.73%
Coefficient piezo longitudinal	-1.3 10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
Coefficient piezo transverse	7.6 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹

Table 1. Paramètres technologiques des micropoutres et des jauges de contrainte.

1.5. Electronique embarquée

Comme nous l'avons annoncé précédemment, le système est intégré de manière monolithique sur un circuit CMOS et embarque toute l'électronique nécessaire au pilotage de la puce et au conditionnement du signal. Le circuit électronique intégré à la puce comporte trois blocs :

- Le circuit de balayage des micropoutres.
- Le circuit de lecture des jauges de contraintes piezorésistives.
- La conversion analogique / numérique.

L'architecture globale du circuit ainsi que les entrées et sorties sont montrés sur la Figure 11. Mis à part certains plots de contrôle, de test, de réglage de gain et de polarisation, toutes les entrées sorties sont numériques. Le système comporte trois rangées de poutres dont une seule est utilisée pendant la mesure, il est possible de sélectionner l'une d'entre elles par un plot de sélection.

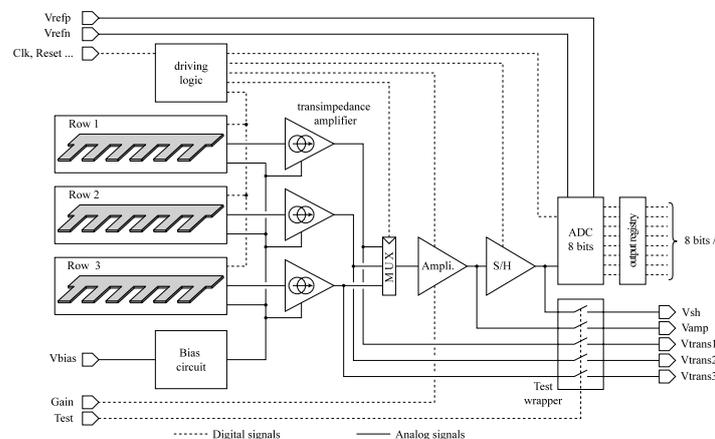


Figure 11. Architecture globale du circuit

La Figure 12 montre la séquence de mesure d'une empreinte digitale avec ce capteur. Le doigt est pressé à la surface du capteur et balayé de haut en bas. Un système de détection de la présence du doigt a été

programmé pour lancer la séquence d'enregistrement au moment précis où la pression du doigt est détectée. Au cours du déplacement du doigt, la rangée de micropoutres est balayée par l'électronique à une fréquence d'environ 10 à 100 kHz. A chaque coup d'horloge, une poutre unique est adressée, et le signal issu du pont résistif est commuté vers la section d'amplification analogique puis vers la conversion analogique / numérique. A la fin du déplacement du doigt, le système de détection de la présence stoppe l'enregistrement.

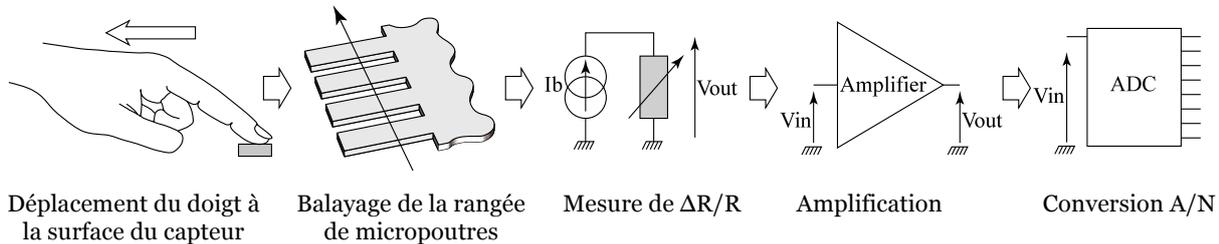


Figure 12. Séquence de mesure des empreintes digitales.

1.5.1. La chaîne analogique

Le circuit analogique d'amplification a été conçu de manière à tenir compte des défauts classiques (*offset* des amplis opérationnels) de ce type de circuits et surtout de fournir une image exempte de bruit de fond. Cet effet de bruit de fond avait été très présent sur un premier prototype à l'électronique simple et l'on avait dû recourir à une étape de calibration et de soustraction du bruit de fond pendant la mesure.

La mesure séquentielle de chaque jauge de contrainte piezorésistive est contrôlée par un registre à décalage composé de bascules D. Une fréquence d'horloge, de 20 à 200 kHz, permet de propager un front et d'activer chaque circuit de jauge, chaque pixel, un par un. Quand un pixel n'est pas sélectionné, l'électronique du pixel est alors mise hors circuit pour diminuer la consommation globale.

La chaîne analogique comporte :

- L'électronique intégrée au sein de chaque pixel qui permet de commuter le signal issu de la jauge de contrainte (variation de résistance électrique) vers la ligne de transmission en mode courant.
- L'amplificateur de transimpédance qui transforme l'information codée en variations de courant vers un signal en variations de tension. Cet élément permet de plus de polariser la ligne de transmission à un potentiel électrique constant.
- L'amplificateur différentiel à capacités commutées qui amplifie le signal suivant un gain déterminé. Cet amplificateur permet d'éliminer les éventuelles tensions de décalage en utilisant le principe du double échantillonnage corrélé.
- Et enfin, l'échantillonneur-bloqueur dont le rôle est d'échantillonner le signal présent en sortie de l'élément précédent en vue de sa numérisation.

1.5.2. Electronique du pixel

L'électronique intégrée au sein de chaque pixel permet de transformer la variation de résistance électrique induite au sein de la jauge de contraintes en variation de courant afin que l'information analogique puisse être acheminée vers les circuits d'amplification via la ligne de transmission

Le circuit de lecture des jauges de contraintes piezorésistive est une architecture à capacités commutées à double échantillonnage corrélé. Le circuit utilise deux horloges non recouvrantes ϕ_1 et ϕ_2 définissant deux phases. Chaque pixel contient, en plus de la jauge de contrainte, une résistance de référence placée sur le substrat qui n'est pas soumise aux déformations mécaniques. Placé à proximité de la jauge de contrainte, elle en subit les dispersions technologiques qui vont modifier sa résistance nominale ainsi que les variations locales de température.

Pendant la première phase ϕ_1 un miroir de courant impose un courant à la jauge. La chute de tension aux bornes de la jauge est alors imposée à la grille du transistor T4 qui crée alors le courant I_p qui est commuté vers la ligne de transmission. Au contraire, pendant la phase ϕ_2 c'est la résistance de référence qui est mesurée par cette méthode.

Le courant I_p est commuté par une porte de transmission vers la ligne de collection polarisée à une tension constante V_{pol} . Cette longue ligne (1,28 cm pour le premier pixel) mène aux blocs d'amplification situés au bout de la puce. Le signal transite sur cette ligne en mode courant ce qui le rend moins sensible aux

perturbations dues aux capacités parasites. Pendant l'autre phase, c'est le courant provenant de la résistance de référence qui est commuté sur la ligne de transmission.

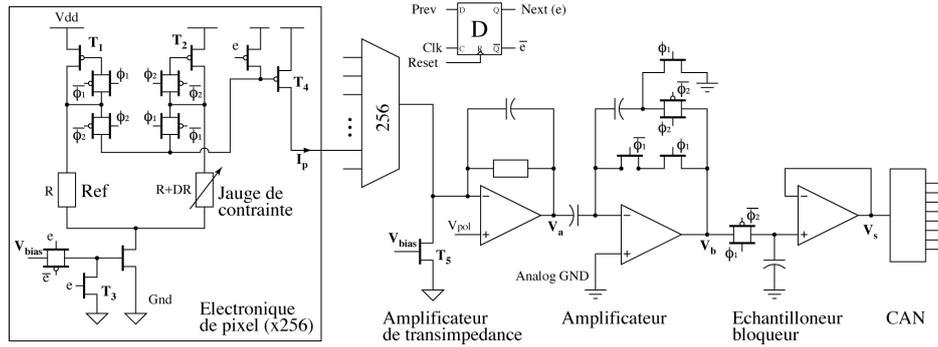


Figure 13. Schéma de l'électronique embarquée.

La fonction de l'amplificateur de transimpédance est de transformer le signal en courant fourni par la ligne de transmission en signal en tension. Notons aussi que cet amplificateur possède une fonction de transfert de type passe bas permettant de filtrer le signal issu des pixels.

Si nous considérons que l'amplificateur opérationnel utilisé présente une tension de décalage systématique en entrée V_{off1} , la tension de sortie V_a du circuit présenté ici est telle que :

$$V_a = V_{pol} - R_g \cdot H(\omega) \cdot (I_p - I_{biais}) + V_{off1} \quad \text{Equ. 1}$$

Où H est la composante fréquentielle de la fonction de transfert de l'amplificateur de transimpédance (fonction de type passe bas due à la présence de la capacité C_1 au sein de la boucle de contre-réaction) telle que:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0} = \frac{1}{1 + jR_g \cdot C_1 \cdot \omega} \quad \text{Equ. 2}$$

Dans notre cas, la résistance R_g a une valeur de 40 kΩ et la capacité C_1 est fixée à 4 pF de manière à ce que la fréquence de coupure soit égale à environ 1 Mhz. Le pré filtrage effectué ici nous permet de limiter l'impact du bruit blanc dû aux différents éléments résistifs présents dans le circuit (les jauges de contraintes par exemple).

1.5.3. L'amplificateur différentiel à capacités commutées

L'amplificateur différentiel à capacités commutées utilisé amplifie le signal émanant de l'amplificateur de transimpédance suivant un gain déterminé. Cet amplificateur de par sa nature différentielle, permet, grâce au principe du double échantillonnage corrélé, d'annuler les diverses tensions de décalage imputables aux circuits présents en amont. Il est piloté par les deux horloges non recouvrantes ϕ_1 et ϕ_2 .

Pendant la phase ϕ_1 l'expression de la charge au nœud A (Figure 13) peut s'écrire:

$$Q_A(\phi_1) = C_1 (V_{off2} - V_a(\phi_1)) + C_1 V_{off2} \quad \text{Equ. 3}$$

Ou V_{off2} est l'offset d'entrée du second ampli op. Pendant la phase ϕ_2 la charge à ce même nœud s'écrit :

$$Q_A(\phi_2) = C_1 (V_{off2} - V_a(\phi_2)) + C_2 (V_{off2} - V_s) \quad \text{Equ. 4}$$

Pour la conservation de la charge au nœud A on a : $Q_A(\phi_2) = Q_A(\phi_1)$. En utilisant les deux dernières équation on peut alors obtenir l'expression de la tension de sortie de l'amplificateur V_s pendant la phase ϕ_2 :

$$\begin{aligned} Q_A(\phi_2) &= Q_A(\phi_1) \\ \Rightarrow V_s(\phi_2) &= \frac{C_1}{C_2} [V_a(\phi_1) - V_a(\phi_2)] \end{aligned} \quad \text{Equ. 5}$$

Cette dernière expression montre que l'offset d'entrée a été annulé. Il est maintenant possible de déterminer $V_s(\phi_2)$ en fonction de la variation de résistance :

$$V_S(\phi_2) = 2 \frac{C_1}{C_2} R_G f(\Delta R)$$

Equ. 6

Cette relation montre que la tension de sortie du circuit de traitement est totalement indépendante des différents *offsets* mais également des dispersions des deux transistors T1 et T2 Utilisés pour chaque poutre.

En utilisant les tailles des différents transistors et les caractéristiques de la technologie employée (AMS 0,6µm CUP) l'expression de $V_S(\phi_2)$ devient :

$$V_S(\phi_2) = \left[R_G \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{W}{L} \right)_3 \left(\frac{W}{L} \right)_{1..2}^{-1/2} \sqrt{\mu_p C_{ox} I_b^{3/2}} \right] \Delta R$$

Equ. 7

ou C_{ox} est la capacité de la grille (par unité de surface) et μ_p la mobilité des trous pour cette technologie.

1.5.4. Conversion analogique numérique

Le signal analogique issu des blocs d'amplification est numérisé sur 8 bits de manière à fournir la valeur de la variation des jauges de contrainte sur un bus parallèle. La structure du convertisseur est une architecture à approximations successives qui est une solution classique. Pour effectuer la conversion analogique numérique, le circuit emploie un convertisseur numérique - analogique et un comparateur. Le convertisseur utilise un réseau de résistances repliées et le comparateur utilise une architecture à capacités commutées. Il peut travailler à 1 million d'échantillons par secondes avec une précision de 7,7 bits effectifs.

Les convertisseurs à approximations successives convergent vers la valeur analogique à numériser par dichotomie. Dans ce but, la valeur numérique est recherchée en faisant varier successivement les valeurs des différents bits en commençant par le bit de poids fort (le MSB pour *Most Significant Bit* à contrario du bit de poids faible nommé LSB pour *Less Significant Bit*). Ces convertisseurs nécessitent généralement autant de périodes d'horloge que de bits afin d'effectuer une conversion complète.

lignes de micropoutres Section analogique Convertisseur AN

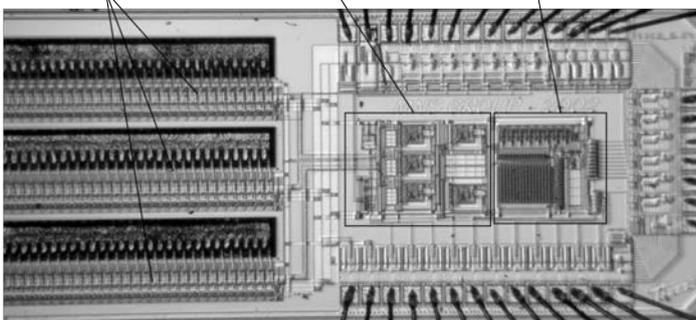


Figure 14. Image de la puce, une partie des trois lignes de micropoutres à gauche et le bloc analogique à droite

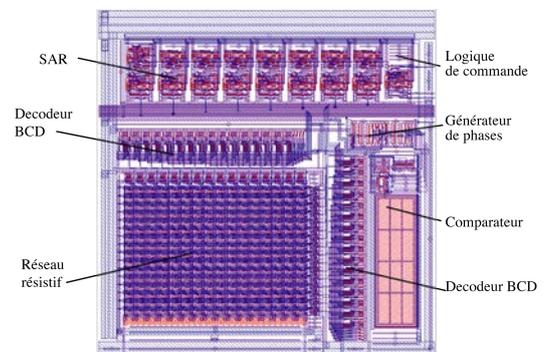


Figure 15. Layout du convertisseur analogique/numérique 8 bits réalisé en technologie AMS 0,6 µm.

La Figure 15 montre le layout du convertisseur analogique/numérique réalisé en technologie AMS 0,6 µm. La surface occupée sur silicium par ce composant est de l'ordre d'un quart de millimètre carré puisque ses dimensions sont de 496x512 µm². Il est important de noter que seuls les deux premiers niveaux métalliques de la technologie ont été employés. De cette manière, ce convertisseur pourra être réutilisé au sein d'autres systèmes réalisés en technologies CMOS 0,6 µm issus du même fondeur qui ne possèdent pas de troisième niveau métallique.

1.6. Acquisition

La puce est contrôlée par une carte de développement APEX de la société ALTERA qui exécute le programme d'acquisition. Cette carte embarque un processeur NIOS 32 bits sur un circuit FPGA et également 256 Ko de mémoire. La carte est paramétrée par un fichier de configuration et elle communique avec le capteur d'empreintes par le biais de quatre signaux numériques :

- RESET qui initialise le circuit.
- CLOCK est l'horloge du registre à décalage, sa fréquence définit la vitesse de balayage de la rangée de micropoutre et sert également à produire les phases des circuits à capacités commutées.
- LAST indique la fin de balayage de la rangée.
- ATA correspond à la valeur de l'octet de la micropoutre mesurée.

La carte est liée à un ordinateur de manière à charger le pilote de la carte et à récupérer les images. Le système est représenté sur la Figure 16.

La carte sur laquelle est monté le capteur d'empreintes comporte également quelques potentiomètres de réglage des gains des amplificateurs et de polarisation mais également des sélecteurs permettant de choisir une des trois lignes de micropoutres et enfin un sélecteur permettant de mettre le capteur en mode auto-test. Quelques sorties analogiques nous ont permis de surveiller les tensions au sortir des différentes sections du bloc analogique.

Comme le capteur fonctionne de manière continue, la sortie est composée d'une série de 256 octets représentant le balayage d'une ligne de micropoutres. Cette série forme ainsi une image rectangulaire avec une hauteur infinie. Un programme spécifique a été codé de manière à détecter le début et la fin du contact du doigt à la surface du capteur. En calculant la somme de chaque ligne et en la comparant à un seuil précédemment défini, il est possible de déterminer la présence du doigt à la surface du capteur et donc de décider d'enregistrer l'image, comme cela est illustré sur la Figure 16.

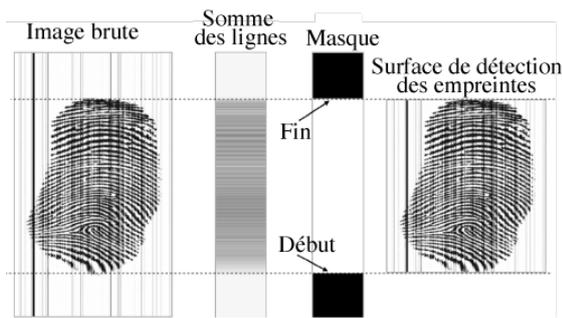


Figure 16. Illustration du mécanisme de détection de la présence du doigt



Figure 17. Image brute provenant du capteur avec détection de présence du doigt

Une image brute provenant du capteur est représentée sur les Figure 17 et 19. On remarque en premier lieu l'important contraste entre le fond, pratiquement blanc, et les sillons sombres. On peut noter également la présence de lignes verticales noires qui correspondent à des micropoutres cassées. La fracture des poutres apparaît surtout à la fabrication pendant la gravure du silicium et relativement peu pendant l'utilisation. Autre caractéristique remarquable, la non-uniformité de la vitesse de déplacement du doigt à la surface provoque des zones plus ou moins étirées qui auront plus tard une importance fondamentale pour les phases de vérification des empreintes. Cette image est caractéristique d'un capteur à ligne unique. On ne retrouve pas ces distorsions dans les capteurs à matrice partielle. On pourrait alors imaginer un système qui mesure la vitesse de balayage et qui asservirait la vitesse de balayage en fonction. Nous avons préféré une solution purement traitement du signal qui sera décrit dans les sections suivantes.

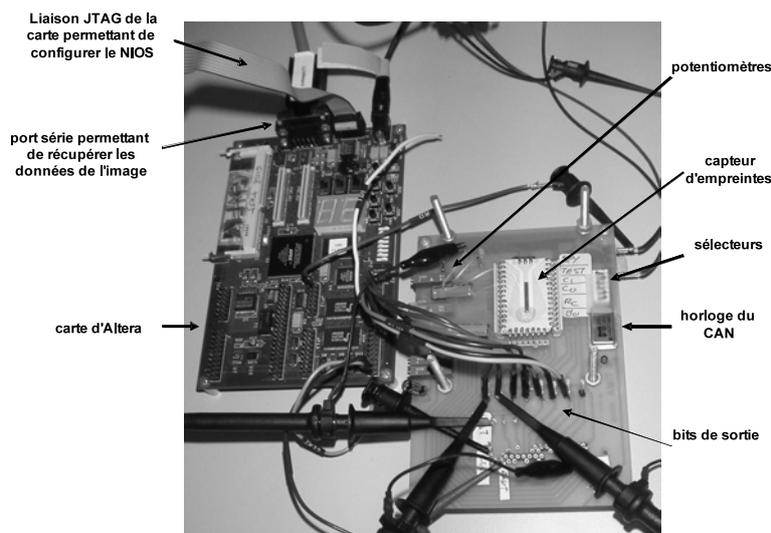


Figure 18. Mesure des empreintes digitales, photo de la carte de pilotage du capteur (a) et image brute d'une empreinte digitale provenant du capteur (b)

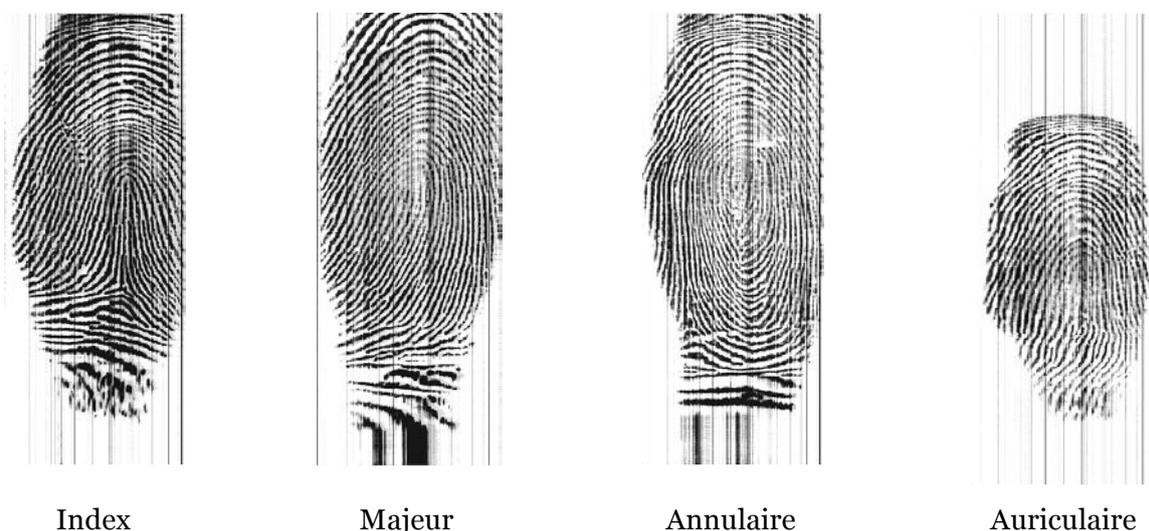


Figure 19. Images brut provenant du capteur d'empreintes digitales des doigts de l'auteur, sans détection de présence.

1.7. Traitement de l'image

La seconde partie du projet capteur d'empreintes digitales a concerné le développement d'algorithmes de reconnaissance spécifiques au capteur. Le but étant d'obtenir un capteur autonome capable de mesurer et de reconnaître un utilisateur à partir d'une signature enregistrée. Le programme a été développé de manière à être opéré par un microprocesseur du type de ceux qui se trouvent sur les objets portables (ARM 7 par exemple) avec des contraintes fortes en termes de mémoire et de puissance de calcul.

Mais avant de pouvoir extraire et vérifier une signature à partir d'une image de l'empreinte, il faut procéder à un ensemble d'étapes de traitement de l'image. La chaîne de traitement comporte ainsi les opérations suivantes :

- Interface de commande du capteur et récupération des données
- Traitement de l'image : formatage, masquage (suppression des zones inutiles ou trop bruitées), suppression de la distorsion verticale (typique de notre capteur) et filtrage.
- Squelettisation et binarisation (dans le cas de la méthode classique).
- Extraction des minuties de terminaisons et de bifurcations.

- Composition de la signature : enregistrement des positions relatives, du type (terminaison ou bifurcation) et de la direction de chaque minutie.
- Comparaison de la signature à la référence en prenant en compte un taux d'erreur.

Les images provenant directement du capteur ne sont pas de qualité suffisante pour être traitées directement. La première étape de la séquence de vérification consiste donc en l'amélioration de la qualité des images. Pour ce faire nous allons exploiter certaines spécificités des empreintes digitales et travailler dans l'espace des fréquences spatiales.

1.7.1. Segmentation

La segmentation permet d'isoler les parties de l'image contenant l'information du reste de l'image ne contenant pas d'informations utiles. Grâce à l'électronique, le bruit de fond est retranché et le fond de l'image est blanc, les empreintes étant très contrastées. L'image est tout d'abord découpée en blocs non recouvrants de 16x16 pixels et la moyenne des niveaux de chaque bloc est calculée. En définissant un niveau de seuil (128/256), il est ensuite aisé de séparer la partie utile de l'image, comme cela est montré sur la Figure 20. Une autre étape permet d'affiner le résultat : les blocs des bords ainsi que ceux ayant trois mauvais voisins sont également écartés. Les opérations suivantes bénéficient ainsi de ce nettoyage, les calculs n'étant pas effectués sur des parties inutiles.

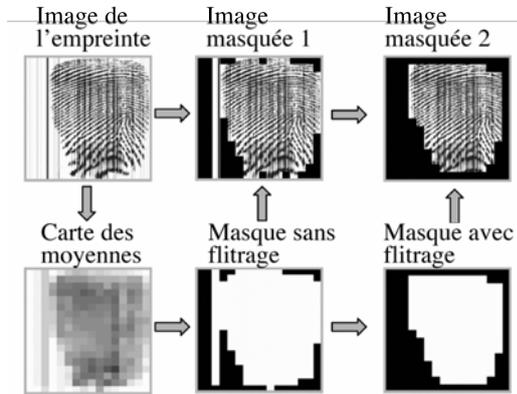


Figure 20. Principe de la segmentation.

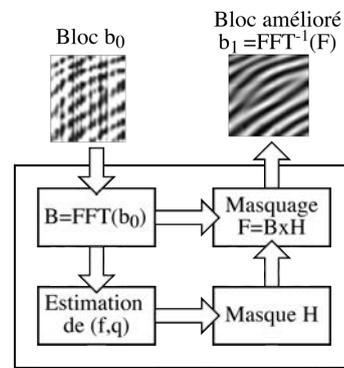


Figure 21. Principe du filtrage par bloc

1.7.2. Amélioration de l'image

Les empreintes digitales ont des particularités spatiales : il existe localement une direction privilégiée des sillons ainsi qu'une distance moyenne entre sillons. Ce sont ces caractères qui vont être utilisés pour l'amélioration de l'image de l'empreinte. Le principe (Figure 21) est de travailler sur des blocs de quelques pixels de large pour lesquels il existe une direction globale. La transformée de Fourier est calculée pour chaque bloc (par transformée de Fourier rapide) et la direction et la fréquence des sillons sont extraits. Chaque bloc est ensuite filtré avec un filtre spécifique (filtre de Log-Gabor) puis la transformée de Fourier inverse permet de produire l'image du bloc amélioré. Les blocs font 32x32 pixels et se recouvrent pour éviter les effets de bord.

Le filtre Log-Gabor[22][23] est composé du produit d'une composante radiale et d'une composante angulaire :

$$H(f, \theta) = H_r(f) \times H_\theta(\theta) \tag{Equ. 8}$$

La composante radiale est une gaussienne logarithmique :

$$H_r(f) = \exp \left\{ - \frac{[\ln(f/f_0)]^2}{2[\ln(\sigma_r/f_0)]^2} \right\} \tag{Equ. 9}$$

σ est la bande passante du filtre et f_0 une fréquence d'ajustage.

La fonction angulaire est, elle, définie par :

$$H_{\theta}(\theta) = \exp\left\{-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_{\theta}^2}\right\} \quad \text{Equ. 10}$$

ou σ_{θ} est la bande passante angulaire et θ_0 la direction du filtre qui est différente pour chaque blocs. Le filtre est représenté dans l'espace des fréquences sur la Figure 22.



Figure 22. Représentation dans l'espace des fréquences du filtre de Log-Gabor

Le bloc amélioré est visible sur la Figure 21. L'image finale est alors assemblée par recouvrement des blocs, un exemple est visible sur la Figure 23. Avec maintenant une image de meilleur qualité et filtrée du bruit de fond, il est possible de procéder à l'extraction.

1.7.3. Extraction

Comme annoncé précédemment la phase d'extraction va tenter de déterminer la position, le type et la direction de chaque minutie de l'empreinte pour former la signature. Pour ce faire, nous avons utilisé une technique classique [24] qui se base sur une représentation affinée de l'image filtrée.

1.7.4. Binarisation et affinage

Comme le filtre de Log-Gabor a une composante continue nulle, l'étape de binarisation est simple et consiste à comparer chaque pixel à un niveau seuil et ensuite d'enregistrer le pixel sur un bit. L'étape d'affinage consiste à opérer une suite d'érosions morphologiques pour obtenir des lignes d'un pixel de large. Nous avons utilisé l'algorithme de Rosenfled [25]. Au final nous obtenons un squelette de l'empreinte qui est visible sur la Figure 23.

1.7.5. Composition du fichier signature

Pour extraire les minuties, nous avons utilisé la technique du *Crossing Number* (CN).

$$CN(P) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 |P_i - P_{i-1}| \quad \text{with } P_8 = P_0 \text{ and } P_i \in \{0,1\} \quad \text{Equ. 11}$$

Pour chaque pixel, nous calculons la somme des valeurs des pixels voisins, si ce nombre est égal a 1 nous avons à faire une terminaison, s'il est égal à 3 c'est une bifurcation, comme illustré sur la Figure 24. Dans tous les autres cas, il ne se passe rien et le pixel suivant est analysé. Les pixels correspondant alors aux minuties sont enregistrés avec leur position dans l'image.

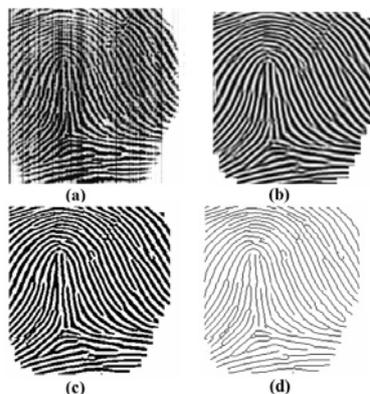


Figure 23. Illustration des différentes étapes de préparation de l'image de l'empreinte. (a) image brute provenant du capteur, (b) image filtrée, (c) image binarisée et enfin (d) image affinée.

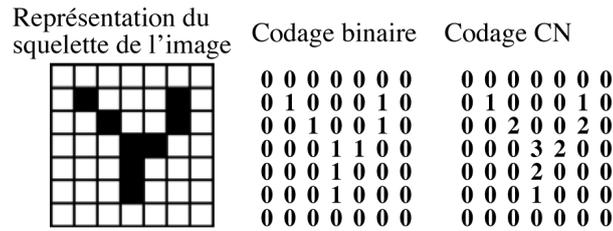


Figure 24. Représentation de la méthode du CrossingNumber.

Cette technique fonctionne bien, mais produit cependant nombre de fausses minuties qu'il faut alors nettoyer. Nous avons alors établi des règles empiriques qui permettent d'effacer les fausses minuties :

- Les minuties à la frontière entre l'empreinte et le fond sont effacées.
- Les minuties qui se trouvent sur le même sillon et dont la distance est inférieure à un seuil sont fusionnées.

Il existe d'autres techniques de nettoyage [26], mais nous nous sommes contentés de celle-ci afin de ne pas alourdir le temps de calcul. Pour chaque minutie valide nous enregistrons alors :

- Le type (bifurcation ou terminaison) : 1 bit
- Les coordonnées dans l'image : 4 bits
- La direction locale associée au bloc (fournie par la carte des directions) : 4 bits

Nous obtenons à la fin un fichier de signature qui est propre à l'utilisateur et qui pèse moins de 1 Kbit. C'est ce fichier qui est stocké et qui sert pour la phase de comparaison. L'image pesant 64 Kbit est effacée, libérant de la mémoire. Le processus d'extraction est illustré sur la Figure 25.

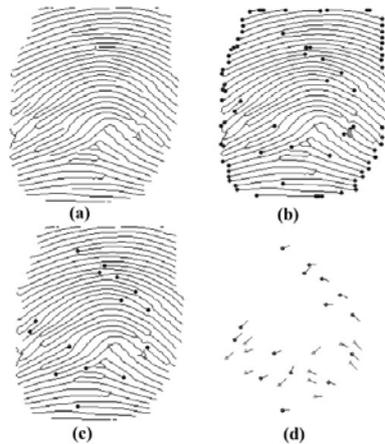


Figure 25. Extraction des minuties : (a) image affinée, (b) ensemble des minuties détectées par la méthode CN, (c) ensemble des minuties validées et enfin (d) signature.

1.8. Vérification

Notre système biométrique est basé sur la vérification de l'identité de l'utilisateur, c'est-à-dire la comparaison de la signature de l'empreinte mesurée avec celle enregistrée en mémoire. Ces deux signatures seront toujours légèrement différentes compte tenu des déviations pendant l'enregistrement (vitesse de balayage du doigt, pression, poussières, humidité de la peau, plaies, etc.). Un score de ressemblance est alors calculé entre les deux signatures qui permettra de statuer sur l'identité de l'utilisateur.

L'algorithme utilisé essaye de trouver une transformation affine qui aligne la signature mesurée S_p à la signature enregistrée S_q .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = k \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & k^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Equ. 12}$$

k , α et $(\Delta x, \Delta y)$ étant les facteurs d'échelle, les paramètres de rotation et de translation. Dans notre cas précis de capteur à balayage, l'image de l'empreinte ne subit pas de rotation, le paramètre α est donc nul. Par

contre la vitesse de balayage, nous l'avons vu n'est pas constante pendant l'acquisition, le facteur k n'est donc pas linéaire. Nous allons donc chercher une transformation telle que :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ f(y) \\ g(\theta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Equ. 13}$$

Ou f et g sont des fonctions non linéaires qui représentent la variation de vitesse de déplacement du doigt pendant l'acquisition. Mais avant de procéder à la comparaison des deux empreintes, c'est à dire trouver un écart minimum entre les deux signatures, il faut régler le problème de la distorsion de non uniformité de la vitesse qui affecte les images et leur signature associées.

1.8.1. Modélisation de la distorsion

Nous avons vu précédemment que la non uniformité de la vitesse de déplacement du doigt à la surface du capteur entraîne une distorsion se traduisant par des zones plus ou moins étirées dans le sens vertical de l'image. Nous allons donc chercher à calculer un facteur de correction k qui modifierait la hauteur d'une section horizontale de l'image. Pour faire cela nous sommes partis des données de l'image déjà en notre possession, c'est-à-dire qui ont déjà été calculées pendant le processus, à savoir l'écartement moyen entre stries et l'orientation locale.

Si l'on considère un bloc de l'image, nous connaissons déjà son orientation locale θ . Nous la retrouvons dans la carte des orientations. En prenant l'hypothèse que la largeur de strie r est constante sur l'empreinte, il est possible de trouver un facteur qui modifie l'orientation locale r' pour ramener la distance entre stries à la valeur moyenne r .

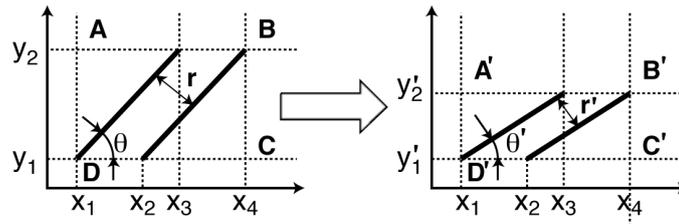


Figure 26. Modélisation de la distorsion locale d'un bloc.

Le facteur k peut alors s'écrire :

$$k = \frac{r}{r'} \times \frac{1}{|\cos \theta|} \times \sqrt{1 - \frac{r'^2}{r^2} \sin^2 \theta} \quad \text{Equ. 14}$$

Pour chaque bloc de l'image l'expression devient :

$$k(x, y) = \frac{r(x, y)}{r_{global}} \cdot \frac{1}{|\cos \theta(x, y)|} \sqrt{1 - \frac{r_{global}^2}{r(x, y)^2} \sin^2 \theta(x, y)} \quad \text{Equ. 15}$$

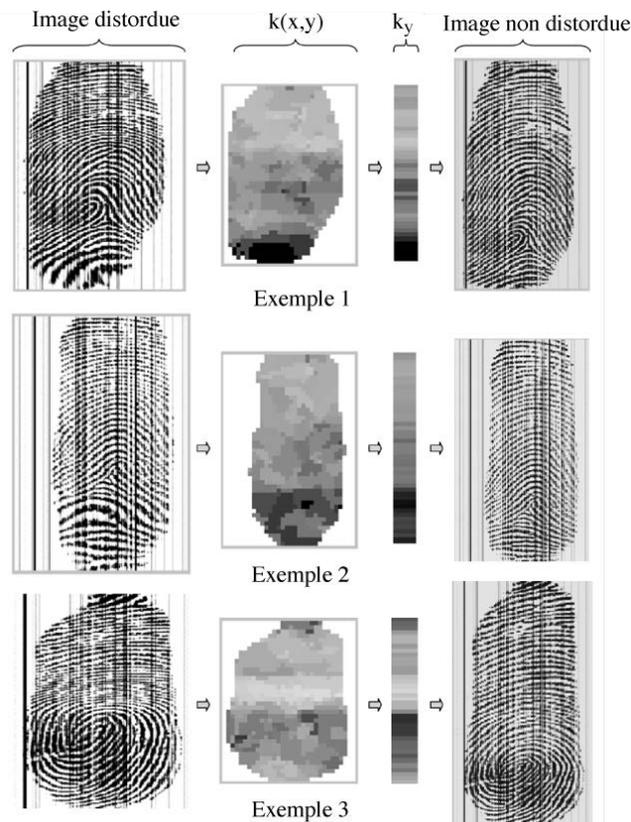


Figure 27. Correction de la distorsion due au balayage non uniforme, trois exemples de correction. Image d'origine à gauche, facteur de correction k au centre et image corrigée à droite.

1.9. Performances

La vérification est l'étape finale, elle consiste à comparer la signature préenregistrée à celle mesurée. Une série d'étapes d'appariement entre les minuties est effectuée et un degré de similitude entre les deux signatures est calculé. Cette valeur servira à authentifier l'empreinte en fonction d'une tolérance prédéterminée. Une campagne de tests a été effectuée à partir d'une banque d'empreintes synthétiques et d'empreintes réelles mesurées avec le capteur (une partie des thésards du laboratoire). Ces tests ont permis de choisir la méthode donnant les meilleurs résultats tout en nécessitant les plus faibles ressources de calcul et de mémoire. Au final, le meilleur taux d'erreur de la chaîne d'authentification (mesure + extraction et reconnaissance) est actuellement autour des 15%. Ce taux peu satisfaisant (les meilleurs sont $<1\%$) provient de la mauvaise qualité des images du capteur.

1.10. Conclusions

Ce travail autour du développement d'un capteur d'empreintes digitales intégré a été porté par trois personnes : Fabien Parrain, Nicolas Galy et moi même sur une période de cinq ans. Nous avons réussi à fabriquer un démonstrateur fonctionnel qui était capable d'effectuer une mesure des empreintes digitales, en mode balayage et à en extraire une signature. A partir du moment où nous avons terminé ce travail des grands groupes industriels ont validés d'autres solutions techniques, STMicroelectronics en particulier a sorti une solution hybrides à matrice partielle fabriquée par une technique proche des technologies PCB avec report des électrodes à travers le support et câblage (par flip chip) à la surface d'un microcontrôleur ST20. La puissance de calcul embarquée permettait d'intégrer de puissantes fonctions de traitement de l'image pour extraire une signature des empreintes. La matrice d'éléments sensibles, des électrodes pour un principe de mesure capacitif, était résistante à l'abrasion et fiables tout en permettant une surface de contact suffisante et à faible coût. Certains ordinateurs portables en sont maintenant équipés. Cependant, ce travail purement universitaire a été mené à bout et a démontré l'intérêt de la méthode de mesure mécanique des empreintes digitales. Ce travail a été présenté à l'oral à la conférence TRANSDUCERS en 2003 et a reçu un bon accueil.

2. Alimentation de capteurs autonomes par récupération des vibrations de l'environnement (2002-2005)

2.1. Contexte

Cette thématique a été lancée en 2002 quand je suis entré au CNRS. A cette époque le Pr. Skandar BASROUR a été nommé au laboratoire TIMA et nous avons tous les deux lancé l'activité et cherché des fonds pour la soutenir. Nous avons donc répondu aux appels d'offre du 6ème Projet Cadre de Recherche et Développement de la commission Européenne, cela s'est traduit par la mise en place d'un consortium de partenaires européens autour d'un projet STREP nommé VIBES. Ce projet dont nous avons été l'instigateur a été dirigé au début par PHILIPS research labs à Eindhoven au Pays Bas puis par l'université de Southampton après que PHILIPS se soit désengagé partiellement du projet pour cause de restructuration. Les fonds alloués au laboratoire nous ont permis d'engager deux étudiants en thèse, sur la même période, qui ont travaillé en parallèle sur deux aspects du projet.

Au niveau du laboratoire, un stage de DEA s'est porté en 2001 sur la conception d'un microgénérateur électromagnétique. La conception de ce dernier s'est faite en collaboration avec le groupe microsystèmes du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble grâce à une coopération financée par un bonus qualité recherche de l'INPG. Les travaux ont permis d'envisager quelques solutions techniques. La Figure 14 montre un schéma d'un microgénérateur électromagnétique.

En 2003, deux stages de Master se sont déroulés sur les aspects de conception du microgénérateur piézo et sur les modules de redressement et de gestion. J'ai partagé l'encadrement de ces étudiants avec le professeur Skandar BASROUR qui est lui-même très impliqué dans ce projet. Deux thèses ont débuté en 2003 sur le sujet l'une sur les micro générateurs, l'autre sur les interfaces électroniques et le module de gestion de la charge.

2.2. Les réseaux de microsystèmes autonomes sans fils : Introduction

2.2.1. Réseaux

Les réseaux de microsystèmes autonomes sans fils[28] sont apparus il y a quelques années grâce aux progrès de différentes technologies tels que les capteurs MEMS, les microbatteries et les systèmes de radio communication à faible puissance. Le principe est de déployer un ensemble de microsystèmes dans un espace réduit, limité typiquement par la portée du système de radio communication à savoir quelques dizaines de mètres. Cet ensemble de microsystèmes formera donc un réseau par lequel transiteront les mesures effectuées par ces derniers vers un point de collecte unique, ce qui permet d'établir in fine une carte des grandeurs mesurées dans l'espace considéré. Chaque nœud permet à la fois de fournir ses propres mesures mais également de convoier celles des autres nœuds. La localisation de chaque nœud étant défini par une mesurande si les nœuds en ont la capacité (par l'emport d'une puce gps par exemple) ou défini au départ dans le cas d'un réseau fixe. L'organisation en réseau offre plusieurs avantages : La fiabilité avec un niveau de redondance dans le réseau, une certaine facilité pour le déploiement et l'extension du réseau et enfin au niveau énergétique la communication de proche à proche qui permet de limiter la puissance nécessaire à la couverture radio.

Les réseaux de capteurs autonomes sont une idée qui a pris forme à partir des premiers travaux sur le sujet qui étaient financés par la DARPA aux états unis, donc pour des applications militaires dans un premier temps mais qui ont rapidement trouvé usage dans différents domaines civils comme l'urbanisme, la domotique ou la surveillance.

Le développement de réseaux de capteurs a fait l'objet d'intenses efforts de recherche dans de nombreux domaines et a été supporté par de nombreuses initiatives pour promouvoir le concept d'*ambient intelligence*. De nombreux travaux ont porté sur les architectures matérielles avec par exemple l'apparition de standards de systèmes de communication radio (le standard Zigbee par exemple) mais également au niveau logiciel avec le système Tiny OS d'Intel. La consommation énergétique des nœuds et les protocoles d'échange à basse

consommation ont également été largement explorés. La Figure 28 montre le schéma d'un réseau de capteur et des exemples de nœuds microsystèmes.



Figure 28. Exemple d'organisation en réseau et de nœuds de ce réseau. Arduino Xbee et Micadot.

Un bon exemple de développement de réseau est à regarder dans le travail effectué par le Laboratoire des ponts et chaussées [27] sur le développement d'un réseau de capteurs surveillant les montants de ponts suspendus. Ce travail met en avant les problèmes de synchronisation des nœuds qui est un aspect très peu abordé dans les autres développements. Dans ce dernier cas cependant, l'encombrement n'est pas un problème majeur et les nœuds développés dans ce projet sont d'un encombrement important.

2.2.2. Nœuds

Les nœuds du réseau (ou *nodes*, *motes* en anglais) sont le cœur du système et ils doivent embarquer les fonctions suivantes :

- Mesure : de grandeurs physiques avec des capteurs MEMS (accéléros, gyros, thermomètres, ...)
- Émission réception radio fréquence (ou optique en champ libre, plus rare).
- Localisation et synchronisation (GPS et horloges)
- Enregistrement et traitement des données (microcontrôleur, mémoires)
- Ressource énergétique : génération, stockage, évaluation et gestion.

De nombreux dispositifs, maillons d'un réseau sans fil ont été développés, que ce soit des des dispositifs de grandes dimensions ou des systèmes miniaturisés tels ceux des projets Smart Dust, SAND ou MICAdot. C'est fréquemment l'application finale et ses contraintes qui fixent le cahier des charges au niveau encombrement et donc le choix des solutions matérielles pour les nœuds. Cependant l'aspect alimentation a rarement été l'objet de ces recherches et les solutions à base de piles ou d'accumulateur est très fréquemment présenté.

2.3. Projet VIBES

Dans notre projet nous avons décidé de développer un système de faible encombrement et de faible puissance qui embarque, en outre, un module de récupération et de stockage de l'énergie. La collecte de l'énergie environnante par des microgénérateurs permet en théorie de produire des réseaux de capteurs ne nécessitant aucune maintenance et avec une grande durée d'utilisation.

Le consortium du projet VIBES se composait de :

- PHILIPS research, Eindhoven, The Netherlands
- PHILIPS research, Aachen, Deutschland
- PHILIPS digital systems lab, Leuven, Belgium
- TIMA laboratory, Grenoble, France
- LMPO, Besançon, France (devenu FEMTO ST depuis)
- NMRC, Cork, Ireland (devenu Tyndall Institute depuis))
- University of Southampton, UK
- MEMSCAP, Grenoble, France
- METRAVIB RDS, Lyon, France (devenu 01dB METRAVIB)

Le but du projet était d'aboutir à l'élaboration d'un microsystème autonome. Par autonome, nous entendons autonome en énergie et en câblage. Le microsystème devait aussi être capable de communiquer avec ses proches voisins de manière à transmettre les informations de ses mesures par onde radio. Le projet avait pour but de produire un démonstrateur à partir d'éléments disponibles sur étagère, notamment pour

les capteurs, le système de radio communication et les microbatteries et de développer spécifiquement les parties microcontrôleur, et surtout le micro générateur d'énergie et le circuit de gestion de l'énergie. Nous allons donc revenir un peu sur les réseaux de microsysteme autonome en introduction à nos travaux sur les microgénérateurs.

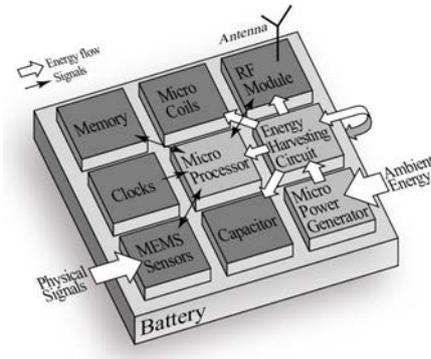


Figure 29. Schéma de bloc du microsysteme autonome en développement. Les modules en gris foncés sont des éléments standard, ceux qui sont en gris clair sont éléments spécifiques développés dans le cadre du projet

La Figure 28 montre l'architecture du systeme qui a été défini comme cahier des charges dans le projet. Il s'agit d'un microsysteme de taille centimétrique centré autour d'un microprocesseur basse consommation (fourni par Phillips) et de différents modules permettant la gestion des informations mesurées par des capteurs MEMS (accéléromètres) et d'un systeme de radio communication standard. La particularité du systeme est la gestion des ressources énergétiques par l'emploi d'une microgénérateur fournissant l'énergie au systeme via des éléments de stockage comme une microbatterie en couche mince (Li-Ion fourni par le CEA Liten) et des condensateurs. Nous avons donc travaillé au développement du microgénérateur mais également au développement de l'unité de gestion de l'énergie (*energy harvesting circuit*).

Le principal objectif du projet a été le développement de microgénérateurs se basant sur les principes de transduction électromagnétique et piézoélectrique et en utilisant les technologies de microfabrication. S'ajoute à cela un volet sur la conversion des signaux fournis par les générateurs en signal utile pour fournir de l'énergie au systeme ou aux unités de stockage. Enfin un démonstrateur final d'un microsysteme autonome sera construit en utilisant des modules développés par les différents partenaires.

Le systeme dans son ensemble comporte les blocs suivants:

- Un micro processeur ultra basse consommation qui est le cœur du systeme. Un travail commun a été entrepris avec le groupe CIS du laboratoire TIMA pour utiliser un microcontrôleur asynchrone. Les nombreux avantages sont détaillés dans [p-57] .
- Un micro générateur transformant l'énergie disponible dans l'environnement (vibrations, mouvement, lumière, différence de température, ..) pour alimenter le systeme.
- Un accumulateur pour stocker sur le long terme l'énergie fournie par le générateur.
- Un circuit de gestion de l'énergie, qui a pour but de mettre en forme le courant provenant du générateur (circuit redresseur et élévateur) et d'alimenter, via l'accumulateur, les sous blocs du systeme. Le générateur fournissant un signal de très faible potentiel (<100mV), il est impossible d'utiliser des diodes de redressement et des montages conventionnels. Par conséquent nous sommes en train de développer un circuit actif permettant d'optimiser le transfert d'énergie entre le générateur et l'accumulateur.
- Enfin différents blocs, comme le module de communication radiofréquence, les blocs mémoires, les passifs et les capteurs proviendront d'éléments standard et ne seront pas développés spécifiquement.

Le microsysteme au final sera autonome en énergie lorsqu'il sera placé dans un environnement soumis à un champ vibratoire suffisant. C'est le cas, on l'a vu d'un châssis d'automobile, ou d'un bâti de machine outils. Le systeme aura un volume inférieur à 100mm³. Une fois la plateforme développée, elle servira à de nombreuses expériences de réseaux de capteurs communicants. Ce sujet faisant actuellement l'objet d'une recherche intense au niveau international.

2.4. Alimentation des microsystèmes autonomes

L'idée de ce projet est donc de développer un module permettant d'alimenter un nœud autonome à partir de l'énergie présente dans son environnement. Ce concept est devenu envisageable avec la diminution importante de la consommation des microprocesseurs, des capteurs MEMS mais également des transmetteurs RF. Reste à trouver dans la nature une source d'énergie pouvant être facilement transformée en électricité tout en garantissant une densité de puissance et une disponibilité temporelle suffisante pour alimenter un de ces nœuds.

2.4.1. Energie environnante

Selon l'endroit ou le réseau de microsystèmes doit être déployé, il existe différents types d'énergie environnante exploitable[29]. Il est évident que l'on n'aura pas le même environnement si les capteurs se trouvent attachés à une structure métallique ou insérés dans un bâtiment. C'est la localisation des nœuds et la présence des différentes sources d'énergie disponible qui dictera le choix final. Une excellente revue de ces sources est disponible dans le manuscrit de thèse de G.Despesse, dont la thèse a été co-encadrée aux laboratoires TIMA et LETI en 2005 [37]. La Figure 30, tirée des travaux de Shad Roundy [38] de l'université Nationale d'Australie et fréquemment utilisée dans la communauté, montre la puissance disponible dans le temps de plusieurs types de batteries comparé aux sources photovoltaïques et de vibrations. Ce graphe nous montre que le choix d'un générateur récoltant l'énergie solaire ou de vibration n'est pas forcément évidente pour les applications ne nécessitant pas une durée de vie sans entretien importante.

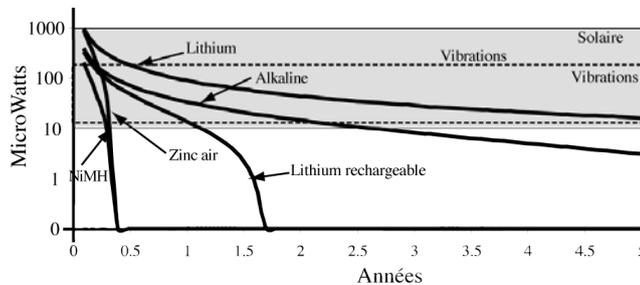


Figure 30. Puissance récupérable en fonction du temps pour différentes sources d'énergie environnante et technologies de batteries.

La lumière, le rayonnement

L'énergie environnante la plus évidente à exploiter est la lumière. Le principe de conversion photovoltaïque a été développé depuis longtemps grâce aux transitions directes photons-électrons dans les semi-conducteurs comme le silicium ou l'arséniure de gallium. Si aujourd'hui ce sont des problèmes de coût pour de panneaux de grande surface qui limitent son emploi massif, il n'en va pas de même pour des dispositifs de petite taille nécessitant de faibles puissances. Les calculatrices et les montres fonctionnant grâce à un système photovoltaïque sont un bel exemple exploité depuis plusieurs décennies. Il reste néanmoins que le solaire n'est pas forcément accessible partout ni tout le temps; notamment pour des capteurs enfouis ou dispersés dans des environnements clos.

La chaleur

La chaleur est potentiellement une source importante d'énergie. Nombre d'objets nous entourant dégagent d'importantes quantités de chaleur, à commencer par l'ordinateur sur lequel je tape ce manuscrit en ce moment. Les moteurs à explosion distillent entre 70 et 80 % de l'énergie du carburant en chaleur et le soleil fait monter la température de tout ce qui s'y trouve exposé, pour peu qu'il soit un peu absorbant. Il reste néanmoins que la nature a des principes et nous devons nous rappeler notamment du deuxième principe de la thermodynamique qui stipule que

« Un système en contact avec une seule source ne peut, au cours d'un cycle, que recevoir du travail et fournir de la chaleur. » — William Thomson, 1852

On ne peut donc récupérer de l'énergie qu'à travers deux sources de températures. Avec les températures que l'on trouve dans des objets de la vie courante et compte tenu des encombrements impartis (quelques cm³) il n'est pas question ici de machines thermodynamiques mais plutôt de thermoélectricité.

La thermoélectricité est la manifestation des effets Seebeck, Peltier et Thomson. Le premier, l'effet Seebeck, est à l'œuvre dans les thermocouples et permet lorsque l'on place deux fils métalliques de

coefficients Seebeck différents et joints par une jonction métallurgique dans un gradient de température, de générer une tension proportionnelle à la différence des coefficients Seebeck et à la valeur du gradient de température. Bien que les performances de meilleurs matériaux aient peu progressés ces cinquante dernières années, il reste théoriquement possible de générer un courant électrique avec l'effet Seebeck. Cependant ces systèmes fonctionnent correctement avec de fortes différences de température. Certains travaux ont quand même démontré la faisabilité d'un micro générateur thermoélectrique avec des thermocouples en Poly Si/Ge et produisant jusqu'à $1\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ pour 10°C de différence de température [37]

Les vibrations

Les vibrations subies par le microsysteme lorsqu'il est fixé sur une structure vibrante peuvent être un moyen de récupérer une partie de cette énergie mécanique dans le but d'alimenter ce microsysteme. Il existe cependant de grandes différences au niveau du spectre de vibrations disponibles suivant les endroits où le dispositif est placé. Des vibrations de hautes fréquences, jusqu'à quelques centaines de Hz sur les bâtis de machines tournantes, les capots de moteurs, les automobiles et plus généralement les structures mécaniques. La Figure 31 montre un spectre de vibration mesuré à l'aide d'un accéléromètre sur le moteur et sur la carrosserie d'une automobile roulant à 50km/h. On remarque que les spectres sont différents, avec des pics très définis (plusieurs harmoniques visibles) pour le premier et plus étalé pour le second.

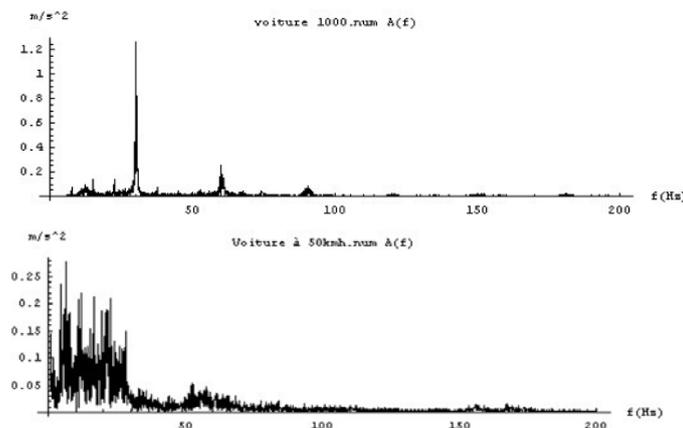


Figure 31. Spectre de vibrations présente sur le moteur et sur la carrosserie d'une automobile roulant à 50km/h. Spectre mesuré par G.Despesse avec un accéléromètre. [37]

Les caractéristiques du spectre de vibrations disponible sont fondamentales pour concevoir un micro générateur. La fréquence de résonance du générateur doit être accordée avec celle de la source des vibrations pour un transfert d'énergie optimal. En outre le niveau des accélérations doit également être pris en compte. A l'autre gamme du spectre, les mouvements d'un corps humain peuvent être considérés comme des vibrations de très basse fréquence mais ne sont généralement pas exploitable dans le cas d'un système résonant. Les microsystemes ayant en général des dimensions et volumes faibles présentent des fréquence de résonance mécanique souvent très élevé par rapport aux sources de vibrations. Il faudra alors faire usage de systèmes à chocs ou à échappement.

2.5. Micro générateurs

Différentes structures ont été imaginées pendant le projet. Le cahier des charges étant d'utiliser un spectre de vibration présent sur une structure porteuse type fenêtre, carrosserie ou corps de machine tournante. Ces spectres possèdent différents pics de vibration surtout dans la gamme en dessous du kHz. Le problème étant que les microsystemes, ayant des dimensions de l'ordre de la centaine de microns ont des fréquences propres assez élevées (bien supérieur au kHz) et des coefficients de qualité également élevés, ce qui nécessite un bon alignement de la fréquence d'excitation sur le mode propre du micro générateur.

2.5.1. Micro générateur Electromagnétique

Un micro générateur électromagnétique a été étudié au début du projet. Nous avons proposé une structure comme celle présentée sur la Figure 32. Elle se compose d'un équipage mobile se déplaçant dans le plan selon un axe unique tout en étant relié à la partie fixe par des ressorts de suspension. La partie mobile comporte un ensemble d'aimants magnétisés de façon opposée pour obtenir un maximum de variation de flux lors du mouvement. La partie fixe du substrat supporte une matrice de micro bobines. Le déplacement de la partie mobile doit être égale au pas des micro bobines pour que ces dernières voient une variation de

flux maximum. Au niveau des dimensions, le pas des microbobines était fixé aux alentours d'une centaine de microns donc autant pour le déplacement de la partie mobile. La technologie envisagée consistait à reporter la structure mobile usinée par DRIE sur le substrat fixe contenant les bobines déposées par croissance électrolytiques de cuivre.

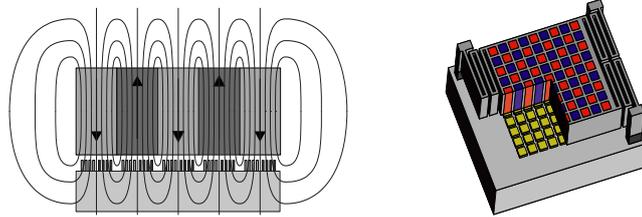


Figure 32. Micro générateur électromagnétique.

Quelques simulations magnétiques en éléments finis nous ont permis de valider le concept au niveau du dessin du circuit magnétique et des matériaux à employer.

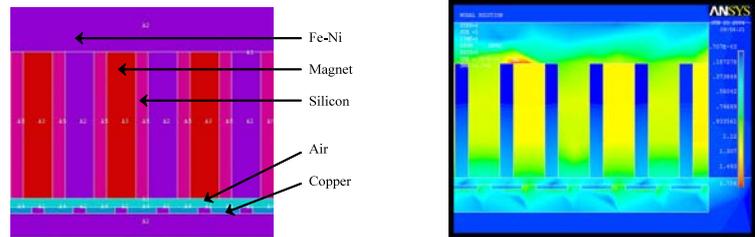


Figure 33. Simulation en éléments finis du circuit magnétique

Cependant même si ce concept offrait sur le papier quelques avantages il s'avérait d'une forte complexité au niveau du procédé de microfabrication. Les points durs étant la réalisation du circuit magnétique et de l'aimantation du l'équipage mobile ainsi que le couplage des forces de Lorentz sur le système mécanique oscillant. Nous avons donc décidé de nous concentrer sur la transduction piézoélectrique et avons laissé le soin à nos partenaires de l'université de Southampton de développer leur version du micro générateur électromagnétique[30].

2.5.2. Micro générateur piézoélectrique à chocs

Comme nous l'avons vu les systèmes résonants nécessitent un accord entre la fréquence d'excitation et les modes propres de résonance du micro générateur, et ce n'est pas toujours possible dans le cas de mouvements ou de vibrations à basse fréquence. Pour cette raison les systèmes à chocs et à échappement nous ont semblé intéressants. Nous avons donc participé au développement d'un tel système [p-64] avec l'équipe partenaire de S.Ballandras de FEMTO-ST à Besançon. Le système, visible sur la Figure 34, se compose d'un ensemble de quatre chambres contenant une bille en métal dur libre de se déplacer et de heurter les parois. Sur chacune des parois latérales a été rapporté une poutre de flexion en PZT massif qui est excitée sur son mode de flexion à chaque choc.



Figure 34. Exemples de micro générateurs récoltant l'énergie vibratoire par un mécanisme de chocs d'une bille sur une structure vibrante piézoélectrique. Dispositifs développés par S.Ballandras à FEMTO-ST.

Ce micro générateur a permis de récupérer de l'énergie à très basses fréquences : $0,5 \mu\text{W}$ pendant 2 ms chaque 20 ms pour une excitation initiale de 1,4 g à 6 Hz.

2.6. Microgénérateur piézoélectrique résonant

2.6.1. Principe

Le micro générateur piezoélectrique que nous avons développé est visible sur le schéma de la Figure 35. Il se compose d'une masse sismique parallélépipédique en silicium monocristallin attachée à une poutre encastrée la reliant au corps du dispositif. Les dimensions sont millimétriques pour un dispositif de 2mm par 2mm environ. Lorsque le corps du dispositif est soumis à une vibration mécanique, l'ensemble poutre et masse sismique sont excités sur leurs modes propres, le fonctionnement recherché est le premier mode de flexion. La poutre comporte un évasement à l'encastrement permettant de réduire les contraintes dans cette région pour une meilleure tenue aux déformations.

La poutre de flexion, qui est le siège des efforts mécanique est composée d'une couche de silicium monocristallin de 5 μ m d'épais et d'une couche de nitrure d'aluminium piézoélectrique. Une électrode supérieure en aluminium vient compléter l'empilement pour former la structure électrode inférieure (silicium dopé p) / matériau actif (AlN) / électrode supérieure (Aluminium). La couche de silicium inférieure, en plus de son rôle d'électrode, a un rôle mécanique puisqu'elle définit un bilame mécanique. La fibre neutre lors du déplacement en flexion se situe en effet dans la couche de silicium et permet au matériau piezoélectrique d'être entièrement en compression ou en élongation lors de ses mouvements. Les propriétés mécaniques du silicium permettent d'obtenir un fonctionnement élastique du matériau sans effets plastiques. La fréquence de résonance du premier mode de flexion est d'environ 200Hz ce qui est extrêmement bas pour un dispositif MEMS.

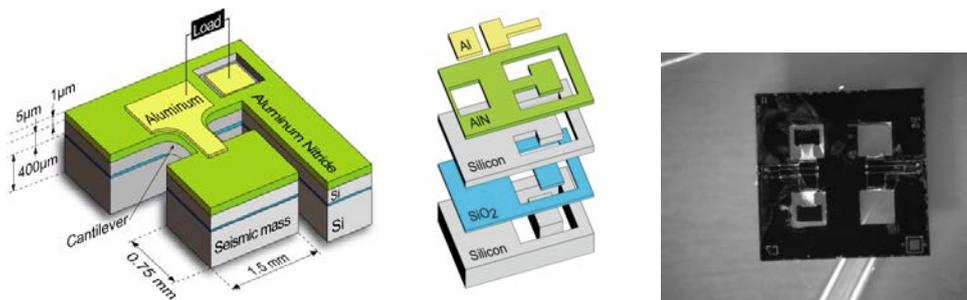


Figure 35. Schéma et dimensions du microgénérateur piézoélectrique résonant fabriqué à partir d'un substrat SOI et d'une couche de nitrure d'aluminium piézoélectrique.

Les prises de contact se font comme illustré sur le schéma de la Figure 35, par des plots d'aluminium. Une charge électrique adaptée à l'impédance de la structure piézo permet d'adapter le transfert de charges depuis la structure vers la charge.

2.6.2. Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication a été développé par notre équipe au laboratoire TIMA ainsi que par nos partenaires du projet : MEMSCAP et FEMTO-ST. Le substrat utilisé est une plaquette de silicium sur isolant (SOI) dont la partie active en silicium dopé p mesure 5 μ m et est séparé du silicium massif par une couche d'oxyde de silicium de 1 μ m d'épaisseur. Un dépôt de nitrure de silicium de 1 μ m est effectué pleine plaque par *sputtering* à 300°C (dépôt effectué par MEMSCAP à l'ESIEE). Cette couche est ensuite lithographiée et gravée par voie chimique pour définir un accès vers le silicium faisant office d'électrode inférieure.

L'électrode supérieure en aluminium de 400nm d'épais est déposée par *sputtering* puis lithographiée et gravée par voie humide pour définir la géométrie de l'électrode supérieure.

La gravure de la couche de silicium supérieure est opérée avec le masque ayant servi à la gravure du nitrure d'aluminium, après lithographie le silicium est gravé par DRIE jusqu'à la couche de silicium enterré faisant office de couche d'arrêt.

La masse sismique est définie quant à elle par une dernière étape de gravure ionique réactive profonde (DRIE) en face arrière avec arrêt de gravure sur la couche d'oxyde enterré. La lithographie face arrière est alignée sur la face avant. La gravure DRIE traverse l'épaisseur de la plaquette avec encore une fois arrêt sur la couche de silicium enterré. A ce moment là, la structure mobile n'est tenue que par la couche d'oxyde enterré qui sera finalement gravée par attaque à l'acide fluorhydrique à 5% tout en protégeant la face avant par de la résine. Les dimensions de la masse sismique étant importantes, les dispositifs sont très fragiles et le

rendement de fabrication est assez bas. Comme la montre la photo de la Figure 35 ou l'on remarque que la moitié des microgénérateurs ont disparus.

Plusieurs prototypes ont été fabriqués et testés avec des variantes au niveau du dessin de masque mais également du matériau piezoélectrique. Le nitrure d'aluminium ayant laissé sa place au PZT dans les développements suivants.

2.6.3. Essais sous pot vibrant.

Le dispositif, une fois câblé, est monté sur un pot vibrant qui permet d'appliquer un mouvement sinusoïdal au système. L'accélération portée est d'environ 0,2g à une fréquence d'environ 200Hz. Le microgénérateur est, en outre, filmé par une caméra CMOS permettant une fréquence de balayage élevée sur une portion de ses pixels. Une fréquence d'échantillonnage de 600 images par seconde permet de filmer le mouvement et les déformations de la structure mobile oscillant à 200Hz. Par hétérodynage, en décalant de quelques Hz la fréquence d'oscillation (pour ne pas se trouver sur une harmonique) il est alors possible de visualiser le mouvement de la structure comme représenté sur la Figure 36.

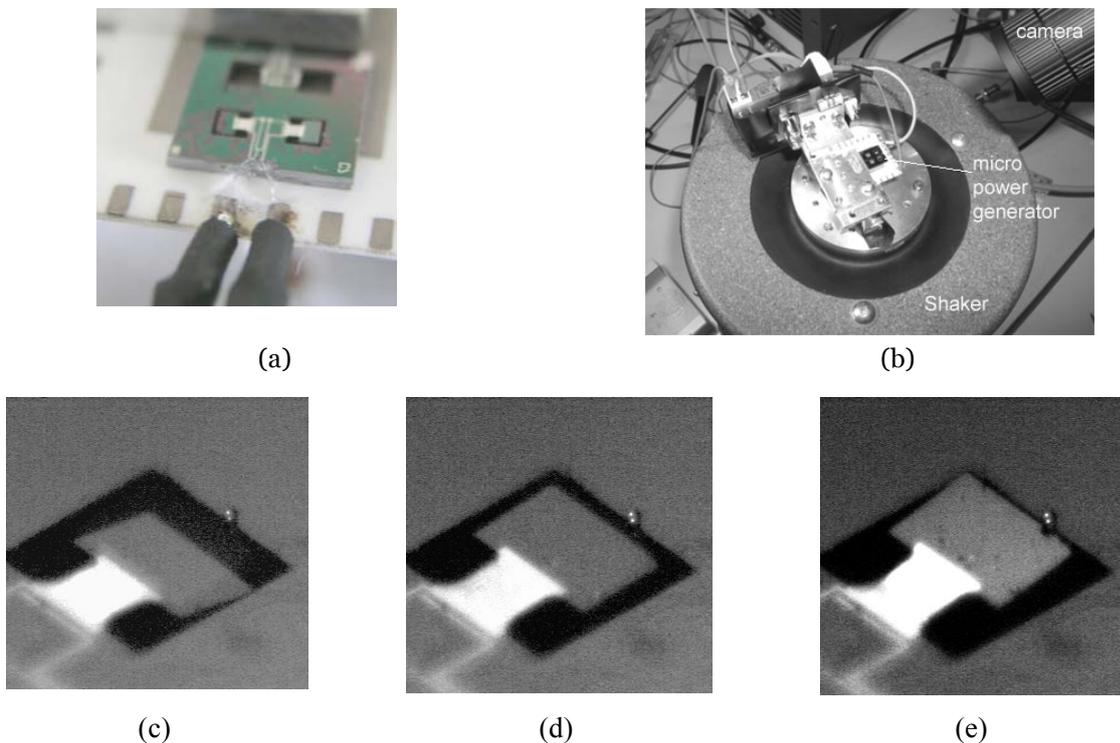


Figure 36. Micro générateur récoltant les vibrations de l'environnement, Photo du dispositif (a), photo de l'équipement de mesure (pot vibrant) (b), Photos du micro générateur excité à sa fréquence de résonance (204Hz), les images ont été enregistrées avec une caméra APS fonctionnant à 600 images/sec, le dispositif est vu dans une position basse (a), en position neutre (d) et en position haute (e). La partie claire sur le cantilever est l'électrode supérieure.

Les mouvements observés sont de grande amplitude pour une accélération relativement faible (0,2g). La flexion résultante de la poutre est donc élevée ce qui conduit à des contraintes importantes dans les matériaux. Cependant nous n'avons pas observé de fracture pendant les essais sous pot vibrant.

2.6.4. Mesures

Les mesures ont été effectuées avec plusieurs dispositifs, ayant des variantes au niveau de la taille et des épaisseurs des matériaux. Le pot vibrant applique une accélération sinusoïdale au corps du dispositif qui est transmise à la structure mobile. La plage de fréquence est balayée autour des fréquences propres des dispositifs, (204 et 370Hz). La charge résistive est tout d'abord ajustée pour optimiser le transfert de charge vers cette dernière. La réponse attendue est celle d'un oscillateur harmonique défini par une fréquence de résonance et un coefficient de qualité à la résonance. Les premières mesures, visibles sur la Figure 37, montrent un comportement s'approchant du résonateur harmonique mais avec une différence notable suivant le sens du balayage en fréquence. En effet, la tension ou la puissance produite par le système piézo vers la charge augmente lorsque la fréquence d'excitation monte vers la résonance et chute rapidement à un certain niveau. De plus lors d'un balayage descendant, c'est à dire partant d'une fréquence supérieure à la

résonance, la puissance produite monte peu et retrouve la courbe ascendante pour une valeur en dessous de la résonance. Les système n'est donc pas analogue à un oscillateur harmonique et montre d'importantes non-linéarités. Les très larges déplacements observés à la caméra rapide nous font dire que le système, à ce niveau d'excitation ne peut pas être modélisé par un système de type oscillateur harmonique.

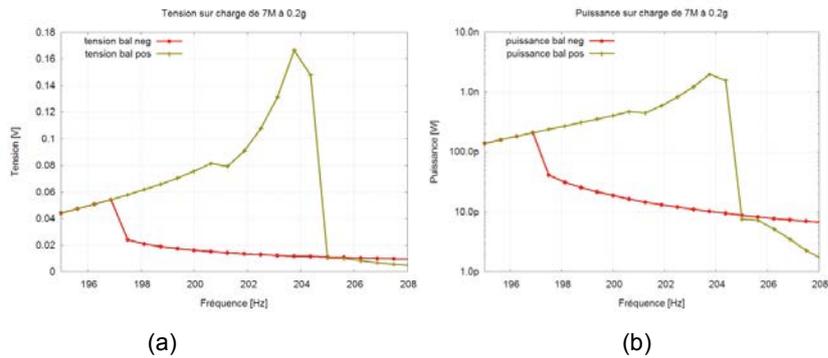


Figure 37. Mesure de la tension de sortie (a) et de la puissance électrique (b) produite par un micro générateur piézoélectrique placé sur un pot vibrant excitant le dispositif à une amplitude de 0,2g sur une plage de fréquence autour de 200Hz, avec balayage en fréquence descendant et ascendant. (mesures effectuées par M.Marzencki)

En utilisant un second dispositif, provenant d'un autre lot de fabrication, les mesures obtenues ont fourni des résultats plus cohérents. Cette fois ci la fréquence de résonance est d'environ 371Hz. Les courbes de la Figure 37 montrent cette fois un comportement plus classique de production de puissance à la résonance. La Figure 37(a) montre en effet la puissance produite en fonction de la fréquence d'excitation pour une amplitude de 0,2g et pour trois valeurs de la charge, dont un transfert maximum pour une charge de 1MΩ. Cependant le comportement non linéaire se retrouve sur la Figure 37(b) lorsque l'amplitude d'excitation atteint les 1,5g.

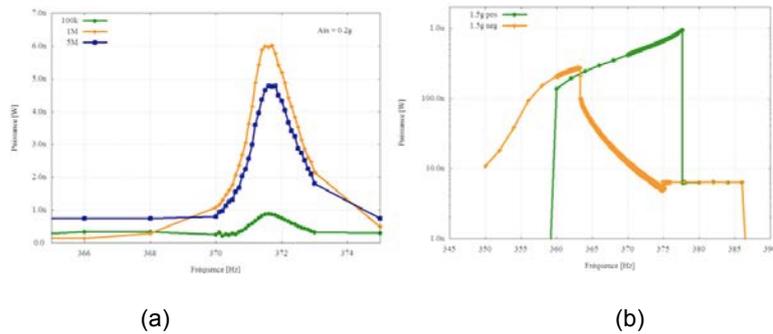


Figure 38. Mesure de la puissance de sortie par un micro générateur piézoélectrique placé sur un pot vibrant excitant le dispositif à une amplitude de 0,2g et 1,5g, respectivement. La plage de fréquence est centrée sur 370 Hz. (mesures effectuées par M.Marzencki)

L'étude du phénomène de non linéarité a démontré que ce phénomène apparaissait à partir de 0,5g, comme le montre la courbe de la Figure 38.

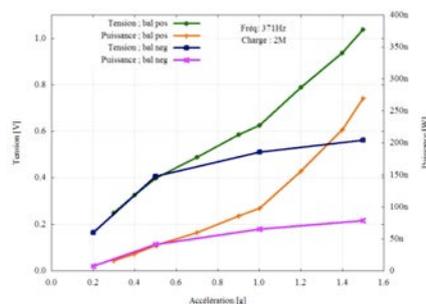


Figure 39. Mesure de la puissance de sortie par un micro générateur piézoélectrique placé sur un pot vibrant excitant le dispositif à une amplitude de 0,2g et 1,5g, respectivement. La plage de fréquence est centrée sur 370 Hz. (mesures effectuées par M.Marzencki)

Au final, ces dispositifs ont montré la capacité de produire une énergie de 265nW et une tension d'environ 1V lorsqu'il est soumis à une excitation d'1,5g. Par la suite, mes collègues de TIMA ont développé une autre version du dispositif qui utilisait une couche active piézoélectrique en PZT. Cette couche a été déposée par le Pr. Muralt de l'EPFL. Ces dispositifs en PZT ont démontré une puissance fournie supérieure aux dispositifs avec couche active en AlN comme le montre les résultats de mesure de la Figure 40

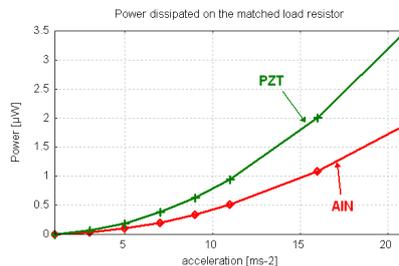


Figure 40. Mesure de la puissance de sortie en fonction de la fréquence d'excitation pour deux micro générateur piézoélectriques utilisant des matériaux différents (PZT et AlN). (Mesures effectuées par M.Marzencki).

Au final le résultat marquant de ces travaux est la puissance fournie par le dispositif excité à sa résonance qui dépasse le microwatt, ce qui avait été défini comme cahier des charges dans le projet.

Enfin, produire un signal alternatif à partir d'une excitation sous forme de vibration est une chose mais le courant ainsi produit ne sert à rien si ce dernier n'est pas mis en forme pour pouvoir effectivement servir à charger une micro batterie. C'est pourquoi nous avons développé en parallèle à ces travaux sur les microgénérateurs un ensemble de circuits pour la gestion de la charge d'une micro batterie.

2.7. Module de gestion de la charge

L'autre axe de recherche au sein de ce projet a concerné le développement d'un module électronique de gestion du générateur et de la charge de la micro batterie. Ce système doit en effet adapter le signal électrique issu du générateur qui se présente sous la forme d'un signal sinusoïdal de quelques centaines de Hz et avec des tensions crête inférieures à 100mV. Le module doit produire une tension continue de quelque volts pour alimenter directement un circuit intégré ou charger une micro batterie lithium-ion. À ce titre plusieurs solutions ont été étudiées, simulées et implémentées sur silicium. Ce travail a été mené tout d'abord dans le cadre du projet de fin d'étude d'un étudiant en Master (Frédéric STEFANI, 2004) puis par une thèse soutenue en 2006 (Yasser AMMAR) encadrée par mon collègue Skandar BASROUR. J'ai donc pris part uniquement au début de ces travaux, avant mon départ pour le Japon.

Au vu des faibles tensions fournies par le micro générateur il est impossible d'utiliser les techniques conventionnelles de mise en forme du courant du style pont de Graetz. En effet, les tensions de coude de diodes à jonction pn ou à diodes Schottky sont trop importantes (de 0,3 à 0,6V) par rapport aux tensions délivrées par notre générateur (<100mV), il est donc impossible de redresser le signal. Nous avons ainsi développé un circuit rectificateur actif qui permet de générer une tension redressée à partir du signal fourni par le générateur.

Le cahier des charges pour un tel circuit comporte deux points nécessaires :

- La rectification de tensions inférieures à 10mV
- Une consommation plus faible que la puissance fournie par le générateur, de l'ordre d'une dizaine de nanowatts.

Le circuit étudié se compose, comme montré sur la Figure 41, d'un ensemble de comparateurs et d'interrupteurs. Les comparateurs, en mesurant la polarité du signal vont commuter ce dernier suivant le résultat sur deux sorties positives ou négatives.

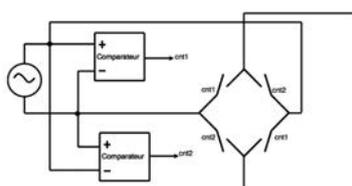


Figure 41. Schéma de principe d'un circuit rectificateur actif et schéma au niveau transistors du comparateur basse consommation.

Le comparateur, visible sur la Figure 42(b) est composé d'un étage de polarisation (transistors P4 P5 et P6), de deux paires différentielles formées par les paires de transistors N2 P2 et N3 P3 et enfin d'un étage d'amplification (P1 et N1). Lors que les tensions des points d'entrée IN1 et IN2 sont égales, les deux paires différentielles sont équilibrées et les tensions de drain des transistors N2 et N3 sont identiques. Si par contre une des tensions d'entrée est supérieure à l'autre, $IN2 > IN1$ par exemple, alors la tension du drain du transistor N3 devient nulle ce qui entraîne la fermeture du transistor de sortie N1 et le basculement à l'état logique haut du comparateur. Les comparateurs commandent ensuite des transistors NMOS.

Les optimisations du schéma ont porté sur les courants de polarisation des transistors pour obtenir une consommation du comparateur qui a été estimée à 30nW pour le circuit de la Figure 42(b) et pour une tension d'alimentation de 3,3V.

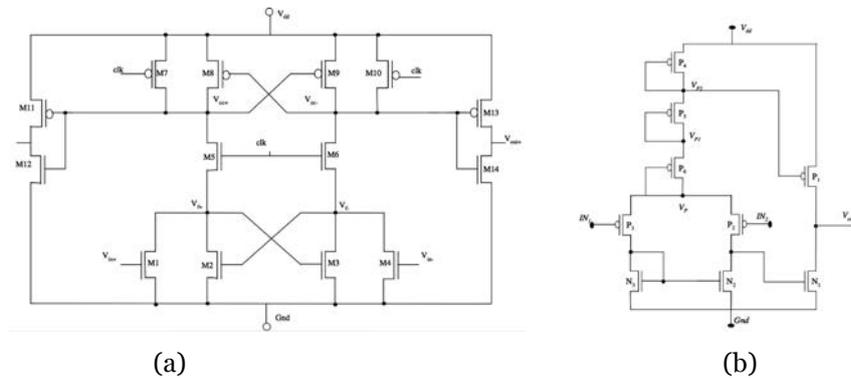


Figure 42. Schéma au niveau transistor d'un montage comparateur classique à point mémoire (a) et d'un comparateur basse consommation (b).

A la suite de ces travaux sur le circuit rectificateur, mes collègues à TIMA ont poursuivis dans le conception des circuits de gestion de la charge et ont développé les étages de conversion DC/DC pour adapter la tension fournie par le générateur et le circuit redresseur à la tension nécessaire pour la charge d'une micro batterie en couche mince. Ce travail [32] [36] a nécessité également un important effort de modélisation du comportement des batteries dans le temps. Enfin des travaux [39] ont portés sur les circuits non linéaires d'amplification du signal comme le *Synchronized Switch Harvesting on Inductor* (SSHI).

2.8. Conclusions et poursuite des travaux

Ces travaux ont été parmi les premiers en France dans le domaine des microsources d'énergie. J'ai quitté ce thème de recherche suite à mon affectation au Japon mais les développements ont continué au laboratoire TIMA dans l'équipe de mon collègue Skandar Basrour.

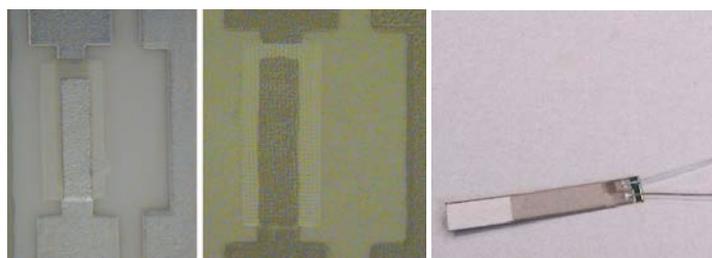


Figure 43. Photographie de structures piézoélectrique Argent/ PZT/Argent fabriquées par sérigraphie sur différents supports : alumine, papier et acier.

Actuellement nous sommes en train de développer une coopération avec le laboratoire TIMA autour du développement de microgénérateurs piézoélectriques en couches épaisses par la technique de la sérigraphie, comme illustré sur la Figure 43. Nous avons fabriqué des structures en PZT sérigraphiées sur des substrats métalliques de faible épaisseur. Ces structures ont ensuite été polarisées puis testées sous pot vibrant. La Figure 44 montre les résultats des tests sous vibration effectués par mon collègue Mikael Colin de TIMA. Le dispositif a fourni un signal de sortie d'environ 1V rms pour une fréquence d'excitation, relativement faible, de 22Hz. La puissance fournie à cette fréquence est d'environ 0,2μW sur une charge adaptée.

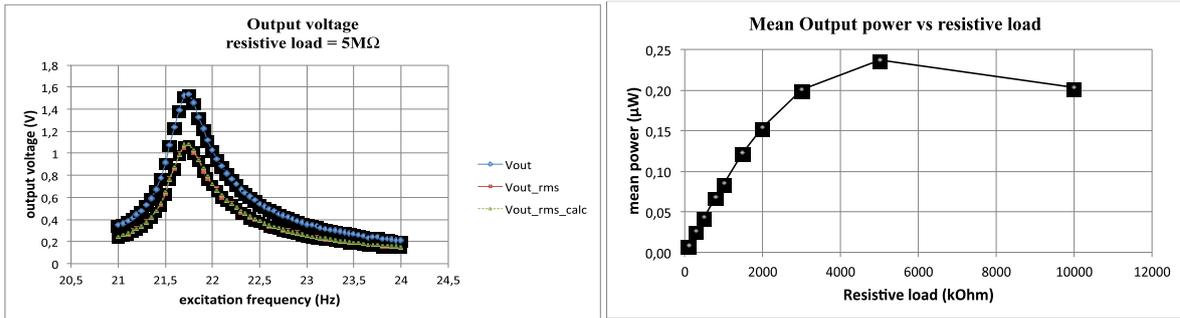


Figure 44. Tension de sortie en fonction de la fréquence d'excitation et puissance délivrée en fonction de la charge pour un microgénérateur piézoélectrique en PZT sérigraphie sur un substrat métallique fin (Mesures Mikael Colin, TIMA) .

Les travaux dans le domaine de la récupération d'énergie à partir de structures piézoélectrique ont donc repris, en partenariat avec mes anciens collègues de TIMA, en ciblant cette fois ci les technologies de dépôt par sérigraphie permettant d'obtenir des couches actives épaisses.

3. Détection des déplacements d'un micro résonateur par jauge à émission de champ (2005-2007)

3.1. Introduction

A mon arrivée à Tokyo j'ai donc rejoint une équipe de recherche et ai participé à un projet déjà en place sur les microrésonateurs. En parallèle j'ai développé, en accord avec le Pr. Toshiyoshi, un axe de recherche propre sur les mémoires nanomécaniques. Ce sont ces deux projets qui vont être détaillés dans le chapitre présent.

Le travail de recherche sur les jauges à émission de champ a été effectué au LIMMS à Tokyo entre septembre 2005 et août 2007. Ce projet a été initié par le Pr. Toshiyoshi qui m'a accueilli dans son équipe à cette époque. Ce projet a débuté un peu avant mon arrivée. J'ai donc intégré un groupe qui travaillait sur le sujet, ces personnes étaient Winston SUN, post doc, qui a travaillé brièvement sur le sujet et enfin Kiyotaka Yamashita dont c'était le sujet de thèse. Ce dernier a défendu sa thèse fin 2007.

3.2. Principe de l'émission de champ

L'émission de champ, également appelée émission Fowler Nordheim du nom de ses découvreurs[40], est un phénomène d'émission d'électrons par effet tunnel d'un conducteur, placé dans un champ électrique, vers le vide. Le champ électrique, appliqué à la surface d'un métal ou d'un semiconducteur, permet de faire transiter par effet tunnel des électrons à travers la barrière de potentiel définie par la différence entre le niveau de Fermi du conducteur et son travail de sortie (typiquement entre 4 et 5eV pour les métaux courants). L'émission de champ, à ne pas confondre avec l'émission thermoionique, est fréquemment utilisée à partir de pointes pour obtenir une source d'électrons de petites dimensions (dans les microscopes électroniques à effet de champ notamment). La présence d'une pointe dont le rayon de courbure est typiquement de quelques dizaines de nanomètres permet d'atteindre de très fortes valeurs de champ électrique ($\sim 10^9 \text{ V.m}^{-1}$)[41] localement à partir d'une différence de potentiel relativement faible (de l'ordre de quelques dizaines de volts). La Figure 45 montre un diagramme de bande d'énergie d'une structure métal vide métal soumise à une polarisation. La courbe en pointillés représente la forme de la barrière d'énergie que constitue une pointe polarisée dans le vide, par rapport à une configuration en surface plane. Les électrons transitent par effet tunnel à travers la barrière puis sont extraits de la surface et sont ensuite accélérés dans le vide pour être enfin collectés par la seconde électrode (le collecteur).

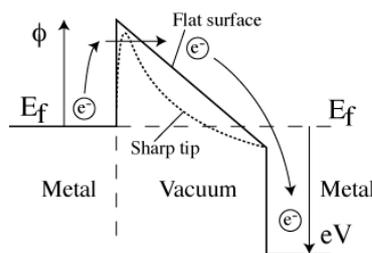


Figure 45. Schéma de bande d'énergie d'une structure métal-vide-métal soumise à un champ électrique intense.

L'émission Fowler Norheim (FN) est décrite par l'équation suivante[40][42] :

$$J = \frac{AE^2}{\phi t^2(y)} e^{\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{E} v(y)\right)} \quad \text{Equ. 16}$$

L'équation exprime la relation entre la densité de courant électrique J en fonction du champ appliqué E et du travail de sortie du matériau émetteur. A et B sont des constantes qui valent respectivement $1.54 \cdot 10^{-6}$ et $6.87 \cdot 10^7$.

$y = 3.79 \cdot 10^{-4} E^{1/2} / \phi$ est la fonction Schottky d'abaissement du travail de sortie. Enfin $t^2(y)$ et $v(y)$ peuvent être approximées par $t^2(y) = 1.1$ et $v(y) = 0.95 \cdot y$.

En posant les valeurs

$$a = \frac{\alpha A \beta^2 \left(\frac{1.44 \times 10^{-7} B}{\sqrt{\phi}} \right)}{1.1 \phi} \quad \text{Equ. 17}$$

$$\text{et } b = \frac{0.95 B \phi^{3/2}}{\beta} \quad \text{Equ. 18}$$

puis en définissant une surface d'émission α telle que $J=I/\alpha$ et un facteur local de conversion du champ β tel que $E=\beta V$, on peut alors écrire la relation entre le courant émis I et la différence de potentiel V :

$$I = a V^2 e^{\left(\frac{-b}{V} \right)} \quad \text{Equ. 19}$$

Ce modèle unidimensionnel n'est valable que pour des métaux plans ou des pointes ayant un rayon de courbure grand devant la largeur de la barrière de potentiel. Ce qui peut s'appliquer à notre cas. Dans le cas contraire, seul la résolution de l'équation de Schrödinger en trois dimensions peut servir à modéliser l'émission de champ.

En ce qui concerne l'émission de champ par un semiconducteur, il n'existe pas de théorie générale[43] et plusieurs phénomènes additionnels doivent être pris en compte tels la génération de porteurs ainsi que les effets de courbure de bande dans le semiconducteur.

Dans un système composé d'une pointe (anode) et d'une électrode en regard (anode) soumise à une différence de potentiel, la relation de Fowler Nordheim exprime donc le courant émis en fonction du champ électrique. Si l'on se place alors à polarisation fixe, le champ électrique devient fonction de la distance séparant la pointe de l'anode. Il est alors possible d'utiliser cette structure comme jauge de distance et ainsi de mesurer les déplacements de la pointe par rapport à l'anode.

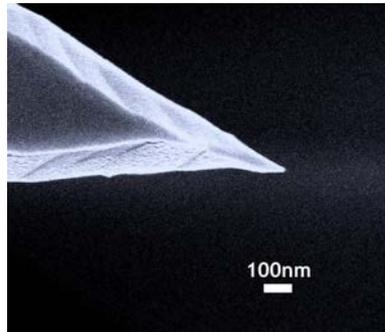


Figure 46. Image au microscope électronique à balayage d'une pointe affinée par gravure chimique au TMAH et recouverte de tungstène.

L'idée de ce projet est donc d'utiliser un système pointe anode pour la mesure des déplacements de résonateurs micromécaniques fonctionnant à haute fréquence (les RF MEMS). Actuellement la mesure du déplacement se fait de manière capacitive en utilisant une capacité variable formée par une des surfaces du résonateur et d'une électrode fixe. Cette méthode a des limites qui tiennent à la très faible valeur de la capacité ainsi formée par rapport aux capacités parasites du système.

3.3. Jauge de déplacement à émission de champ : Diode et triode

Si l'on a vu qu'il était possible de moduler le courant FN en faisant varier la distance pointe anode, il est également possible de moduler le courant d'électrons en insérant une grille à proximité du faisceau d'électrons. Cette technique est utilisée depuis longtemps dans les tubes à vides, les triodes. Dans ce cas, les électrons émis par effet thermoïonique sont attirés à travers une grille métallique par l'anode polarisée positivement. En appliquant une tension négative à la grille, il est possible de moduler le courant la traversant. Ce furent les précurseurs des transistors. Les dernières versions, les pentodes pouvaient contenir d'autres grilles au long du parcours des électrons, comme la grille supresseuse, pour minimiser certains effets comme les accumulations de charges dans les zones de charges d'espace.

Dans le cas qui nous intéresse ici, et comme illustré sur la Figure 47 la grille est polarisée à une tension fixe et, étant solidaire d'un microrésonateur, se déplace perpendiculairement au faisceau d'électrons pour moduler ce dernier.

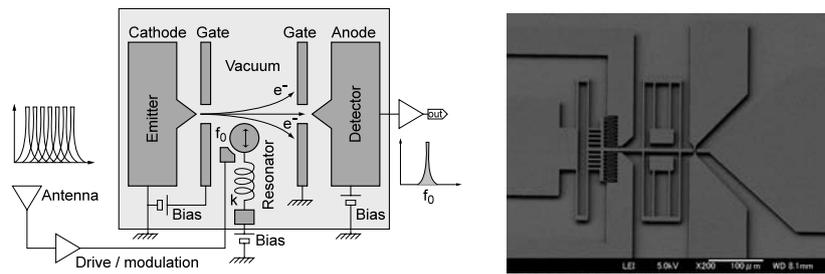


Figure 47. Schéma d'un microrésonateur en triode.

Bien que des dispositifs de ce type aient été réalisés, nous nous sommes concentré dans un premier temps sur la modulation directe du courant FN. C'est à dire en insérant une pointe parallèle au mouvement du résonateur.

3.4. Analyse en éléments finis.

Le modèle Fowler Nordheim permet de prévoir le courant émis en fonction du travail de sortie et des conditions de polarisation pour une surface plane. Lorsque l'on a affaire à une pointe, un coefficient correctif en fonction du rayon de courbure permet d'obtenir une approximation. Mais dès lors que l'on est dans un cas de figure plus complexe, il est nécessaire de recourir à la simulation par éléments finis pour résoudre le problème en trois dimensions en prenant en compte la géométrie du dispositif.

Nous avons utilisé le code SCALA couplé au modelleur OPERA. Ce logiciel permet de résoudre le problème électrostatique (le potentiel étant le degré de liberté) et d'y calculer le trajet des électrons émis à partir d'une surface définie tout en prenant en compte les zones de charges d'espace.

Il est possible alors, à partir du modèle géométrique de calculer la trajectoire des électrons et le courant total passant à travers une zone donnée. On peut donc étudier l'influence de la distance entre pointes, du rayon de courbure de l'émetteur ainsi que de l'influence du substrat si ce dernier est mis à la masse.

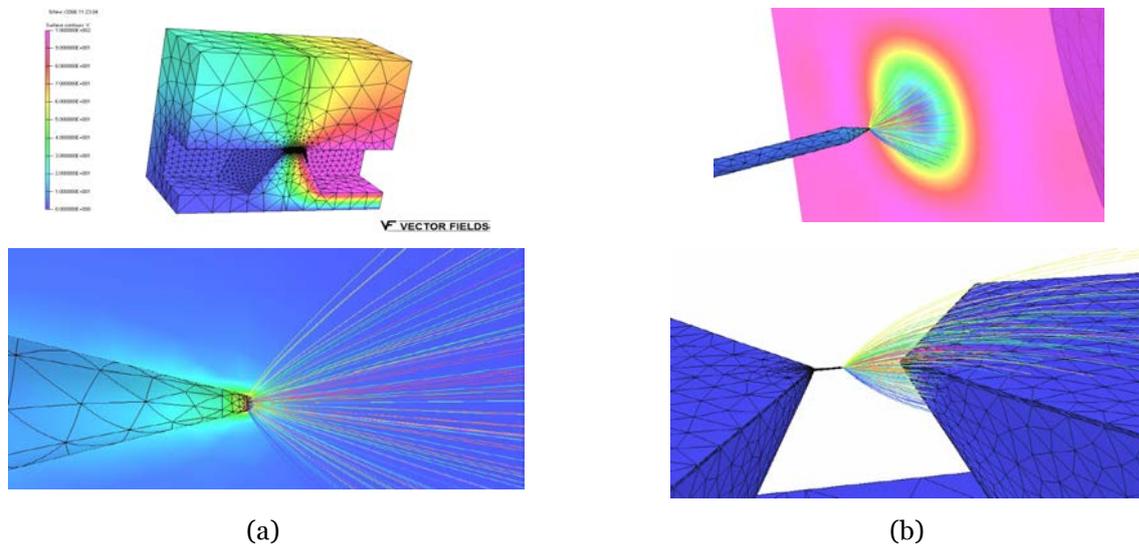


Figure 48. Simulation par éléments finis, (a) analyse modale du résonateur à mode de Lamé (ANSYS) et (b) simulation de l'émission de champ à partir d'une micro pointe, représentation des trajectoires des électrons (OPERA3D/SCALA)

3.5. Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication initial[44] a été développé avant mon arrivée au laboratoire, les dispositifs sont entièrement fabriqués dans les salles blanches de l'IIS à Tokyo. J'ai affiné le procédé pour parvenir aux dispositifs fonctionnels. Le procédé se base sur l'emploi de wafers de silicium sur isolant (SOI *silicon on insulator*) dont la couche de silicium supérieure est épaisse de 5 à 10 μm . Cette dernière repose sur une

couche de dioxyde de silicium de $4\mu\text{m}$ d'épais, elle-même posée sur un substrat de silicium de $500\mu\text{m}$. Un unique niveau de lithographie permet de définir la structure qui est micro-usinée par gravure ionique profonde (procédé BOSCH sur machine STS). Cette technique permet d'obtenir des flancs de silicium verticaux et de s'arrêter sur la couche de dioxyde, comme illustré sur la Figure 49. Pour former les pointes d'émission, nous dessinons un pont reliant le micro résonateur à l'anode. Ce pont d'environ $1,5\mu\text{m}$ de large est ensuite affiné par gravure humide anisotropique au TMAH. La gravure ICP RIE formant un angle de dépouille négatif, la largeur du mur sous le pont diminue alors que la gravure progresse. C'est cet effet qui permet, lors de l'affinage d'obtenir une pointe en surface. Le caractère anisotropique de la gravure permet de former la pointe que l'on a pu voir sur la Figure 46. Le rayon de courbure, intervenant de manière importante dans l'émission de champ, est difficile à mesurer. Il peut être cependant estimé au microscope électronique et l'on a estimé sa valeur autour de quelques dizaines de nanomètres.

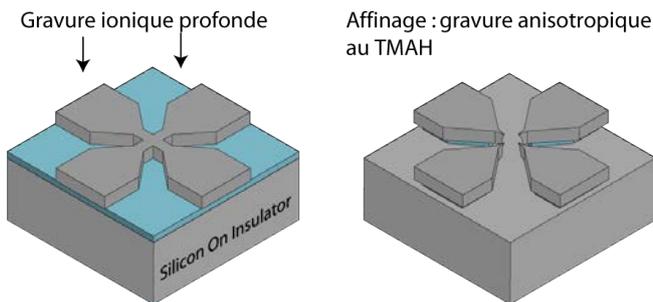


Figure 49. Schéma du procédé de fabrication des pointes pour émission de champs dans le plan à partir de substrat SOI.

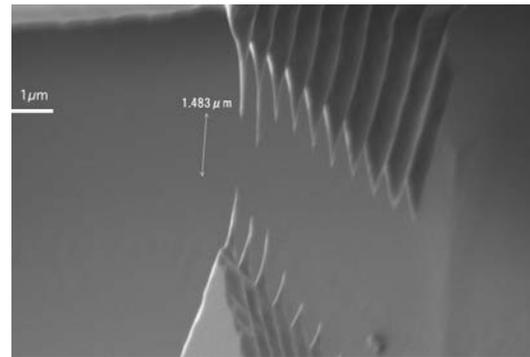


Figure 50. Image MEB de pointes micro usinées sur SOI.

Au moment de ma venue, les structures étaient formées à partir d'un motif en croix. Les pointes obtenues étaient fines mais séparées par une distance d'environ $5\mu\text{m}$. Le rapport de l'amplitude de vibration de la pointe attachée au résonateur à la distance à l'anode était trop importante pour pouvoir mesurer la modulation du courant FN.

Pour diminuer cette distance nous avons alors utilisé la lithographie électronique, disponible dans les salles blanches du *VLSI Education Center* de l'université de Tokyo. Cette technique nous a permis d'obtenir des ponts arrondis de 500nm de largeur au niveau de la gorge. Le procédé de gravure ICP RIE est une suite d'étapes de gravure isotrope et de passivation qui produit des ondulations verticales appelées *scalloping*. Ces ondulations couplées avec l'étape d'affinage ont tendance à produire de multiples pointes comme on peut le

Figure 50.

Pour éviter cet effet, nous avons utilisé plusieurs étapes de gravures ICP. La première phase consiste à faire des cycles de gravure/passivation très courts ce qui permet d'obtenir des ondulations très fines et des flancs verticaux sur environ un micron d'épaisseur. Ensuite des cycles de gravure/ passivation plus long permettent de traverser la couche supérieure tout en formant l'angle de dépouille négatif. Au final, après affinage, on obtient une pointe unique en surface et proche de sa contre électrode, visible sur la Figure 51.

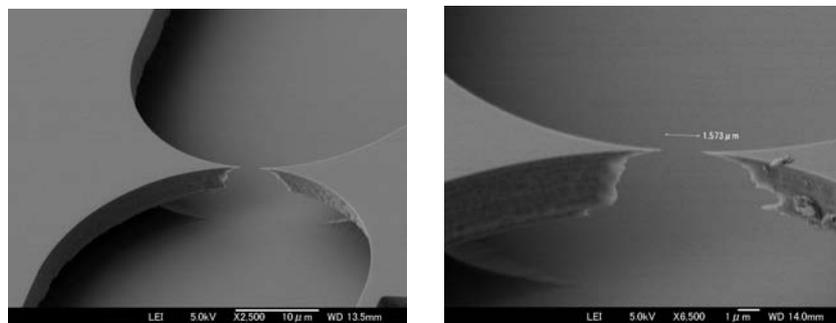


Figure 51. Image MEB de pointes micro usinées sur SOI, affinage des pointes par gravure TMAH.

Une autre technique d'affinage de la pointe a été évaluée. Il s'agit de l'affinage par oxydation (*Oxidation sharpening*). Une fois la gravure ICP RIE effectuée, le dispositif est monté en température à $1100\text{ }^\circ\text{C}$ dans un four d'oxydation en présence de vapeur d'eau et d'oxygène. Le silicium s'oxyde puis est enlevé par gravure

humide à l'acide fluorhydrique. Plusieurs étapes d'oxydation et de gravure sont nécessaires pour former la pointe. Cependant, ce procédé est extrêmement sensible au temps d'oxydation, et un temps un peu trop long produit des pointes arrondies. Nous sommes alors revenu au procédé classique d'affinage par gravure humide TMAH qui fournit les meilleurs résultats.

Une fois la pointe formée, le dispositif est plongé dans l'acide fluorhydrique pour graver de manière sélective les $4\mu\text{m}$ de dioxyde de silicium du substrat SOI et suspendre la structure. Les points d'accroche sont définis par des zones de plot suffisamment large pour que la gravure du SiO_2 ne pénètre pas suffisamment sous le plot, le laissant mécaniquement attaché. Nous avons dû avoir recours à une combinaison de gravure HF humide et en phase vapeur pour éviter les phénomènes de collage de la structure mobile sur le fond, ce qui est un problème classique des microsystemes.

Une fois le dispositif suspendu, une couche métallique est déposée en surface de manière à obtenir une émission de champ stable comme nous allons le voir dans les sections suivantes.

3.6. Prototypes

3.6.1. Premiers dispositifs

Les premiers dispositifs ont été fabriqués rapidement après mon arrivée à Tokyo en utilisant un procédé précédemment mis au point [p-12]. Le résonateur visible sur la Figure 52 se compose d'une poutre centrale accrochée au substrat par quatre poutres de flexion. L'extrémité de la poutre centrale reçoit la pointe d'émission (cathode) face à la pointe de collection (anode). La structure comporte également des pointes latérales qui peuvent également être utilisées comme anode ou comme grille.

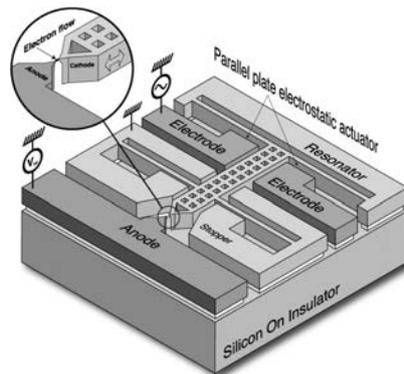


Figure 52. Schéma du micro résonateur électrostatique avec système de mesure du mouvement par pointe à émission de champ (a) et photos du dispositif à différents temps de son mouvement d'oscillation (b) et (c), on remarque la différence de distance entre pointes.

La Figure 53 montre des images MEB du dispositif.

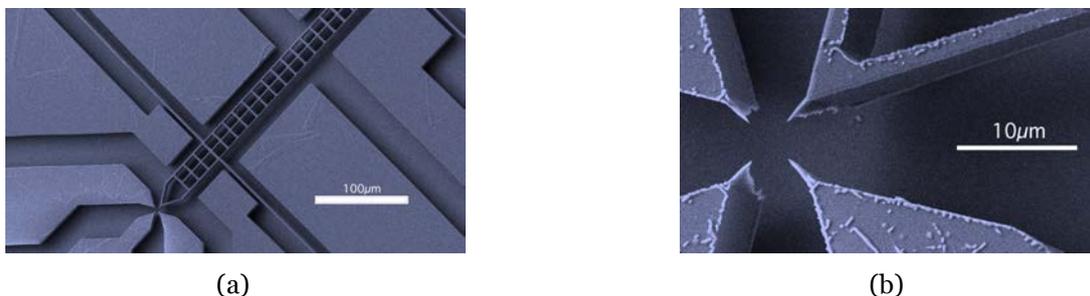


Figure 53. Images au microscope électronique d'un micro résonateur à mode de flexion intégrant des micro pointes à émission de champ pour la détection du mouvement du résonateur. Vue d'ensemble (a) et zoom sur les pointes (b).

A la base des bras de suspension arrière se trouvent les deux électrodes qui permettent, à travers l'attraction électrostatique, d'exciter la structure sur son mode fondamental de résonance. La résonance se trouve vers 18kHz et est visible sur la Figure 54. Les déplacements s'observent au microscope avec une caméra vidéo à 30Hz . On remarque sur la seconde image l'enveloppe du déplacement. Le maximum de déplacement nous permet d'estimer la fréquence de résonance du premier mode. Des mesures au laser

Doppler nous ont permis de confirmer la fréquence ainsi que d'estimer l'amplitude du débattement. La tension d'excitation est de 80V crête à crête.



Figure 54. Image à la camera video CCD sur microscope de la résonance de la microstructure et mesure au Laser Doppler des déplacements.

3.6.2. Mesure sous vide du premier dispositif

Le dispositif est mis en boîtier et câblé dans une enceinte à vide qui permet après plusieurs jours de pompage de descendre à une pression d'environ 10^{-8} Torr. Les mesures statiques $I(V)$ ont été effectuées et ont montré une émission de champ importante et pour de faibles niveaux de tension. Cependant comme le montre la mesure temporelle de la Figure 55, le courant émis est très instable au cours du temps (sur une minute d'acquisition). En plus du niveau de bruit moyen se superpose des variations importantes du courant d'un facteur 3.

Ce phénomène d'instabilité du courant est sûrement dû à une modification de la pointe d'émission au cours du temps. En effet lors de l'émission de champ la pointe chauffe à cause de l'effet Joule et de l'effet Nottingham. La température peut atteindre de fortes valeurs et mener à une fusion locale du matériau ce qui entraîne des changements de sa forme et donc du courant émis. On peut également invoquer l'évaporation de champ qui entraîne aussi une modification de la forme de la pointe. À part des observations MEB avant et après les mesures électriques, nous n'avons pas de moyens de vérifier ces hypothèses.

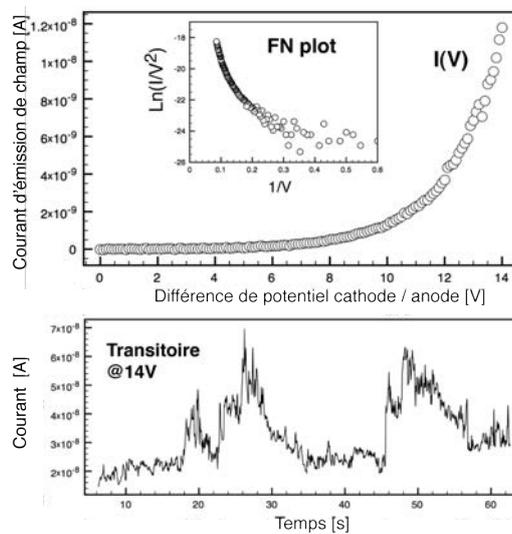


Figure 55. Mesure $I(V)$ et Transitoire de l'émission de champ à partir d'une pointe en Silicium recouverte de Nickel. Le courant continu varie dans de très grandes proportions.

Les essais de modulation du courant n'ont pas produit de résultats et il n'a pas été possible de mesurer un signal modulé dans le courant FN. Nous avons décidé alors d'utiliser un matériau à plus haut point de fusion et très fréquemment utilisé en émission de champ, le tungstène. Ce matériau a été déposé sur un dispositif suspendu en utilisant le dépôt par pulvérisation cathodique.

3.6.3. Second dispositif

À partir des résultats des premiers dispositifs, nous avons développé de nouvelles versions des dispositifs en utilisant cette fois la lithographie électronique qui permet d'obtenir des traits plus fins.

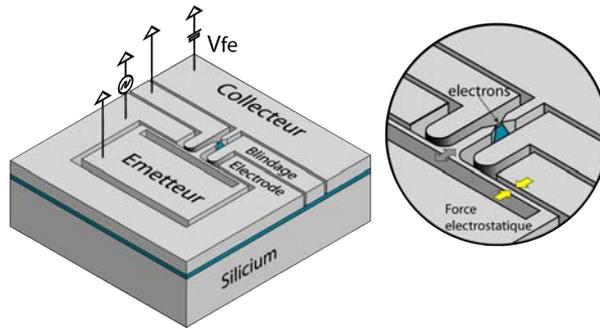


Figure 56. Schéma de principe du microrésonateur électrostatique et de la jauge de déplacement à courant Fowler Nordheim

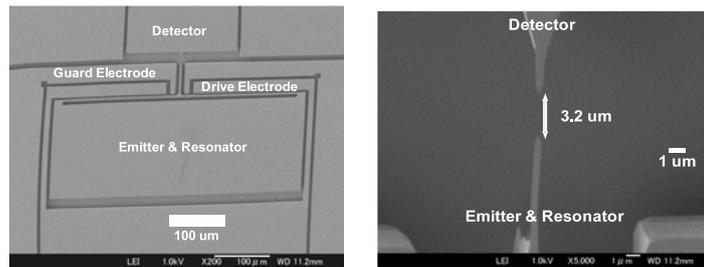


Figure 57. Image MEB d'un résonateur micromécanique, vue d'ensemble et vue rapproché de la pointe d'émission de champ

3.7. Conditions expérimentales

Le dispositif a été câblé et inséré dans une chambre à vide dans laquelle le vide atteint la valeur de 1×10^{-7} Torr ($1,3 \times 10^{-5}$ Pa). Plusieurs câbles de connectique entrent dans la chambre et permettent de connecter le dispositif à un analyseur paramétrique. La pointe émettrice couplée au résonateur est mise à la masse, alors que la pointe collectrice, en regard, est connectée au second canal et soumise à une rampe de potentiel allant de 0 à 100V DC. Le courant passant entre les deux canaux, dans la gamme du nA, est alors enregistré par le PC via une interface GPIB.

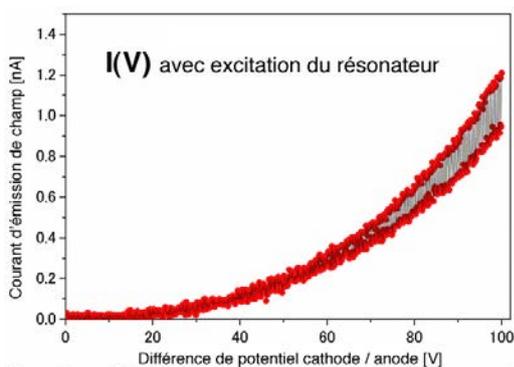


Figure 58. Mesure du courant d'émission de champ en fonction de la différence de potentiel entre cathode avec excitation électrostatique du résonateur.

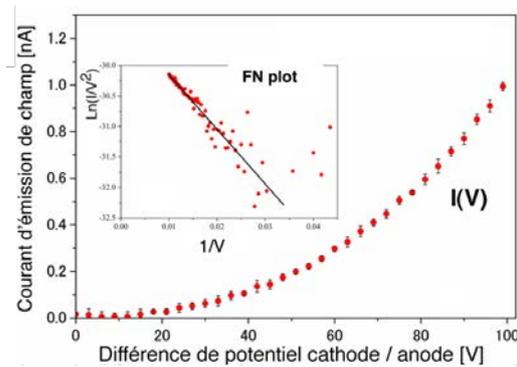


Figure 59. Mesure statique du courant Fowler Nordheim.

La Figure 59 montre le résultat d'une mesure du courant Fowler Nordheim. Le courant émis est de l'ordre du nA pour un potentiel de 100V au collecteur. La seconde courbe de la Figure 59 montre la relation entre $\ln(I/V^2)$ en fonction de l'inverse du potentiel ($1/V$) et permet de montrer, via son caractère linéaire, que l'on est bien en présence d'une émission de type Fowler Nordheim.

Enfin l'électrode d'excitation est soumise à une tension sinusoïdale de 28V (crête à crête) qui est accordée à la fréquence de résonance du dispositif. Cette dernière ayant été mesurée sous microscope dans l'air et également avec un équipement laser Doppler. La pointe émettrice, reliée au résonateur, se déplace alors autour d'une position d'équilibre et la variation de la distance entre pointe engendre une variation de champ électrique autour de la pointe et ainsi une modulation du courant Fowler Nordheim. C'est cet effet qui est

montré sur la Figure 58, ou est représenté le courant émis en fonction de la différence de potentiel appliquée. La mesure étant quasi statique, on observe l'enveloppe du courant modulé.

En soustrayant cette courbe à la réponse $I(V)$ sans excitation du résonateur on obtient la courbe de la Figure 60. On remarque sur cette figure que, conformément à la théorie, le courant modulé dépend de la polarisation statique et qu'il n'est pas symétrique. Ceci nous permet d'affirmer que ce courant n'est pas à un couplage capacitif entre l'électrode d'excitation et le collecteur, bien que ce dernier soit également présent mais ne varie pas avec la polarisation.

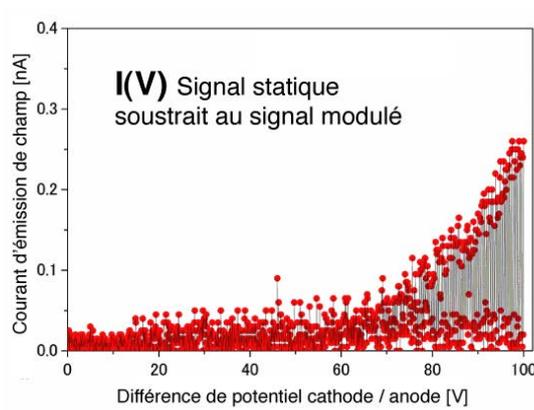


Figure 60. Mesure du courant d'émission de champ en fonction de la différence de potentiel entre cathode avec excitation électrostatique du résonateur et soustraction de la composante statique.

3.8. Poursuite du projet au sein du laboratoire IES

Les mesures réalisées au Japon n'ont pas permis à l'heure actuelle de mettre en évidence la modulation de courant. Des nouveaux dispositifs de plus petite taille (voir Figure 61) ont été fabriqués peu avant mon retour. Ils ont été validés au niveau mécanique par la détection de la fréquence de résonance. Je suis actuellement en train de monter, avec mes nouveaux collègues du groupe MITEA de l'IES un équipement de mesure électrique sous vide contenant une fenêtre d'observation pour pouvoir mesurer la modulation du courant Fowler-Nordheim tout en observant le déplacement de la structure. Nous visons également, à termes, le dépôt de matériaux à faible travail de sortie pour augmenter le courant ou diminuer la tension d'anode.

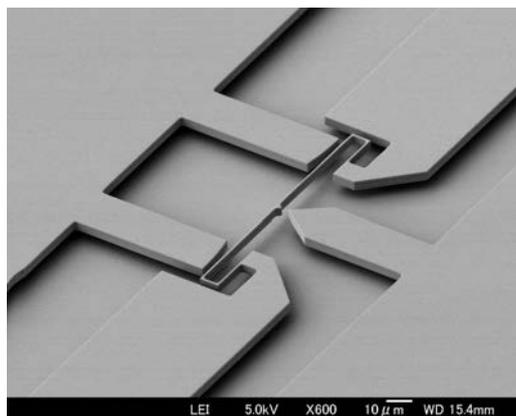


Figure 61. Image MEB de micro résonateur incluant une micro pointe pour l'émission de champs dans le vide.

4. Les mémoires nanomécaniques (2005-2007)

4.1. Introduction

Cet axe de recherche a été initié pendant mon séjour au laboratoire LIMMS à Tokyo et mis en œuvre au sein de l'équipe du Pr. Toshiyoshi. À la différence du projet précédent (le micro résonateur à effet de champ), ce thème a été lancé à mon initiative et a reçu l'accord du Pr. Toshiyoshi pour être développé à l'aide de leurs importants moyens technologiques. J'ai donc bénéficié des infrastructures de salles blanches et de lithographie électronique de pointe ce qui m'as permis d'obtenir des dispositifs très fins.

Le but de ce projet est donc de développer des points mémoires basés sur le flambage mécanique dans le plan d'une poutre suspendue à ses deux extrémités. Pour obtenir des densités de stockage importantes et des énergies d'écriture faible il faut aller vers des systèmes de petites tailles, inférieure au micron.

4.2. Etat de l'art

4.2.1. Les mémoires

Les mémoires sont des dispositifs électroniques destinés à enregistrer des informations sous formes de bits de données. Les fonctions associées à une mémoire sont l'écriture, la lecture et l'effacement des données. Les mémoires sont différentes des systèmes de stockage massif de données de par la quantité de données enregistrées mais surtout par le temps d'accès à ces dernières et le mode de lecture. L'acronyme anglais RAM pour *Random Access Memory* définit donc précisément le mode de lecture aléatoire par opposition aux systèmes de stockages massifs qui fonctionnent de manière séquentiel. C'est à dire que l'on ne peut accéder aux données que par blocs de données (cluster). Les systèmes de stockage massifs fonctionnent en imprimant des données dans un medium qui est ferromagnétique la plupart du temps (cas des disques durs), mais aussi en utilisant des propriétés d'optique non linéaire (mémoires holographiques) ou de déformations plastique (le *millipede* d'IBM).

A l'heure actuelle, la plupart des mémoires sont des dispositifs fabriqués à partir des technologies de la microélectronique. Les temps d'accès sont de l'ordre de la nanoseconde (à comparer à quelques millisecondes pour un disque dur), la Table 2 résume les performances de quelques types de mémoires en termes de consommation électrique, de tension électrique, d'encombrement, et de temps de réponse.

Il existe différentes architectures basées sur des principes de stockage différents. Les mémoires dynamiques, ou DRAM sont les mémoires les plus courantes et celles que l'on trouve dans tous les ordinateurs associés au microprocesseur. Leur principe de fonctionnement est de stocker un bit sous la forme d'une charge stockée dans un condensateur. Le point mémoire est composé alors d'un unique transistor et d'un condensateur (1T1C). Ce sont des mémoires volatiles (qui s'effacent lorsque la mémoire est mise hors tension) qui montre le plus haut niveau d'intégration. Le courant de fuite dans le condensateur oblige cependant à rafraîchir la mémoire de manière fréquente.

Les mémoires statiques (SRAM) ont un principe de fonctionnement différent. Ici, le bit de donnée est stocké dans une structure bistable composé de deux inverseurs tête-bêche. Un point mémoire nécessite six transistors (6T) et occupe de fait une surface plus grande que les DRAM. En contrepartie, le temps d'accès est le plus rapide : 0,4ns. Les SRAM sont utilisés comme mémoire cache dans les microprocesseurs.

Les mémoires Flash sont des mémoires vives non volatiles qui sont de plus en plus présents dans les objets électroniques, ce sont des mémoires Flash que l'on trouve par exemple dans toutes les clefs USB et lecteurs mp3 Ipod. Le point mémoire Flash se compose d'un unique transistors MOS à double grille. Le transistor comporte, placée en dessous de sa grille principale, une grille flottante, isolée électriquement donc entre la grille principale et le canal du transistor. Lorsque l'on impose une tension importante sur la grille principale (de 5 à 12 V), le canal ouvert laisse passer un courant et des électrons de haute énergie (électrons chauds) traversent l'isolant par le mécanisme d'injection de porteurs chauds et chargent la grille. Cette dernière peut dès lors rester chargée pendant une très longue période de temps. En lecture, la présence de la grille flottante chargée va venir écranter la grille principale et modifier la tension de seuil du transistor. Pour effacer le bit de donnée, une forte tension est appliquée sur le drain et les électrons transitent vers le canal par effet tunnel.

	Mémoires volatiles		Mémoires non volatiles		
	DRAM	SRAM	Flash	FeRAM	MRAM
Eléments	1T1C	6T	1T	1T1C	1T1R
Surface	0.13 μm^2	2.36 μm^2	0.16 μm^2	0.57 μm^2	0.44 μm^2
Durée de lecture	15ns	0.4ns	14ns	80ns	25ns
Durée d'écriture et d'effacement	15ns	0.4ns	1 μs	15ns	25ns
Durée de rétention de l'information	64ms	Alimentation	10 ans	10 ans	10 ans
Potentiel d'écriture	2.5 V	2.5 V	12 V	0.9-3.3 V	1.8 V
Energie d'écriture (J/Bit)	1e-16	7e-16	8e-15	2e-14	1e-10

Table 2. Spécifications de différents types de mémoires, Source : ITRS, International roadmap for semiconductors, 2006

Récemment de nouvelles architectures de mémoires non volatiles ont vu le jour. Ce sont les mémoires magnétoresistives et ferroélectriques. Dans le premier cas le point mémoire est construit autour d'une structure composée de deux couches ferromagnétiques séparées par un isolant mince faisant office de barrière tunnel. La première couche possède une magnétisation permanente alors que la magnétisation de l'autre peut être modifiée en appliquant un champ électrique. La lecture revient donc à mesurer la résistance électrique de l'ensemble.

Finalement les mémoires ferroélectriques ou FeRAM sont basées sur l'utilisation d'un matériau ferroélectrique en couche mince (PZT par exemple). L'application d'un champ électrique intense à ce matériau permet de faire varier l'état de polarisation interne de ce dernier. Il existe actuellement une recherche intense dans ce domaine.

4.2.2. Les mémoires micromécaniques

Il existe, on l'a vu, plusieurs types de mémoires basées sur différents mécanismes de modification d'une propriété physique d'un système (état électrique, tension de seuil d'un transistor, charge dans une capacité,...). Il existe également des mémoires utilisant la modification de l'état mécanique d'une micro ou nanostructure. Nous allons décrire ici différentes solutions de mémoire mécaniques.

Plusieurs travaux ont porté sur des structures bistable composées de poutres en flambage[53][57][58]. Ces dispositifs, bien qu'ayant démontré leurs capacité à être commuté dans deux positions d'équilibre mécanique, restent de grande dimension, typiquement plusieurs centaines de microns, les rendant inintéressant du point de vue d'une intégration poussée.

D'autres travaux [45][54][55][56] ont portés sur des dispositifs de plus petites taille, composés d'une poutre en matériau précontraint, typiquement du dioxyde de silicium, se relaxant par flambage dans une direction hors plan. Ces dispositifs en forme de ruban sont obtenus par oxydation en phase vapeur du silicium puis lithographie et micro usinage du silicium. Le contrôle de l'épaisseur des couches de SiO₂ permet de déterminer avec précision les conditions de flambage. Néanmoins l'actionnement de ces rubans perpendiculairement au plan du substrat n'est pas évident et n'a pas été montré.



Figure 62. Image SEM des points mémoire à micropoutres développées par la société Cavendish Kinetics.

La société Cavendish kinetics [52], a développée une mémoire micromécanique basée sur l'utilisation d'un poutre encastree – libre et actionnée électrostatiquement. La poutre, que l'on peut voir sur la Figure 62, est

amenée en flexion par une électrode jusqu'à ce que l'extrémité de celle-ci vienne en contact sur une autre électrode métallique. Aux petites échelles, les forces de surfaces étant importantes, l'extrémité de la poutre se colle et reste dans une position déformée. En appliquant une différence de potentiel entre la poutre et une troisième électrode située au-dessus de la poutre, il est possible alors, toujours via l'attraction électrostatique de décoller la poutre et ainsi de revenir à la position originelle. Il a été reporté que la société a récemment réussi à intégrer cette technologie de micropoutre bistable avec une technologie microélectronique pour produire des mémoires. Les valeurs de tension de 1,8 V ont prouvé être suffisante pour opérer les fonctions d'écriture et d'effacement sur ces dispositifs. Cela reste à l'heure actuelle la solution la plus aboutie, mais très peu d'informations sont disponibles sur cette technologie.

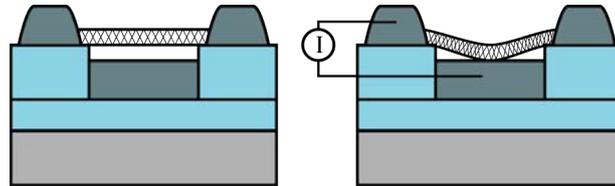


Figure 63. Schéma de principe d'un point mémoire à nanotube.

Récemment une nouvelle technologie a été décrite dans la littérature, faisant usage de nanotubes de carbone comme élément central d'un système de mémoire nanomécanique [61][62][63]. Dans ces dispositifs illustrés sur la Figure 63, plusieurs nanotubes sont accrochés entre deux plots métalliques et suspendus au-dessus d'une électrode métallique, elle même déposée sur une couche isolante. En appliquant une différence de potentiel entre le nanotube et cette électrode, il est possible par effet de la force électrostatique de tordre le nanotube jusqu'à ce que ce dernier arrive en contact avec l'électrode métallique. La position fléchiée est ensuite maintenue par les forces de contact, de type forces de Van der Waals. La concurrence entre les forces de contact et la raideur du nanotube en font un système bistable. La lecture se fait en mesurant le courant passant par le nanotube vers l'électrode de contact. La fonction d'effacement s'opère, comme dans le dispositif de Cavendish Kinetics, en appliquant une tension sur une électrode située au-dessus du nanotube pour l'extraire de sa position collée. Même si ce système paraît prometteur en termes de densité et d'énergie de basculement, il reste de gros problèmes technologiques à résoudre pour arriver à une solution viable. Le principal problème étant le contrôle du dépôt des nanotubes.

Les mémoires nano mécaniques ne peuvent pas actuellement prétendre à entrer en compétition avec les mémoires électroniques, une des premières tâches de caractérisation sera alors de comparer ces données par rapport à l'état de l'art. Un avantage toutefois que les mémoires nanométriques auront sur les autres types de mémoire est l'insensibilité aux rayonnements ionisants.

4.3. Mémoire nanomécanique bistable dans le plan

4.3.1. Principe

L'idée est de fabriquer un dispositif de stockage de l'information sous forme mécanique grâce à l'utilisation d'une micro structure déformable ayant plusieurs positions de stabilité. Cette structure appelée poutre bistable est composée d'une poutre en dioxyde de silicium encadrée à ses deux extrémités. Le matériau est obtenu par oxydation du silicium et se trouve contraint. Lorsque la poutre est suspendue (par gravure du silicium sous-jacent), elle se déforme, c'est ce que l'on nomme le flambage, et elle se relaxe dans une des deux position de stabilité (voir le schéma sur la Figure 64).

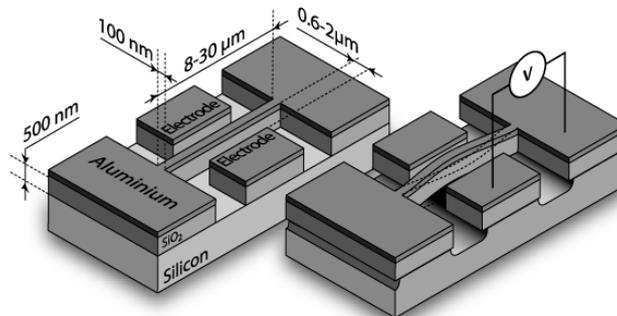


Figure 64. Schéma de principe d'une mémoire nano mécanique à poutre bistable.

Pour écrire un bit d'information il faut actionner la structure d'une position à l'autre, ce qui est rendu possible grâce à la présence d'électrodes sur les cotés de la poutre et de la force d'attraction électrostatique (avec, donc, une différence de potentiel entre l'électrode et la poutre). L'oxyde de silicium étant un isolant, une fine couche de métal (Chrome/or ou Aluminium) est donc déposée sur la structure. La lecture se fait soit par couplage capacitif soit par contact ohmique entre la poutre et une des électrodes. La structure doit, en outre, être de petites dimensions, quelques μm^2 , pour prétendre offrir de grandes capacités de stockage.

Pour réaliser un module de mémoire contenant une grande quantité de points mémoires, il est possible d'utiliser une configuration à points croisés comme représentée sur la Figure 65. Sur cet exemple, un module 2×2 est composé d'un tableau de micropoutres et de pistes de connexion horizontales et verticales formant les lignes de bit (*bit line*) et les lignes d'écritures haute et basse (*top write* et *bottom write line*). En utilisant un multiplexeur, il est possible d'utiliser une combinaison de lignes de bit et de ligne d'écriture pour soit écrire soit effacer une donnée à un endroit précis. En appliquant une ddp suffisamment élevée pour permettre le basculement d'une poutre entre les lignes de bit et d'écriture, il est possible alors d'enregistrer les données de manière séquentielle. La lecture se fait de la même façon en appliquant cette fois-ci un signal AC de haute fréquence de manière à mesurer l'impédance entre la poutre flambée et son électrode.

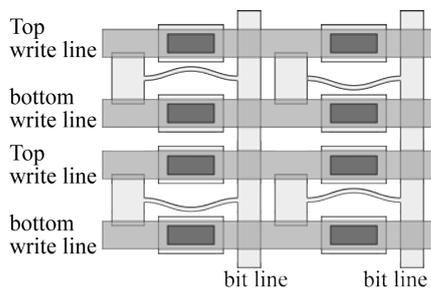


Figure 65. Configuration d'un module de mémoire (2×2) à base de micropoutres

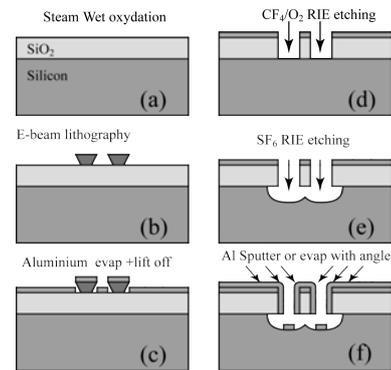


Figure 66. Procédé de fabrication

4.3.2. Procédé de fabrication

Le point clé dans l'élaboration de ce type de dispositif tient à la couche structurale et à la valeur de sa contrainte interne qui va imposer le flambage de la poutre encastrée et conditionner le caractère bistable de la structure. Dans le cas présent, nous avons utilisé le dioxyde de silicium comme matériau pour la poutre. Le SiO_2 est obtenu par oxydation thermique d'une tranche de silicium dans un four d'oxydation à 1100°C pendant plusieurs heures et en présence d'oxygène et de vapeur d'eau. Cette technique, qui est classique, permet d'obtenir des couches minces de SiO_2 de très bonne qualité et montrant une contrainte interne élevée et reproductible. Des mesures à l'ellipsomètre ont montré des épaisseurs de 431 et 866nm d'épaisseur pour les deux lots de plaquette que nous avons oxydés avec des temps différents.

Pour obtenir un flambage dans le plan, les poutres doivent donc montrer un profil vertical, dont la section est plus haute que large. Pour obtenir cette finesse de motifs nous avons utilisé la lithographie électronique et non pas la lithographie optique, cette dernière étant limitée à environ un micron de large pour les traits les plus fins.

A partir des plaquettes de silicium oxydées, la lithographie électronique a été opérée à l'université de Tokyo dans la salle blanche du *VLSI Design and Education Center (VDEC)* avec le E5112 d'Advantest qui est une machine de lithographie ebeam de production mise à disposition des chercheurs. Le procédé de *lift-off* a été fait avec une résine ZEP520 A-7 insolée à $120 \mu\text{C}.\text{cm}^{-2}$ sur une plaque entière. Après le développement une couche métallique d'environ 50nm est déposée par évaporation puis la résine est enlevée pour ne laisser que les motifs désirés et formant le masque de gravure.

La gravure des structures est faite par gravure ionique réactive avec un plasma de 70W pour 7 Pa dans un mélange de gaz CF_4/O_2 . Cette étape permet de graver à flancs verticaux le dioxyde de silicium et de former les poutres de section rectangulaire. Enfin, une dernière étape de gravure plasma isotropique au SF_6 permet de libérer la micropoutre en SiO_2 en gravant le silicium du substrat.

Le procédé de fabrication a été également complété par des essais de dépôt par évaporation et pulvérisation pour couvrir les flancs des micropoutres de manière à rendre ces dernières conductrices pour

augmenter l'efficacité de l'actionnement électrostatique. Cependant quelques difficultés ont été observées pour obtenir un dépôt vertical montrant une bonne adhérence.

Les premiers dispositifs ont été fabriqués en Juillet 2006, les images au microscope électronique sont visibles sur la Figure 67. Comme prévu, les poutres flambent latéralement (aléatoirement à gauche ou a droite) lorsqu'elles sont suspendues par la gravure isotropique du silicium.

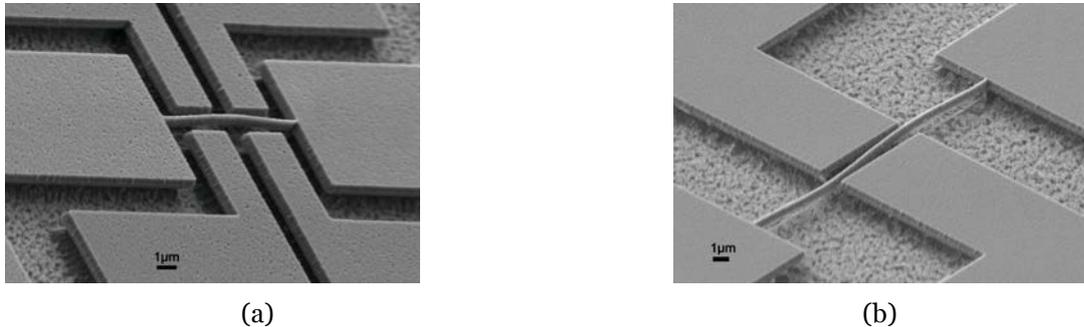


Figure 67. Image au microscope électronique des mémoires nano mécaniques. On remarque les électrodes d'actionnement sur les côtés. Sur la photo b, la poutre se positionne de manière stable selon le second mode.

4.4. Etude du flambage statique

Après examen au microscope électronique, il apparaît que les poutres ont une section trapézoïdale de 260nm à leur base et de 60nm sur la partie supérieure. L'épaisseur totale qui est définie lors de la phase d'oxydation humide est d'environ 500nm. La déflexion centrale des poutres a été mesurée au microscope électronique et est reportée en fonction de la longueur sur la Figure 70. (pour deux largeurs initiales des poutres). Il apparaît que les poutres flambent à partir de 10 microns de long.

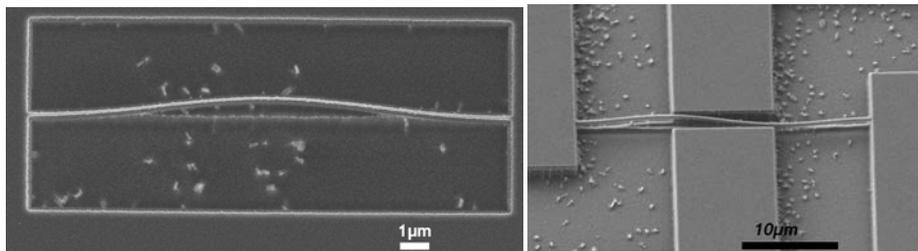


Figure 68. Image au microscope électronique à balayage (émission d'électrons secondaires) des poutres flambées.

Une formulation classique du problème [46][47] est l'équation d'Euler-Bernoulli qui se présente sous la forme d'une équation différentielle du quatrième ordre du déplacement latéral $w(x)$ d'une poutre:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + n^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad \text{avec} \quad n^2 = \frac{P}{EI} \quad \text{Equ. 20}$$

ou P est la force axiale, E est le module d'Young du matériau composant la poutre, et I le moment d'inertie de cette dernière. Dans le cas d'une poutre encastree – encastree, les conditions aux limites s'écrivent :

$$w(0) = w(l) = 0 \quad \text{et} \quad w'(0) = w'(l) = 0$$

La solution de cette équation est un ensemble de fonctions propres orthogonales pour lesquelles les valeurs n_i Satisfont l'équation 22:

$$1 - \cos(n_i L) = \frac{1}{2} n_i L \sin(n_i L) \quad \text{Equ. 21}$$

Pour les valeurs paires ($i=0,2,4,..$) nous avons les solutions suivantes:

$$w_i(x) = A_i [1 - \cos(n_i x)] \quad \text{Equ. 22}$$

et pour les valeurs impaires ($i=1,3,5,..$) nous obtenons les solutions suivantes:

$$w_i(x) = A_i \left[1 - \cos(n_i x) - \frac{2}{n_i L} (n_i x - \sin(n_i x)) \right] \quad \text{Equ. 23}$$

Les équations 23 et 24 sont représentées sur la Figure 69 pour $i=0, 2, 4,$ et $1, 3, 5,$ respectivement.

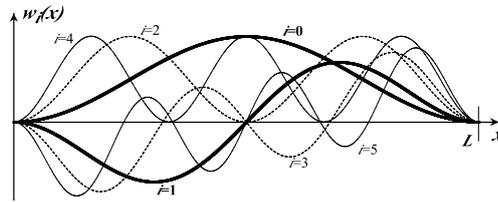


Figure 69. Fonctions propres du problème d'Euler-Bernoulli pour une poutre encastée – encastée.

Nous pouvons voir sur la Figure 68 que la poutre flambe suivant deux déformées correspondant au premier ($i=0$) et second ($i=1$) mode, respectivement. Le dernier cas est observé sur une poutre de $30\mu\text{m}$ de long avec $1\mu\text{m}$ d'entrefer entre les électrodes d'actionnement. Cette petite distance empêche la poutre de flamber suivant le premier mode et force ainsi le second mode. Un modèle plus complet a été établi par Timoshenko, celui-ci prend en compte la contrainte de cisaillement [60] et les rotations [64][65][66].

En ce qui concerne la stabilité des modes d'ordre supérieur, S.M. Carr et ses co-auteurs[48][49][50] ont montré que des structures équivalentes d'échelle nanométrique (longueur 10 à $20\mu\text{m}$, largeur 200nm et épaisseur de 500nm) peuvent exhiber des états mécaniquement stables composés d'une superposition de plusieurs modes. Des poutres ayant un rapport de forme élevé (longueur sur largeur supérieure à 80) flambent ainsi dans une superposition de modes, alors que les poutres de rapport de forme inférieur à 80 flambent selon le premier mode, ce qui est notre cas.

Pour étudier le flambage statique nous avons réalisé des poutres de différentes longueurs (de 4 à $20\mu\text{m}$) et suivant deux largeurs nominales (80 et 100nm). Une fois libérées, la flèche est mesurée au microscope électronique. Les résultats ont été reportés sur la Figure 70. Les poutres les plus courtes de 4 et $6\mu\text{m}$ de long ne flambent pas, étant de toute évidence sous le critère de flambage. Les poutres de 6 et $8\mu\text{m}$ montrent quant à elles une déflexion très faible qui est sous la précision de mesure du microscope électronique.

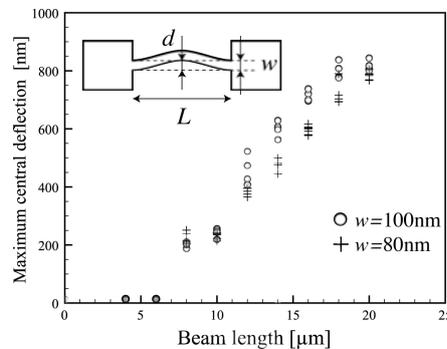


Figure 70. Déflexion des poutres (flambage), mesuré au centre, en fonction de leur longueur pour deux largeurs différentes.

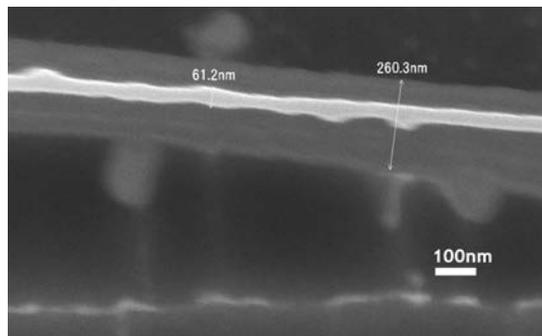


Figure 71. Image au microscope électronique (vue de dessus) d'une section de la poutre flambée. On remarque la couche métallique en surface.

L'examen des profils des poutres au microscope nous a également permis de mesurer la largeur et la section des poutres qui ne sont pas uniformes dans la longueur. Les poutres montrent en effet une largeur d'environ 60nm dans la partie centrale au niveau du masque métallique et de 120nm sur les bords, près de l'encastrement. La largeur, au niveau le plus bas des poutres, est de 260nm pour les poutres de 866nm d'épaisseur ce qui montre que la section n'est pas rectangulaire mais trapézoïdale, ceci est dû à la gravure ionique qui produit des murs pas tout à fait verticaux. Les poutres réelles sont donc éloignées des modèles de poutres à section rectangulaire.

L. Nicu [54], a développé un modèle pour déterminer la contrainte résiduelle dans des couches de SiO₂ en mesurant la flèche de poutres flambées. Cette méthode estime le potentiel total d'une poutre basée sur le modèle d'Euler Bernoulli. La contrainte interne de la couche est exprimée en fonction de la flèche, des dimensions de la poutre et du module d'Young. Avec ce modèle la contrainte critique à partir de laquelle une poutre de dimension donnée commence à flamber peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{3} E \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 \quad \text{Equ. 24}$$

L_0 et h étant les longueurs et épaisseur de la poutre. Selon ce modèle et pour une poutre de SiO₂ thermique ayant une contrainte résiduelle compressive de 270 MPa (valeur standard), une épaisseur de 120nm et un module d'Young de 69GPa, la longueur à partir de laquelle une poutre flambera sera alors de 3,4µm. Ce qui est à comparer aux valeurs reportées dans la Figure 70 et qui montre que les poutres flambent à partir de 8µm de long.

Dans le travail de L.Nicu[54] les poutres sont fabriquées à partir d'une couche mince de SiO₂ qui flambe hors plan. Dans ce cas-là, l'épaisseur de la poutre est contrôlée par le temps d'oxydation et est relativement constante dans le plan et mesurable avec une bonne précision, par ellipsométrie par exemple. Dans notre cas, l'épaisseur de la poutre correspond à une dimension obtenue par lithographie et, on l'a vu, n'est pas du tout constante le long de la poutre. En ajoutant au fait que la section de nos poutres n'est pas rectangulaire, on arrive à beaucoup d'imprécisions entre le modèle et la poutre réelle. De plus l'épaisseur de la poutre entre dans l'équation à la puissance trois. De petites variations de ce paramètre vont donc entraîner de grandes variations dans le résultat. C'est pourquoi, il existe un décalage entre les calculs et les valeurs mesurées.

4.5. Analyse du flambage en éléments finis

Pour étudier le basculement des poutres bistables, nous avons développé un modèle en éléments finis avec le code FEM ANSYS. Les simulations sont de type structurelles non linéaires et sont faites dans le temps, en mode transitoire.

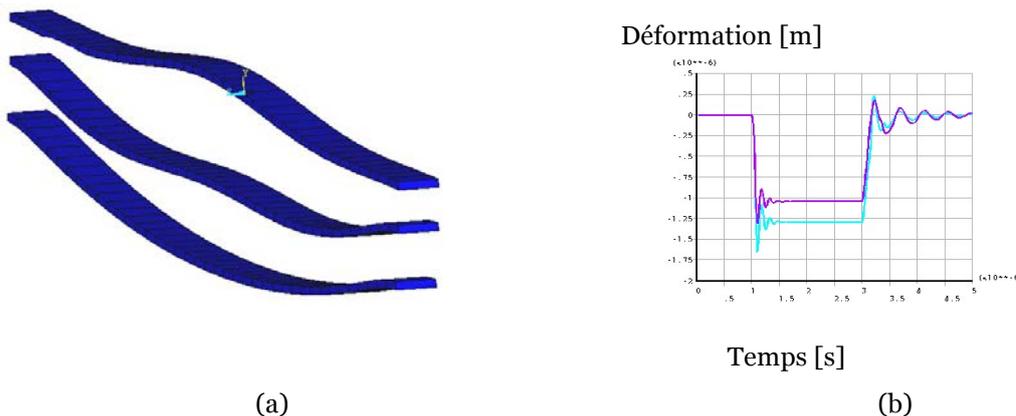


Figure 72. Analyse en éléments finis du flambage d'une poutre pré-formée encastree à ses deux extrémités et soumise à une pression. Analyse temporelle non linéaire, (a) maillage et déformée de la structure à trois moments, (b) déformation au cours du temps en deux points de la poutre, au centre et au quart de la longueur.

Le premier modèle est celui d'une poutre pré-formée dont la forme initiale est celle du premier mode que l'on peut observer sur la Figure 72(a). L'application d'une pression constante sur l'épaisseur de la poutre force le basculement de cette dernière dans la seconde position, mais l'arrêt de cette pression implique le retour de la poutre à sa position initiale. Ces résultats montrent qu'une poutre pré-formée n'est pas bistable, la poutre revient à sa position d'origine lorsque les charges d'actionnement cessent. Ceci peut être modifié en doublant les poutres, comme illustré sur la Figure 73. Cette forme de poutre empêche le passage par le

second mode en interdisant les rotations vers le centre de la poutre (au niveau du point d'ancrage entre les deux poutres). On peut voir toujours sur la Figure 73 une micro structure de ce type [58] qui est actionnée par une pointe de test et qui reste sur sa seconde position de stabilité.

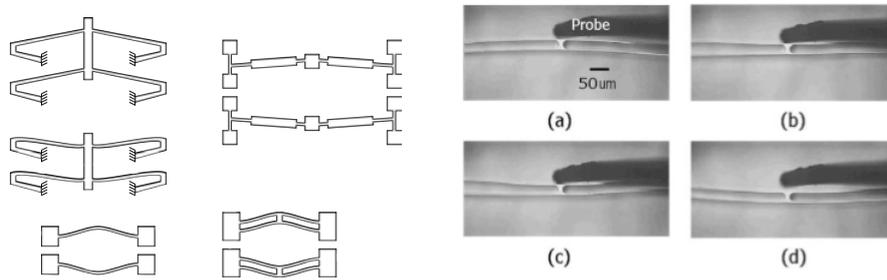


Figure 73. Schéma de différentes structures déformables bistables et essais de basculement d'une structure à double poutre pré-formée [58].

Le second modèle que nous avons développé est celui d'une poutre simple de section rectangulaire qui est mise sous contraintes par compression longitudinale. Le flambement d'un côté particulier est réalisé en imposant une légère force latérale ce qui force le basculement de la poutre d'un côté. Cette dernière se stabilise selon le premier mode. Cette première solution nous fournit donc les conditions initiales pour mener à bien l'analyse transitoire du basculement.

La simulation se fait alors en transitoire en imposant un amortissement interne au matériau pour aider à la convergence des calculs. Une force ponctuelle est appliquée latéralement dans le sens opposé à la déflexion de la poutre. La Figure 74 montre les différentes étapes du calcul en commençant par la poutre non contrainte (a), la poutre contrainte et flambée du côté droit (b), l'application de la force latérale et la poutre se déformant selon le second mode (c) et enfin la poutre dans le second état de stabilité suite à l'annulation de la force latérale. Le déplacement du point central est tracé en fonction du temps sur la courbe à côté. Les dimensions et propriétés du matériau employé ont été définies pour coller au cas réel de la poutre en SiO_2 . Contrairement au cas précédant la poutre sous contrainte est bistable puisqu'elle reste dans la seconde position lorsque l'on retire la force.

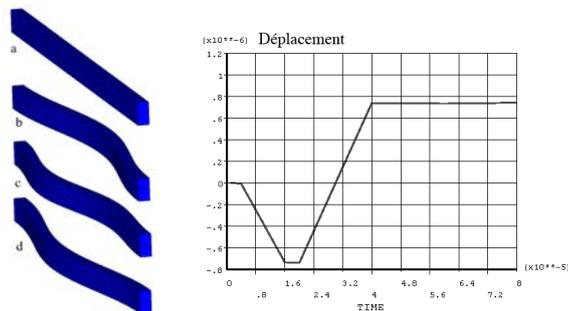


Figure 74. Déformée de la structure à différents temps et déplacement du point central en fonction du temps.

Ce modèle en éléments finis nous permet également d'étudier l'intensité de la force à appliquer pour effectuer le basculement en fonction de la position du point d'appui le long de la poutre. La valeur de cette force passe par un minimum à environ 0,4 fois la longueur nominale de la poutre.

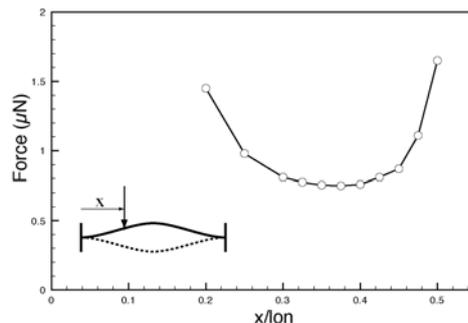


Figure 75. Force à appliquer pour provoquer le basculement de la poutre bistable en fonction de la position du point d'appui, résultats de simulation FEM.

4.6. Mesures

Le comportement mécanique des micropoutres a été évalué par actionnement mécanique. Avec des pointes de test, les micropoutres ont été forcées par translation de la pointe (dont l'extrémité est visible sur la Figure 76). La taille des micropoutres rend cette manœuvre délicate et un certain nombre d'entre elles ont été détruites. Cependant nous avons réussi à forcer le basculement de certaines poutres depuis la position de flambage prise lors de la libération de la poutre vers la seconde position. Les poutres ainsi basculées maintiennent leur position, preuve de la bistabilité de la structure. On peut observer sur la Figure 76 la première puis la seconde position de stabilité.

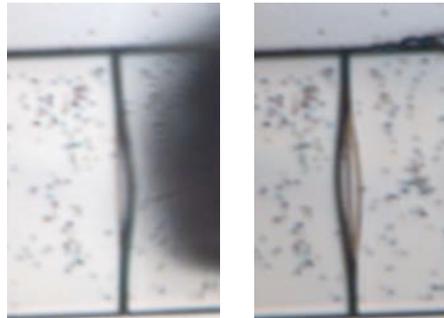


Figure 76. Image optique au microscope (100x) de l'actionnement des micropoutres, actionnement mécanique via les sondes de test.

Les essais de basculement par actionnement électrostatique ont été effectués avec un échantillon de longueur 30 μ m comportant deux électrodes de chaque côté de la poutre. Cette dernière étant mise à la masse, une des électrodes a été connectée à un générateur de signaux lui-même branché sur un amplificateur pour pouvoir appliquer de hautes tensions, les autres électrodes restant flottantes. La Figure 77 montre le basculement de la poutre prise par une caméra CCD placée sur un microscope avec grossissement 100x. La Figure 77(a) montre la poutre à l'état initial, elle est flambée sur le côté gauche. Un signal de 100kHz est appliqué sur l'électrode en bas à droite et la tension crête à crête est montée jusqu'à la valeur de 90V ce qui provoque le basculement de la poutre sur la seconde position de stabilité, flèche vers la droite (Figure 77 b). La poutre reste en position lorsque la tension est ramenée à zéro. Enfin le signal est appliqué sur l'électrode de bas à gauche pour basculer la poutre vers sa position initiale. On note au passage un décollement des couches métalliques qui s'est produit vers les coins des supports en haut à droite.

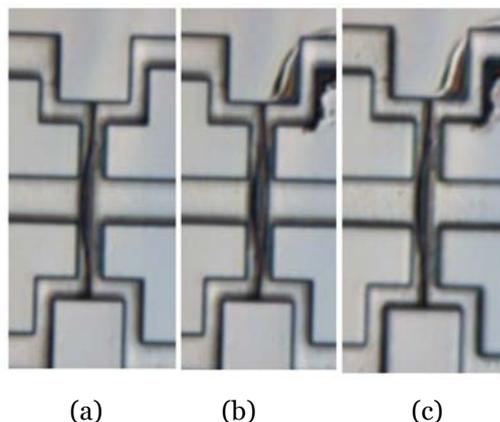


Figure 77. Image optique au microscope (100x) de l'actionnement des micropoutres. Actionnement électrostatique par les électrodes latérales, Tension de 90V (100kHz) appliquée entre la poutre et une des électrodes. On remarque le basculement d'un état stable vers un autre puis le retour à l'état initial via l'application de la tension sur l'électrode opposée.

Ces résultats d'actionnement par la force électrostatique prouvent la possibilité de stocker un bit d'information dans une structure bistable de petite dimension. La valeur élevée de la tension nécessaire au basculement est due au fait que la poutre n'est couverte de métal qu'en surface, ce qui rends l'actionnement électrostatique peu efficace puisque qu'elle n'a lieu que par les franges, les flancs verticaux de la poutre d'étant pas recouverts de métal.

Nous avons tenté en vain de recouvrir les flancs par du métal en utilisant l'évaporation et la pulvérisation, mais de problèmes techniques de couverture de métal nous ont fait y renoncer. C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser un autre matériau pour la poutre.

4.7. Poutres en Silicium amorphe

Les développements autour des poutres bistables effectués au Japon ont montré la faisabilité du système pour agir en tant que point mémoire, cependant les performances en termes de tension nécessaire au basculement sont clairement insuffisantes. Afin de remédier à ces problèmes nous avons décidé de nous orienter vers un autre matériau pour composer la structure déformable. Ce matériau doit pouvoir être déposé sous contraintes compressives, doit être conducteur et enfin doit pouvoir se graver par plasma de manière anisotropique pour obtenir une section rectangulaire. Nous avons donc fait le choix d'utiliser le silicium amorphe hydrogéné (α -Si:H) que nous déposons sur une couche de SiO_2 par dépôt chimique sous phase vapeur assisté par plasma (PECVD).

Le procédé de fabrication est légèrement différent puisqu'il est nécessaire de déposer au préalable une couche de SiO_2 de manière à pouvoir isoler la poutre du substrat et des électrodes. Cette couche d'oxyde est gravée par voie humide à l'acide fluorhydrique. La lithographie est également opérée par écriture directe au faisceau d'électrons avec une résine positive. Les performances en termes de finesse avec l'équipement de la salle blanche de Montpellier sont néanmoins assez éloignées de ce que je pouvais obtenir avec la machine Advantest à Tokyo. Les poutres ont alors des dimensions de 10 à 35 μm de long pour une largeur d'environ 300 nm.

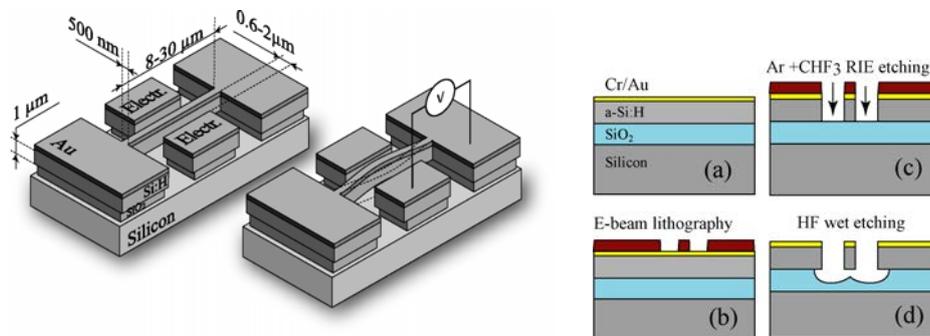


Figure 78. Schéma et procédé de fabrication des micropoutres bistables en silicium amorphe.

Le α -Si:H que nous déposons sur une épaisseur de quelque 800 nm montre une contrainte résiduelle assez importante qui permet aux poutres de flamber. On peut voir notamment sur la Figure 79 le flambage statique d'une poutre dans ses deux positions de stabilité. La courbe tracée Figure 79 montre la flèche en fonction de la longueur de la poutre. On obtient à peu près des résultats identiques à ceux qui sont obtenus avec une poutre en SiO_2 . Cependant la valeur de la contrainte interne, obtenue par calcul ou par simulation FEM correspond à environ 40 MPa ce qui est plus faible que ce que l'on a trouvé pour le SiO_2 .

Le silicium amorphe hydrogéné est un matériau qui est intrinsèque dans les conditions de dépôt que nous employons (PECVD). Il est donc hautement résistif et nécessite alors une étape de dopage qui est réalisée avec la technique du *spin-on-dopant*. Un borosilicate est déposé à la tournette sur le wafer contenant la couche de α -Si:H. Le wafer est ensuite recuit à 950 °C pendant 20 mn ce qui permet de faire diffuser les atomes de Bore dans le matériau et ainsi d'obtenir un profil de dopage. Les essais effectués ont montré effectivement un dopage de type p mais également une recristallisation partielle du matériau, passant de amorphe à micro ou nanocristallin.

Cette étape de recuit agit également sur la composition du matériau faisant diffuser l'hydrogène et recristalliser le silicium, ce qui a pour effet, in fine, de changer les valeurs de contraintes internes. En outre le dopage au Bore, comme il a été pratiqué a tendance à réduire les contraintes internes, ce qui va à l'encontre de ce qu'il nous faut.

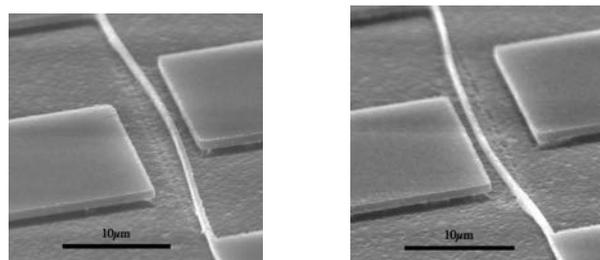


Figure 79. Images au MEB du flambage statique des micropoutres en silicium amorphe et mesure de la flèche en fonction de longueur des poutres pour ce même matériau.

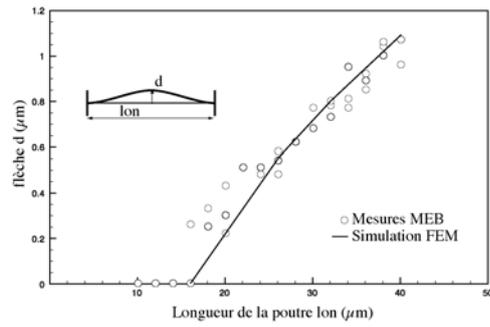


Figure 80. Flèche en fonction de la longueur de la poutre, mesures et simulations en éléments finis.

Actuellement le facteur limitant dans ce projet est la précision de la gravure électronique avec l'équipement disponible à Montpellier qui ne nous permet pas pour l'instant d'obtenir des rapports épaisseur / hauteur nécessaire à un flambage dans le plan. Nous y travaillons.

5. Conclusions

Cette première section du document a décrit mon travail de recherche dans le domaine des MEMS et plus particulièrement de la micromécanique.

La première partie a montré le développement d'un capteur d'empreintes digitales intégré qui mesure les empreintes à l'aide d'une rangée micropoutres. Ces travaux ont montrés la possibilité d'utiliser une transduction purement mécanique pour scanner les reliefs du doigt. Contrairement à ce que l'on pouvait attendre les micropoutres, bien que très fines, ont montré une étonnante robustesse au passage répété d'un doigt à la surface du capteur. Ceci est du à la fois à la présence de la tranchée micro-usinée qui limite la pénétration de la peau et donc la flexion des micropoutres mais également au fait que les micropoutres peuvent supporter facilement de très larges flexions sans se rompre. Le capteur que nous avons développé a aussi montré quelques avantages dont notamment :

- La sensibilité des micropoutres avec une variation de résistance électrique de la jauge (jusqu'à 6%) qui in fine produit un signal très contrasté.
- Un circuit de lecture/amplification qui permet de soustraire le bruit de fond et les dispersions technologiques.
- La présence d'un convertisseur analogique numérique qui permet de piloter le capteur en tout numérique.
- Une faible surface de silicium du à une conception de type capteur à balayage et une technologie CMOS relativement peu couteuse qui permet d'envisager des capteurs à bas coût dans l'optique d'une production en grand volume.
- Un système tout intégré avec une partie de traitement de l'image et de reconnaissance spécifique à notre capteur qui comporte quelques innovations comme la détection de présence et le traitement des non linéarités de balayage.

Au final ce travail universitaire qui a été mené par deux étudiants en thèse et moi même a montré une solution technique innovante pour la mesure des empreintes digitales par un capteur MEMS intégré de manière monolithique sur une technologie CMOS. La faible surface du capteur, du à la méthode de balayage par ligne unique et la relative ancienneté du process CMOS font que ce capteur avait un réel potentiel économique dans le cadre d'une production en volume. Les performances finales en termes de taux de fausse acceptation et de faux rejet ne sont pas à l'état de l'art mais quelques améliorations du système auraient pu y remédier. Ce travail a également démontré l'intérêt de la technique d'intégration monolithique sur CMOS qui est fréquemment délaissé au profit de solutions hybrides, comme ce fut le cas pour le capteur de STmicroelectronics.

La deuxième partie de cette section a décrit mes travaux entrepris dans le domaine des microgénérateurs MEMS pour la récolte de l'énergie vibratoire environnante. Cet axe de recherche a été imaginé à mon entrée au CNRS et en grande partie avec mon collègue Skandar BASROUR. Ce projet a bénéficié des le début d'un financement par l'Europe et nous a permis d'être dans les premiers en France à publier dans ce domaine (POWERMEMS 2005). Nous avons produit un microgénérateur piézoélectrique résonnant à 200Hz qui a commencé par fournir la prodigieuse puissance de 38nW pour terminer après quelques améliorations par atteindre notre objectif du μ W.

Ces systèmes sont étroitement liés à l'application qui leur est destiné et surtout au spectre de vibration du lieu dans lequel ils vont opérer. De nombreux travaux ont été depuis repris pour élargir la gamme de fréquence ou le système est efficace en travaillant notamment avec les non linéarités qui nous avons découvert avec les premiers dispositifs. Au niveau du système, nous avons commencé à explorer des architectures de circuits de gestion de l'énergie, pour exploiter au mieux le courant électrique générer par le microsystème et tenir compte des modules de stockage.

Enfin les deux dernières parties ont traité de mes travaux dans l'équipe du Pr. Toshiyoshi à Tokyo. Le premier axe a concerné le développement d'un système de mesure des vibrations d'un microrésonateur à l'aide d'une jauge de déplacement à émission de champ. Même si les résultats obtenus n'ont pas été époustouflants nous avons quand même réussi à montrer une modulation de l'émission électronique en fonction du déplacement d'un microrésonateur. Si cette technique est intéressante sur le papier, pour détecter des petits mouvements, elle reste tributaire de la stabilité de l'émission d'électrons dans le vide. Or l'émission par une pointe de très faible rayon de courbure est très sensible et la pointe peut rapidement se transformer sous l'effet de l'évaporation de champ par exemple. Les développements technologiques en salle blanche ont été par contre très intéressants. La technique de microfabrication d'une pointe dans le plan sera sûrement réutilisée dans un projet de générateur de flux gazeux par effet corona.

Le second projet que j'ai mené au Japon concernait les mémoires nanomécaniques. Ce projet a mené à un premier dispositif fonctionnel qui a pu être actionné de manière électrostatique avec cependant une tension de déclenchement de 90V qui est évidemment beaucoup trop élevée. J'ai continué à mon retour en France à travailler le sujet en changeant de matériau pour m'affranchir de certaines limitations. Je suis en train de regarder également des techniques de lithographie alternatives, de type *edge lithography* qui permettraient de produire des poutres suspendues de type ruban sans avoir recours à la lithographie électronique.

Les conditions de travail au Japon étaient exceptionnelles, tant au niveau humain qu'au niveau technique et scientifique par la quantité de matériels et de machines à ma disposition. J'ai appris énormément de techniques de microfabrication, j'ai passé de nombreuses heures en salle blanche avec mes collègues. Malheureusement, deux ans c'est très court et il a fallu abrégé de nombreuses expériences et développements pour mon retour en France.

Partie II

Microthermique

Introduction

Actuellement la microélectronique fait face à un problème de dissipation de la chaleur par les circuits intégrés. L'intégration, dans un centimètre carré de silicium, de quelques centaines de millions de transistors cadencés par des horloges à plusieurs GHz fait que les circuits intégrés doivent dissiper maintenant des puissances thermiques considérables (plusieurs centaines de Watts, comme illustré sur la Figure 81). C'est en effet à cause d'un trop grand échauffement des circuits que Intel a décidé récemment de freiner la course à la fréquence d'horloge de ses processeurs.

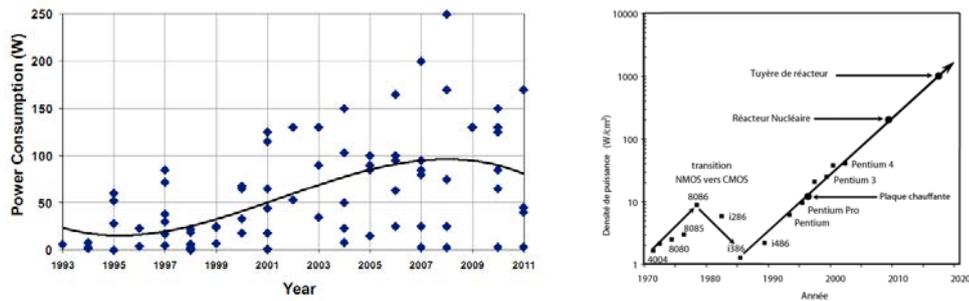


Figure 81. Consommation et densité de puissance en fonction de l'année de production de circuits intégrés.

Les températures atteintes à la surface des circuits intégrés posent quantités de problèmes de fonctionnement, comme par exemple le décalage des horloges, ainsi que de fiabilité. En effet concernant ce dernier point, la relation entre la température d'un circuit intégré et son taux de défaillance est exponentiel. Au niveau de l'extraction de la chaleur, bien que de nombreuses solutions techniques aient été développées [72], il n'est pas toujours possible d'extraire facilement et à moindre coût cette chaleur.

En amont, plusieurs solutions ont été proposées pour diminuer la dissipation thermique, à la fois au niveau technologique (plus basse consommation des transistors) mais également au niveau de la conception des circuits. Ces méthodes et techniques, nécessitent toutefois des outils d'analyse et d'évaluation de la dissipation de chaleur.

Les travaux de recherche que j'ai effectué dans ce domaine ont concerné tout d'abord la caractérisation thermique des boîtiers de circuits intégrés, au sein du projet PROFIT puis, en coopération avec le GDR micro et nanothermique, l'application de plusieurs techniques de thermographie à l'analyse de dissipation thermique des circuits intégrés. Puis enfin au développement d'un outil de prédiction des dissipations thermiques à partir de modèles de circuits associés au dessin de masque.

6. Thermique des circuits intégrés (2002-2005)

6.1. Thermographie des circuits intégrés

6.1.1. Introduction

Cette activité de recherche se place dans le cadre du GDR micro et nano thermique du CNRS dirigé par Sebastian VOLZ de l'EM2C. Ce GDR se compose de différentes équipes de physiciens et de thermiciens qui développent des outils et expériences de mesure de la température aux petites échelles ainsi que des études plus théoriques sur les flux de chaleur aux petites dimensions et sur les interactions optiques en champ proche dont notamment les échanges thermiques par radiation.

Au sein du GDR micro et nanothermique, j'ai apporté une problématique qui est l'analyse et la mesure des températures dans les circuits intégrés de dernières générations. En effet, L'imagerie thermique classique, c'est à dire par mesure du rayonnement infrarouge direct est limité en résolution spatiale à environ 10 μ m par pixel à cause des effets de diffraction pour longueurs d'onde mesurées.

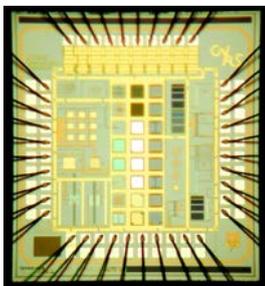
La technique de thermographie nécessaire à l'étude des transferts de chaleur dans les circuits intégrés doit posséder une résolution spatiale et temporelle bien au delà de ce qui est disponible actuellement. C'est pourquoi nous avons étudié, en coopération avec les chercheurs développant ces techniques, les méthodes de thermographie à sonde locale mais aussi les méthodes optiques dans le visible.

L'action de recherche principale dans ce projet du GDR a été la conception et la fabrication de circuits intégrés dédiés à certaines expériences de micro thermique. Dans ce projet, nous avons conçu au laboratoire TIMA des circuits intégrés (avec mon collègue Kholdoun TORKI) que nous avons ensuite fait fabriquer dans une technologie CMOS standard. Les circuits ont été ensuite mis a disposition des équipes du GDR pour leurs expériences respectives. Deux puces ont été ainsi fabriquées, l'une appelée puce multiprojet comporte un ensemble de structures spécifiques à des expériences de thermographie (à sonde locale ou optique sans contact), l'autre est dédié spécifiquement à l'étude de l'échauffement des circuits intégrés numériques.

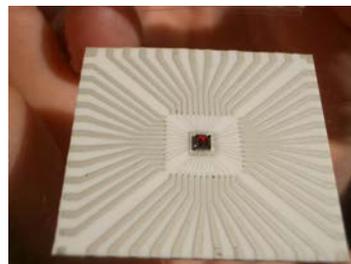
6.1.2. Puce Multi projets GDR

La puce, visible sur la Figure 82, comporte un ensemble de structures destinées à diverses expériences de thermographie aux petites échelles. Les expériences menées sur cette puce par les équipes du GDR sont les suivantes :

- Thermoreflectance : ESPCI et LPMOH, calibration de la méthode de mesure
- Thermographie à sonde locale (fil de Wollaston) : LEO, EM2C et CETHIL
- Thermographie à sonde locale (AFM à effet Seebeck intrinsèque) : FEMTO ST
- Micro convection : EM2C
- Mesure des coefficients Seebeck : TIMA



(a)



(b)

Figure 82. Puce multi projet pour expériences de micro thermique, photo de la puce (a) et vue du montage sur PCB céramique.

Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications communes dans le cadre de la conférence THERMINIC [79][78][77][76].

6.2. Thermoréflectance de circuits intégrés

6.2.1. Principe de la mesure de température par thermoréflectance

La technique de la thermoréflectance, mise en œuvre par mes collègues de l'ESPCI, permet de produire des images thermiques à partir de la mesure des variations de réflectivité d'une surface avec la température. Puisque l'indice optique d'un matériau dépend de la température, la réflectivité de la plupart des surfaces montrent une dépendance à la température de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} K^{-1} . La microscopie par thermoréflectance [76]-[82] est basée sur la mesure de la réflectivité de la surface d'un échantillon à partir de laquelle une carte des températures peut être déduite. La variation du coefficient de réflectivité avec la température permet donc de remonter à cette dernière en éclairant un échantillon avec une source dans le visible ou le proche ultraviolet, ce qui permet, du fait des faibles longueurs d'ondes mises en jeu, d'obtenir des cartes de température à des résolutions spatiales de l'ordre de 100nm, beaucoup plus basse que les techniques infrarouges classiques.

La réflectivité peut s'écrire sous la forme linéaire :

$$R(T) = R(T_0) + \frac{\partial R}{\partial T}(T - T_0) \quad \text{Equ. 25}$$

En connaissant $R(T_0)$ et T_0 , il est ainsi possible d'obtenir la valeur de la température par une mesure d'intensité lumineuse réfléchie. Cependant, le coefficient $\partial R/\partial T$ on l'a vu, est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} K^{-1} , ce qui est convenons en, relativement faible et impose l'utilisation de techniques de détection telles que la détection synchrone, pour des mesures point par point ou des images.

La Figure 83 montre des courbes de réflectivité en fonction de la longueur d'onde d'illumination, dans le visible, et ce pour une surface métallique et la même surface recouverte d'une couche mince de nitrure de silicium. Ce dernier cas montre un cas d'interférence dû à la couche mince transparente. Sur la partie droite de la Figure 83, est tracé la variation de réflectivité avec la température, et montre, dans les deux cas, des optimums du coefficient de thermoréflectance, qui définit la longueur d'onde optimal à utiliser pour ce matériau.

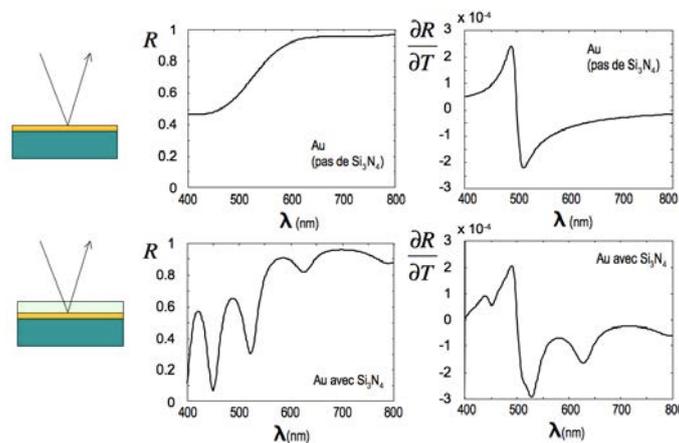


Figure 83. Principe de la thermoréflectance, réflectivité optique en fonction de la longueur d'onde d'illumination d'une couche métallique et variation de la réflectivité avec la température pour la même gamme de longueur d'onde. Film mince d'or en haut et recouvert de nitrure de silicium en bas (G.Tessier, ESPCI)

6.2.2. Principe de la thermographie par thermoréflectance

La thermographie par thermoréflectance se fait classiquement avec une mesure par laser sur un point avec excitation thermoélastique par un autre laser. Dans le cas présent, mes collègues de l'EPSCI dans ce projet ont développé une méthode d'imagerie avec une caméra CCD. Le principe est illustré sur la Figure 84. L'échantillon est excité en température à une fréquence f . C'est par exemple un dissipateur thermique qui est chauffé par effet Joule à cette fréquence. A cause de la dynamique des échanges thermiques, cette fréquence est relativement basse, de quelque Hz à quelques dizaines de Hz. Le système comporte en outre un système d'éclairage à diodes électroluminescentes, synchronisé à l'excitation thermique du dispositif. La longueur

d'onde de l'illumination est choisie en fonction du matériau à étudier, là où le signal de thermoréfectance est le plus important. La caméra CCD DALSA CA-D 1 capture des séries de quatre images, chacune étant intégrée sur un quart de la période de modulation de l'illumination de l'échantillon. Une combinaison linéaire de ces images permet de produire des images d'amplitude et de phase.

En fonction de la dynamique du signal thermique à étudier il existe deux montages possibles :

- Le premier montage, homodyne, utilise la même fréquence pour la chauffe et pour la synchronisation de la caméra. Avec la limitation de la caméra CCD cela revient à se limiter à 30Hz, soit 7,5Hz pour la modulation thermique.

- Si le phénomène à observer nécessite une modulation en température à plus haute fréquence, un montage hétérodyne est utilisé. Dans ce cas l'échantillon est modulé à une fréquence F élevée (jusqu'à 25MHz), le système d'illumination est quant à lui modulé à une fréquence légèrement supérieure $F+f$, synchronisé à la chauffe par un PLL. Enfin la caméra est synchronisée à la fréquence $4f$.

- Enfin le système peut sommer le signal de thermoréfectance sur plusieurs images pour augmenter le rapport signal sur bruit.

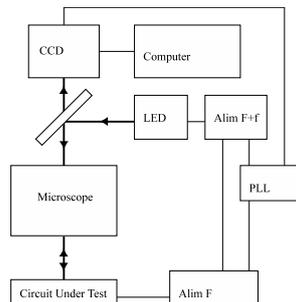


Figure 84. Principe d'un banc de mesure par thermorefectance (G.Tessier, ESPCI)

Les premières mesures en thermoréfectance effectuées sur des circuits intégrés [77] ont montré l'intérêt de la méthode. Nous avons alors travaillé avec l'ESPCI pour développer cette technique spécifiquement à l'élaboration de carte de température à la surface de circuits intégrés.

Un premier exemple de ce qu'il est possible de faire avec cette technique est illustré sur la Figure 85. Un dissipateur a été implémenté sur une technologie CMOS $0,8\mu\text{m}$. Un serpentin en polysilicium (Figure 85(a)) de $20\mu\text{m}$ de large pour 300nm d'épais entoure une diode (thermomètre). Le polysilicium est plus résistif que les métallisations, ce qui permet de produire des dissipateurs thermique plus facilement. Il est parcouru par un signal AC à 25 MHz, 4V crête qui va à la fois créer un effet Joule dans le matériau et être utilisé pour le calage du système de mesure. La Figure 85(b) montre l'image de thermoréfectance. On remarque que l'élévation de température suit le profil de densité de courant dans le dissipateur (les électrons suivent le chemin le plus court). L'échelle en variation de réflectance est n'indique pas pour l'instant de température puisqu'une étape de calibration est nécessaire pour relier la réflectance à la température.

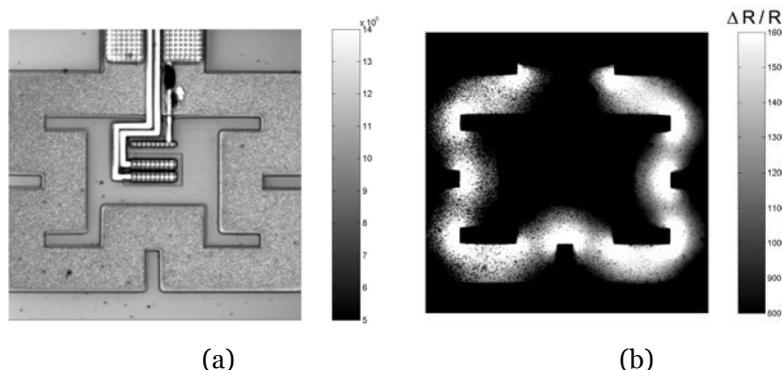


Figure 85. Image optique (a) et thermographie par thermoréfectance (b) d'un dissipateur en polysilicium fabriqué en technologie CMOS $0,8\mu\text{m}$, unités arbitraires. (Image G.Tessier, ESPCI, dispositifs B.Charlot, TIMA).

6.2.3. Calibration de la thermographie par thermoréfectance

La méthode de thermographie par thermoréfectance est une méthode indirecte de mesure de la température. C'est-à-dire que la mesure a besoin d'être calibrée. Pour ce faire nous avons conçu des

dispositifs spécifiques permettant la mesure de la température des structures observées par thermoréflectance, et ceci avec des échantillons CMOS des filières que nous voulons cartographier. Ces structures sont des thermomètres, de type thermocouples ou diodes pn situées à proximité ou à la surface d'éléments dissipateurs.

La première structure, Figure 87 (a), se compose d'un dissipateur en forme de boucle ($R=109 \Omega$, $30 \times 44 \mu\text{m}$) entourant une diode à jonction pn. La dépendance en température de la chute de potentiel aux bornes de la diode a été calibrée en plaçant la puce en étuve entre 25 et 200°C. La relation est linéaire et la pente a été mesurée à $-1.42 \cdot 10^{-3} \text{ V.K}^{-1}$.

La seconde structure, Figure 87 (b) est un ensemble de thermocouples polysilicium/ aluminium dont les jonctions chaudes sont placées au centre d'un large dissipateur carré ($100 \times 100 \mu\text{m}$, 17.8Ω) en polysilicium également. La valeur du coefficient Seebeck de ce thermocouple a été déterminée avec une autre structure dédiée ($44 \mu\text{V.K}^{-1}$). Ce dispositif permet une mesure de température directement sur le dissipateur, à la différence de la première structure .

La calibration de la mesure par thermoréflectance a été faite par deux méthodes.

La première méthode a consisté à placer le dispositif (puce en boîtier) sur un module Peltier et d'attendre la thermalisation à différentes températures. A cause de l'inertie thermique, il n'est pas possible d'utiliser une technique de lock-in. La valeur de la variation de réflectivité $\Delta R/R$ est ensuite mesurée en plusieurs points de l'échantillon. La courbe qui en ressort, sur la Figure 86 permet par une régression linéaire d'obtenir une relation entre la température et le $\Delta R/R$.

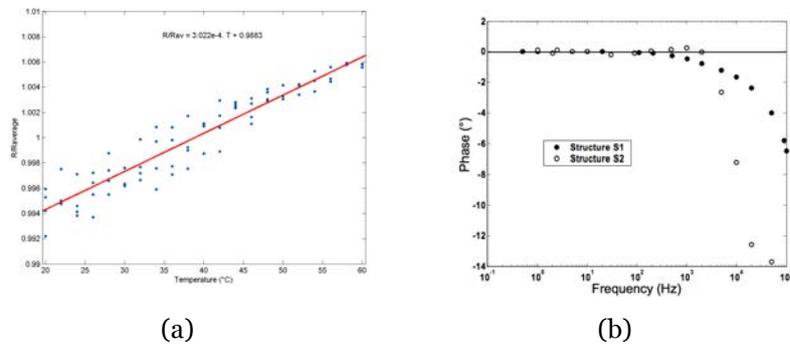


Figure 86. (a) Calibration en statique de la variation de réflectivité (du polysilicium) par rapport à la température. (b) Différence de phase entre le signal de modulation électrique et la sortie des thermomètres (S1 Diode et S2 thermocouple) en fonction de la fréquence. La fréquence de coupure de S1 est de 200 Hz et celle de S2 de 2kHz.

Ensuite, la cartographie de la température est réalisée en montage homodyne à basse fréquence, c'est à dire en dessous des fréquences de coupure des structures S1 et S2, voir sur la Figure 87. Les températures relevées par la diode et le thermocouple ont ainsi confirmé la calibration effectuée en statique.

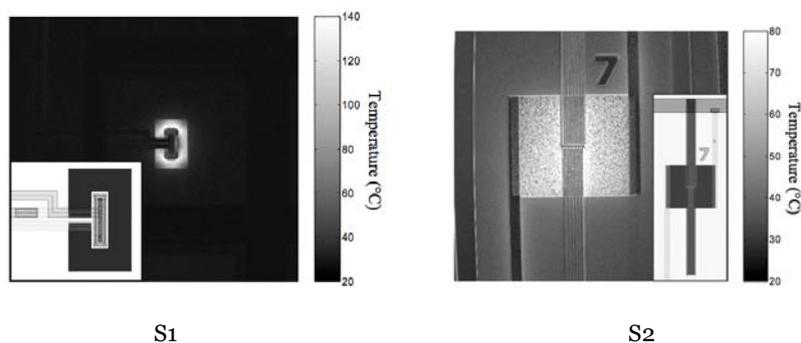


Figure 87. Images thermiques ($250 \times 250 \mu\text{m}$) obtenus pour les structures dissipateur/thermomètre S1 (gauche) et S2 (droite), modulation électrique en signal carré à $F=7.5 \text{ Hz}$ et $V_{pp}=4 \text{ V}$. L'échelle des températures n'est valide que pour le polysilicium, matériau des dissipateurs. Les inclusions représentent les layout des structures avec diode (à gauche) et thermocouple à droite.

6.2.4. Comparaison des techniques Thermoreflectance et SThM

Pour pouvoir étudier les performances en résolution spatiale de différentes méthodes de thermographie, nous avons conçu [p-58] [p-13] une structure composée d'un ensemble de lignes parallèles en polysilicium de $0,35\mu\text{m}$ de large pour obtenir des sources de chaleur les plus fines possibles. Nous avons donc utilisé le polysilicium des oxydes de grille des transistors qui est le niveau offrant les plus petites dimensions dans la filière CMOS $0,35$. Cependant le polysilicium dans le procédé est recouvert par tous les oxydes intermétalliques et la passivation qui ne permet d'obtenir des lignes dégagées des oxydes d'isolation. Nous avons donc opéré une étape de gravure ionique réactive pour libérer les structures. Cette opération a été réalisée en utilisant le dernier niveau métallique comme masque de gravure. Ainsi au final nous disposons d'un ensemble de lignes dissipatrices isolées les unes des autres, comme le montre la Figure 88.

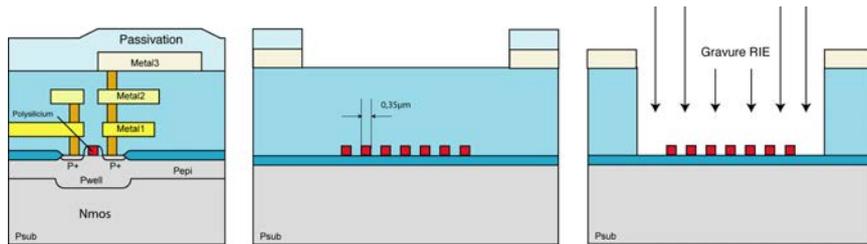


Figure 88. Schéma en coupe de la technologie AMS $0,35\mu\text{m}$ CMOS et principe de la gravure RIE avec masquage par le dernier niveau de métal pour obtenir des lignes dissipatrices isolées.

La mesure de l'échauffement de ces lignes a ensuite été opérée par thermoréfectance en utilisant un montage hétérodyne analogue aux expériences précédentes et en utilisant les résultats de calibration. Les lignes ont été toutes parcourues par le même signal de chauffe.

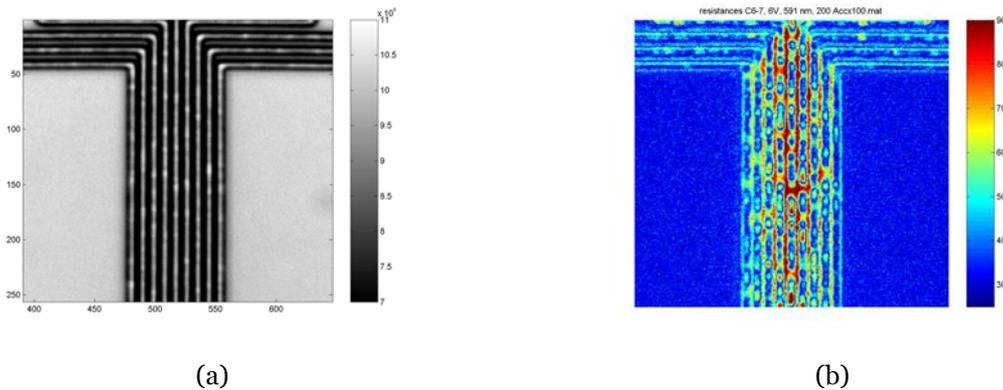


Figure 89. Thermographie de circuits intégrés par thermoréfectance, image optique d'un ensemble de lignes résistives de $0,35\mu\text{m}$ de large en polysilicium (a) et thermographie par thermoréfectance du même dispositif (l'échelle est en $^{\circ}\text{C}$) faite à l'ESPCI (b).

La Figure 89 montre les résultats de thermoréfectance opérés sur les lignes de polysilicium de $0,35\mu\text{m}$ de large. La figure de gauche montre l'image optique produite directement par la caméra CCD alors que l'image de droite est l'image de thermoréfectance (en amplitude) calibrée par les méthodes décrites dans la section précédente. On remarque tout d'abord que la résolution spatiale est suffisante pour discriminer l'élévation de température sur chaque ligne tout en observant une répartition plus globale de la température sur les 9 lignes : les lignes du centre chauffent plus. Nous avons également observé une certaine granularité du signal de thermoréfectance qu'il est possible d'attribuer à plusieurs effets tels que le caractère polycristallin du matériau ou à des effets purement optiques liés à la méthode de mesure de réflectance. Nous ne pouvons toutefois pas expliquer avec certitude la présence de points chauds au long des lignes.

Cette méthode, la thermographie par thermoréfectance a montré sa capacité à effectuer une mesure de la température avec une précision spatiale bien plus grande qu'en thermographie infrarouge classique. Nous avons donc décidé de développer un circuit intégré spécifique pour montrer l'intérêt de cette méthode pour cartographier la température à la surface d'un circuit intégré. Les circuits intégrés ont également été utilisés pour le développement d'une technique de thermographie par sonde fluorescente montée sur un micro scope de type AFM [p-16].

6.3. Thermographie de circuits intégrés numériques

La progression des technologies CMOS vers des densités toujours plus importantes induit de sérieux problèmes de dissipation de la chaleur créée par ces circuits. Même si des efforts importants sont faits sur la consommation des circuits, la densité de puissance dissipée à la surface du silicium ne fait que croître, comme le montre la courbe de la Figure 81. Il existe certes des techniques d'extraction forcée de la chaleur des circuits intégrés [72], mais ces solutions ont un coût élevé et ne se prêtent pas forcément aux appareils mobiles. Des températures élevées dans le silicium sont source de défaillance pour les circuits. Les pics de température qui apparaissent à la surface des circuits peuvent induire des problèmes, la relation entre la température de fonctionnement d'un circuit et son taux de défaillance est exponentiel. En plus de la température, les gradients de température à la surface du circuit, et la présence de points chauds sont également une source de défaillance. En effet des problèmes thermomécaniques peuvent survenir ainsi que des problèmes d'intégrité du signal. La température augmentant les temps de basculement des portes logiques.

Les techniques de thermographie et de simulations électrothermiques des échanges de chaleur dans les circuits intégrés [73][74] peuvent aider à prévenir ces problèmes. En effet, en agissant au moment de la conception des circuits, il est possible de prévoir l'apparition de points chauds et d'agir en conséquence sur la topologie du circuit de manière à mieux répartir les blocs fortement dissipateurs et ainsi de lisser les augmentations de températures à la surface du circuit. Les techniques de thermographie permettant de se représenter la carte des échauffements pendant le fonctionnement et les simulations pendant le placement routage.

Ces techniques de mesures thermographiques doivent donc produire une carte des températures à la surface d'un circuit intégré pendant le fonctionnement, et ce pour un cycle de fonctionnement et une fréquence d'opération donnés. En plus de l'aspect temporel, ces techniques doivent pouvoir fournir une résolution spatiale en accord avec la taille des éléments dissipatifs, c'est-à-dire typiquement la taille d'un transistor ou d'une porte logique.

La méthode de thermographie par mesure infrarouge est la plus connue. Elle repose sur la mesure du rayonnement de corps noir émis par les éléments chauffants. Cette technique, bien que pouvant être synchronisée à une horloge de circuit intégré ne permet pas d'atteindre des résolutions spatiales élevées et est limitée à une précision de quelques dizaines de micron, à cause des longueurs d'ondes infrarouge.

Les techniques de thermographie par sonde locales : SThM (scanning thermal microscopy), du type pont de Wollaston [75][p-61] permettent d'obtenir de bien meilleures résolutions spatiales mais sont limitées de fait par leur principe de fonctionnement intrinsèque, à savoir un mode de mesure en balayage qui ne permet pas une cartographie en fréquence et une mesure perturbatrice et en surface, là ou la plupart des éléments chauffants dans le CMOS son recouvert de plusieurs niveaux de métal et d'oxydes.

Les méthodes optiques dans le visible, comme la thermoréflectance semblent donc avoir sur le papier un certain nombre d'avantages pour la cartographie thermique des circuits intégrés. C'est pourquoi nous avons exploré cette voie avec nos collègues de l'ESPCI et avons fondu un circuit intégré spécifique nous permettant de valider la technique.

6.3.1. Conception des circuits

Nous avons développé un circuit intégré numérique spécifique. Ce circuit a été conçu spécifiquement pour l'expérience de thermographie, c'est-à-dire qu'il a un fonctionnement permettant de simuler l'activité électronique (et l'échauffement associé) d'un circuit intégré standard tout en ayant des fonctionnalités particulières dont notamment un mode de fonctionnement automatique et cyclique. Ce circuit ne nécessite pas l'utilisation d'un testeur de circuits intégrés. Le circuit a été implémenté en technologie AMS CMOS 0,35 μ quatre niveaux de métal. Le cœur numérique a été synthétisé et routé automatiquement selon deux niveaux de congestion ce qui donne au total deux circuits identiques dans la connectique et le fonctionnement mais avec des cœurs de densités différentes (voir Figure 92(b,c)). La congestion des portes logiques à l'intérieur du circuit devrait avoir de l'influence sur la température du circuit. Le circuit logique en lui-même ne sert à rien, il additionne et multiplie des séries de nombres, cependant il est typique d'une grande quantité de circuits intégrés (génération pentium II) et sert à démontrer l'intérêt des méthodes de thermographie par thermoréflectance appliquées aux circuits intégrés et à valider un ensemble de techniques de simulations de l'activité thermique des circuits intégrés.

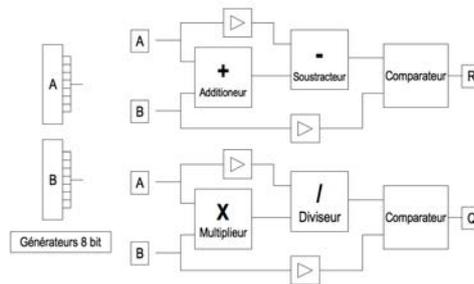


Figure 90. Schéma de bloc du circuit numérique pour thermographie.

La conception des circuits numériques devait suivre certaines spécifications :

- Tout d'abord être typique d'une grande quantité de circuits intégrés du marché pour pouvoir servir d'étalon pour différentes techniques de thermographie.
- Les circuits doivent avoir un fonctionnement répétitif, déterministe et avoir un cycle de fonctionnement contrôlable.
- Le circuit doit pouvoir être mis en oeuvre facilement sans avoir recours à de lourds équipement de test.

Donc, pour satisfaire au cahier des charges, nous avons eu recours à une technique de conception originellement destinée au test des circuits intégrés. La technique de l'auto-test intégré (ou BIST pour *Built-In Self Test*) consiste à intégrer dans le circuit un générateur de stimuli et un analyseur de signature. Une séquence de vecteurs de test est générée et appliquée au cœur de logique combinatoire. Les résultats en sortant sont analysés par l'analyseur de signature. Ce circuit est donc capable d'être testé sans avoir recours à un appareil de test. Le circuit n'a donc aucune autre fonction que de s'auto-tester et d'être analysé par thermographie pendant cette opération.

Le cœur numérique du circuit contient plusieurs blocs : un additionneur - soustracteur et un multiplicateur - diviseur qui fonctionnent sur 8 et 16 bits. Le générateur de stimuli embarqué est un registre linéaire à contre-réaction (LFSR pour *Linear Feedback Shift Registers*), un schéma de ce circuit est visible sur la Figure 91.

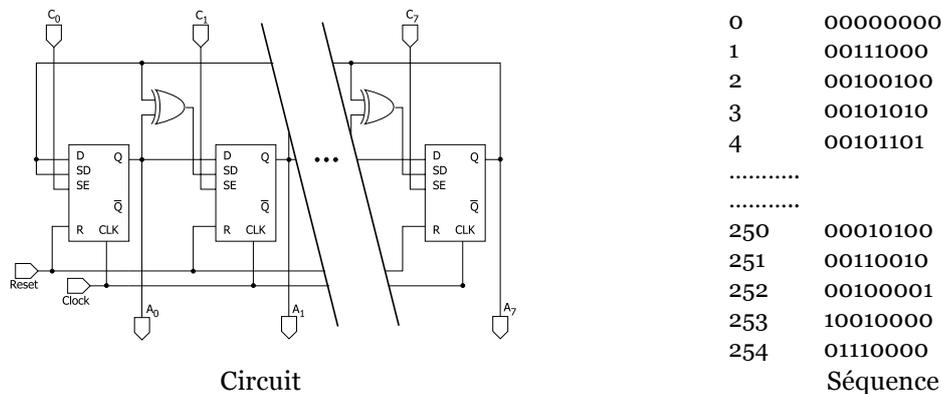


Figure 91. Schéma d'un LFSR 8 bits (Linear Feedback Shift Register) fait avec des bascules *scan path*. Ce circuit produit des séquences pseudo aléatoires répétitives (A et B) qui seront calculés par le cœur de logique combinatoire (addition multiplication) de manière déterministe.

Le LFSR est composé d'un ensemble de bascules D connectées en série dans une structure en anneau. Des cellules XNOR sont positionnées dans une configuration de contre réaction le long du registre. En fonction de la structure de contre-réaction, le registre va produire une séquence pseudo aléatoire de différentes longueurs. Dans notre cas, les bascules D ont été remplacées par des bascules de type *scan path* pour pouvoir programmer la structure de contre réaction et modifier ainsi les séquences de vecteurs. Deux LFSR 8 bits ont donc été implémenté et vont générer des séquences déterministes de 256 mots A et B. Ces séquences de mots vont donc être envoyés sur les blocs logiques qui vont faire les opérations $(A+B)-A$ et $(A \times B)/A$. Le résultat de ces opérations est ensuite comparé avec le mot original B pour créer un bit résidu observable.

Les circuits ont été implémentés par mon collègue Khodoun Torki avec une technique de synthèse, placement et routage traditionnel en utilisant une bibliothèque de cellules standard de la filière utilisée à

savoir AMS CMOS $0,35\mu\text{m}$. Le cœur numérique a été synthétisé avec deux niveaux de congestion différents ce qui a donné deux circuits de différente taille avec des densités de cellules différentes. Cela a été fait pour étudier l'effet de la densité de cellules sur la dissipation thermique. Les circuits sont visibles sur la Figure 92, layout et silicium. Les deux puces ont la même fonctionnalité et le même diagramme de câblage.

Les puces contiennent chacune un générateur d'horloge intégré composé d'un oscillateur en anneau et qui produit une horloge avec huit fréquences programmables de 1,4MHz à 225MHz. Les circuits peuvent aussi être cadencés par l'extérieur. Au final, les puces sont contrôlables par seulement quatre plots d'entrées : Reset, Clock, VDD et GND.

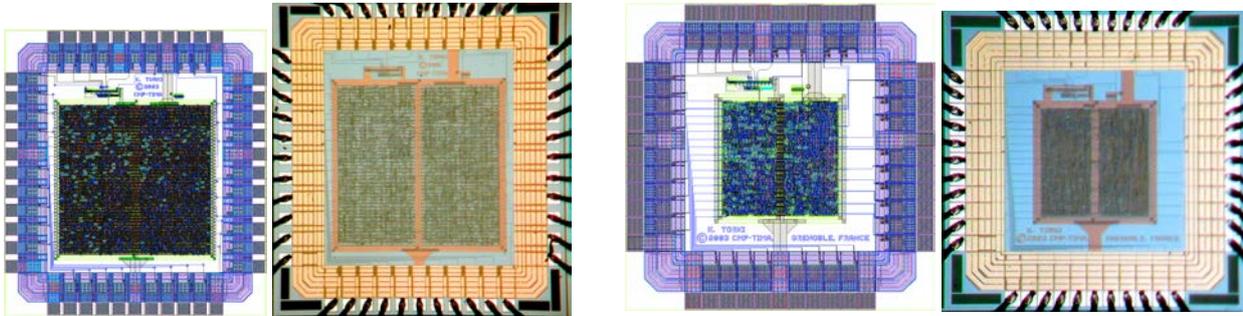


Figure 92. Circuit intégré numérique dédié à la thermographie, Layout et photo de la puce CMOS implémentée avec deux niveaux de congestion du cœur numérique, faible à gauche et forte congestion à droite.

6.3.2. Thermographie sur circuits numériques

Les mesures en thermoréflexance ont été réalisées sur les circuits numériques décrits précédemment. Les circuits ont été alimentés avec deux tensions d'alimentation, 5V pour les plots d'entrées sorties et 3V pour le cœur numérique. L'oscillateur embarqué a été utilisé comme horloge et les circuits en boîtier ouvert ont été illuminés par des diodes électroluminescentes à 614,5nm de longueur d'onde.

Le circuit est commuté avec l'entrée Reset à une fréquence $f=7,5\text{Hz}$ avec un rapport cyclique de 50%. Les images ont été capturées avec une caméra CCD cadencée à $4xf=30$ images par seconde avec des objectifs de grandissement allant de $x5$ à $x30$.

La Figure 93 montre des images thermiques d'une partie du cœur numérique pour différentes fréquences d'horloge, 40, 80 et 225MHz. Comme on s'y attendait, l'augmentation de température à la surface du circuit est plus importante pour des fréquences élevées. Dans les circuits CMOS la dissipation de température est due non seulement au basculement des transistors (partie dynamique) mais aussi aux courants de fuites des grilles (partie statique).

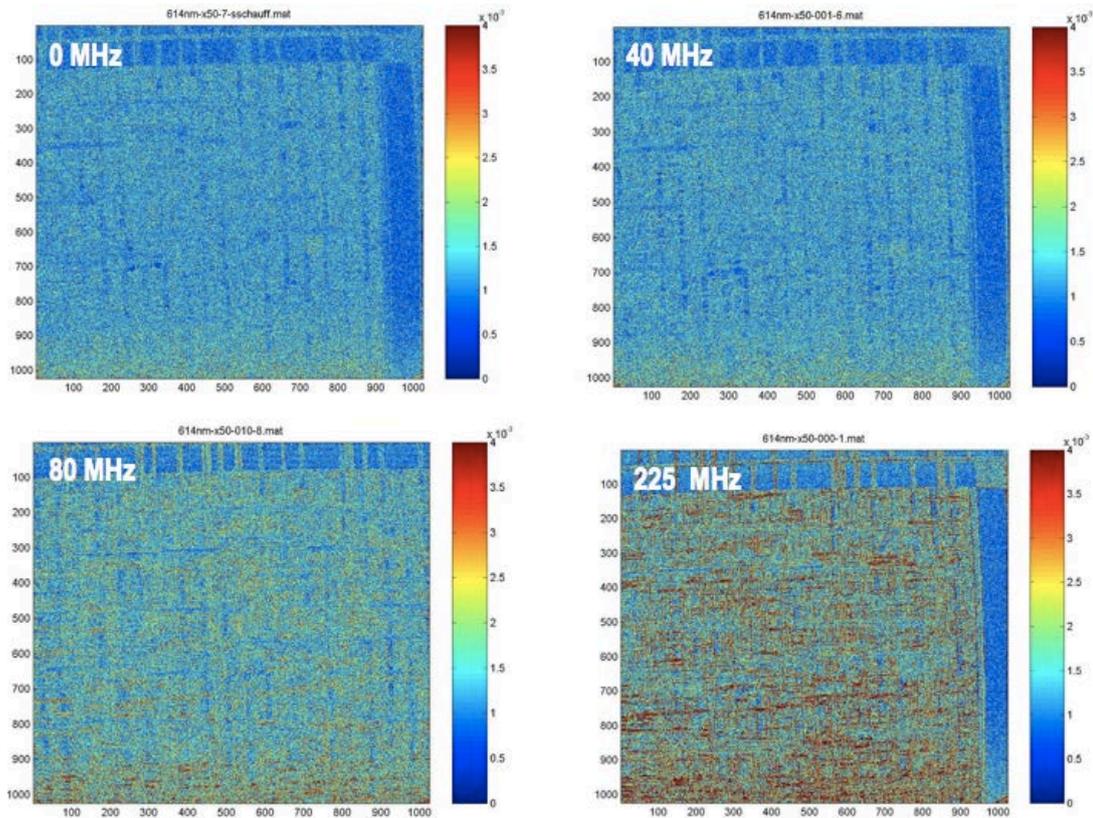


Figure 93. Thermographie par thermoréfectance de circuit intégré, quart supérieur droit du circuit intégré en fonctionnement à : 40MHz, 80 MHz et 235 MHz. Les images représentent une surface de 250x250µm sur la puce.

Les mesures à basse fréquence montrent une répartition quasi uniforme de la température à la surface du cœur, avec un signal légèrement plus fort en bas des images, ce qui correspond aux étages de sortie qui ont une activité plus importantes que le reste du circuit. On peu remarquer aussi des lignes horizontales et verticales qui correspondent aux lignes de routage des interconnexions métalliques (quatre niveaux de métal). Cet effet est encore plus visible sur la Figure 94 où les images sont réalisées à plus fort grossissement (x100). Un fort signal de thermoréfectance est visibles sur les pistes métalliques indiquant de plus hautes températures dans les lignes que dans le matériau diélectrique isolant les pistes. Ceci est interprété de la façon suivante.

Premièrement, le signal de thermoréfectance est composé de la dérivée par rapport à la température du coefficient de réflectivité dR/dT , grandeur qui dépend largement du matériau mesuré. Les métaux ont généralement un coefficient dR/dT plus élevé que les diélectriques tels que le SiO_2 [83]. Le signal de thermoréfectance est plus élevé sur le métal, même si la température est homogène localement.

Ensuite, la puissance électrique consommée par le circuit est dissipée principalement dans les canaux des transistors et dans les interconnexions métalliques. L'aluminium des interconnexions possède une conductivité thermique beaucoup plus élevé que le dioxyde de silicium, respectivement $\sim 230 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\sim 1.25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, ce qui conduit à une élévation de température plus importante dans les pistes métalliques.

D'autres travaux doivent être menés pour évaluer la température précise dans les interconnexions et dans les isolants, pour cela une piste est de choisir une longueur d'onde d'illumination en dehors de la fenêtre d'absorption du Si_3N_4 , matériau de la dernière couche de passivation, pour permettre de mesurer la température uniquement en surface du circuit.

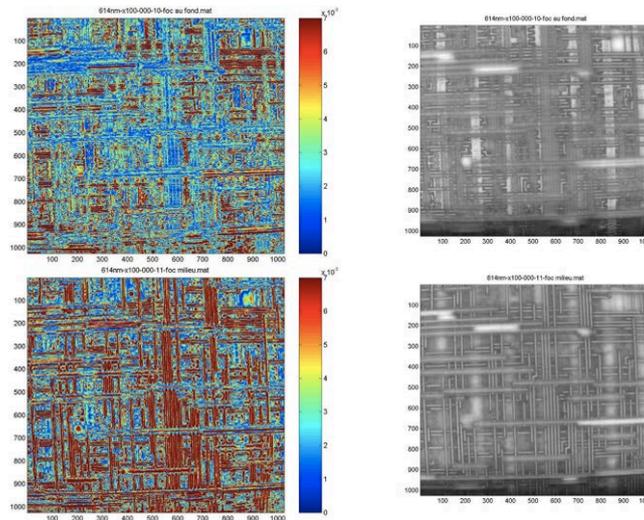


Figure 94. Thermographie par thermoreflectance de circuit intégré (à gauche) et image optique (à droite), Les images représentent une surface de $100 \times 100 \mu\text{m}$ sur la puce. Différents points de focalisation du système optique correspondant à différents niveaux de routage.

Ces mesures par thermoreflectance ont donc montré leur capacité de produire une carte des températures sur un circuit intégré. L'expérience n'a cependant été réalisée qu'en mode homodyne et la mesure montre donc la somme des contributions thermiques intégrées pendant un quart du temps de cycle. Une continuation de ces travaux va donc considérer la synchronisation d'un montage hétérodyne pour suivre les échauffements à la surface du circuit à plusieurs moments du cycle de fonctionnement répétitif du circuit.

6.3.3. Simulations Electrothermique au niveau portes logiques

En parallèle, ces mesures ont été utilisées pour la validation des simulations électrothermiques développées au laboratoire [76] par mon collègue Kholdoun TORKI. Cette technique se base sur l'utilisation de la cellule logique comme élément dissipateur. Cette simplification permet d'obtenir des simulations électrothermiques plus rapides et relativement précises. Le modèle reliant la puissance dissipée par une cellule en fonction de son activité logique a été validée par un stagiaire de Master recherche (Benoît DUBOIS) que j'ai encadré. La Figure 95 représente la carte des températures à la surface du circuit intégré précédent obtenu par simulation. Les thermographies présentées sur la Figure 93 correspondent au quart supérieur droit de la puce.

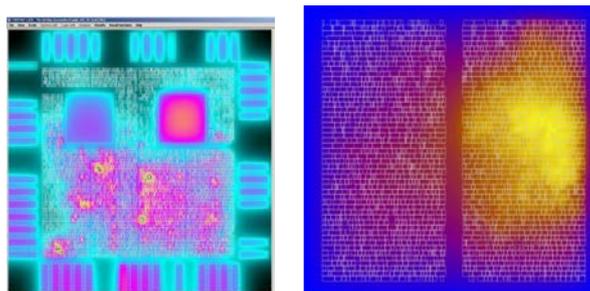


Figure 95. Simulation électrothermique au niveau cellule logique, les images représentent la carte des températures à la surface du circuit intégré.

Le processus de simulation qui mène aux cartes des températures est illustré sur la Figure 96. Il débute avec une simulation du circuit intégré considéré avec le logiciel VERILOG XL. L'activité des portes logiques au cours de la phase de fonctionnement est enregistrée puis est associé à un modèle de dissipation thermique traduisant les commutations des portes à une dissipation thermique. Ensuite ces données sont combinées aux informations de surface et de placement des cellules à partir de la topologie du circuit (son layout) puis l'ensemble est mis en forme puis envoyé vers le simulateur thermique THERMAN pour produire une carte des échauffements à la surface du circuit intégré, dans une configuration d'encapsulation dans un boîtier donné. Cette technique de simulation permet donc d'avoir une idée des zones produisant un échauffement plus prononcé afin, éventuellement de réorganiser le placement / routage du circuit pour minimiser les pics de températures.

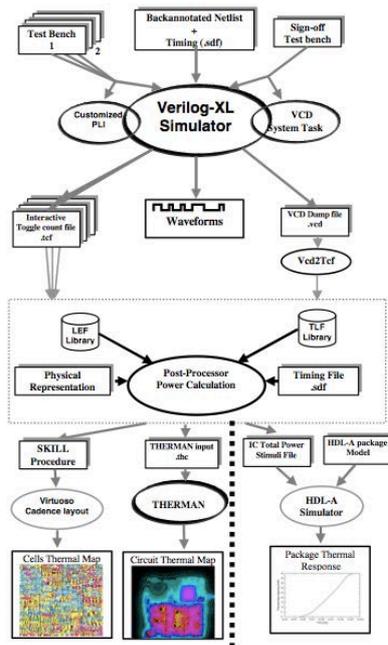


Figure 96. Diagramme de principe de la simulation électrothermique au niveau cellules logiques (K.Torki)

7. Éléments pyroélectriques

Cet axe de recherche a été débuté à mon retour en France, en 2007. Il s'est inséré dans les axes de mon équipe d'accueil qui développait depuis plusieurs années des matériaux et des systèmes pyroélectriques. J'ai donc pris part à cet axe de recherche en me concentrant sur les matériaux polymères pyroélectrique, dont notamment le PVDF en couche mince. J'ai ensuite pris part aux développements de la technique de dépôt de couches épaisses par sérigraphie.

7.1. Ferroélectricité et pyroélectricité

Les ferroélectriques sont des matériaux qui montrent une non linéarité et un effet d'hystérésis dans la relation entre la polarisation interne du matériau et le champ électrique appliqué à ce dernier. La polarisation est le résultat d'un alignement des dipôles électriques dans le matériau avec l'application d'un champ électrique, ce phénomène n'apparaît que dans les matériaux polaires.

Les ferroélectriques ont donc la capacité d'être polarisés et de montrer une polarisation permanente sans champ électrique appliqué. Une densité surfacique de charge apparaît donc spontanément à la surface d'un ferroélectrique pour contre balancer la polarisation permanente.

Le caractère ferroélectrique est également le phénomène sous-jacent aux propriétés piezo et pyroélectriques des matériaux. La pyroélectricité correspond à la variation de la polarisation permanente du matériau en fonction de la déformation du matériau suite à l'application d'une contrainte mécanique. Concernant la pyroélectricité, le changement de polarisation du matériau est la résultante de trois effets :

- la variation dans le temps de la température.
- la déformation mécanique due à la dilatation du matériau sous l'effet du changement de température
- l'effet d'un gradient spatial de température

Ce dernier point étant fréquemment négligeable

Le courant pyroélectrique généré par un matériau pyroélectrique peut donc s'écrire :

$$I_p = pS \frac{dT}{dt} \quad \text{Equ. 26}$$

où I_p est le courant pyroélectrique, p le coefficient pyroélectrique, S la surface active et dT/dt la dérivée de la température par rapport au temps. Les coefficients pyroélectriques typiques vont de $27 \mu\text{C.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour le PVDF, à 200 pour le BaTiO_3 et 500 pour le PZT.

Les ferroélectriques sont utilisés dans une large gamme d'applications qui vont des capteurs thermiques, capteurs infrarouge, capteurs d'empreintes digitales, d'énergies, mémoires, microscopies à sonde locale et micro sources d'énergies[96].

7.2. PVDF

Le Poly(vinylidène fluoride) (PVDF) est un polymère linéaire $(\text{CH}_2\text{-CF}_2)_n$ semi cristallin. Il est synthétisé à partir du monomère 1,1 vinylidène fluoride ($\text{CH}_2=\text{CF}_2$). Il est utilisé pour ses propriétés ferroélectrique et pyroélectrique [98]. Il possède une structure cristalline qui dépend des conditions appliquées lors de la cristallisation. Il possède en effet plusieurs phases qui correspondent à différentes conformations du polymère: les phases: orthorhombiques α , β et γ et la phase monoclinique δ . La phase α est non polaire, et est la plus fréquemment rencontrée avec les méthodes de cristallisation standard. La phase polaire β est celle qui produit le plus fort caractère ferroélectrique. La phase γ est une conformation intermédiaire entre les phases α et β et peut être obtenu par cristallisation à haute température. Enfin, la phase δ est une version polaire de la phase α et peut être obtenu par polarisation de la α sous un champ électrique intense.

Le PVDF a une température de transition vitreuse de -35°C et ne montre pas de point de Curie puisque le point de fusion (174°C) apparaît avant.

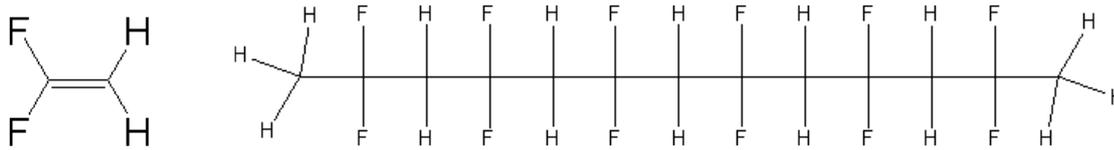


Figure 97. Schéma du monomère VF₂, et du polymère PVDF.

Pour obtenir un effet pyroélectrique, une couche déposée de PVDF doit contenir les phases β ou δ . Une fois le polymère cristallisé, il est possible de transformer une phase en une autre soit par élongation mécanique ou par polarisation à chaud sous un champ électrique intense.

7.2.1. Dépôt d'un film mince de PVDF

Nous avons utilisé des granules de PVDF (Goodfellow) qui ont été dissoute à hauteur de 15% en masse dans du Diméthylformamide (DMF). La dissolution complète prend plusieurs heures à 50°C sous agitation. Une fois le polymère entièrement dissous, la solution visqueuse est répandue sur l'échantillon métallisé et étalée par tournette à des vitesses de rotation variant de 800 à 4000 tours par minute pour obtenir des couches minces de 500nm à 4 μ m.

L'évaporation du solvant et notamment la vitesse d'évaporation est un facteur important dans la composition de la couche de PVDF [99][100]. Après dépôt, les échantillons sont recuits sur une plaque chauffante pendant vingt minutes. La température de la plaque, ainsi que la nature et l'épaisseur du substrat (Silicium ou plaque de verre) vont définir la vitesse d'évaporation et ainsi le type de phase dans la couche de PVDF. Une température de recuit basse, c'est-à-dire une évaporation lente va produire des couches ayant majoritairement de la phase β avec une morphologie en spherulite. Alors qu'une vitesse d'évaporation rapide va forcer la cristallisation en phase α avec des grains plus gros et une couche moins poreuse [99][100]. Nous avons vérifié la composition en phase du PVDF déposé par la spectroscopie d'absorption dans l'infrarouge (FTIR). Nous avons utilisé des substrats de verre de dimension 2,5cmx2,5cm recouvert d'or (Cr/Au) et sur lesquels nous avons déposé un film de PVDF recuit à différentes températures. Les mesures ont été faites en réflexion avec une taille de spot assez large (2cm) pour augmenter le signal. Les spectres sont visibles sur la Figure 99. Les pics d'absorption correspondent à une liaison chimique et la présence d'une phase est jugée par un ensemble de pics caractéristiques de la phase. Si l'on observe les spectres pour le PVDF, on peut voir la présence majoritaire de la phase α (532, 615, 764, 796 and 976cm⁻¹), et quelques pics de la phase β minoritaire. Les conditions d'évaporation ne semblent pas avoir une grande influence sur la composition. Nous avons donc décidé, d'utiliser un adjuvant, le PMMA qui est connu pour promouvoir la cristallisation du PVDF en phase β .

7.2.2. Etude du composé PVDF/PMMA

La phase β du PVDF produit le caractère pyroélectrique le plus important, il est donc nécessaire d'obtenir une majorité de ce polymorphe dans le matériau pour pouvoir exploiter cette propriété. Plusieurs techniques ont été décrites dans la littérature à ce propos [101][102]. Une solution est l'allongement mécanique du polymère, en effet la déformation de la structure permet d'aligner les chaînes de polymères et de transformer la structure en spherulite en une structure fibrillaire. Avec cette technique, il est possible de monter à 90% de phase β [103]. Cependant cette technique n'est pas applicable à notre cas, c'est à dire des couches minces déposées sur substrat rigide. Donc plutôt que d'agir sur un polymère déjà cristallisé, il est préférable d'agir sur les conditions de cristallisation.

Une technique décrite dans la littérature[104][105] est de maintenir une certaine quantité d'eau dans la solution pendant l'évaporation du solvant. La technique est d'inclure des hydrates dans la solution, par exemple un hydrate de magnésium Mg(NO₃)₂ 6H₂O. L'hydrate agit comme site de nucléation et promeut la cristallisation dans le polymorphe β .

Enfin, une dernière technique[106][107][108] fait part de l'utilisation du poly(méthyl méthacrylate) (PMMA) à la solution de PVDF en solution dans le DMF. Le mélange de PMMA permet également la promotion de la cristallisation en phase β . C'est cette technique que nous avons choisi d'explorer.

La procédure pour le dépôt de couches de PDVF/PMMA est identique à celle du PVDF seul. Une quantité 10% de PMMA par rapport au PVDF est ajoutée à la solution lors de la solvatation (15%PVDF, 1,5%PMMA dans DMF). L'ajout du PMMA produit des couches plus homogènes mais contenant des bulles. Le chauffage de la solution à 50°C avant le dépôt permet de réduire le niveau de bulles dans la couche cristallisée. La taille

et la morphologie des grains ont été observées au microscope électronique et sont visibles sur la Figure 98. Lorsque la couche est séchée à température ambiante le film prend une teinte laiteuse et une grande porosité est observée au microscope. Avec une température de recuit allant de 50 à 70°C, la couche est composée d'une agrégation de petits grains (de 1 à 2µm de diamètre). Cette structure de grain produit malheureusement des couches court-circuitées lorsqu'un métal est déposé en face supérieure pour produire une capacité. Enfin pour des évaporations de solvant rapides, c'est-à-dire, au-dessus de 70°C, on trouve une structure à grain large, d'une taille supérieure à 5µm Cette structure avec des joints de grains bien visibles produit des couches compactes et électriquement isolées lorsqu'elles sont prises en sandwich par les électrodes métalliques.

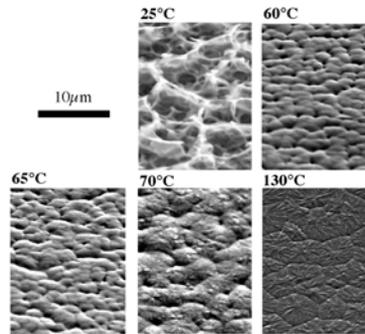


Figure 98. Vues au microscope électronique à balayage de la surface d'un échantillon de PVDF à différentes températures d'évaporation du solvant.

L'étude de la composition des couches minces de PVDF PMMA a suivi la même procédure que pour le PVDF seul. Les échantillons ont été déposés à la tournette sur des substrats de verre métallisés au Cr/Au pour une épaisseur d'environ 2µm, les températures d'évaporation du solvant allant de 25°C jusqu'à 150°C. La mesure du spectre de transmission par réflexion a été menée jusqu'à des nombres d'ondes de 400cm⁻¹ jusqu'à 1400cm⁻¹, dans la gamme où se trouvent une majorité de pics d'absorption des spectres considérés. Les spectres des composés PVDF/PMMA se trouvent sur la Figure 99 en bas, et par rapport aux échantillons de PVDF seul, on peut observer une différence notable dans les spectres pour les composés évaporés à basse température. Les pics de la phase β (444, 510, 839 and 1076cm⁻¹) sont en effet beaucoup plus présents pour les échantillons recuits en dessous de 70°C. Cependant les pics α sont également présents, ce qui nous permet de conclure de la présence des deux polymorphes.

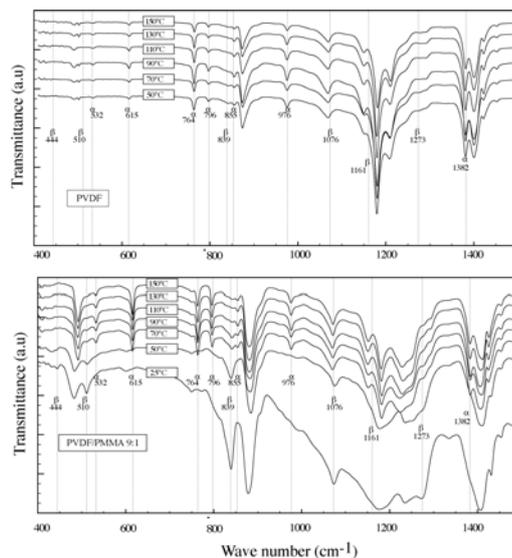


Figure 99. Spectre de transmission dans l'infrarouge pour le PVDF pur et l'alliage PVDF PMMA, en fonction des températures d'évaporation du solvant. Les pics d'absorption sont notés pour les phases α et β.

Les conditions de dépôt et surtout de recuit sont alors un compromis entre l'état de surface et la morphologie de la couche et la composition du polymère. Pour une couche relativement épaisse, il faut observer une température de recuit basse, d'environ 50°C qui permettra d'obtenir une certaine quantité de phase β dans la couche. Cette étude ne permet pas, par contre de quantifier le rapport des phases dans le

matériau. La morphologie des couches est alors une structure à petits grains, des spherulite qui provoque malheureusement beaucoup de courts circuits lors des métallisations lorsque la couche est mince.

7.2.3. Polarisation

La polarisation (ou Poling en Anglais) est l'étape qui permet d'aligner les dipôles dans le matériau et de créer ou de renforcer une polarisation rémanente dans le matériau. Il existe cinq mécanismes de polarisation pour les matériaux ferroélectriques. Les polarisations ionique et électrique sont basées sur le déplacement des charges dans le matériau, ce sont des phénomènes intrinsèques. Les polarisations extrinsèques, quant à elles, sont l'orientation, la zone de charge d'espace et la polarisation des murs de domaines. Tous ces phénomènes ont leurs propres dynamiques et dépendances en température. Dans le cas de polymères ferroélectriques, la nature et l'orientation des chaînes polymères joue un rôle prépondérant. Les polymères ferroélectriques ont un champ coercitif et une dynamique de changement d'orientation beaucoup plus longue que les céramiques ferroélectriques [109].

Il existe plusieurs techniques pour polariser un matériau ferroélectrique [110]: la polarisation par électrodes, les décharges Corona, les faisceaux d'électrons et enfin la polarisation photothermique. Etant donnée que nous utilisons des dispositifs avec électrodes métalliques, nous allons utiliser ces dernières pour polariser le matériau fraîchement déposé. Une grande quantité de techniques sont décrites dans la littérature et il n'existe pas réellement de consensus sur la meilleure technique.

Nous avons donc mis les échantillons, sous pointe, sur une plaque chauffante et appliqué une tension continue aux bornes de la capacité pyroélectrique. La Figure 100 (a) montre le courant dans la structure en fonction du temps pour une tension appliquée de 200V dc, le tout étant porté à la température de 150°C.

La séquence de polarisation commence par la montée en température de la plaque chauffante depuis l'ambiante jusqu'à 150°C, le courant monte jusqu'à quelques pA puis se stabilise. Un champ électrique intense est ensuite appliqué par la mise sous tension de la pastille de test avec une ddp de 200V. Le champ électrique résultant vaut entre 100 et 200MV.m⁻¹ suivant l'épaisseur de la couche active. Le courant augmente alors très rapidement jusqu'à 30pA puis décroît exponentiellement. La tension est maintenue pendant plusieurs minutes puis la plaque chauffante est arrêtée et l'échantillon retourne à la température ambiante sous champ. Pendant la séquence de polarisation le courant qui parcourt le diélectrique est la résultante de plusieurs phénomènes :

- La charge du condensateur formé par la couche diélectrique et des ses électrodes
- La polarisation ferroélectrique
- La conduction activée en température ou courant thermo stimulé.

La capacité du condensateur vaut

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} = 29 \text{pF} \text{ avec une permittivité du PVDF de } 8,4.$$

Cette valeur combinée à la résistance interne faible de la source de tension produit une constante de faible par rapport à la durée de la séquence d'orientation des dipôles. Cette contribution n'est donc pas visible sur la courbe de la Figure 100 (a). Une fois le condensateur chargé, la décroissance exponentielle correspond aux courants activés en température qui se produisent dans le matériau[111][112][113]. Des porteurs de charge sont créés aux électrodes par un effet thermionique qui inclue les effets d'abaissement de barrière de potentiel avec l'application du fort champ électrique. Ces charges sont alors transportées à travers l'épaisseur du matériau par saut entre les sites de piègeage de charge dans le matériau.

En plus de ces mécanismes de conduction électrique, la courant de changement de polarisation se superpose à la décroissance et est clairement visible sur la Figure 100 (a). Ce courant montre un maximum quelques temps après l'application du champ électrique. Le matériau est effectivement polarisé lorsque ce courant est nul. Le champ électrique est maintenu pendant la baisse en température pour maintenir l'état de polarisation dans le matériau. Des courbes de polarisation similaires ont été obtenues pour différentes pastilles de test et pour différentes valeurs de l'épaisseur du PVDF.

La Figure 100 (a) montre une mesure de la polarisation du matériau en fonction de la différence de potentiel appliquée à ce dernier. Cette courbe a été produite avec un équipement de test ferroélectrique Aixact. Le champ appliqué de 125V.m⁻¹ est supérieur au champ coercitif du PVDF/PMMA (125V.m⁻¹). La figure montre donc la courbe d'hystérésis de la polarisation en fonction du champ électrique à température ambiante et à basse fréquence (0,01Hz). La polarisation rémanente vaut 2,5 µC.cm⁻². Cette dernière est beaucoup plus faible lorsque la fréquence de mesure est plus élevée à cause des la dynamique du phénomène. La valeur mesurée est environ la moitié de la valeur obtenue dans des matériaux massifs (5 µC.cm⁻²). Notre

matériau montre aussi des courants de fuite importants. L'équipement de mesure n'étant pas pourvu d'un système de compensation, nous n'observons pas sur la courbe un régime de saturation.

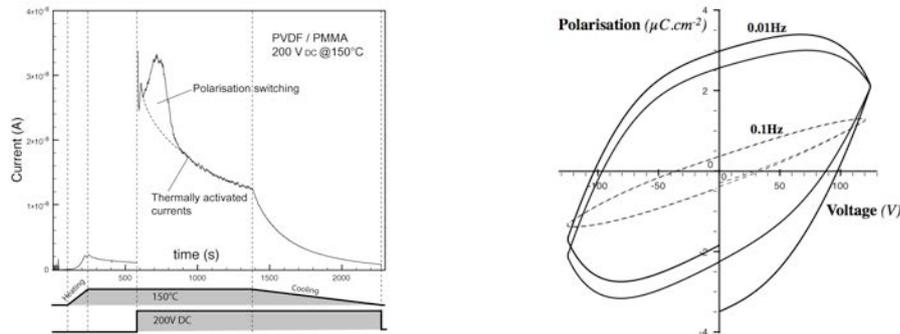


Figure 100. Polarisation : Courant en fonction du temps pendant la séquence de polarisation et courbe d'hysteresis P(V).

7.2.4. Caractérisations pyroélectriques

Après polarisation, les échantillons ont été caractérisés au niveau thermique. Les échantillons de test sont des pastilles de 500µm de diamètre dont l'électrode supérieure, en aluminium, est déposée à travers un clinquant. Le dispositif est placé sur un module Peltier qui permet d'imposer des cycles de chauffe et de refroidissement. Les contacts sont pris aux pointes de test et le courant est mesuré par un électromètre. La température sur l'échantillon est mesurée par un thermocouple. La Figure 101 montre la réponse en courant pyroélectrique en fonction de la température et de sa dérivée par rapport au temps. Nous constatons que le courant pyroélectrique suit exactement le profil de la dérivée de la température. Il existe cependant un léger offset qui a tendance à décroître au cours du temps.

Nous pouvons écrire le coefficient pyroélectrique sous la forme

$$p = \frac{I_p}{S} \frac{dT}{dt} \quad \text{Equ. 27}$$

ou, I_p est le courant pyroélectrique, S la surface des zones actives et dT/dt la dérivée de la température, étant $1.5^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ au maximum à la surface de l'échantillon. Le coefficient pyroélectrique correspondant est donc de $20\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Cette valeur est à comparer à celle du matériau massif qui vaut $27\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

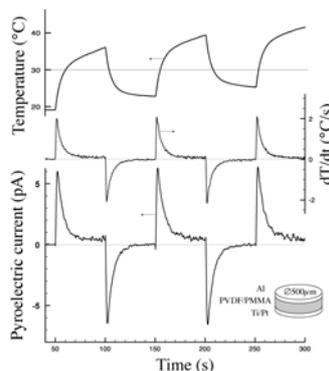


Figure 101. Mesure du courant pyroélectrique en fonction de la température et de sa dérivée par rapport au temps. Créneaux de 50s.

Nous avons donc obtenu des couches minces de PVDF/PMMA qui montrent un caractère effectivement pyroélectrique.

7.2.5. Dispositifs pyroélectriques

L'étude sur le composé PVDF/PMMA a été menée dans le but de construire des capteurs thermiques dans le but d'étudier des transferts de chaleur aux petites échelles. Pour valider la démarche nous avons construit

un système microfluidique qui intègre des éléments dissipateurs avec des capteurs pyroélectrique au sein d'un micro canal fluïdique.

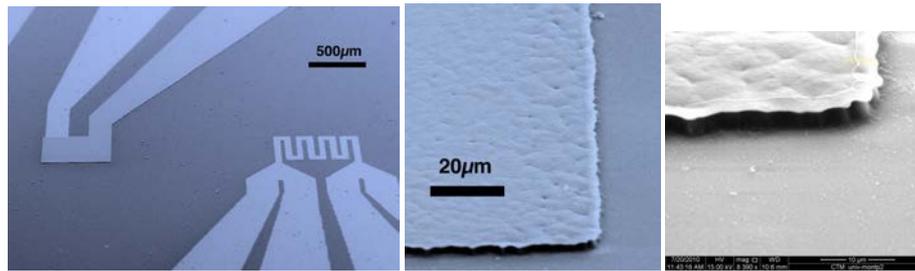


Figure 102. Images au microscope électronique de capteurs pyroélectriques en composé couche mince PVDF/PMMA avec électrodes platine sur substrat de verre.

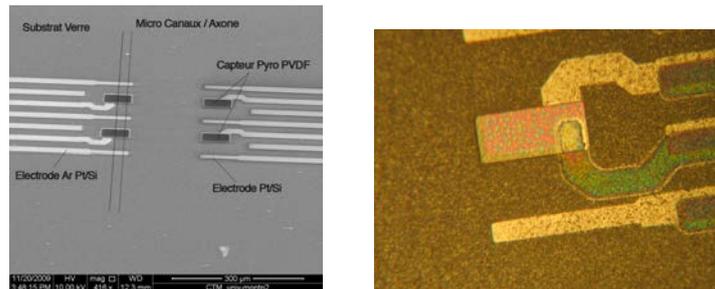


Figure 103. Images au microscope électronique de capteurs pyroélectriques en composé couche mince PVDF/PMMA avec électrodes platine sur substrat de verre.

Actuellement, nous parvenons à créer des motifs mais sommes comme ceux illustrés sur les Figure 102 et Figure 103, mais pour l'instant tous les dispositifs fabriqués sont court-circuités. Il semble que la couche de PVDF comporte des irrégularités d'épaisseur et des trous à certains endroits qui favoriseraient l'établissement de courts circuits. Le passage de marche pour contacter l'électrode supérieure est aussi problématique dans le cas de couches de PVDF relativement épaisse.

7.3. Matériaux pyroélectriques en couche mince : LiTaO_3

Le second matériau que nous étudions est le tantalate de Lithium (LiTaO_3) qui est déposé en couche mince par pulvérisation cathodique au laboratoire par mon collègue Philippe Combette. Les travaux autour de ce matériau ont fait l'objet de plusieurs thèses. Je me suis occupé de développer un procédé de microfabrication pour fabriquer des dispositifs pyroélectriques à partir de ce matériau. Les applications envisagées vont concerner la détection infrarouge, terahertz et en évidemment en microfluidique.

L'assemblage des couches lors du dépôt du matériau est la suivante :

- Substrat de Silicium monocristallin ou Sapphire recouvert d'une couche de 500nm de nitrure de silicium faible stress.
- Electrode arrière composée d'une couche d'accroche en dioxyde Zircone (ZrO_2) et d'une couche de Platine
- La couche active de LiTaO_3 de 300 à 600nm d'épaisseur
- Et enfin une électrode supérieure en Platine avec une fine couche d'accroche en Titane.

Le dépôt du tantalate de lithium se fait à haute température, à 650°C à partir d'une cible du même matériau excédentaire en Lithium. Le dépôt est opéré pendant plus d'une dizaine d'heures sous une puissance de 35W.

Le procédé a été développé à partir de l'empilement initial en pleine plaque des matériaux mentionnés ci-dessus. Des essais de dépôt du Tantalate de Lithium à partir d'une électrode inférieure ayant été gravé n'a pas du tout fonctionné. Nous avons donc établi le procédé à partir de l'empilement de toutes les couches. Ce procédé est décrit sur la Figure 104, il comporte quatre étapes de lithographie.

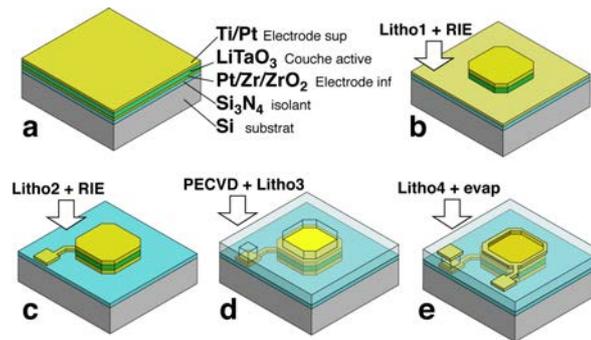


Figure 104. Procédé de microfabrication de dispositifs pyroélectriques.

Le procédé commence par un premier niveau de lithographie qui permet de définir les dimensions du plot actif, c'est-à-dire la zone pyroélectrique. Après développement de la résine l'électrode supérieure et le Tantalate de Lithium sont gravés par ICP RIE avec une recette d'attaque physique au plasma Argon jusqu'à l'électrode inférieure

Le contrôle du temps de gravure se faisant par mesure interférométrique laser pendant la gravure. Nous avons essayé différentes méthodes de gravure avec plusieurs gaz réactifs comme le CHF_3 pour finalement converger vers la pulvérisation à l'Argon, cette recette donnant les meilleurs résultats. Les recettes au CHF_3 laissent un tapis de cristaux de taille nanométriques.

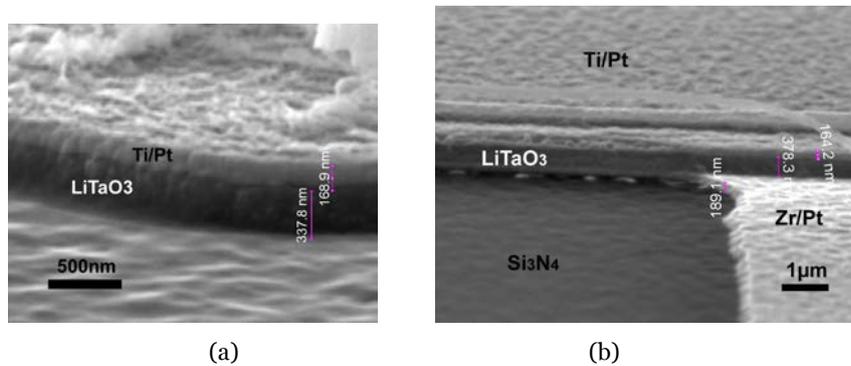


Figure 105. Images au microscope électronique des étapes de gravure RIE des différentes couches.

L'étape suivante permet de définir la forme de l'électrode inférieure avec une deuxième lithographie. Il est à noter que cette deuxième étape de lithographie est incluse dans la zone du plot pyroélectrique en dehors des lignes de connexions comme le montre la Figure 105 (a). Il y a donc une légère surgravure de l'électrode supérieure sur la périphérie du plot.

La troisième étape consiste à déposer une couche d'isolant à la surface du dispositif par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour deposition). Le matériau est le nitrure de silicium. Cette couche est ouverte grâce à troisième niveau de lithographie qui va définir des ouvertures sur les plots pyroélectriques et sur les plots de câblage.

Enfin la métallisation finale est faite la aussi pleine plaque puis une dernière étape de lithographie va définir la forme de l'électrode supérieure et de ses connexions vers les plots de câblage. Le dernier métal est enlevé par pulvérisation à l'Argon. L'électrode supérieure se compose donc de deux couches métalliques superposées.

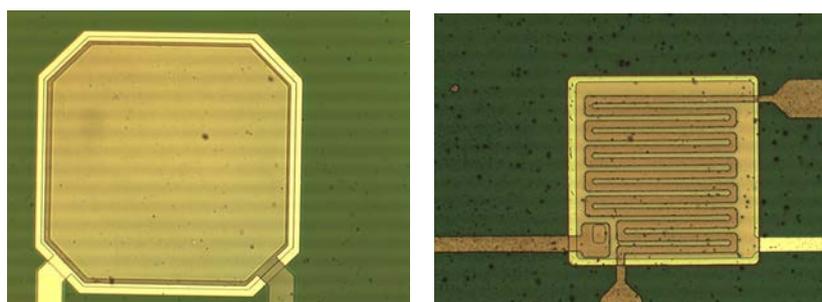


Figure 106. Image au microscope optique de structures composées à partir de couches minces de tantalate de lithium.

7.4. Matériaux pyroélectriques PZT en couche épaisse, application à la récupération d'énergie.

7.4.1. Sérigraphie de PZT

La dernière partie des développements autour des matériaux pyroélectriques concerne le PZT qui est cette fois-ci élaboré par une méthode de dépôt moins courante dans les microtechniques : la sérigraphie.

La sérigraphie consiste à faire transiter localement une pâte (une encre) à travers le maillage d'un écran tissé via le balayage de cette pâte par un racloir à la surface de l'écran. Cette méthode permet le dépôt et la structuration de couches relativement épaisses par rapport aux standards de la microfabrication. Après le dépôt par sérigraphie, le motif déposé est séché puis recuit (fritté) à haute température. Cette dernière phase est indispensable à la structuration du matériau, c'est à ce moment qu'il obtient ses propriétés. L'encre de sérigraphie est composée du matériau à déposer, sous forme de poudre calibrée, associée à un verre également en poudre (le Binder) et à un solvant qui confère à cet ensemble une certaine viscosité. L'étape de cuisson va évaporer le solvant, faire fondre le verre et fritter le matériau pour lui donner une cohésion mécanique mais également l'accrocher sur le substrat.

Nous avons donc utilisé cette technique pour produire des éléments pyroélectriques composés de trois couches de PZT (pour une épaisseur totale de $50\mu\text{m}$) entourées des électrodes inférieures et supérieures en argent. La précision des motifs est toutefois bien moindre que ce qui est couramment fait en lithographie, comme en témoigne la Figure 107.

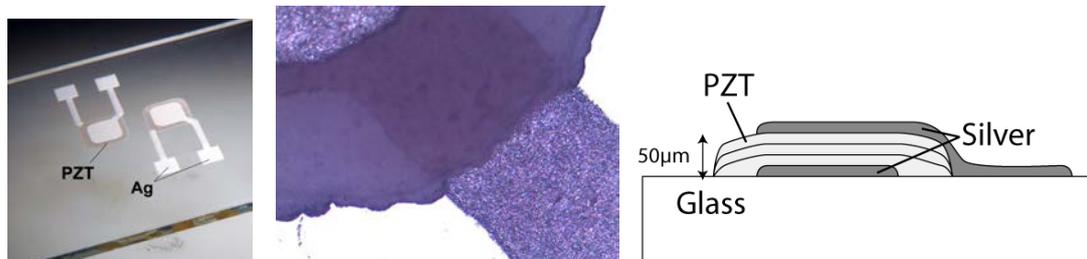


Figure 107. Sérigraphie de composants pyroélectriques en PZT sur verre.

Le dépôt de matériaux du type PZT par sérigraphie se fait habituellement sur des substrats en céramique, ce qui autorise des températures de frittage de l'ordre de 850°C [114]. Ici nous avons utilisé du verre, pour pouvoir par la suite venir coller un circuit microfluidique en PDMS. Le but étant d'avoir un substrat transparent et lisse; les substrats d'alumine étant relativement rugueux. Le problème de cette technique est de devoir limiter la température de frittage pour rester compatible avec le verre. C'est pourquoi nous avons limité la température à 650°C , ce qui permet de fritter le matériau sur du verre. Cependant les performances du matériau en terme de coefficient pyroélectrique sont moins bonnes. Nous avons mesuré un coefficient de $67\ \mu\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{k}^{-1}$, ce qui est pratiquement la moitié du coefficient du même matériau fritté à 850°C sur alumine.

La mesure du coefficient pyroélectrique utilise le même protocole que pour le PDMS, le signal pyroélectrique, visible sur la Figure 108 suit exactement celui de la dérivée de la température.

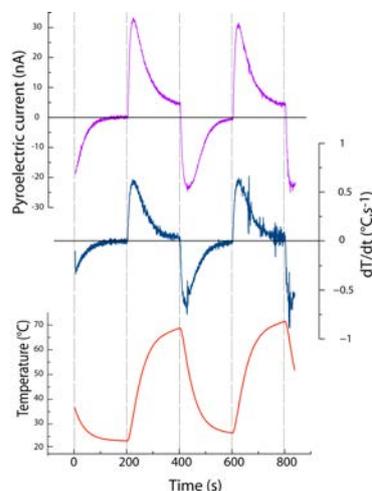


Figure 108. Caractérisation pyroélectrique du PZT

7.4.2. Transitoires thermiques en microfluidique

Une fois la méthode de dépôt par sérigraphie validée, nous avons étudié un système de récupération de l'énergie par pyroélectricité[114][119]. Nous avons décidé d'associer l'élément pyroélectrique en PZT avec un circuit microfluidique. Ce dernier permet d'appliquer un flux de liquide à différentes température et ainsi de créer un échauffement dans le temps de l'élément pyroélectrique. Pour ce faire nous avons utilisé le montage illustré sur la Figure 109. Il s'agit d'un circuit microfluidique en PDMS contenant un canal simple reliant une entrée et une sortie. Le canal a la largeur du l'élément pyro, c'est à dire 3mm et mesure environ 800 μ m de haut. Des pompes ou des seringues permettent la circulation de liquide dans le canal. En envoyant une succession de liquides à différentes températures, il est alors possible de créer des élévations et des baisses de température sur l'élément, comme en témoigne la courbe de la Figure 109 qui représente la tension à la sortie de l'amplificateur de transimpédance qui convertit le courant pyroélectrique en tension avec un gain de 10^6 . On remarque l'alternance de pics de courants positifs et négatifs qui sont proportionnels à la dérivée de la température par rapport au temps dans l'élément. Les liquides perfusés sont de l'eau à 80°C et de l'eau à température ambiante.

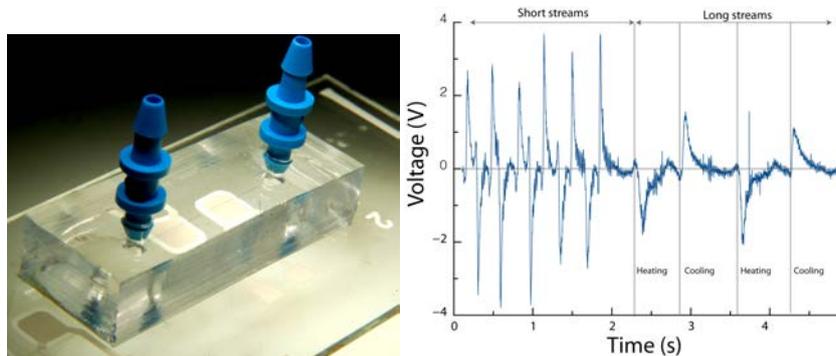


Figure 109. Photographie de l'élément pyroélectrique surmonté d'un circuit microfluidique en PDMS et tension de sortie au cours du temps de l'élément pyroélectrique (relié à un amplificateur courant tension) en fonction du passage de liquides chauds et froids.

Ce système fournit effectivement des pics de courants pyroélectriques, le temps de passage du fluide doit être comparé à la constante de temps thermique du système. Ce mode de stimulation en température de l'élément pyroélectrique nécessite toutefois de synchroniser les pompes des sources de chaleur ce qui complexifie le système. Nous avons donc cherché un système plus simple qui permette de générer in situ une alternance de fluides à différentes températures. C'est la que nous avons pensé à un système de génération de gouttes par la technique de la focalisation hydrodynamique à partir de deux fluides non miscibles.

Cette technique[120] est employée pour la génération de liposomes de taille déterminée. Les premiers travaux ont portés sur des systèmes à base de capillaires concentriques puis vers des solutions de type circuits en PDMS sur verre [121][122]. Le principe est basé sur l'instabilité de Rayleigh Plateau qui est responsable de la transformation d'un flux laminaire en une succession de gouttes. Ce phénomène est visible sur un robinet d'eau à faible débit et prends sa source dans la minimisation de la surface de liquide motivée par la tension de surface du liquide.

Le principe, pour générer une succession de gouttes dans un liquide, est de contraindre un flux laminaire de liquide par un autre flux de liquide non miscible avec le premier. Cela peut se faire par des jonctions en T ou en croix comme représenté sur les Figure 110 et Figure 111.

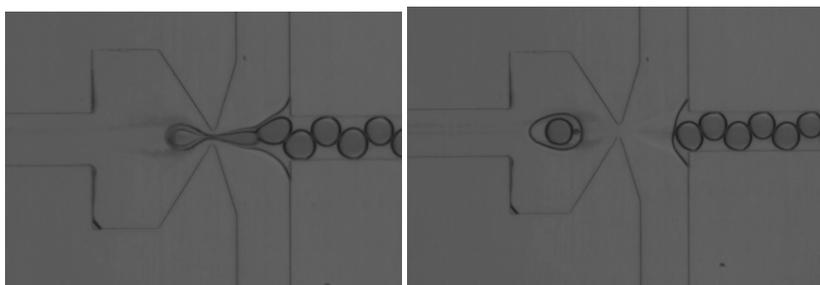


Figure 110. Génération de liposome dans un circuit microfluidique par la technique de la focalisation hydrodynamique (B.Charlot, N.Sanchez, P.Roux (SANOFI)).

Le premier liquide est donc focalisé par le flux du second liquide formant une constriction. La détente suivant le passage de cette constriction brise le flux laminaire et le liquide adopte une forme de chapelet de gouttes. En rajoutant une seconde jonction il est possible de générer des liposomes de taille déterminée comme le montre la Figure 110. Ce projet en particulier a été développé avec des collègues de SANOFI à Montpellier.

Nous avons donc utilisé cette technique pour générer une succession de gouttes d'eau à une température donnée dans un flux d'huile. Ce système à jonction en T est alors aligné à la surface de l'élément pyro de manière à ce que les gouttes se forment juste avant l'élément pour minimiser les échanges thermiques entre les deux liquides, comme illustré sur la Figure 111.

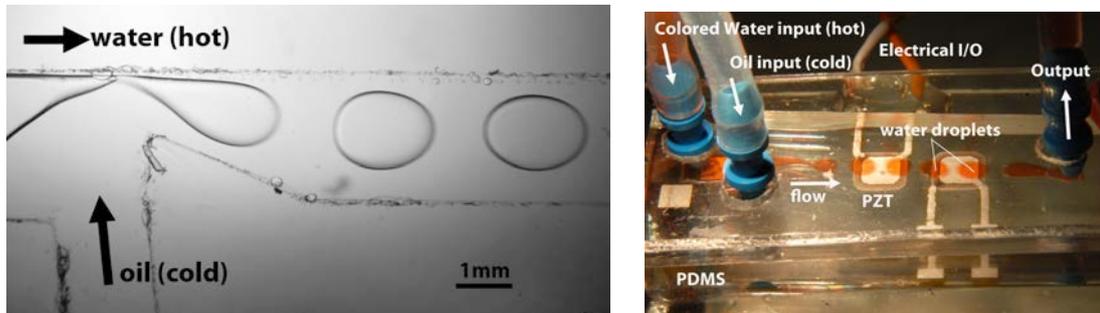


Figure 111. Génération d'une succession de goutte d'eau chaude dans un flux d'huile par la technique de la focalisation hydrodynamique en circuit microfluidique pour la création de transitoires de température sur un élément pyroelectrique.

Une fois le système en place nous avons mesuré le courant pyroelectrique avec le même montage que précédemment, à savoir un amplificateur de transimpédance. Après une étape de stabilisation du flux de gouttes et la thermalisation du dispositif, nous observons une succession de pics de courants positifs et négatifs qui correspondent au passage des gouttes d'eau qui échauffent localement l'élément pyro suivi d'une étape de refroidissement par le flux d'huile à plus basse température. La valeur des pics de courant est toutefois plus faible qu'avec une succession de flux d'eau ou d'huile à l'instar des premières expériences menées.

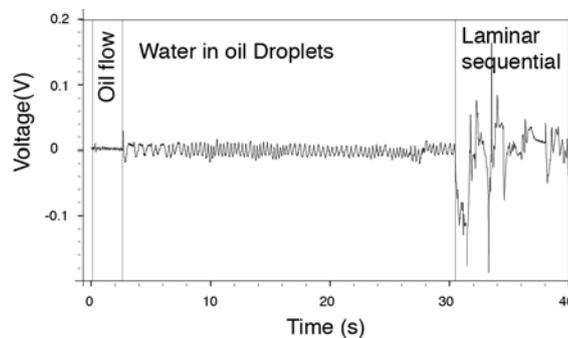


Figure 112. Mesure du courant pyroelectrique (montage transimpedance) généré par le système microfluidique de génération de gouttes.

Ce système doit être optimisé, et notamment au niveau du rapport de taille entre les gouttes, leur vitesse de défilement et la taille de l'élément qui doit permettre un transfert de chaleur optimale et une élévation de température maximale. Malgré cela, le système a montré la production d'un signal électrique à partir de sources de températures et sans adjonction d'un système de pompage synchronisé.

La poursuite de ce travail va donc consister en d'une part l'optimisation des transferts de chaleur dans le dispositif et d'autres part à l'amélioration du matériau sérigraphié et enfin une analyse de la puissance électrique générée.

8. Conclusions.

Cette seconde partie, intitulée microthermique, est composée de deux axes de recherche qui ont été menés dans deux laboratoires différents (TIMA et IES) à des périodes différentes, de 2002 à 2005 à TIMA et depuis 2007 à l'IES.

Le premier axe a concerné les techniques de thermographie de circuits intégrés et s'est déroulé au Laboratoire TIMA. Cet axe de recherche répondait à une problématique industrielle de caractérisation de la température dans des circuits intégrés. L'échauffement des circuits intégrés, du à l'intégration poussée de millions de transistors cadencés à des fréquences de plus en plus importantes, est un problème majeur de l'industrie de la microélectronique. En coopération avec des laboratoires membre du GDR micro et nanothermique nous avons évalué certaines techniques de thermographie, en développement dans ces laboratoires et appliqué certaines à un cas très concret de mesure de la température de surface d'un circuit intégré.

En particulier, une coopération avec des chercheurs de l'ESPCI nous a permis d'adapter la technique de la thermoreflectance au cas particulier de la cartographie en température d'un circuit numérique pendant un cycle de calcul. Pour cela nous avons conçu un circuit intégré CMOS spécifique permettant d'utiliser la technique d'imagerie par thermoreflectance. Cette méthode est la seule qui permette d'observer l'échauffement des lignes de connectique à l'intérieur même du circuit intégré et ceci à une échelle bien plus petite que ne l'autorise les techniques plus classiques de thermographie par émission infrarouge. Nous avons montré qu'il était possible d'observer l'échauffement de lignes de polysilicium de $0,35\mu\text{m}$ de large mais également de produire une carte de la température d'un circuit intégré pendant son cycle de fonctionnement.

En parallèle à ces travaux de mesure, avons également commencé à développer des outils de conception qui permettent de prendre en compte la dissipation de la chaleur au niveau de l'étape de placement routage dans le flot de conception des circuits intégrés. Les mesures opérées par nos partenaires physiciens devant servir à valider les simulations faites à partir de modèles très simplifiés de dissipation thermique. Le but étant d'obtenir facilement une simulation rapide de la carte des températures. Ces travaux ont été jugés très prometteurs lorsque nous les avons présentés en conférence. Cependant nous n'avons pas mené ces travaux à un niveau de développement qu'ils auraient mérité, ceci faute de temps et de moyens, mais également à mon changement d'affectation et mon départ vers le Japon.

La seconde partie du travail exposé dans cette section a concerné les travaux effectués dans l'équipe MITEA de l'IES dès mon retour en France en 2007. J'ai bénéficié de l'expertise de mes collègues en terme de science des matériaux et ai entrepris le développement de capteurs et de microsystèmes utilisant ces matériaux actifs. Les travaux présentés ici portent principalement sur trois matériaux obtenus par des méthodes différentes, le dépôt par pulvérisation cathodique pour le Tantate de Lithium, la cristallisation d'un polymère pour le PVDF et le frittage après sérigraphie pour le PZT. Ces trois techniques donnent des matériaux ayant des épaisseurs et des substrats différents, mais montrent chacun des propriétés pyroélectriques que nous allons maintenant exploiter dans diverses applications. Ce fut notamment le cas pour le PZT en couche épaisse que nous avons utilisé dans un circuit microfluidique en vue de générer un courant pyroélectrique à partir d'un écoulement diphasique à différentes températures créant une élévation rapide de température. Les résultats ont montré effectivement un courant pyroélectrique fait d'alternances positives et négatives, conséquences des étapes d'échauffement et de refroidissement de l'élément PZT suite au passage des gouttes à températures différentes. Nous n'avons pas, pour l'heure, évalué la puissance produite ni le rendement effectif d'un tel système, mais il ne doit pas être remarquable. La pyroélectricité étant un phénomène indirect et pas vraiment adapté à la conversion d'énergie. Cependant, la méthode de stimulation de l'élément pyroélectrique par écoulement diphasique est quelque chose d'inédit et a montré son efficacité à générer des transitoires thermiques.

Actuellement nous nous orientons vers l'étude du caractère piézoélectrique des couches sérigraphiées pour notamment les associer à un circuit microfluidique et générer des ultrasons pour des études d'acoustophorèse dans des écoulements contenant des particules ou de cellules.

Partie III

Projet :

Les microsystemes
pour la biologie
cellulaire

Introduction

Cet axe de recherche correspond à une nouvelle orientation de mon activité et a été lancé à partir de 2009. C'est à Tokyo, au LIMMS que j'ai commencé à m'intéresser au domaine en observant mes collègues travaillant dans les laboratoires des Pr. Fujii, Fujita et Takeuchi au développement de circuits microfluidiques et bioMEMS. Peu après mon arrivée à Montpellier j'ai donc décidé de lancer une activité dans le domaine en partenariat avec des chercheurs en biologie cellulaire de l'université de Montpellier.

Malgré quelques déconvenues au niveau du financement (cinq projets ANR refusés...) et quelques tâtonnements au niveau des équipes partenaires, j'ai développé un axe de recherche centré sur l'étude de l'impact de stimuli physiques sur l'activité de cellules en culture.

Ce projet de recherche concerne le développement de micro capteurs et micro actionneurs pour l'étude de l'effet des stimulations physiques (à la fois thermique, mécanique et optique) sur le comportement de cellules en culture in vitro. C'est un projet à long terme qui inclue donc à la fois des développements de MEMS, de micro actionneurs et de circuits microfluidiques mais également impose une coopération avec des équipes de biologistes. A l'heure actuelle, je coopère dans le cadre de projets financés avec deux équipes de l'Institut des Neurosciences de Montpellier. L'une dirigée par Christian Jorgensen sur les cellules souches mésenchymateuses (cellules des articulations) et l'autre équipe, dirigée par Jean Valmier sur la régénération axonale des neurones. Dans chaque cas nous développons des circuits microfluidiques instrumentés pour étudier l'impact de stimuli physiques sur la différenciation cellulaire et la croissance axonale.

Les cellules sont sensibles à leur environnement, par les interactions entre cellules et avec le milieu extracellulaire au niveau biochimique mais sont également sensibles aux interactions physiques, que ce soit thermique, mécanique ou optique. Les cellules des articulations par exemple sont sensibles aux efforts mécaniques subies par ces dernières et la présence de stimulations (compression ou élongation) va influencer sur leur comportement comme par exemple la production de collagène. Au niveau du système nerveux, les neurones des systèmes somato-sensoriel et sensori-moteurs sont sensibles aux déformations mécaniques mais également aux stimulations optiques qui peuvent stimuler la croissance axonale ou générer une activité électrophysiologique. Notre but est donc de développer des microsystèmes pour pouvoir appliquer ces stimulations à l'échelle des cellules et observer l'effet de ces contraintes.

La coopération scientifique avec des équipes de chercheurs en biologie cellulaire se fait dans le cadre des thèmes de recherche propres à ces équipes. Nous adressons donc in fine des problèmes de recherche médicale, que ce soit la thérapie des articulations par cellules souches ou la régénération nerveuse du système sensori moteur. Cependant mon projet de recherche ne vise pas uniquement ces thématiques mais vise des études plus fondamentales sur l'effet des stimulations mécaniques et thermique sur l'électrophysiologie notamment.

Ce projet nécessite des développements technologiques et scientifiques pour produire les microsystèmes qui permettront ces expériences :

Au niveau des matériaux :

- Les substrats de culture micro et nano-structurés, qui permettent un guidage de la croissance cellulaire nécessitent des matériaux biocompatibles et stérilisables. Outre les techniques classiques de fabrication des circuits microfluidiques en PDMS sur verre, nous développons des techniques de microstructuration du Polyéthylène Glycol qui est un matériau qui réduit l'adhérence cellulaire. Associé à un polymère photopolymérisable il est possible de le déposer et de créer des structures de guidage par photo polymérisation à travers une matrice de PDMS.
- Les électrodes pour la mesure des potentiels extracellulaires et la stimulation thermique nécessitent aussi des matériaux biocompatibles et offrant une impédance adaptée à la mesure des potentiels extracellulaires. Nous travaillons donc avec des métaux nobles comme l'or et le platine, avec la possibilité d'utiliser des couches de noir de platine qui augmentent la surface d'échange lors de la mesure des potentiels extracellulaires. Egalement nous développons le dépôt et la structuration du PEDOT :PSS [p-1] qui est un matériau polymère conducteur et connu pour diminuer l'impédance électrique des électrodes d'électrophysiologie.
- Enfin les matériaux actifs : les pyroélectriques et piézoélectriques pour la mesure des échanges thermiques et l'excitation mécanique aux petites dimensions. Dans ce domaine je me suis appuyé sur le savoir faire de mon équipe d'accueil qui travaille à l'élaboration de certains de ces matériaux depuis quelques années. Actuellement nous développons en équipe trois matériaux ferroélectriques,

le PVDF, le LiTaO_3 , et le PZT, qui sont associés chacun à des méthodes de dépôt et de structuration différentes. La maîtrise de ces matériaux a nous permettre d'élaborer des solutions de mesure de la température à l'échelle des cellules mais également de développer des système électromécaniques de stimulation des cellules, intégrés dans des circuits microfluidiques.

Au niveau des dispositifs microsystèmes :

- Les circuits microfluidiques en PDMS ou verre pour la culture cellulaire et la croissance axonale guidée.
- Les méthodes de microfabrication et de structuration des matériaux précédemment cités.
- L'intégration des microcapteurs et micro actionneurs dans des circuits microfluidiques.

Enfin au niveau du système de biologie cellulaire.

- La maîtrise de la culture cellulaire en circuit microfluidique, qui est validée pour les cellules souches mésenchymateuse et les neurones du système sensori-moteur.

Enfin un troisième projet se déroule en coopération avec Etienne Schwob de l'IGMM sur le peignage de molécules d'ADN. Ce projet consiste à développer de nouvelles techniques de dépôt et d'élongation de molécules d'ADN pour permettre l'observation en fluorescence de la position et du nombre des sites de réplication au long de la double hélice d'ADN. Nous sommes donc en train de développer une technique de dépôt par démouillage forcé d'une solution d'ADN sur un substrat microstructure et en parallèle un circuit microfluidique contenant des nanocanaux pour forcer le déploiement et le transit de filaments longs d'ADN, toujours dans une optique d'observation. Ces premiers travaux qui ont fait l'objet d'une publication vont nous mener à développer de nouvelles techniques pour manipuler ces molécules.

9. Contraintes physiques à l'échelon cellulaire : impact sur la différenciation de cellules souches mésenchymateuses

Ce projet est une coopération avec l'équipe Inserm 844 « Groupe cartilage engineering » dirigée par Christian Jorgensen de l'Institut des Neurosciences de Montpellier. Ce sont eux qui ont initié ce projet en nous demandant de réfléchir à un système pouvant appliquer des contraintes physiques sur des cellules. Suite à ces discussions, nous avons soumis le projet à l'appel d'offre du programme interdisciplinaire du CNRS « Interface physique-chimie-biologie; Soutien à la prise de risque » sous le nom STIMDIF : Contrainte physique à l'échelon cellulaire : impact sur la différenciation de cellules souches mésenchymateuses. Ce soutien financier a permis le développement du projet qui est en cours de réalisation à l'heure actuelle.

9.1. Problématique

Le cartilage articulaire est une structure avasculaire, située aux extrémités des os longs et composée d'une large quantité de matrice extracellulaire riche en collagènes et glycoprotéines et d'un petit nombre de cellules, les chondrocytes. Ce sont ces cellules qui sécrètent la matrice extracellulaire du cartilage, cette dernière assurant les fonctions de résistance aux forces de cisaillements et à la compression (maintien de la posture et amortissement de la poussée ou des chocs). Le cartilage permet aussi la diminution des frictions en favorisant le glissement des os les uns contre les autres. Une des principales caractéristiques de ce tissu est sa faible capacité d'auto-régénération qui est responsable, lors de pathologies, de la dégradation progressive et irréversible du cartilage. La régénération du cartilage constitue donc un enjeu majeur.

Les solutions cliniques proposées à l'heure actuelle reposent sur des interventions chirurgicales lourdes faisant appel à des techniques de microfracture, de plastie en mosaïque ou de greffe de tissus[138]. Ces techniques donnent des résultats satisfaisants à court et moyen terme mais en dernier recours, la pose de prothèses doit être envisagée. De manière similaire, la thérapie cellulaire basée sur l'utilisation de chondrocytes autologues donne des résultats intéressants, mais a aussi montré des limites. Il apparaît notamment que les chondrocytes issus de patients atteints d'arthrose ne sont plus fonctionnels et que d'autre part, les chondrocytes amplifiés ex vivo perdent leur capacité anabolique à sécréter la matrice cartilagineuse. C'est pourquoi, des stratégies alternatives sont recherchées et une des approches privilégiées est l'utilisation des cellules souches mésenchymateuses pour une ingénierie tissulaire.

Les cellules souches mésenchymateuses (CSM) ont la capacité de se différencier en plusieurs lignages (Figure 113) : tissu adipeux (adipocytes), os (ostéoblastes), muscle (myoblastes), tendons et ligaments (fibroblastes) et bien sûr en cartilage : les chondrocytes. Leur intérêt pour la réparation du cartilage articulaire a été montré dans de nombreuses études in vitro et in vivo[141]. Cependant, une meilleure connaissance des facteurs moléculaires et environnementaux responsables de l'induction et du maintien du phénotype chondrocytaire est indispensable pour une maîtrise du processus de différenciation des CSM et la mise en place d'une thérapie cellulaire efficace.

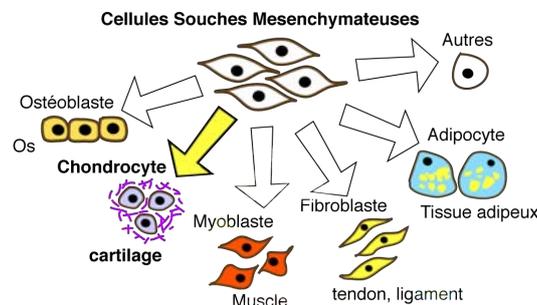


Figure 113. Différenciation des cellules souches mésenchymateuses.

Outre les facteurs moléculaires, les facteurs environnementaux jouent un rôle important pour la stabilité du phénotype chondrocytaire, Parmi ceux-ci, on peut citer la tension en oxygène et la culture en trois dimensions [142]. Cette culture en 3D est reproduite au sein des microagrégats mais aussi en utilisant des matrices à base de biomatériaux naturels ou synthétiques qui ont un rôle de support cellulaire et qui peuvent favoriser l'orientation de la différenciation cellulaire vers un phénotype défini.

Enfin, les contraintes mécaniques ont un rôle certain sur la fonctionnalité et le métabolisme chondrocytaires[143]. Ainsi, ces sollicitations biomécaniques engendrent des contraintes locales plus ou moins intenses en fonction du poids de l'individu, sa tension musculaire et son activité physique. Ces contraintes de compression déclenchent un signal de mécano-transduction aboutissant à la stimulation de l'activité sécrétrice de ces cellules [143] dont les mécanismes sont encore très mal compris. L'utilisation de stimulations mécaniques devrait donc permettre d'orienter la différenciation des CSM en chondrocyte ou maintenir le phénotype différencié.

En résumé, ce projet vise à déterminer l'effet de stimuli mécaniques sur la différenciation d'un ensemble de cellules. En particulier nous voulons répondre aux questions suivantes :

- Une stimulation mécanique en présence de facteur de différenciation (TGF- β) (Transforming Growth Factor beta) favorise la chondrogenèse ?
- Une stimulation mécanique est-elle suffisante pour induire le phénotype chondrocytaire ou le maintenir ?

9.2. Etat de l'art

Il existe dans la littérature quelques travaux ayant porté sur la stimulation mécanique de cellules en culture[137] [145]. Une partie de ces travaux portent sur les facultés d'adhésion des cellules sur des substrats micro structurés [143]. Dans ces systèmes, les cellules adhèrent à un substrat déformable et structuré de lignes parallèles de quelques microns pour renforcer l'adhésion cellulaire. Le tapis cellulaire est ensuite étiré ou comprimé par la déformation du substrat (Figure 114(a)). Le substrat souple est le plus souvent en PDMS avec un *coating* spécifique comme par exemple de la fibronectine [147][148].

Une autre technique, illustrée sur la Figure 114(b), consiste à cultiver les cellules sur une membrane circulaire suspendue qui sera déformée par aspiration dans la chambre sur laquelle elle repose et ainsi comprimer les cellules accrochée à sa surface [149]. Dans une autre configuration, celle de la Figure 114(d), une membrane en PDMS située au dessus du tapis cellulaire et amené au contact des cellules par déformation suite à la mise sous pression d'une cavité d'air[146].

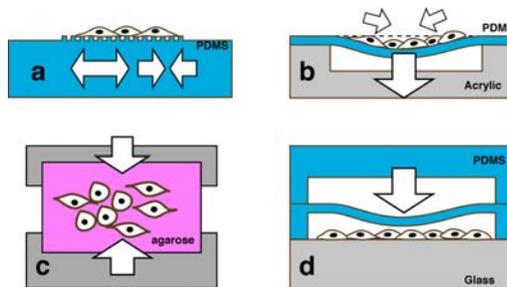


Figure 114. Schéma des différentes structures développées pour imprimer des contraintes mécaniques à des cellules en culture, Substrat structuré déformable (a), membrane de support déformée par dépression (b), suspension gélifiée en compression, chambre de culture à membrane en compression (d).

Enfin une étude a porté sur un système ne faisant pas recours à un circuit microfluidique mais en la constitution d'un assemblage en trois dimensions de cellules dans un gel de collagène ou d'agarose [150]. La structure gélifiée, schématisé sur la Figure 114(d), est ensuite portée en compression par un moteur linéaire qui appuie sur la structure, imprimant une contrainte aux cellules par la déformation du gel.

9.3. Solution proposée

La solution que nous avons proposé est décrite sur la Figure 115 et se base sur la structure de la Figure 114(d). c'est une solution à base d'un circuit microfluidique classique en PDMS collé sur substrat de verre. Les cellules étudiées seront cultivées dans une chambre de culture permettant l'immobilisation d'un tapis de cellules et l'application de contraintes mécaniques par déformation de la chambre de culture.

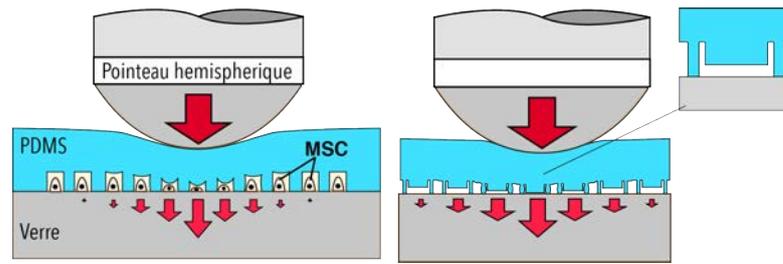


Figure 115. Vue en coupe du principe du circuit microfluidique pour l'application de contraintes mécaniques sur un tapis de cellules en culture, chambre de compression simple et chambre de compression à deux niveaux.

La particularité du circuit tient dans la présence dans la chambre d'un réseau régulier de pilier permettant de rigidifier la structure et de réduire les déplacements. Comme montré sur la Figure 116, l'application de la pression se fait par le plaquage d'un pointeau hémisphérique à la surface de la structure en PDMS qui transmet l'effort à la chambre de culture. La chambre est ainsi composée d'une zone où est réparti un réseau de piliers verticaux de 20 à 40 μm de haut et distants dans le plan de 200 μm de manière à pouvoir enserrer les cellules et obtenir un tapis de cellules régulièrement espacées. Les aspects mécaniques sont traités dans la section suivante.

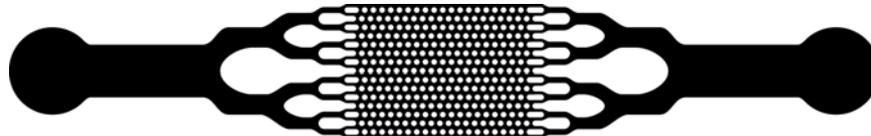


Figure 116. Dessin du circuit microfluidique. La chambre de culture au centre se compose d'un ensemble de piliers pour répartir la déformation de la structure.

L'application de ces contraintes dans le temps va donc reproduire les conditions de chocs et d'effort qui sont appliquées aux chondrocytes in vivo dans une articulation. L'analyse de la fluorescence permettra ensuite d'estimer et de qualifier l'influence des conditions physiques de culture et de stimulation.

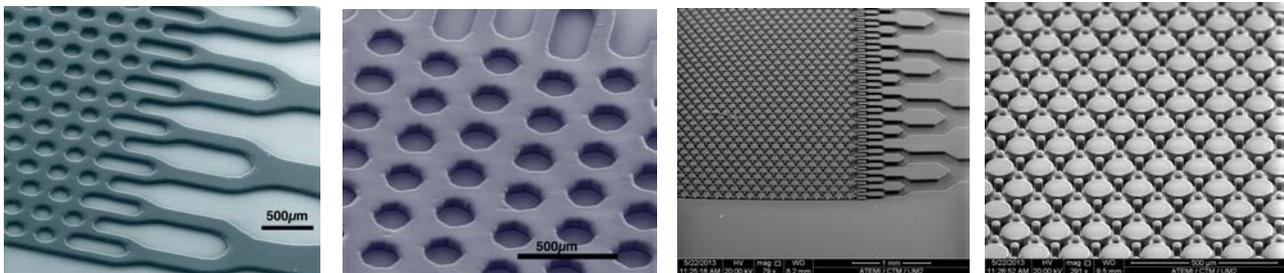


Figure 117. Photographies au microscope électronique à balayage de moules en résine SU-8 pour la fabrication de chambre de culture en microfluidique (en haut) et circuit microfluidique moulé en PDMS de la version chambre à deux niveaux (en bas)

La technique de fabrication utilisée est classique. Le positif a été réalisé en résine épaisse SU8 sur un substrat de silicium monocristallin. L'épaisseur de résine définit donc la hauteur de la chambre de culture et a une grande importance. En fonction des essais de culture cellulaire il s'est avéré que la hauteur optimale est de 35 μm . cette hauteur permet l'injection des cellules dans la chambre et le passage du milieu de culture sans affecter les cellules par effet de cisaillement du au passage du fluide. En outre, les cellules mesurant quelques 20 μm de diamètre, elles ne touchent pas la partie supérieure de la chambre. Cette dernière venant au contact des cellules uniquement lorsque la pression du pointeau est appliquée.

Le PDMS est ensuite versé à la surface du moule en SU8. Le matériau est dégazé sous vide puis réticulé à 70°C pendant trois heures. Une fois solidifiées les structures en PDMS sont découpées et collées sur les substrats en verre par application d'un bref plasma oxygène (10s, 35W RF) sur les faces en regard du verre et du PDMS.

Les entrées sorties sont poinçonnées grâce à un kit de ponction et des embouts de pipettes sont enfichées dans les entrées sorties, comme montré sur la Figure 118.

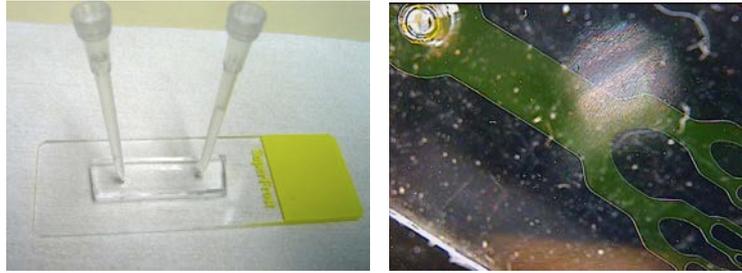


Figure 118. Schéma du circuit microfluidique pour la culture de cellules souches sous contraintes mécaniques

9.4. Contraintes

L'application de contraintes mécaniques sur le tapis de cellules en culture est faite avec un moteur piezoélectrique à déplacement linéaire, visible sur la Figure 120. Le moteur est fixé à une armature métallique permettant de fixer la lame de verre contenant le circuit microfluidique. Le support est également percé dans sa base pour pouvoir observer avec une loupe binoculaire la chambre de culture à travers la lame de verre.

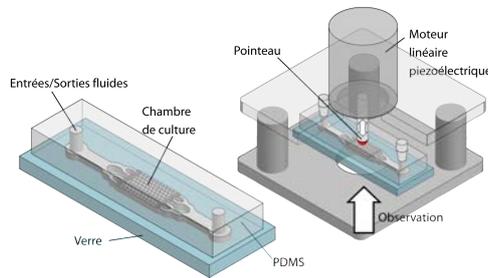


Figure 119. Système d'application de contraintes mécaniques à des cellules en culture dans un circuit microfluidique.

L'extrémité de l'axe mobile est équipée d'un pointeau hémisphérique en téflon appuyant directement à la surface du PDMS. Un jeu de pointeaux de différents diamètres permet de faire varier la surface et donc la pression transmise par la matrice PDMS vers la chambre de culture. Le moteur est un système piézoélectrique à reptation avec contre-réaction permettant des déplacements précis et rapides. Le pas de déplacement en mode reptation est de $14\mu\text{m}$ et un mode analogique permet d'effectuer des oscillations de quelques microns autour d'une position moyenne.

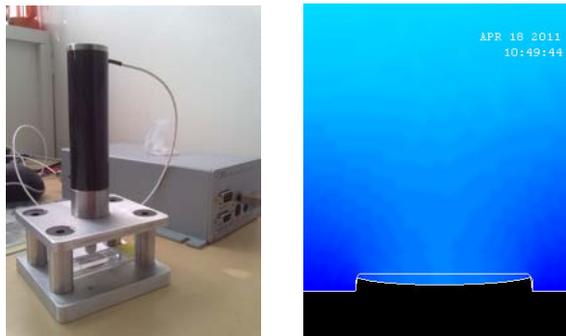


Figure 120. Photographie du moteur piezoélectrique, et simulation FEM de la déformée autour de la chambre de culture

La chambre de culture est plus large que le pointeau et composée d'un ensemble de piliers permettant de répartir la charge. Lors du déplacement du pointeau dans la matrice viscoélastique, la pression est répartie et est soutenue par les piliers, qui fléchissent également. Des simulations en éléments finis nous ont permis d'obtenir un ordre de grandeur des déplacements des plafonds de la chambre de culture. Il existe, en gros un facteur 10 à 20 (suivant l'épaisseur totale du PDMS et la distance inter piliers) entre le déplacement du pointeau et le déplacement du plafond de la chambre. En outre, suivant la position des piliers par rapport à l'axe du pointeau, le déplacement du plafond varie, depuis un écrasement total (le plafond touche la lame de verre) jusqu'à un déplacement nul. Ce système permet donc d'obtenir un gradient de déplacement depuis le centre jusqu'au bord de la zone contrainte. Ce gradient permettra de juger les effets des différentes contraintes sur le tapis cellulaire, en espérant obtenir une image de fluorescence montrant une structure circulaire.

Le système est donc peu sensible aux erreurs de positionnement du pointeau dans le plan, par rapport au centre de la chambre de culture mais également aux défauts d'orthogonalité de l'axe du moteur par rapport à la lame de verre. Et enfin, de la position moyenne de pénétration du pointeau dans la matrice PDMS, il suffit que le centre de la zone contrainte soit à écrasement total, ce qui est facilement observable à la binoculaire.

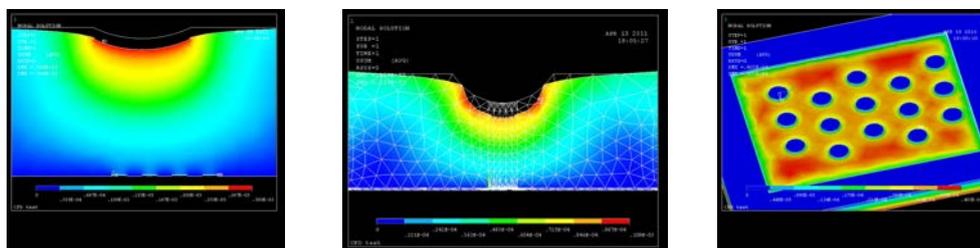


Figure 121. Simulation en éléments finis de la déformation d'une structure microfluidique en PDMS sous l'effet de l'écrasement d'un pointeau.

Les simulations en éléments finis, visibles sur la figure ci dessus montrent l'importance de deux facteurs qui sont la hauteur totale de la structure en PDMS qui définit le coefficient de raideur du système et la distance entre piliers et le diamètre de ces derniers, ces deux facteurs déterminent le déplacement du plafond de la chambre de culture et donc l'écrasement subi par les cellules. Les simulations ont été conduites en ignorant la composante visqueuse du matériau, hypothèse qui est valable pour des déplacements lents par rapport à la fréquence de résonance mécanique du système, ce qui est le cas puisque les déplacements se font à une fréquence de quelques hertz.

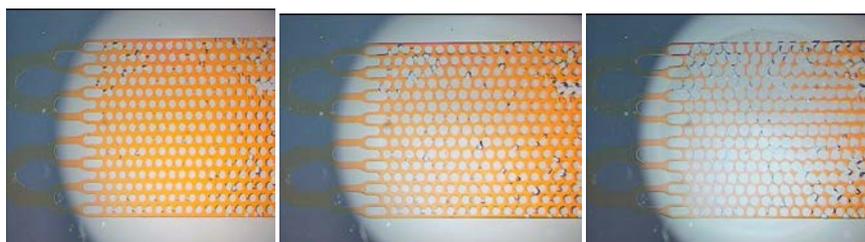


Figure 122. photographie sous microscope de l'écrasement d'une chambre de culture microfluidique remplie d'eau colorée à l'éosine.

9.5. Cultures

Les cultures cellulaires sont effectuées à l'Institut des Neurosciences de Montpellier par mon collègue Marc Mathieu. Les cellules souches mésenchymateuses sont obtenues à partir d'une lignée de chondrocytes humains [151] (appelée C20A4). Ces chondrocytes sont dé-différenciés par la culture en présence de serum incluant des facteurs de croissance et d'adhésion et deviennent donc des MSC qui servent alors pour en étudier les mécanismes de différenciation.

Pour déterminer si les MSC sont effectivement différenciés en chondrocytes, il est nécessaire de pouvoir les reconnaître, notamment en marquant leur production de matrice extracellulaire.

Pour cela nous utilisons une protéine fluorescente, la GFP qui sera exprimée en association à l'expression de l'Aggrecan qui est une protéine (Protéoglycane) constituant du cartilage. L'expression de GFP par les chondrocytes est obtenue par transfection des cellules. Un plasmide portant le promoteur GFP est lié à un polymère cationique ayant la particularité de passer à travers la membrane cellulaire. L'ADN du plasmide est donc relargué dans le cytoplasme ou il migre vers le noyau et se combine avec l'ADN génomique. Un gène de résistance à un antibiotique (la néomycine) est également associé au plasmide, ce qui permet de sélectionner ensuite les cellules ayant effectivement intégrées cet exogène dans leur génome.

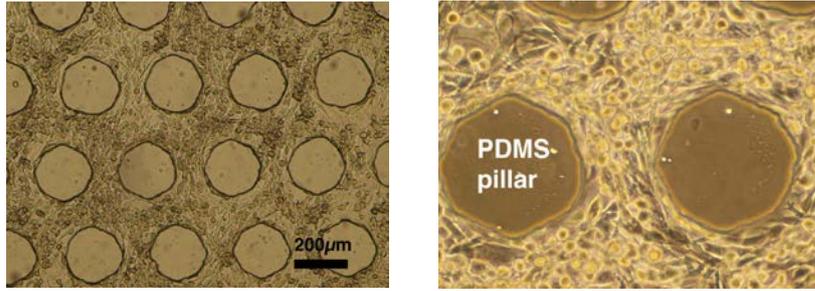


Figure 123. Image au microscope à contraste de phase d'un tapis de cellules souches mésenchymateuses cultivées dans une chambre microfluidique.

Le protocole d'étude est le suivant.

- Les cellules, dans un milieu de culture, sont injectées dans le circuit microfluidique qui a été préalablement nettoyé et aseptisé à l'alcool. Les cônes d'entrées sorties sont bouchés et le système est mis en incubateur pendant 24 à 48 heures.

- Les contraintes sont appliquées pendant trois heures à une fréquence de 1Hz.

- Le système est remis en incubateur pendant 72h avant observation par fluorescence.

La hauteur de la chambre de culture est également un paramètre important pour la culture, nous avons essayé différentes hauteurs, allant de 15 à 70μm pour finir par utiliser des chambres de 35μm de haut, ce qui permet de laisser à la surface des cellules une zone de déplacement de liquide.

L'étude de l'influence de la stimulation mécanique de cellule sur leur phénotype et de répondre aux questions qui sont :

- Une stimulation mécanique favorise t-elle la chondrogenèse ou la réinduction du phénotype chondrocytaire ?

- Quelle est l'influence de l'intensité et/ou de la fréquence de la contrainte physique ?

Actuellement, l'expérience est installée dans les locaux de l'INM. La transfection des cellules a donné de bons résultats comme le montre la photo sur la Figure 124 ou l'on peut apercevoir au microscope à épifluorescence la présence de cellules différenciées (fluorescence verte)

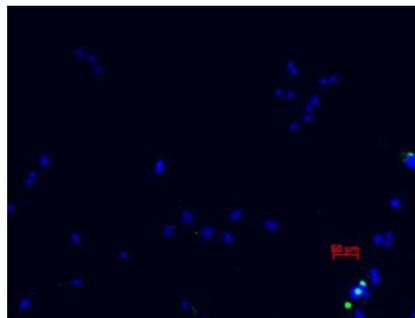


Figure 124. Photo au microscope à fluorescence

Cependant nous faisons face à des problèmes de culture en circuit microfluidique en particulier avec la lignée transfectée. Mes collègues essaient actuellement une autre lignée en espérant avoir de meilleurs résultats.

10. Microsystèmes pour les neurosciences

Ce projet de recherche est en cours de développement en collaboration avec plusieurs équipes de biologistes des neurosciences. D'une part avec mes collègues de Jean Valmier et Patrick Carroll, ce dernier dirigeant l'équipe « Différentiation neurale et connectivité dans le système somato-sensoriel » de l'Institut des Neurosciences de Montpellier. Le but ici est de développer des dispositifs microfluidiques pour stimuler et étudier la croissance axonale de neurones. Ce projet est réalisé également en partenariat avec mon collègue de l'IES Fabrice Bardin et son étudiant de thèse Lambert Paris.

Ce projet de recherche autour des neurosciences se fait également en partenariat avec plusieurs équipes du MMDM de l'université Montpellier 2 et avec l'équipe de Frédéric Saudou de l'institut Curie en région Parisienne. Dans cette coopération nous allons développer des systèmes microfluidiques avec électrodes et capteurs pour étudier d'une part le transport axonale et les mécanismes de connexion synaptiques dans des systèmes de co-culture (neurones de différentes parties du cerveau de souris).

Ces projets, même si ils ont des finalités différentes, nécessitent les mêmes développements technologiques pour pouvoir à la fois cultiver des neurones, guider leur croissance et appliquer des contraintes physiques pour étudier les réactions de neurones et leur physiologie.

10.1. Contraintes physiques à l'échelon cellulaire : impact sur la régénération axonale

Le système sensori-moteur contrôle les fonctions motrices volontaires ainsi que d'autres réflexes nécessaires à la posture, la coordination motrice ou certains réflexes de protection. Du côté sensitif, les neurones sensitifs somato-sensoriels présentent une grande diversité et transmettent les informations sur la température, les stimuli douloureux, le toucher et la tension des muscles, depuis la périphérie vers la moelle épinière puis les centres supérieurs du cerveau. Du côté moteur, les motoneurones contrôlent l'unité motrice de base indispensable à la contraction du muscle squelettique.

Une lésion nerveuse des nerfs périphériques, provoquée par un traumatisme, un traitement anti-cancéreux, une infection virale ou une maladie génétique, peut induire une perte temporaire, partielle ou complète des connections nerveuses motrices et sensitives vers les effecteurs musculaires et cutanés. Dès les premières heures suivant la lésion, des modifications transcriptionnelles importantes se mettent en place et permettent aux neurones de passer d'un mode de fonctionnement normal à un mode de conditionnement de type « régénération ». Ce nouvel état modifie les capacités intrinsèques du neurone et permet par exemple une vitesse de pousse axonale accrue en vue d'une ré-innervation de ses cibles périphériques. Cependant, après traumatisme, ce conditionnement neuronal est limité dans le temps et s'arrête souvent avant le temps nécessaire à une récupération motrice et sensitive complète. De plus ce mécanisme peut induire l'apparition de douleurs neuropathiques. Aussi arriver à comprendre les mécanismes qui régissent la régénération nerveuse à l'échelle cellulaire et moléculaire est un enjeu de taille pour mettre au point des stratégies thérapeutiques adaptées.

Outre la stimulation biochimique, les cellules nerveuses sont sensibles à une quantité de paramètres et de stimuli physiques. Certaines stimulations dans le registre mécanique[124], ont un effet à la fois sur la morphologie et sur le développement mais également sur l'activité électrophysiologique des neurones. Nous comptons ainsi étudier l'effet de stimulations mécaniques sur la régénération axonale.

10.2. Stimulation optique, génération de potentiel d'action et stimulation de la croissance axonale

Dans le domaine optique, la stimulation de cellules nerveuses par flux lumineux permet la génération de potentiels d'action comme l'ont montré mes collègues de l'IES, Fabrice BARDIN et Lambert PARIS. Ils travaillent en coopération avec l'équipe de Jean Valmier à l'INM sur la génération de potentiels d'action dans les neurones par tir laser infrarouge. Actuellement l'irradiation de neurones en culture se fait au niveau du corps cellulaire en entier avec une fibre optique dans les longueurs d'onde infrarouge. Les résultats ont montrés qu'il était possible de générer un potentiel d'action par une stimulation lumineuse de quelques ms avec une dose précise (voir la Figure 125).

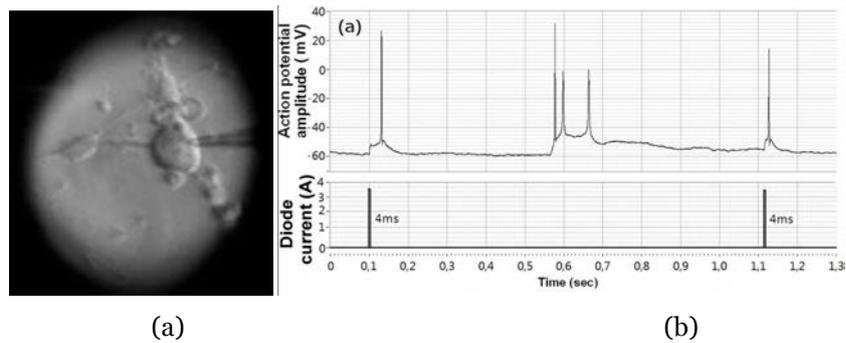


Figure 125. (a) Neurone sous patch clamp sous stimulation optique laser et (b) enregistrement du potentiel intracellulaire ou l'on voit déclenchement du potentiel d'action par le tir laser (F.Bardin, IES).

Cependant le mécanisme fondamental à l'origine de la génération du potentiel d'action n'est pas pour l'instant connu. Le tir laser de forte intensité, absorbé pour la plus grand part dans l'eau crée une onde thermomécanique, une élévation de température importante et une onde de choc qui se propage dans le milieu. Afin de mieux comprendre ce mécanisme nous avons observé en vidéomicroscopie à haute vitesse le comportement d'un neurone soumis à ce traitement de choc. Nous avons effectivement observé un léger mouvement des neurones consécutif à l'application du tir laser. L'onde de choc fait donc bouger le corps cellulaire et conjugué à l'élévation de température est sans doute la cause de la génération du potentiel d'action dans ces neurones, qui pour certains d'entre eux sont mécanosensitifs. L'étude des mécanismes de la génération optique des PA nécessite d'autres analyses, notamment au niveau thermique pour comprendre le lien entre une élévation brusque de la température et la génération des PA.

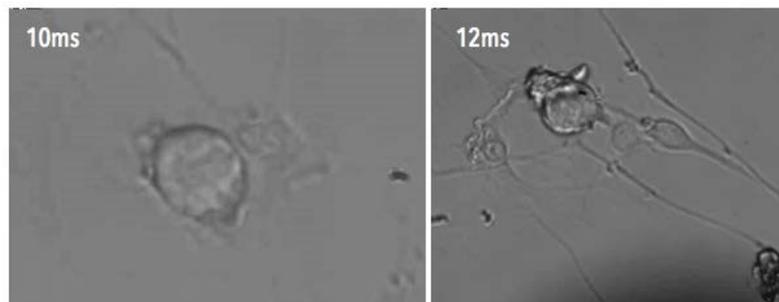


Figure 126. Images extraites d'une vidéo montrant les déplacements d'un neurone en culture soumis à un tir laser.

Dans l'idée de générer une activité électrophysiologique par une stimulation optique, nous allons également nous pencher sur l'addition de générateurs plasmoniques sur le substrat de culture, solution qui permet la génération localisé d'un champ électromagnétique au voisinage de la membrane cellulaire par voir optique et éventuellement la génération de potentiels d'action[127].

Enfin au niveau thermique, nos projets concernent l'analyse des échanges thermique dans les cellules électriquement actives. Il existe en effet des publications faisant état de dégagement de chaleur spécifique à la propagation des potentiels d'action et inversement un effet des stimulations thermiques sur l'activité électrophysiologique [125][126]. Dans le cadre des études sur les mécanismes de stimulation de la régénération axonale, nous envisageons d'étudier l'effet de stimulations thermiques aux petites échelles au niveau des axones.

10.3. Micro dispositifs

Nous avons donc en projet le développement de plusieurs solutions technologiques faisant appel aux microtechnologies afin d'élaborer des microsystèmes permettant d'appliquer des stimuli physiques à des neurones en culture et d'adresser des problèmes de biologie cellulaire. Les systèmes doivent alors permettre les fonctions suivantes :

- Permettre le développement en culture de neurones (provenant de ganglions dorsaux de souris). Cela implique la présence de milieu de culture et d'une couverture de protéines favorisant l'accroche cellulaire (polylysine, polyornithine, laminine etc.).
- Guider la croissance axonale de neurones pour en maîtriser la position et l'orientation et permettre la mesure des vitesse de croissance.

- Perfusion de facteurs de croissance.
- Mesure des potentiels extracellulaires via un réseau d'électrodes intégré au dispositif.
- Application des stimulations mécaniques, thermiques et optiques sur les axones et ou les corps cellulaires.

Toutes ces fonctions nécessitent des développements techniques que nous avons entrepris au laboratoire. Actuellement nous avons certains échantillons réalisés et commençons à valider les procédés de culture de neurones et de croissance axonale. Nous allons décrire dans les sections suivantes les technologies en développement.

10.4. Micro contact printing

La technique du micro contact printing [128][129][130][131] est une technique de report de microstructure par tamponnage. Elle permet de transférer un motif de molécules sur un substrat sans avoir recours à des techniques de lithographie et donc sans passages dans des solutions agressives. Cette technique utilise un tampon obtenu dans un bloc de PDMS moulé sur un wafer de silicium contenant des motifs en résine épaisse SU8. Le tampon, comme celui visible sur la Figure 127 contient des motifs de quelques microns de large en surface. Le matériau à tamponner est la plupart du temps une protéine d'adhérence (poly-L-Lysine, Polyornithine, fibronectine) destinée à créer des motifs pour localiser les endroits où des cellules vont s'accrocher au substrat. Cela permet de générer des chemins de guidage pour la croissance axonale par exemple. Le procédé est illustré sur Figure 127.

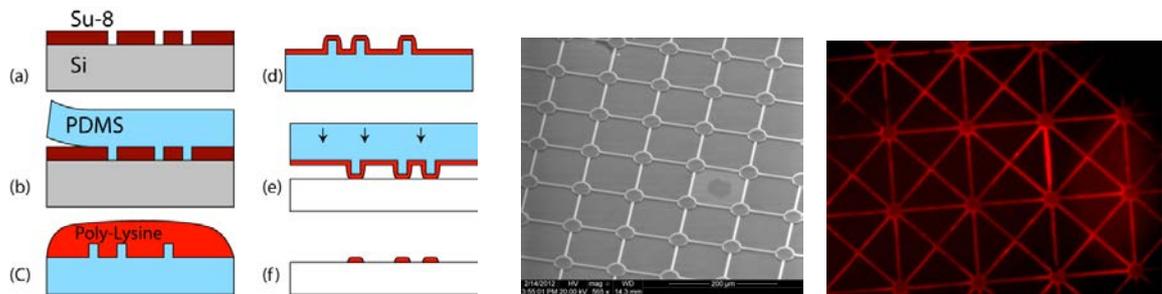


Figure 127. Principe du micro contact printing, vue au microscope électronique de la surface d'un tampon de PDMS et image en fluorescence d'un dépôt tamponné de polylysine marquée FITC.

Dans notre cas nous avons recours à cette technique pour créer des chemins pour la croissance guidée d'axones pour étudier la vitesse de croissance de ces derniers. Nous utilisons la poly-lysine qui est transférée sur une lamelle par tamponnage à partir d'un tampon en PDMS microstructure. L'utilisation de poly-lysine marquée FITC nous a permis également de vérifier l'efficacité du transfert de molécule par tamponnage. La Figure 127 nous montre le résultat d'un tamponnage au microscope en fluorescence.

Les lamelles de verre sont ensuite placées au fond d'un puits de culture en ensemençant par des neurones DRG. Au bout de quelques jours de cultures, les neurones adhèrent sur la poly-lysine et les neurones commencent à se ramifier en suivant les chemins de poly-lysine, comme on peut l'observer sur la Figure 128. Cependant ces résultats de pousse localisée ne sont pas vraiment convaincants. De prochaines expériences vont être effectuées avec la poly-lysine marquée pour vérifier de visu la sélectivité d'adhérence entre les zones tamponnées et le verre. Un traitement anti adhésion cellulaire à base de copolymère poly-lysine-PEG peut éventuellement améliorer le confinement des cellules aux zones marquées.

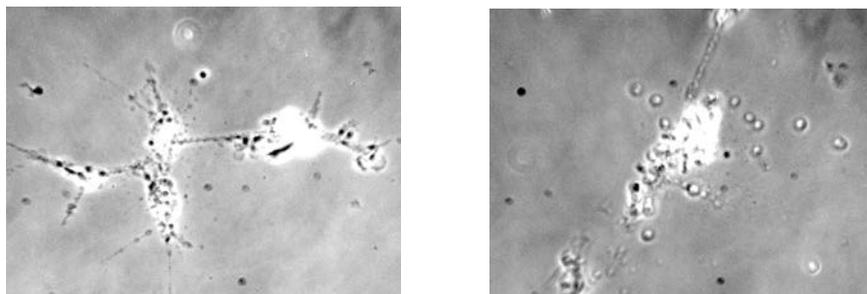


Figure 128. Image au microscope de neurone DRG en culture sur un substrat préparé par tamponnage de Poly-L-Lysine. On remarque des directions privilégiées dans la pousse neuritique.

10.5. Substrat de culture micro structuré en PEG-DMA pour le confinement de la pousse axonale

Les systèmes de guidage de la croissance axonale, que ce soit par tamponnage de protéine d'adhésion ou les circuits microfluidiques ont chacun des caractéristiques qui posent certains problèmes. En effet, concernant la technique du tamponnage, la faible sélectivité des zones tamponnées par rapport aux zones qui ne les sont pas fait que certaines cellules parviennent à s'immobiliser dans ces zones non couvertes de protéines d'adhésion. Pour les circuits microfluidiques, la taille relativement faible des microcanaux, ou sont engagés les axones peut poser certains problèmes lorsqu'il s'agit d'aller faire diffuser certains produits réactifs ou des marqueurs.

Pour essayer de pallier à ces problèmes nous avons décidé de développer pour la croissance des neurones une techniques qui a été développée pour produire des puits de culture cellulaire. Cette technique fait appel à un matériau polymère, le Poly éthylène glycol (PEG)[132][133]. Ce dernier possède des propriétés de nonimmunogénicité, de nonantigénicité et de rejection de protéines, ce qui en fait matériau qui va de fait réduire l'adhérence cellulaire. Le PEG est un polymère fortement hydrophile et visqueux. Pour produire des microstructures avec ce matériau il faut le lier à un autre monomère (le DiMéthyle Acrylate DMA) qui sera ensuite photopolymérisé pour produire une structure solide, un hydrogel PEG-DMA

Nous avons donc repris une technique de photo polymérisation à travers un moule en PDMS qui permet de solidifier le gel de PEG-DMA entre une lame de verre et un bloc de PDMS qui produit une structuration. La photo polymérisation se fait sous lampe UV en quelques secondes. L'excès de matériau dans les zones de contact verre PDMS est ensuite retiré par plasma oxygène.

Comme le montre la Figure 132 nous avons réalisé quelques structures en PEG-DMA par cette technique, nous travaillons actuellement à certains problèmes d'accroche sur le verre en opérant des silanisations de surface pour lier l'hydrogel au verre de manière chimique.

Les microstructures offrent à la fois des zones répulsives pour les protéines d'adhésion et l'accroche cellulaire mais également un confinement géométrique avec des épaisseurs de plusieurs microns ou dizaines de microns.

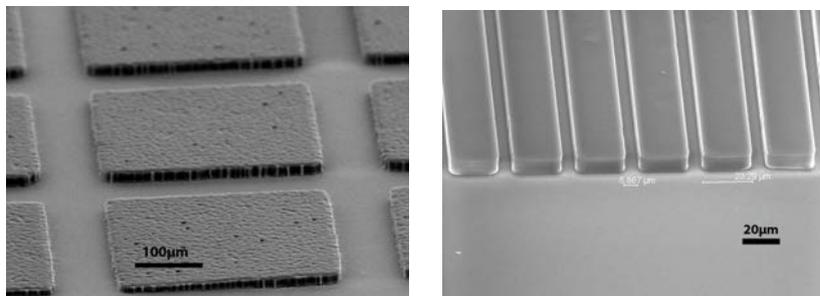


Figure 129. Image au microscope de structure de confinement de pousse neuritique en PEG-DMA.

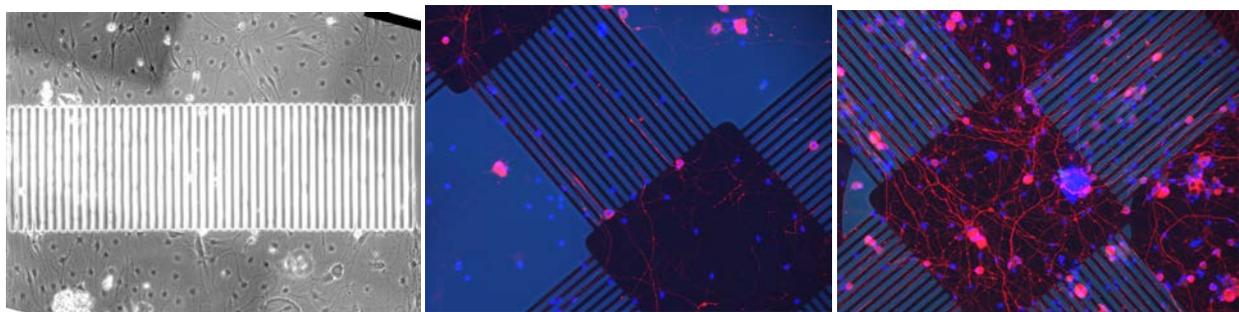


Figure 130. Image au microscope à fluorescence de la culture de neurones DRG sur des substrats microstructurés en PEGDMA. Marquage des neurones β tubuline (rouge), noyaux cellulaires au DAPI (bleu) et autofluorescence du PEGDMA (bleu clair). Images faites sur deux cultures de DRG à différentes densités à 7 journées de cultures.

Les premiers essais de culture de neurones DRG sur ces dispositifs montrent la biocompatibilité du procédé, l'efficacité du guidage de la pousse axonale mais ces essais n'ont pas montré un fort rejet de l'accroche des cellules sur ce polymère. Nous avons bel et bien observé une différence de quantité de cellules entre les zones verre et les zones PEGDA (voir su la figure Figure 130) mais en dessous des 80% couramment annoncé dans la littérature. Pour l'instant le traitement d'adhésion cellulaire se fait avec de la poly-lysine qui

aurait tendance à se lier également avec l'hydrogel. Nous allons regarder d'autres techniques de coating, notamment l'utilisation de polyornithine/laminine et de fibronectine, de manière à accroître la sélectivité de l'adhésion cellulaire.

10.6. Chambres de culture micro fluïdique

Pour ce projet, nous sommes en train de développer une plateforme microfluidique, comme illustrée sur la Figure 131. Dans l'étude envisagée, nous nous focaliserons sur la croissance axonale par la voie de micro canaux permettant de bloquer le corps cellulaire et ainsi de guider la pousse axonale. Ce type de circuit a montré [134][135][136] la possibilité de séparer le corps cellulaire et les prolongations axonales. Une fois les axones en place dans leurs canaux un ensemble d'actions pourra être effectué comme la stimulation lumineuse par fibre optique et le suivie de l'activité électrophysiologique obtenu par la mesure des potentiels extracellulaires grâce à un ensemble d'électrodes placées sous les micro canaux.

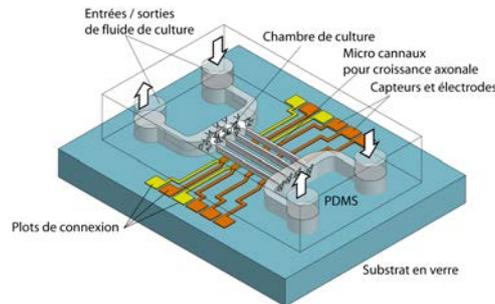


Figure 131. Schéma de principe d'un circuit microfluidique pour la croissance axonale guidée de neurones en culture

Nous avons déjà réalisé plusieurs générations de dispositifs avec la technique classique du PDMS sur verre. Dans le cas présent le positif en SU8 possède plusieurs épaisseurs pour délimiter les chambres de cultures et les micro canaux, comme cela est présenté sur la Figure 132.

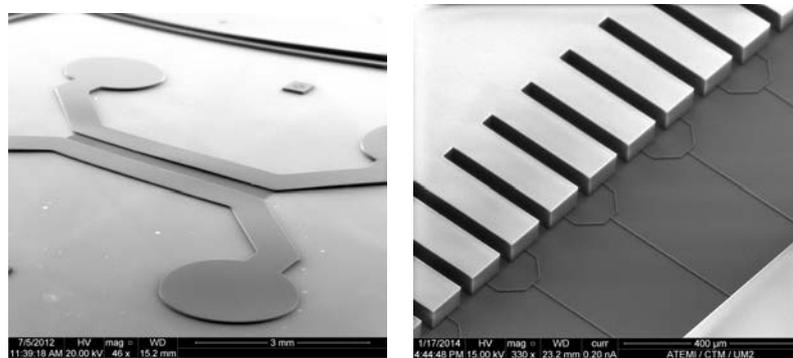


Figure 132. Image au Microscope électronique de structures en résine SU-8 pour la fabrication de circuits microfluidiques pour la croissance axonale guidée.

La structure, une fois moulée et collée sur un substrat de verre, doit être recouverte sur ses parois intérieures d'un revêtement de protéines d'adhérence (poly-Lysine ou poly Ornithine et Laminine) pour favoriser l'adhérence cellulaire. Après plusieurs jours de culture, les neurones commencent à se ramifier (Figure 135) et à lancer les axones au travers des micro canaux. Nous sommes actuellement en phase de développement de la technique grâce aux cultures de neurones DRG de Lambert PARIS qu'il effectue à l'INM.

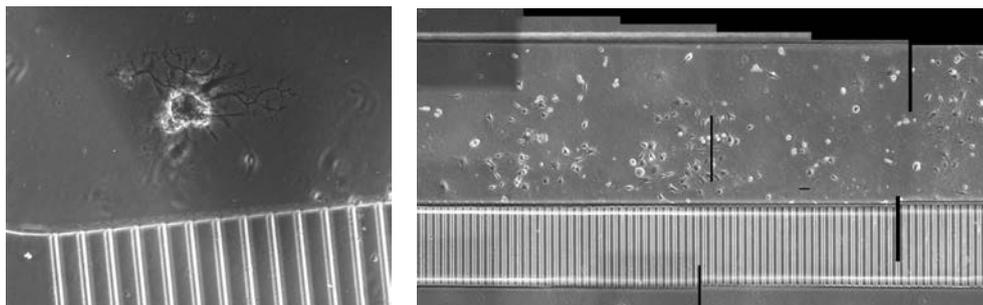


Figure 133. Culture de neurones DRG adultes en circuit microfluidique.

Les neurones sont extraits des ganglions rachidiens dorsaux (DRG) de souris, ils sont ensuite préparés puis injectés dans le circuit microfluidique par un des canaux d'accès. Les neurones en forte concentration sédimentent lentement dans le canal et adhèrent au substrat recouvert d'une couche de protéine d'adhésion. Au bout de quelques jours en incubateurs les cellules se ramifient, lancent leurs projections axonales et des cellules gliales et cellules de Schwann se développent pour supporter le réseau neuronal. Au bout d'une semaine de culture, les projections axonales sont assez longues pour avoir traversé les micro canaux séparant les deux chambres de culture.

Cette méthode fonctionne très bien avec des neurones corticaux post nataux, qui sont plus petits et qui ont une croissance très forte, comme en témoigne la Figure 134 qui montre justement ces neurones corticaux dans la chambre cellulaire à droite et dans la chambre axonale à gauche où l'on voit les axones ayant transité par les micro canaux.



Figure 134 Photo en lumière transmise d'une culture de neurones corticaux dans un circuit microfluidique. La chambre cellulaire à droite où les corps cellulaires ont adhéré et la chambre axonale à gauche où seul les pousses neuritiques ont accès via une rangée de micro canaux.

Nous avons en revanche beaucoup plus de mal avec les neurones DRG adultes, qui ont une croissance plus lente et sont beaucoup plus sensibles à l'environnement de culture. Nous allons rapidement passer à des neurones DRG post nataux qui devraient avoir plus de vigueur. Une fois les protocoles de culture maîtrisés, nous pourrions appliquer des stimulations optiques dans les différentes chambres et procéder également à des co cultures avec des fibroblastes par exemple.

10.7. Intégration de Micro électrodes

La mesure de l'activité électrophysiologique des neurones se fait habituellement par la technique du Patch clamp. Cette technique nécessite l'introduction d'une micropipette dans le corps cellulaire pour avoir accès au potentiel transmembranaire et ainsi mesurer l'activité électrique du neurone.

Il est également possible d'étudier l'activité électrophysiologique des neurones à travers la mesure des potentiels extracellulaires. Ceci est fait en approchant une électrode au plus près de la cellule ou de son axone. La mesure du potentiel extracellulaire est cependant beaucoup moins précise que le potentiel intracellulaire mais il reste un indicateur de l'activité ou de la non activité du neurone.

Nous avons donc commencé à développer des micro électrodes en platine qui se positionnent sous les micro canaux, à l'endroit du passage des prolongations axonales. Cela implique l'alignement du substrat contenant les électrodes avec les micro canaux, comme cela est illustré sur la Figure 135.



Figure 135. Intégration de micro électrodes en platine dans un circuit microfluidique, image du dispositif montrant l'assemblage du bloc PDMS sur le substrat soutenant les électrodes, image au microscope des électrodes positionnées sous les micro canaux et mesure de l'impédance des électrodes de platine en fonction de la fréquence du signal.

Le but du système est de montrer l'activité électrophysiologique des neurones suite éventuellement à une reconnexion avec des cellules cibles contenues dans la seconde chambre de culture. A termes, aussi nous

comptons utiliser un polymère conducteur le PEDOT :PSS qui a l'avantage de présenter une impédance favorable à la mesure des potentiels d'action.

Dans le cadre de la coopération avec l'équipe de F.Saudou de l'institut Curie j'ai également développé des circuits microfluidiques pour la culture de neurones reprenant la structure classique des deux chambres séparées par un réseau de micro canaux. Le but est ici de reconstituer in vitro les liaisons cortico striatales pour en étudier la dynamique. Des neurones extraits du cortex sont injectés dans une chambre et des neurones du striatum sont quant à eux injectés dans la chambre opposée. Les projections axonales transitant par les micro canaux vont se retrouver au centre et former des synapses dans la ligne que l'on aperçoit sur la Figure 136. Cette ligne est connectée à des entrées sorties fluidiques qui permet de perfuser un liquide précis dans la zone de contact synaptique.

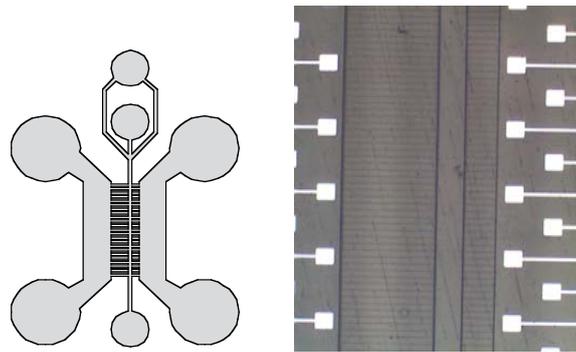


Figure 136. schéma et image au microscope d'un circuit microfluidique pour l'étude des connexions cortico striatales, et électrodes de stimulation en platine et isolation Si₃N₄.

On remarque sur la Figure 137 des images en fluorescence avec plusieurs marqueurs qui permettent de différencier les neurones corticaux, les neurones du striatum ainsi que les projections axonales ainsi que les synapses (marquage pré synaptique à la Synaptophysine) (images M.Cazorla, Institut Curie)

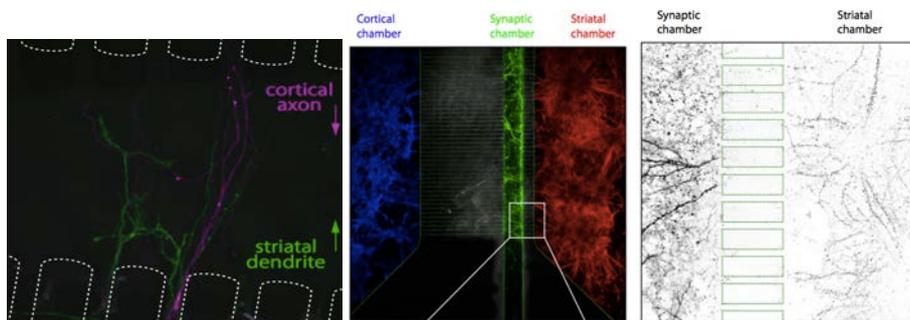


Figure 137. Images en fluorescence de co culture de neurones pour la reconstruction in vitro des synapses cortico striatales (images M.Cazorla, Institut Curie)

Enfin dernier développement autour des chambres de culture microfluidique, un dispositif qui est destiné à l'étude du transport axonal. Une des préoccupations de mes collègues biologistes est d'étudier le transport des vésicules contenant les neurotransmetteurs depuis le corps cellulaire vers les terminaisons synaptiques en bout d'axone. Pour cela ils ont imaginés une structure de micro canaux en T reliant les deux chambres de culture. Le micro canal d'une longueur typique de 500µm débouche se termine par une bifurcation en T avant d'accéder à le seconde chambre de culture. Des électrodes sont positionnées dans les chambres de cultures et permettront d'avoir accès à l'activité électrique de neurones ayant projetés leur axone dans la structure. L'idée est que l'axone traversant le canal se scinde en deux puis aille former des synapses vers les neurones de la seconde chambre. Une fois le neurone connecté il sera alors possible d'étudier le transport des vésicules synaptiques dans l'axone et d'observer quelle direction ces vésicules prennent au niveau du T en fonction de l'activité du neurone. Cette expérience est actuellement en phase de développement.

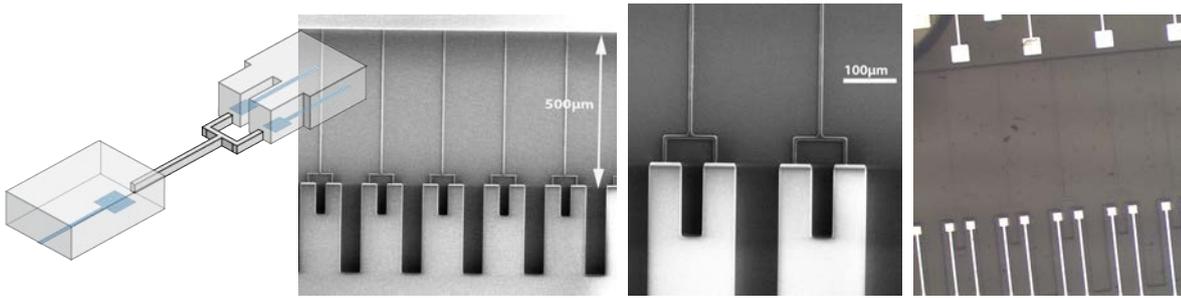


Figure 138. Schéma, image MEB et image au microscope du circuit microfluidique avec micronal en T pour l'étude du transport axonal des vésicules synaptiques.

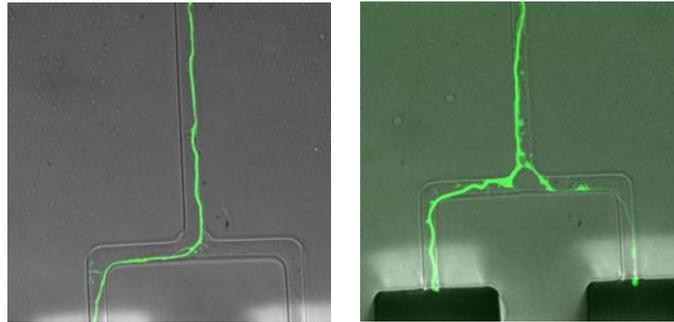


Figure 139. Photographie en fluorescence de split axonal réalisé en chambre microfluidique (image M.Cazola, Institut Cuurie).

11. Assemblage ordonné et peignage de l'ADN par dépôt par capillarité

Ce projet a été initié suite à une rencontre avec Etienne Schwob de l'IGMM à Montpellier qui dirige l'équipe «dynamique et contrôle de la réplication des chromosomes». Cette équipe étudie la distribution et la dynamique des sites de duplication de l'ADN et notamment le nombre et la position des origines de duplication. Lorsque la cellule se divise, les chromosomes sont dupliqués et la réplication se produit en de nombreux sites (plus de 300 dans les cellules de levure) au long des chromosomes. Pour étudier et observer la position de ces sites dans les chromosomes ils ont besoin d'obtenir des filaments déployés pour pouvoir les observer par fluorescence, alors que ces longues molécules se présentent naturellement sous une forme très fortement enroulée.

La technique habituelle qu'ils utilisent se nomme le peignage moléculaire et consiste à plonger une lamelle de verre silanisée dans une solution d'ADN puis à forcer l'ancrage d'une des terminaisons de la molécule puis dérouler et débobiner cette molécule d'ADN ou de chromatine en sortant lentement la lamelle de verre de la solution. Le démouillage provoque alors le peignage de la molécule qui se retrouve déposée sous forme allongée sur le verre. Cette méthode bien que très performante nécessite notamment un pH précis pour ouvrir les extrémités des ADN et leur permettre de s'accrocher au verre silanisé par effet électrostatique. Le résultat permet effectivement le dépôt et le peignage de molécules longues d'ADN mais présente toutefois certains défauts comme les positions aléatoires des filaments et des effets d'agrégation de multiples brins.

Nous intervenons donc dans ce projet en proposant à cette équipe la mise au point de deux nouvelles techniques de peignage d'ADN qui permettraient de combler les lacunes de la méthode classique. Ces techniques, qui font appel aux microtechnologies sont décrites dans ce paragraphe.

11.1. Dépôt et Elongation de l'ADN par démouillage forcé

La technique du dépôt et de peignage d'ADN par capillarité [p-33] est apparue dans les publications il y a quelques années [154][155][156]. Cette technique est une adaptation de la technique du peignage moléculaire avec quelques variantes. Cette technique consiste à balayer à vitesse constante (de 50 à 400 $\mu\text{m/s}$) une goutte de milieu contenant les fragments d'ADN ou de chromatine[157] en pelote à la surface d'un bloc de PDMS microstructuré.

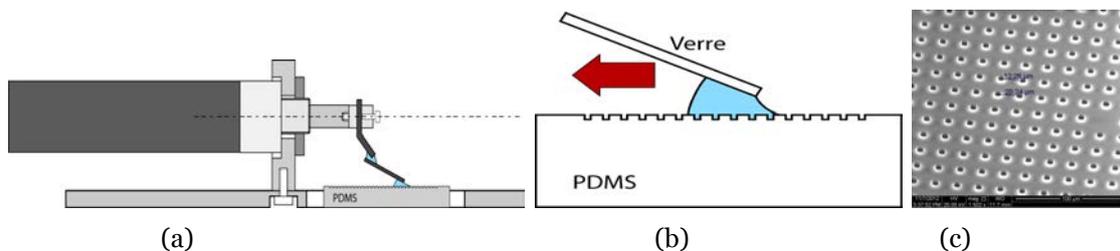


Figure 140. Schéma de principe du montage mécanique de dépôt d'ADN par capillarité et image MEB du substrat de PDMS microstructuré.

Le PDMS, de par sa nature hydrophobe permet de disposer d'angles de mouillage de la goutte sur le substrat assez importants ($>90^\circ$) et donc de confiner le liquide entre le substrat et une lame de verre comme cela est montré sur la Figure 140. La plaque de verre est accroché sur l'axe d'un moteur linéaire, un moteur piézoélectrique à reptation PI Nexact (Figure 140(a)) qui permet de la déplacer par translation dans le plan du substrat à des vitesses contrôlées. Lors du déplacement de la lamelle de verre, la goutte est entraînée et balayée à la surface du substrat.

Le substrat en PDMS contient un réseau de puits de quelques microns de diamètre et espacés régulièrement de 20 à 100 μm (Figure 140(c)). Ces puits vont former des points de perturbation et vont modifier la géométrie front de démouillage lorsque celui ci leur passe dessus, une quantité de liquide va quant à lui rester emprisonné dans les puits. Les pelotes d'ADN contenues dans les puits vont alors être extirpées des puits lors du démouillage et par l'effet combiné des mouvements du fluide à l'intérieur des puits et du pincement du film de liquide être déroulées puis déposées à partir du bord du puit à la surface du substrat. La géométrie des puits force donc le dépôt au bord des cavités, ce qui permet d'obtenir un dépôt des molécules sous forme déroulée et de manière ordonnée comme le montre la Figure 144. Le peignage se fait en outre uniquement par ce mécanisme physique sans avoir à modifier le pH de la solution. Les brins peuvent

être ensuite observés par fluorescence. La Figure 144 montre des molécules d'ADN de phage λ de 48kb (16,5 μ m de long). On remarque, outre les brins d'ADN peignés, la présence de pelotes d'ADN répartis aléatoirement en fond de puits (marqué en rouge sur la figure), 5 μ m sous la surface.

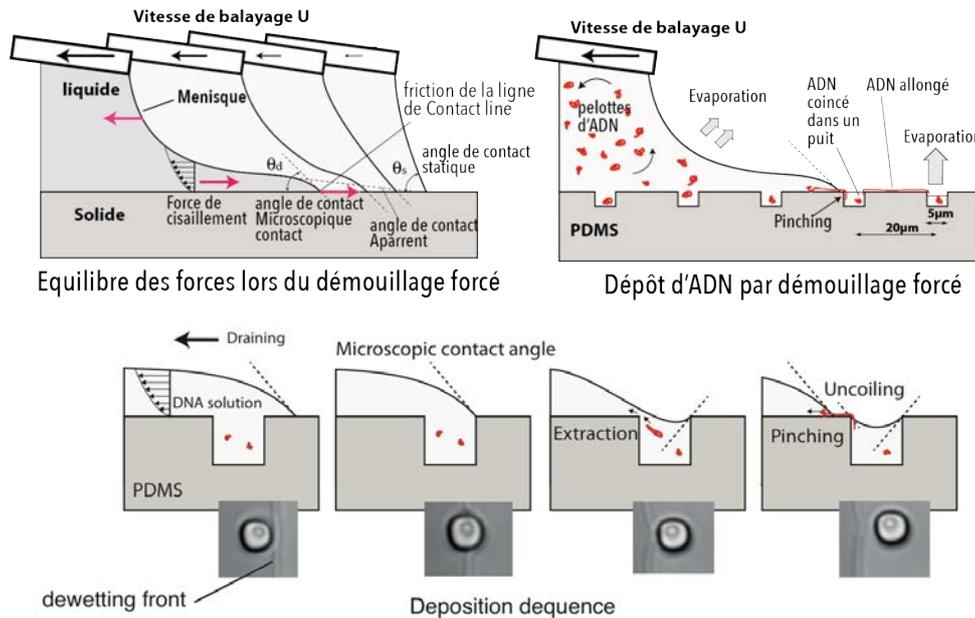


Figure 141. Schéma de principe du dépôt d'ADN par la méthode de déplacement d'une goutte sur un substrat de PDMS microstructuré.

Cet effet physique de peignage et de dépôt, dit dépôt par capillarité, est un phénomène complexe et dépend de plusieurs facteurs. La physique des phénomènes de démoillage est un sujet de recherche encore très actif à l'heure actuelle. Lors du démoillage forcé du liquide à la surface du PDMS, un équilibre dynamique s'installe qui est représenté sur la Figure 141. Le mouvement du corps de la goutte, entraîné par le moteur, introduit une modification des angles de mouillage et de la surface de la goutte, un ménisque apparaît. Les forces de cisaillement dues à la viscosité du fluide et les forces de friction de la ligne de démoillage s'opposent à la force d'entraînement, l'équilibre de ces forces produit la forme décrite sur la Figure 141 à gauche et visible sur la Figure 142. Quand la vitesse augmente la traîne de la goutte est de plus en plus longue et l'angle de contact de la ligne de démoillage apparaît pratiquement nul. Cependant, au niveau de la ligne de démoillage un angle de contact microscopique existe et sa valeur exacte est encore sujette à discussions [166]. La zone qui se trouve avant la ligne de démoillage est alors assez fine, d'une épaisseur inférieure au micron selon le modèle de Landau et Levich [167] qui permet de calculer l'épaisseur d'un film d'eau obtenu par démoillage forcé. Cette valeur est cependant donnée ici à titre d'ordre de grandeur puisque le modèle n'est adapté exactement à cette configuration, il est valable dans un cas de mouillage total (surface hydrophile).

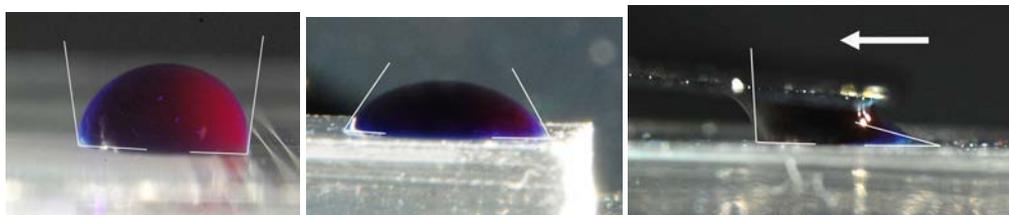


Figure 142. Angle de mouillage statique d'une goutte d'eau pure sur du PDMS (a), d'une goutte d'eau contenant 1% de surfactant (Triton X100 + colorant) et angle de mouillage dynamique suite au déplacement motorisé de la goutte.

Lorsque la vitesse de balayage augmente encore plus, une transition apparaît entre le régime non perturbé (front de démoillage droit) et un régime dispersif qui voit la ligne de démoillage se ramifier et produire des gouttelettes. Cela a été observé sur la Figure 142(b) ou l'on aperçoit clairement le passage d'un régime à l'autre en fonction de la vitesse de balayage.

Lors de nos expériences, notamment à l'aide d'un système de vidéo microscopie à haute fréquence (jusqu'à 4000 images/s), nous avons montré que pour que le dépôt d'ADN par capillarité soit efficace il fallait :

- que l'angle de contact statique ait une valeur plus faible que 90° (autour de 30 à 40°) pour que le ménisque forme une couche fine de liquide et emprisonne des pelotes d'ADN dans les puits. Cela est réalisé en ajoutant un produit tensio actif (du Triton X à $0,1\%$)
- Que la vitesse de balayage soit inférieure à la vitesse de transition auquel cas le dépôt en régime dispersif est ramifié comme sur la (Figure 142(c)) et que la vitesse soit supérieure à une certaine vitesse ($200\mu\text{m/s}$).
- Que la concentration en pelotes d'ADN suffise à peupler chaque puit, soit une concentration d'environ $10\text{ng}/\mu\text{L}$.

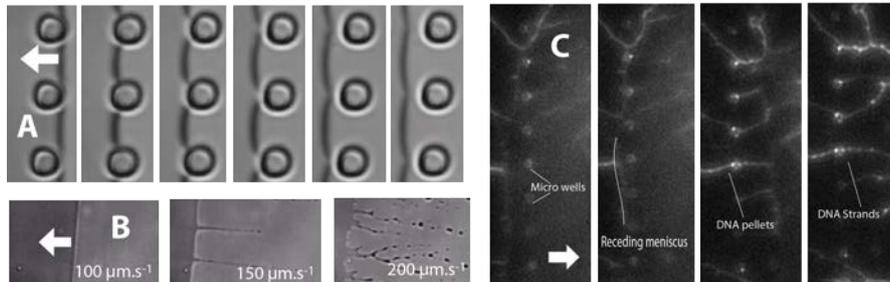


Figure 143. (A) Vue partielle d'une capture vidéo à grande vitesse (1000 images/s) du mouvement de la ligne de démouillage sur une surface de PDMS micro structurée. Le liquide est entraîné à $300\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 40ms entre la première et la dernière image. (B) transition vers le régime de démouillage dispersif et (C) dépôt d'ADN en régime dispersif (image fluorescence GFP)

Enfin nous avons montré que la ligne de démouillage se rompt à proximité du bord des puits sans se déformer outre mesure et en ne formant pas de canal tronconique comme cela a été montré par simulation[168].

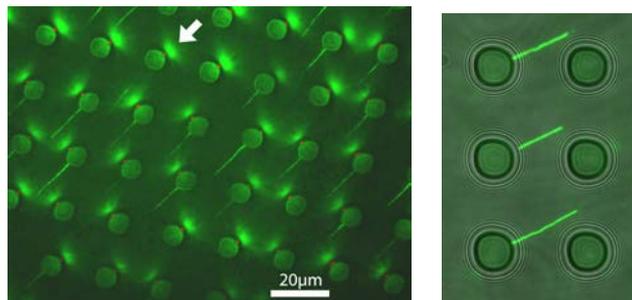


Figure 144. Photographie en fluorescence de molécules d'ADN de Phage lambda (48kb) marqués en YOYO-1, allongés et déposés sur un substrat de PDMS microstructuré.

Plus récemment, nous avons utilisé des substrats formés d'un ensemble de tranchées parallèles pour forcer le peignage des l'ADN dans ces tranchées et obtenir un alignement des molécules. Ces substrats sont obtenus avec la lithographie par interférence qui a été développée par mon collègue Roland Teissier de l'IES. Cette méthode permet d'obtenir des lignes parallèles de faible dimensions (800nm de pas dans mon cas) sur des grandes surfaces (plusieurs cm^2). Après transfert du motif dans une couche mince de nitrure de silicium sur du verre, nous obtenons donc des tranchées d'environ 300nm de large pour 400nm de profond. Le peignage de l'ADN est réalisé par la technique de démouillage forcé d'une solution d'ADN. En fonctionnalisant la surface au silane et en abaissant le pH de la solution à $5,7$, l'accroche physicochimique des terminaisons des filaments permet un déroulage des filaments et un dépôt linéaire avec une grande densité (Figure 145).

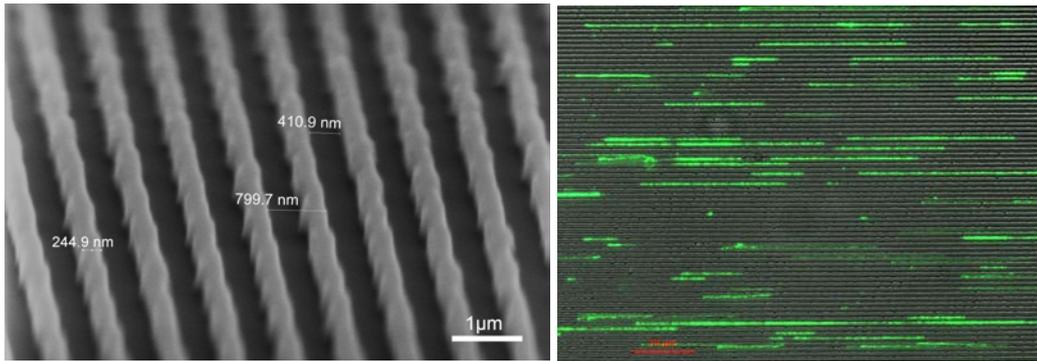


Figure 145. Image au microscope électronique de lignes de résine obtenues par lithographie par interférence laser et image en fluorescence (GFP) du peignage de filaments d'ADN sur ces mêmes tranchées.

La poursuite de ce projet va concerner le peignage des filaments de chromatine. Ces derniers sont beaucoup plus complexes au niveau physique que de l'ADN simple, notamment à cause de la présence des histones qui sont des protéines qui servent littéralement à enrouler l'ADN de façon périodique. Egalement nous allons nous pencher sur le dépôt sélectif de cellules, notamment des cellules de levure, sur substrat microstructuré par une méthode analogue [158][159].

11.2. Elongation de l'ADN par confinement microfluidique

Il existe une autre méthode permettant l'observation directe de filaments d'ADN dans une conformation linéaire, c'est la méthode par confinement microfluidique. Dans ces dispositifs [162][163][164], l'ADN est forcé à pénétrer dans des canaux longilignes dont les dimensions dans la section sont plus faible que la longueur caractéristique de repliement d'un filament d'ADN, à savoir autour de 70 à 100nm. Avant de pénétrer au travers des ces nanocanaux, les pelotes d'AND doivent subir un pré-déroutement qui consiste à faire transiter des pelotes d'ADN à travers une zone constituée d'un ensemble de piliers régulièrement espacés (Figure 146). C'est par des effets d'accrochage sur les obstacles que représentent les piliers que se produit le déroulement initial des pelotes nécessaire à leur entrée dans les nanocanaux. Une fois les filaments engagés dans les nanocanaux il est alors possible de les observer en fluorescence dans la configuration dépliée.

Le transport des molécules d'ADN dans structure se fait par voie hydrostatique dans les grands canaux et les arrivées puis par électrophorèse dans tout l'ensemble et spécifiquement dans la région des nanocanaux.

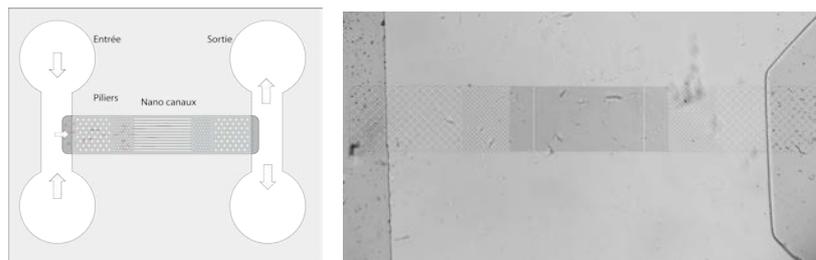


Figure 146. Schéma de principe et photo d'un système micro/nano fluide pour l'observation de filaments déroulés d'ADN.

Pour élaborer un tel dispositif, il faut prendre en compte plusieurs paramètres qui sont la longueur totale du filament d'ADN à observer, son rayon de giration dans la conformation enroulée mais également sa longueur de persistance qui va définir la taille du nanocanal n'autorisant que la conformation allongée. Cette longueur est d'environ 70nm

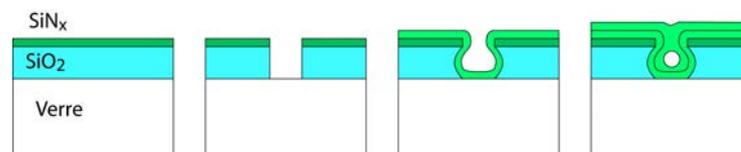


Figure 147. Schéma de principe pour l'obtention de nanocanaux fermés par gravure et dépôt conforme.

De nombreux travaux ont été faits dans ce domaine par une équipe du LAAS [160][161]. Les choix technologiques se sont portés sur la mise au point de nanocanaux en PDMS à partir d'une technique originale de lithographie.

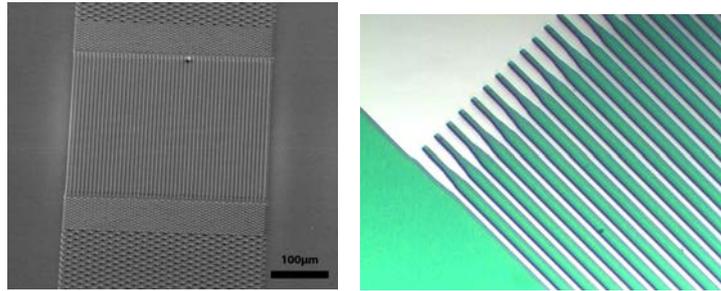


Figure 148 Images au MEB et au microscope optique du circuit microfluidique usiné sur du verre pour l'élongation de l'ADN.

A partir des discussions avec Etienne Schwob et de nos moyens de microfabrication nous sommes parvenus à élaborer une solution pour obtenir des nanocanaux fermés, micro usinés dans un matériau hydrophile et transparent. Pour obtenir des tranchées de moins de 100nm de large, il est nécessaire d'utiliser des moyens de lithographie électronique de très haute résolution. L'appareillage à notre disposition au laboratoire n'étant pas suffisamment performant pour la finesse désirée, nous avons décidé de commencer par des tranchées larges et de les rétrécir par une succession de dépôt et de gravure. La première solution consiste à définir la structure initiale par lithographie UV classique en se limitant à une résolution de 2μm par tranchée. Un substrat de verre est couvert par une couche d'environ 800nm de Nitrure de silicium obtenu par PECVD. Cette couche est ensuite structurée par lithographie et gravure RIE. Puis, de nouveau un dépôt de nitrure par PECVD vient recouvrir la structure qui est de nouveau gravée jusqu'au verre. La conformité du dépôt PECVD et la directivité de la gravure plasma font que seul la partie verticale du dépôt est conservée, moyennant une léger arrondissement de la structure, ce qui permet d'affiner la largeur des tranchées.

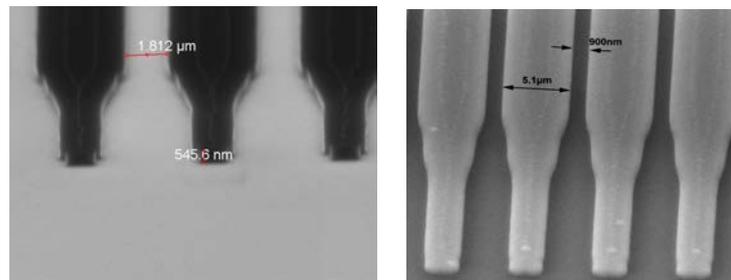


Figure 149. Rétrécissement d'une micro tranchée par étapes successives de dépôt et gravure plasma.

Un second procédé technologique est envisagé, il est illustré sur la Figure 147. Il commence par la définition de tranchées dans un empilement de SiO₂/SiN_x sur substrat de verre. Cette étape sera faite par lithographie par faisceau d'électrons pour partir d'une tranchée d'environ 200nm à 300nm de large et de profond. Une étape d'arrondissement de la tranchée sur ensuite opérée par gravure humide à l'acide fluorhydrique de la couche de silice, de manière à former une tranchée avec un profil rentrant. Ensuite la conformité d'un dépôt de SiN_x par PECVD sera utiliser pour former et boucher les canaux.

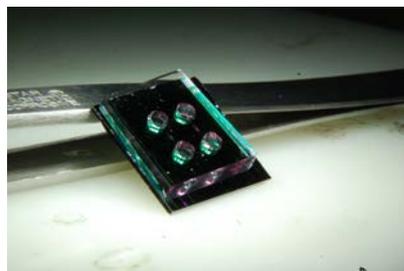


Figure 150. Photo d'un dispositif microfluidique pour l'élongation de brins d'ADN.

Evidemment, ce genre de procédés nécessite de nombreux ajustements et essais pour parvenir aux dimensions souhaitées. Cependant son avantage est de reporter l'ajustement de dimensions latérales par des épaisseurs de dépôts qui sont bien plus facilement contrôlable. La fermeture du canal d'entrée, bien plus large se fera par collage d'une lame de PDMS.

Ce projet est un travail de longue haleine mais repose sur une forte coopération avec l'équipe d'Etienne Schwob.

12. Conclusions

Cette dernière section du document a concerné mon activité de recherche actuelle, qui correspond à mon projet de recherche. Ce projet concerne principalement le développement de bio-microsystèmes pour l'étude de l'impact de stimulations physique sur l'activité de cellules cultivées *in vitro* dans des circuits microfluidiques.

Le premier volet de cet axe de recherche porte sur la stimulation mécanique de cellules souches dans le but d'étudier l'effet des contraintes mécaniques sur la différenciation de ces cellules. Notamment pour essayer en simulant les effets mécaniques que l'on pourrait trouver à l'intérieur d'une articulation et qui induiraient la différenciation vers les cellules du cartilage, les chondrocytes. Ceci est fait dans une optique de médecine régénérative. Nous avons donc développé un système microfluidique permettant d'appliquer des contraintes mécaniques sur un tapis cellulaire composé de cellules souches mésenchymateuses. Après avoir validé les techniques de cultures de cellules et résolu certains problèmes de mortalité des cellules du à des efforts de cisaillement fluidiques trop importants nous avons réussi à obtenir des cultures ayant proliféré jusqu'à un tapis cellulaire complet, lequel a été soumis à des écrasements répétitifs de quelques hertz.

Cependant, observer la différenciation des cellules, depuis les CSM vers le type chondrocyte nécessite la présence de marqueurs fluorescents qui sont exprimés conjointement à la production d'aggrecan, qui signe la présence des chondrocytes. Les cellules ainsi transfectées ont montré cependant une plus grande sensibilité aux conditions de culture. Ce qui a largement ralenti l'avancement de projet. Actuellement ce projet est en attente, mais nous sommes en discussion avec un autre chercheur, pour reprendre et terminer ce travail.

En parallèle aux développements des culture en microfluidique nous avons participé à une autre expérience de stimulation mécanique des ces CSM, cette fois cultivées sur une tresse de polymère biodégradable. Cette expérience qui a été réalisée par des collègues chimiste de l'institut des biomolécules Max Mousseron (IBMM) a pour but la production de ligaments artificiels. Nous avons ainsi instrumenté l'expérience de culture cellulaire et de différenciation sous tension mécanique. Les résultats de cette expérience sont en train d'être publiés.

Le second volet de ce projet de recherche concerne les neurosciences. Ce travail de recherche se fait en collaboration avec mon collègue Fabrice Bardin, qui est maître de conférence à l'université de Nîmes et à l'IES. Ce travail de recherche se fait naturellement en collaboration avec plusieurs équipes de biologistes qui travaillent à différentes problématiques. Cela va de l'étude de la régénération nerveuse dans le système nerveux périphérique (INM) à l'étude des maladies neurodégénératives comme Alzheimer (MMDN) et les maladies de Parkinson et Huntington (Institut Curie).

Le but de cet axe de recherche est d'étudier l'impact sur la physiologie et l'activité de neurones de stimulation physiques tels que la stimulation optique, mécanique et thermique. Ce travail a pour l'instant consisté à développer des systèmes de culture de réseaux neuronaux dans des circuits microfluidiques et des substrats micro et nanostructurés pour le guidage de la croissance des neurites. Nous avons aussi passé du temps à maîtriser les conditions de cultures, les *coatings* de protéines d'adhésion et le marquage pour l'observation en fluorescence. A l'heure actuelle nous sommes en train de terminer l'élaboration d'une plateforme de culture microfluidique qui intègre un réseau de micro électrodes pour la stimulation et l'enregistrement de l'activité électrique extracellulaire des jonctions neuronales. Ce système va permettre d'observer l'activité de ces jonctions en sous l'effet de perfusion de certaines molécules mais également de stimulation optiques et ultrasonores tout en observant le trafic axonale par fluorescence. C'est un travail de longue haleine avec plusieurs partenaires ayant chacun des objectifs différents mais qui nécessite des développements technologiques identiques. Enfin, mes travaux de recherche sur les matériaux ferroélectriques (PVDF, PZT,..) et les polymères conducteurs (PEDOT :PSS) vont être utilisés ici pour intégrer des sources des stimulation ultrasonores et pour former des électrodes à basse impédance.

Le troisième thème de recherche présenté dans ce document sur la manipulation de l'ADN résulte d'une rencontre avec Etienne Schwob de l'IGMM qui dirige l'équipe « réplication et instabilité génomique ». Ils utilisent, pour étudier la position des sites de réplication de l'ADN, des techniques de peignage moléculaire permettant le dépôts sous forme allongée de filaments d'ADN ce qui leur permet d'observer les signaux de fluorescence de la molécule dans une configuration dépliée. En discutant nous nous sommes rendu compte que nous pouvions adapter et optimiser cette technique de peignage moléculaire en utilisant des dispositifs micro usinés. Nous avons donc commencé par étudier le dépôt de filaments d'ADN par démouillage forcé sur

un réseau de micro puits sur un substrat de PDMS[p-5], puis nous avons développé une technique de peignage d'ADN sur un substrat nanostructuré, obtenu par lithographie holographique. Dans ce dernier cas les molécules d'ADN sont peignées sur un substrat contenant un réseau de tranchées sub-micronique, ce qui permet de contraindre chaque filament dans une conformation rectiligne et séparées les uns des autres (en cours de publication). Nous avons aussi d'autres expériences en têtes faisant intervenir à la fois des structurations topologiques et des fonctionnalisations de surface mais également l'emploi de techniques électrocinétiques comme la dielectrophorèse pour ancrer les terminaisons des fragments d'ADN avant des les dérouler par la force capillaire lors du démouillage. Enfin, je suis en train de murir une réflexion sur l'utilisation de ces molécules et des techniques d'auto assemblage pour créer des connectiques de petites dimensions.

Références

- [1] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom, J.R. Davis, "The resonant gate transistor", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 14, Issue: 3 pp 117- 133, (1967)
- [2] L.J. Hornbeck, "The DMD Projection Display Chip: A MEMS-Based Technology, *MRS Bulletin*, Vol. 26, Issue 04, pp 325-327, (2001)
- [3] K. Schwab, E.A. Henriksen, J.M. Worlock, M.L. Roukes, "Measurement of the quantum of thermal conductance", *Nature* 404, pp. 974-977 (2000)
- [4] M.D. LaHaye, J. Suh, P.M. Echternac, K. C. Schwab, M.L. Roukes, "Nanomechanical measurements of a superconducting qubit" *Nature* 459, pp. 960-964 (2009)
- [5] H.B. Chan, V.A. Aksyuk, R.N. Kleiman, D.J. Bishop, F. Capasso, "Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator", *Phys. Rev. Lett.* 87, 211801 (2001)
- [6] A.K. Jain, L. Hong and S. Pankanti, "Biometrics: Promising Frontiers for Emerging Identification Market", *Comm. ACM*, pp. 91-98, (2000).
- [7] International Biometric Group, homepage: www.biometricgroup.com
- [8] S. Pankanti, S. Prabhakar, and A. K. Jain, "On the Individuality of Fingerprints", *IEEE Transactions on PAMI*, Vol. 24, No. 8, pp. 1010-1025, (2002).
- [9] A. Ross and A. Jain, "Biometric Sensor Interoperability: A Case Study In Fingerprints", *Proc. of International ECCV Workshop on Biometric Authentication (BioAW)*, (Prague), LNCS vol. 3087, pp. 134-145, Springer Publishers, (2004).
- [10] H. Morimura, S. Shigematsu, and K. Machida, "A Novel Sensor Cell Architecture and Sensing Circuit Scheme for Capacitive Fingerprint Sensors", *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, Vol. 35, No. 5, (2000).
- [11] S. Jung, R.Thewes, T. Scheiter, K.F. Goser and W. Weber, "A Low-Power and High-Performance CMOS Fingerprint Sensing and Encoding Architecture", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 34, No. 7, pp. 978-984, (1999).
- [12] J.W. Lee, D.JMin, J.Kim, and W. Kim, "A 600-dpi Capacitive Fingerprint Sensor Chip and Image-Synthesis Technique", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 34, No. 4, pp. 469-475, (1999).
- [13] M. Tartagni and R. Guerrieri, "A Fingerprint Sensor Based on the Feedback Capacitive Sensing Scheme", *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, Vol. 33, No. 1, (1998).
- [14] O. Vermesan et al., "A 500-dpi AC capacitive hybrid flip-chip CMOS ASIC/sensor module for fingerprint, navigation, and pointer detection with on-chip data processing", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.38, Issue 12, pp.2288-2296, (2003).
- [15] J.F. Mainguet, M. Pégulu and J.B. Harris, "Fingerprint recognition based on silicon chips", *Future Generation Computer Systems*, pp. 403-415, (2000).
- [16] J.S. Han, T. Kadowaki, K. Sato and M. Shikida, "Thermal analysis of fingerprint sensor having a microheater array", *Proceedings of International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, (1999).
- [17] R.W. Sandage and J.A. Connely, "A Fingerprint Opto-Detector Using Lateral Bipolar Phototransistors in a Standard CMOS Process", *International Electron Devices Meeting, IEDM'95*, pp. 171-174, (1995).
- [18] N.D. Young, G. Harkin, R.M. Bunn, D.J. McCullogh, R.W. Wilks and A.G. Knapp, "Novel Fingerprint Scanning Arrays Using Polysilicon TFT's on Glass and Polymer Substrates", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 18, No. 1, (1997).
- [19] R.J. De Souza and K.D. Wise, "A Very High Density Bulk Micromachined Capacitive Tactile Imager", *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers'97*, Chicago, June 16-19, (1997).
- [20] P. Rey, P. Charvet, M.T. Delaye and S. Abou Hassan, "A High Density Capacitive Pressure Sensor Array For Fingerprint Sensor Application", *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers'97*, Chicago, June 16-19, (1997).
- [21] J.F. Mainguet. "Fingerprint-Reading System", *United States Patent No. US 6,289,114 B1*, (2001).
- [22] A.K. Jain, S. Prabhakar, L. Hong and S. Pankanti, "FingerCode: A Filterbank for Fingerprint Representation and Matching", *Proc. IEEE Conference on CVPR*, Vol. 2, pp. 187-193, Colorado, June 23-25, (1999).
- [23] L. Hong, Y. Wan and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation", *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 8, pp. 777-789, (1998)
- [24] N. Yager and A. Amin, "Fingerprint verification based on minutiae features: a review", *Pattern Analysis and Applications*, Vol. 7, Issue 1, pp.94-113, (2004).
- [25] R. Stefanelli and A. Rosenfeld, "Some parallel thinning algorithms for digital pictures", *Journal of the ACM*, Vol.18, No2, p.255-264, (1971).
- [26] Z. Bian, D. Zhang and W. Shu, "Knowledge-Based Fingerprint Post-Processing", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 16, No.1, pp. 53-67, (2002).
- [27] V. Le Cam, Cyril Nguyen Van Phu, "Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°273*, (2008).
- [28] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci , "Wireless sensor networks: a survey ", *Computer Networks*, Vol.38, Issue 4, pp.393-422, (2002)
- [29] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art", *Renewable Energy*, Vol. 36, Issue 10, pp. 2641-2650, (2011)
- [30] S. Kulkarni, E. Koukharenko, R. Torah, J. Tudor, S. Beeby, T. O'Donnell, S. Roy "Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagneticgenerator", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.145-146, pp.336-342, (2008)
- [31] S.P. Beeby, M. J. Tudor and N.M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", *Measurement Science and Technology* 17, R175-R19, (2006).
- [32] M. Marzencki, S. Basrour, B. Charlot, S. Spirkovich, M. Colin, "A MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Device", in *PowerMEMS 05*, Nov 28-30, Tokyo, Japan, (2005).
- [33] Y. Ammar, A. Buhrig, M. Marzencki, B. Charlot, S. Basrour, K. Matou and M. Renaudin, "Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator", *Smart Objects & Ambient Intelligence SoC-EUSAI conference*, Grenoble, (2005).

- [34] M. Strasser, R. Aigner, M.F ranosch and G. Wachutka "Miniaturized thermoelectric generators based on Poly Si and poly Si-Ge surface micromachining", *Sensor and Actuators A* 97-98, p.535-542, (2002).
- [35] P.D. Mitcheson, P. Miao, B.H. Stark, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, T. C. Green, "MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.115, No. 2-3, pp.523-529, (2004).
- [36] Y. Ammar « Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystèmes autonomes », These de Doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, (2006)
- [37] G. Despesse, "Étude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micro-systèmes communicants" Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, Dir. S. Basrour (2005)
- [38] S. Roundy, P.K. Wright, and J. Rabaey, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes", *Computer Communications*, vol. 26, no. 11, pp.1131-1144, (2003).
- [39] Y. Ammar, S. Basrour, "Non-linear techniques for increasing harvesting energy from piezoelectric and electromagnetic micro-power-generators », *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'06)*, Stresa, Italy, 26-28 April, (2006).
- [40] H. Fowler and L. W. Nordheim, *Proc. Roy. Soc. Lond.* A119. (1928)
- [41] G. Fursey, "Field emission in vacuum microelectronics", Kluwer academic publishing, ISBN 0-306-4740-6.
- [42] J.D. Zuber, K. L. Jensen, T. E. Sullivan, "An analytical solution for microtip field emission current and effective emission area", *Journal of Applied physics*, Vol 91, Number 11.
- [43] K.L. Jensen, "Electron emission theory and its application: Fowler – Nordheim equation and beyond", *J. Vac. Sci. Technol. B* 21, 4, (2003).
- [44] K. Yamashita, W. Sun, K. Kakushima, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "RF microelectromechanical system device with a lateral field-emission detector" *J. Vac. Sci. Technol. B* 24, no. 2, pp.927-31 (2006).
- [45] B. Hälg, "On a Micro-Electro-Mechanical Nonvolatile Memory Cell" *IEEE trans. on Electron Devices* 37, pp.2230-6
- [46] M. Vangbo and Y. Backlund Y "A lateral symmetrically bistable buckle beam", *J. Micromech. Microeng* 8-29-32, (1998).
- [47] M. Vangbo, "An analytical analysis of a compressed bistable buckled beam", *Sensors and Actuators A* 69, pp.212-16, (1998).
- [48] S.M. Carr, W. Lawrence, M.N. Wybourne, "Buckling cascade of free standing mesoscopic beams", *Europhys. Lett.*, 69-952-8, (2005).
- [49] S.M. Carr, W. Lawrence, M.N. Wybourne, "Static Buckling and Actuation of Free-Standing Mesoscale Beams", *IEEE Trans. On Nanotech.* 4-655-9, (2005).
- [50] S.M. Carr, W. Lawrence, M.N. Wybourne, "Elastic instabilities of nanomechanical beams", *Appl. Phys. Lett.* 82-709-11, (2005).
- [51] R.L. Badzey, G. Zolfagharkhany, A. Gaidarzhy and P. Mohanty, "controllable nanomechanical memory" *Appl. Phys. Lett.* 85-3587-9, (2004).
- [52] www.cavendish-kinetics.com
- [53] W. Fang, C.H. Lee and H.H. Hu "On the buckling behavior of micromachined beams", *J. Micromech. Microeng.* 9-236-44, (1999).
- [54] L. Nicu, P. Temple-Boyer, C. Bergaud, E. Scheid and A. Martinez, "Energy study of buckled micromachined beams for thin-film stress measurements applied to SiO₂", *J. Micromech. and Microeng.* 9-414-21, (1999).
- [55] Y. Tsuchiya, K. Takai, N. Momo, T. Nagami, H. Mizuta, S. Oda, "Nanoelectromechanical nonvolatile memory device incorporating nanocrystalline Si dots", *J. Appl. Phys.* 100-094306-6, (2006).
- [56] W.W. Jang, J.O Lee, J.B. Yoon J B "A DRAM-like mechanical non-volatile memory" *Proc. Int. Conf. on Solid-state Sensors, Actuat. and Microsyst.* pp. 2187-2190.
- [57] O. Français, L. Rousseau, T. Bourouina, J. Haussy and A. Tissot, MEMS "Memory Based on Bi-Stable Mechanical Structures", *Proc. Symp. on Design Test Integration and Packaging of MEMS and MOEMS*, (2005).
- [58] J. Qiu, J.H. Lang and A.H. Slocum "A Curved-Beam Bistable Mechanism *IEEE*", *J. of Microelectromech. Syst.* 13- 137-46, (2004).
- [59] N.F.J. Van Rensburga and A.J. Van der Merweb, "Natural frequencies and modes of a Timoshenko beam", *Wave Motion*, 44-58-69, (2006).
- [60] S.P. Timoshenko and J.M. Gere "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill, (1961).
- [61] T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G.Y. Tseng, C.L. Cheung and C.M. Liever, "Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing", *Science* 289-94-7, (2006).
- [62] J.W. Ward, M. Meinhold, B.M. Segal, J. Berg, R. Sen, R. Sivarajan, D.K. Brock and T. Rueckes, "A Non-Volatile Nanoelectromechanical Memory Element Utilizing a Fabric of Carbon Nanotubes", *Proc. Symp. for Non-Volatile Memory Tech.* pp. 34–38, (2004).
- [63] K.J. Ziegler, D.M. Lyons, J.D. and Holmes "Bistable nanoelectromechanical devices" *Appl. Phys. Lett.* 84-4075-6, (2004).
- [64] C.M. Wang, "Timoshenko Beam-Bending Solutions in Terms of Euler-Bernoulli Solutions", *J. Engineering. Mechanics.* 121-763-5, (1995).
- [65] C.M. Wang, Y.Y. Zhang, S.S. Ramesh and J. Kitipornchai, "Buckling analysis of micro- and nano-rods/tubes based on nonlocal Timoshenko beam theory", *Phys. D: Appl. Phys.* 39-3904-9, (2006)
- [66] S. Abu-Salih and D. Elata, "Experimental validation of ElectroMechanical Buckling", *J. Microelectromech. Syst.* 15-1656-62, (2006).
- [67] S. Casals-Terre, A. Shkel, "Snap-action bistable micromechanism actuated by nonlinear resonance", *Proc. IEEE Sensors 2005 conf.* 893-6, (2005).
- [68] A.H. Nayfeh, "Investigation of natural frequencies and mode shapes of buckled beams" *AIAA Journal* 33-6-1121-6, (2005).
- [69] K. Nagai, S. Maruyama, B. Sakaimoto and T. Yamaguchi, "Experiments on chaotic vibrations of a post-buckled beam with an axial elastic constraint", *Journal of Sound and Vibration* 304-3-5-541-5, (2007).
- [70] R.D. Blevins, "Formulas for natural frequency and mode shape", (Krieger Pub Co), (1993).
- [71] A. Husain, J. Hone, H.W Postma, X.M.H. Huang, T. Drake, M. Barbic, A. M Scherer and M.L. Roukes, "Nanowire-based very-high-frequency electromechanical resonator", *Appl. Phys. Lett.* 83-1240-2, (2003).
- [72] P.E. Ross, "Beat the Heat". *IEEE Spectrum*, Volume: 41, Issue: 5, pp. 38- 43, (2004).
- [73] M. Rencz, V. Szekely, A. Poppe, K. Torki, and B. Courtois, "Electro-thermal simulation for the prediction of chip operation within the package", 19th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMITHERM'03), San Jose, California, USA, (2003).
- [74] K. Torki, F. Ciontu, "IC thermal map from digital and thermal simulations", 8th International Workshop on THERmal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC'02), Madrid, Spain, (2002).
- [75] A. Majumdar, J. P. Carrejo, and J. Lai, "Thermal imaging using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.* 62, 2501 (1993).
- [76] S. Grauby, B. C. Forget, S. Hole, and D. Fournier, "High resolution photothermal imaging of high frequency phenomena using a visible charge coupled device camera

- associated with a multichannel lock-in scheme" *Review of Scientific Instruments*, Vol 70, N° 9, American Institute of Physics, pp.3603-3608, (1999).
- [77] C.Filloy, G. Tessier, S. Holé, G. Jerolimski and D. Fournier, "The contribution of thermoreflectance to high resolution thermal mapping", *Sensor Review* 23, pp.35-39, (2003).
- [78] G. Tessier, S. Holé, and D. Fournier, "Quantitative thermal imaging by synchronous thermoreflectance with optimized illumination wavelengths", *Applied Physics Letters* 78 (16) pp. 2267, (2001).
- [79] S. Grauby, S. Dilhaire, S. Jorez, and W. Claeys, "Imaging setup for temperature, topography, and surface displacement measurements of microelectronic devices," *Review of Scientific Instruments* 74(1), pp.645-647, (2003).
- [80] J. Christofferson, A. Shakouri, "Through the substrate, backside thermal measurements on active semiconductor devices using near IR thermoreflectance". Nineteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Piscataway, NJ, USA, pp. 271-275, (2003).
- [81] J. Christofferson, D. Vashae, A. Shakouri, and P. Melese. "Real time sub-micron thermal imaging using thermoreflectance", International Mechanical Engineering Congress and Exhibition (IMECE 2001), New York, NY, (2001).
- [82] J. Altet, S. Dilhaire, S. Volz, J.M. Rampoux, A. Rubio, S. Grauby, L. D. Patino Lopez, W. Claeys and J. B. Saulnier, "Four different approaches for the measurement of the IC surface temperature: application to thermal testing", *Microelectronics Journal*, 33, pp.689-696, (2002).
- [83] G. Gosh, "Handbook of thermo-optic coefficients of optical materials with applications", Academic Press (1998), ISBN 0-12-281855-5.
- [84] B. Charlot, V. Szekely, M. Rencz et al., "An 8X8 thermopile based uncooled infrared sensor." *European Micro and Mano systems 2004 (EMN 04)*, Noisy le Grand, France, pp. 131-135, (2004).
- [85] S. Mir, F. Parrain, B. Charlot and D. Veychard, "Microbeams with Electronically Controlled High Thermal Impedance", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 29 Issue 1-2, pp. 71-83, (2001).
- [86] J. Courteaud, P. Combette, N. Crespy et al., "Thermal simulation and experimental results of a micromachined thermal inclinometer," *Sensors and Actuators A-Physical*, vol. 141, no. 2, pp. 307-313, (2008).
- [87] F. Mailly, A. Martinez, A. Giani et al., "Effect of gas pressure on the sensitivity of a micromachined thermal accelerometer," *Sensors and Actuators A-Physical*, vol. 109, no. 1-2, pp. 88-94, (2003).
- [88] N. Crespy, J. Courteaud, P. Combette, P. Temple Boyer, A. Giani, A. Foucaran, "Micromachined Inclinometer Based on Fluid," *Technical Digest of Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS 2008 (DTIP 2008)*, Cannes, France, (2008)
- [89] CMP. "Circuits Multi Projets," <http://cmp.imag.fr>.
- [90] N. Galy, B. Charlot, and B. Courtois, "A full fingerprint verification system for a single-line sweep sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 7-8, pp. 1054-1065, Jul-Aug, (2007).
- [91] K. Biswas and S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining", *Microelectronics Journal*, vol. 37, pp.519-525, (2006).
- [92] L. R. Mack, and H. C. Hardee, "Natural convection between concentric spheres at low Rayleigh numbers" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 11, no. 3, pp. 387-396, (1968).
- [93] H. C. Hardee, "Natural convection between concentric spheres at low Rayleigh numbers," Ph.D Dissertation, University of Texas, Austin, Texas, (1966).
- [94] L. Lin, and J. Jones, "A liquid-filled buoyancy-driven convective micromachined accelerometer," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 1061-1069, (2005).
- [95] N. Crespy, "Etude, réalisation et optimisation d'inertiels à détection thermique," Ph.D Dissertation, Université Montpellier 2, Montpellier, France, (2008)
- [96] D. Mao, M.A. Quevedo-Lopez, H. N. Alshareef, H. Stiegler and B. E. Gnade, "Optimization of Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Films as Non-volatile Memory for Flexible Electronics" *Organic Electronics* 11(5), pp. 925-932, (2010).
- [97] A. Cuadra, M. Gasulla, V. Ferrari, "Thermal energy harvesting through pyroelectricity", *Sensors and Actuators A: Physical* 158, pp.132-139, (2010).
- [98] H. Kawai, "The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride)", *Japan J. Appl. Phys* 8, pp. 975-976, (1969).
- [99] R. Gregorio and D. Sousa Borges, "Effect of crystallization rate on the formation of the polymorphs of solution cast poly(vinylidene fluoride)", *Polymer* 49(18), pp. 4009-16, (2008).
- [100] R. Gregorio and M. Cestari, "Effect of crystallization temperature on the crystalline phase content and morphology of poly(vinylidene fluoride)", *J. of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 32(5), pp.859-870, (1994).
- [101] X.He and K. Yao, "Crystallization mechanism and piezoelectric properties of solution-derived ferroelectric poly(vinylidene fluoride) thin films" *Appl. Phys. Letters* 89, 112909, (2006).
- [102] S. Ramasundaram, S. Yoon, K.J Kim, J.S. Lee, "Direct Preparation of Nanoscale Thin Films of Poly(vinylidene fluoride) Containing β -Crystalline Phase by Heat-Controlled Spin Coating", *Macromolecular Chemistry and Physics* 209(24), pp.2516-2526, (2008).
- [103] B. Mohammadi, A.A. Yousefi, S. Moemen Bellah, "Effect of Tensile Strain Rate and Elongation on Crystalline Structure and Piezoelectric Properties of PVDF Thin Films", *Polymer Testing* 26, pp.42-50, (2007).
- [104] Y.Kim, W. Kim, H. Choi, S. Hong, H. Ko, H. Lee and K. No, "Nanoscale domain growth dynamics of ferroelectric poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) thin films", *Appl. Phys. Lett.* 96, 012908, (2010).
- [105] S. Chen, K. Yao, F. Eng Hock Tay and C. Lee Liow, "Ferroelectric poly(vinylidene fluoride) thin films on Si substrate with the β phase promoted by hydrated magnesium nitrate", *J. Appl. Phys.* 102, 104108, (2007).
- [106] S. Schneider, X. Drujon, J.C. Wittmann and B. Lotz, "Impact of nucleating agents of PVDF on the crystallization of PVDF/PMMA blends", *Polymer* 42, pp.8799-8806, (2001).
- [107] A. Linares and J.L. Acosta, "Pyro-piezoelectrics polymers materials. I: Effect of addition of PVA and/or PMMA on overall crystallization kinetics of PVDF from isothermal and non-isothermal data", *European polymer journal* 31(7), pp.615-619, (1995)
- [108] I.S. Elashmawi and N.A. Hakeem, "Effect of PMMA addition on characterization and morphology of PVDF", *Polymer Engineering & Science* 48(5), pp.895-901, (2008).
- [109] R. Waser, U. Böttger, S. Tiedke, "Polar Oxides Properties, Characterization, and Imaging" Wiley-VCH, (2006).
- [110] S. Bauer, "Poled polymers for sensors and photonic applications", *J. Appl. Phys.* 80, pp. 5531-58, 1996).
- [111] M. Wegener, "Polarization-electric field hysteresis of ferroelectric PVDF films: comparison of different measurement regimes", *Rev. Sci. Instrum.* 79, 106103, (2008).
- [112] P. Shukla and M. Gaur, "Investigation of electrical conduction mechanism in double-layered polymeric system", *J. Appl. Polymer Science* 114(1), pp. 222-230, (1999).
- [113] G.K. Narula and P.K.C Pillai, "Electrical conduction measurements in solution-mixed polyblends of poly(vinylidene fluoride) and poly(methylmethacrylate)",

- Journal of Materials Science: Material in electronics 2(4), pp.209-215, (1991).
- [114] [115] B.Y. Lee, C.I. Cheon, J.S. Kim, K.S. Bang, J.C. Kim, H.G. Lee, "Low temperature firing of PZT thick films prepared by screen printing method", *Materials Letters*, 56(4), (2002), pp. 518-52
- [115] J. Xie, P. P. Mane, C. W. Green, K. M. Mossi, "Performance of T[114]h Piezoelectric Materials for Pyroelectric Energy Harvesting", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, (2009)
- [116] D. Vanderpool, J.H. Yoon, L. Pilon, "Simulations of a prototypical device using pyroelectric materials for harvesting waste heat", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 51, Issues 21–22, (2008), pp. 5052-62
- [117] F.Y. Lee, A. Navid, L. Pilon "Pyroelectric waste heat energy harvesting using heat conduction", *Applied Thermal Engineering*, Volume 37, (2012), pp.30-3
- [118] A. Cuadras, M. Gasulla, V. Ferrari, "Thermal energy harvesting through pyroelectricity", *Sensors and Actuators A: Physical* 158(1), (2010), pp. 132-139
- [119] R.B. Olsen, D.A. Bruno, J.M. Briscoe, "Cascaded pyroelectric energy converter", *Ferroelectrics* 59 (3-4) (1984) pp.205-219
- [120] P. Garstecki, H.A. Stone G.M. Whitesides, "Mechanism for flow-rate controlled breakup in confined geometries: a route to monodisperse emulsions", *Phys Rev Lett.* 94, 164501 (2005)
- [121] A. M. Leshansky and L. M. Pismen, "Breakup of drops in a microfluidic T junction", *Phys. Fluids* 21, 023303 (2009)
- [122] G.F Christopher and S.L Anna, "Microfluidic methods for generating continuous droplet streams", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007)
- [123] A. Blau, A. Murr, S. Wolff, E. Sernagor, P. Medini, G. Iurilli, C. Ziegler, F. Benfenati, "Flexible, all-polymer microelectrode arrays for the capture of cardiac and neuronal signals", *Biomaterials*, 32(7), pp.1778-1786, (2011).
- [124] Y.W. Lin, C.M. Cheng, P.R. LeDuc, C.C. "Understanding Sensory Nerve Mechanotransduction through Localized Elastomeric Matrix Control", *PLoS ONE*4(1):e4293. doi:10.1371/journal.pone.0004293
- [125] T. Heimburg et A.D. Jackson; dans: *Structure & Dynamics of Membranous Interfaces*. Ed. Kaushik Nag. John Wiley & Son, (2007).
- [126] S. Andersen, A. D. Jackson, and T. Heimburg, "Towards a thermodynamic theory of nerve pulse propagation". *Progr. Neurobiol.* 88: 104-113, (2009).
- [127] K. Lugo, X. Miao, F. Rieke, and L.Y. Lin, "Remote switching of cellular activity and cell signaling using light in conjunction with quantum dots", *Biomed Opt Express*. 2012 March 1; 3(3): 447-454.
- [128] J.M. Corey, E.L. Feldman, "Substrate patterning: an emerging technology for the study of neuronal behavior", *Experimental Neurology* 184 S89-S96, (2003)
- [129] A. Ruiz, L. Buzanska, D. Gilliland, H. Rauscher, L. Sirghi, T. Sobanski, M. Zychowicz, L. Ceriotti, F. Bretagnol, S. Coecke, P. Colpo, F. Rossi, "Micro-stamped surfaces for the patterned growth of neural stem cells", *Biomaterials* 29, pp. 4766-4774, (2008).
- [130] T. Kaufmann, B.J. Ravo, "Stamps, inks and substrates: polymers in microcontact printing", *Polym. Chem*, 1, pp. 371-387, (2010)
- [131] J.C. Chang, G.J. Brewer, B.C. Wheeler, "A modified microstamping technique enhances polylysine transfer and neuronal cell patterning", *Biomaterials* 24, pp.2863-2870, (2003).
- [132] K.Y. Suh, J.Seonga, A. Khademhosseini, P.E. Laibinisa, R.Langer, "A simple soft lithographic route to fabrication of poly(ethylene glycol) microstructures for protein and cell patterning", *Biomaterials* 25 pp. 557-563, (2004)
- [133] P. Kim, D. H. Kim, B. Kim, S. K. Choi, S. H. Lee, A. Khademhosseini, R. Langer and K. Y. Suh, "Fabrication of nanostructures of polyethylene glycol for applications to protein adsorption and cell adhesion", *Nanotechnology* 16, pp.1-7, (2005)
- [134] H.S. Shin, H.J Kim, S.K. Min, S.H. Kim, B.M. Lee, N.L. Jeon, "Compartmental culture of embryonic stem cell-derived neurons in microfluidic devices for use in axonal biology", *Biotechnol Lett* 32, pp.1063-1070, (2010).
- [135] J.M. Peyrin, B. Deleglise, L. Saias, M. Vignes, P. Gougis, S. Magnifico, S. Betuing, M. Pietri, J. Caboche, P. Vanhoutte, J.L. Viovy, B. Brugg, "Axon diodes for the reconstruction of oriented neuronal networks in microfluidic chambers". *Lab Chip.* 21, pp. 3663-73, (2011).
- [136] J.W. Park, B. Vahidi, A.M Taylor, S.W. Rhee, N.L. Jeon, "Microfluidic culture platform for neuroscience research", *Nature Protocols*, 1(4), pp.2128-2135, (2006).
- [137] A. Engler, S. Sen, H.L.Sweeney, D.Discher, "Matrix Elasticity Directs Stem Cell Lineage Specification", *Cell* 126, pp. 677-689, (2006).
- [138] C. Vinatier, D. Mrugala, C. Jorgensen, J. Guicheux, D. Noël, "Cartilage engineering: a crucial combination of cells, biomaterials and biofactors", *Trends in Biotechnol*, 27(5), pp.307-314, (2009).
- [139] F. Djouad, D. Mrugala, D. Noël D, C. Jorgensen "Engineered mesenchymal stem cells for cartilage repair", *Regenerative Medicine* 1(4), pp.529-537, (2006)
- [140] D. Mrugala, N. Dossat, J. Ringe, B. Delorme, A. Coffy, C. Bony, P. Charbord, T. Häupl, J.P. Daures, C. Jorgensen, D. Noël, "Gene expression profile of multipotent mesenchymal stromal cells: identification of pathways common to TGFβ3/BMP-2-induced chondrogenesis", *Cloning Stem Cells*, 11, pp. 61-76, (2009).
- [141] F. Djouad, C. Bony, F. Canovas, O. Fromigué, T. Rème, C. Jorgensen, D. Noël, "Transcriptomic analysis identifies novel transcription factors regulated in the late stages of chondrogenesis", *Cloning Stem Cells*, 2009; 11(3), pp.407-416 (2009).
- [142] C.L. Murphy, B.L. Thoms, R.J. Vaghjiani, and J.E. Lafont, "Hypoxia. HIF-mediated articular chondrocyte function: prospects for cartilage repair". *Arthritis Res Ther* 11(1), p. 213, (2007).
- [143] L. Ramage, G. Nuki, D.M. Salter, "Signalling cascades in mechanotransduction: cell-matrix interactions and mechanical loading", *Scand J Med Sci Sports* 19(4), pp. 457-69, (2009).
- [144] Y. Katanosaka, J.H. Bao, T. Komatsu, T. Suemori, A. Yamada, S. Mohri S, K. Naruse, "Analysis of cyclic-stretching responses using cell-adhesion-patterned cells", *Journal of Biotechnology* 133, pp.82-89, (2008).
- [145] A. Dolatshahi-Pirouz, M. Nikkhal, K. Kolind, M.R. Dokmeci, A. Khademhosseini, "Micro- and Nanoengineering Approaches to Control Stem Cell-Biomaterial Interactions", *J. Funct. Biomater* 2, pp.88-106, (2011).
- [146] H.W. Wu, C.C. Lin, S.M. Hwang, Y.J. Chang, G.B. Lee, "A microfluidic device for chemical and mechanical stimulation of mesenchymal stem cells", *Microfluidics and Nanofluidics* 11(5), pp.545-556.
- [147] J. Kawada, H. Kimura, H. Akutsu, Y. Sakai, Y. T. Fujii, "Microfluidic spatial control of stem cell differentiation", *Proceedings of MicroTAS 2010 conference*, Groningen, The Netherlands, pp.7-9, (2010).
- [148] Y.C. Kim, J.H. Kang, S.J. Park, E.S. Yoon, J.K. Park, "Microfluidic biomechanical device for compressive cell stimulation and lysis", *Sensors and Actuators B* 128, pp.108-116, (2007).
- [149] T. Masuda, I. Takahashi, T. Anada, F. Arai, T. Fukuda, F. Takano-Yamamoto, O. Suzuki, "Development of a cell culture system loading cyclic mechanical strain to chondrogenic cells", *Journal of Biotechnology* 133, pp. 231-238, (2008).

- [150] Y. Hirano, N. Ishiguro, M. Sokabe, M. Takigawa, K. Naruse, "Effects of tensile and compressive strains on response of a chondrocytic cell line embedded in type I collagen gel", *Journal of Biotechnology* 133, pp. 245–252, (2008).
- [151] M.B. Goldring, J.R. Birkhead, L.F. Suen, R. Yamin, S. Mizuno, J. Glowacki, J.L. Arbiser, J.F. Apperley JF, "Interleukin-1 beta-modulated gene expression in immortalized human chondrocytes". *J Clin Invest.* (6), pp.2307-16, (1994).
- [152] X. Michalet et al., *Dynamic Molecular Combing: Stretching the Whole Human Genome for High-Resolution Studies*, *Science* 277 5331 (1997)
- [153] E. Schwob, C. de Renty, V. Coulon, T. Gostan, C. Boyer, L. Camet-Gabut, and C. Amato, Use of DNA combing for studying DNA replication in vivo in yeast and mammalian cells, *Methods Mol Biol.* 521 673-87 (2009)
- [154] L. Malaquin, T. Kraus, H. Schmid, E. Delamarche, and H. Wolf, "Controlled Particle Placement through Convective and Capillary Assembly", *Langmuir* (2007), 23, 11513-11521
- [155] A. Cerf, C. Thibault, M. Geneviève, C. Vieu, "Ordered arrays of single DNA molecules by a combination of capillary assembly, molecular combing and soft-lithography" *Microelectronic Engineering* 86 (2009) 1419–1423
- [156] J. Guan and L. James Lee, "Generating highly ordered DNA nanostrand arrays", *PNAS*, vol. 102 no. 51, pp.18321-5, (2005).
- [157] A. Cerf, H.C. Tian, and H.G. Craighead, "Ordered Arrays of Native Chromatin Molecules for High-Resolution Imaging and Analysis", *ACS Nano*, 6 (9), pp 7928–7934, (2012)
- [158] M.C. Park, J.Y. Hur, K.W. Kwon, S.H. Park and K.Y. Suh, "Pumpless, selective docking of yeast cells inside a microfluidic channel induced by receding meniscus", *Lab Chip*, (2006), 6, 988–994
- [159] N. Broguière, T. Pinedo Rivera, B. Pépin-Donat, A. Nicolas, D. Peyrade, « Capillary force assembly of giant vesicles on a microstructured substrate », *Microelectronic Engineering* 88 (2011) 1821–1824
- [160] Y. Viero, "Développement de systèmes fluidiques dédiés à la manipulation d'ADN dans réseaux de nanoplots : étude à l'échelle de la molécule unique et application à la separation", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, (2011).
- [161] Y. Viero, Q. He, L. Mazenq, H. Ranchon, J. Y. Fourniols, A. Bancaud Efficient prototyping of large-scale pdms and silicon nanofluidic devices using pdms-based phase-shift lithography, *Microfluid. Nanofluid.* 12, pp.465–473, (2012)
- [162] S. K. Das et al. "Single molecule linear analysis of DNA in nano-channel labeled with sequence specific fluorescent probes", *Nucleic Acids Research* 38 (18), (2010).
- [163] W. Reisner et al. "Statics and dynamics of single DNA molecules confined in nanochannels", *Physical Review Letters* 19(4), (2005).
- [164] J.O. Tegenfeldt et al. "The dynamics of genomic-length DNA molecules in 100-nm channels" *PNAS* 101:10979-83, (2004).
- [165] D. Gentili, G. Foschi, F. Valle, M. Cavallini, F. Biscarini, Applications of dewetting in micro and nanotechnology, *Chem. Soc. Rev.* 41, pp.4430–4443 (2012)
- [166] E. Bertrand, T.D. Blake, J. De Coninck, Dynamics of Dewetting, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 369 (2010)
- [167] L.D. Landau. and V. G. Levich, Dragging of a liquid by a moving plate, *Acta Physicochim. USSR* 17, pp.42-54, (1942)
- [168] C H Lin et al., Experimental and numerical analysis of DNA nanostrand array formation by molecular combing on microwell-patterned surface, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 025303, (2009)

PUBLICATIONS

1. Journaux

- [p-1] A.Leroy, C.Bony, C.Pinese, B.Charlot, X.Garric, D.Noël, J.Coudane, "PLA-poloxamer/poloxamine copolymers for ligament tissue engineering: sound macromolecular design for degradable scaffolds and MSC differentiation", *Biomaterials Science*, DOI: 10.1039/C4BM00433G, (2015)
- [p-2] B.Charlot, D.Coudouel, F.Very, P.Combette, A.Giani, "Droplet generation for thermal transient stimulation of pyroelectric PZT element", *Sensors and Actuators A*, sous presse, (2015),
- [p-3] B.Charlot, R.Teissier, M.Drac, E.Schwob, "DNA on rails: Combing DNA fibers on nanogratings", *Applied Physics Letters*, 105, 243701 (2014).
- [p-4] L.Paris, M.Burland, P.Quintana, J.M.Bec, L.Diouloufet, C.Sar, H. Boukhaddaoui, B.Charlot, J.Braga-Silva, M.Chammas, V.Sieso, J.Valmier and F.Bardin, "Neurite growth acceleration of adult Dorsal Root Ganglion neurons illuminated by low-level Light Emitting Diode light at 645 nm". *Journal of Biophotonics* 1-9, (2014)
- [p-5] B.Charlot, F.Bardin, N.Sanchez, P.Roux, S.Teixeira and E.Schwob, "Elongated unique DNA strand deposition on microstructured substrate by receding meniscus assembly and capillary force", *Biomicrofluidics* 8, 014103 (2014).
- [p-6] B.Charlot, G.Sassine, A.Garraud, B.Sorli, A.Giani, P.Combette, "Micropatterning PEDOT-PSS layers", *Microsystem technologies*, *Microsystem technologies*. Volume 19, Issue 6, pp 895-903, (2013)
- [p-7] A.Garraud, P.Combette, F.Pichot, J.Courteaud, B Charlot and A.Giani, "Frequency response analysis of an accelerometer based on thermal convection", *J. Micromech. Microeng.* 21 035017 ,(2011).
- [p-8] B.Charlot, S.Gauthier, A.Garraud, P.Combette, A.Giani, "PVDF/PMMA blend pyroelectric thin films" *J Mater Sci: Mater Electron*, Volume 22, Numbr 12, pp.1766-1771, (2011)
- [p-9] A.Garraud, A.Giani, P.Combette, B.Charlot, M.Richard, "A dual axis CMOS micromachined convective thermal accelerometer" *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.170, Issues 1–2, pp. 44–50, (2011)
- [p-10] B.Charlot, K.Yamashita, W.Sun, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "Bistable nanowire for micromechanical memory", *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 18 045005, (2008)
- [p-11] S.Grauby, A.Salhi, L.D.Patino Lopez, W.Claeys, B.Charlot, S.Dilhaire, "Comparison of thermoreflectance and scanning thermal microscopy for microelectronic device temperature variation imaging: Calibration and resolution issues". *Microelectronics Reliability* volume 48, issue 2, pp. 204 – 21, (2008)
- [p-12] K.Yamashita, W.Sun, B.Charlot, K.Kakushima, H.Fujita, and H.Toshiyoshi, "Vacuum, temperature, and time dependencies of field-emission current for RF-MEMS applications," *Journal of Microelectronic Engineering* vol. 84, pp. 1345-1353, (2007).
- [p-13] S.Gomes, P.O.Chapuis, F.Nepveu, N.Trannoy, S.Volz, B.Charlot, G.Tessier, S.Dilhaire, B.Cretin, P.Vairac, "Temperature Study of Sub-Micrometric ICs by Scanning Thermal Microscopy", *IEEE Transaction of Components and Packaging Technologies*, Vol. 30, Issue 3, pp. 424-431, (2007)
- [p-14] N.Galy, B.Charlot, B.Courtois, "A Full Fingerprint Verification System for a Single-Line Sweep Sensor", *IEEE Sensors Journal*, Vol.7, issue 7, pp. 1054-1065, (2007).
- [p-15] K. Dogheche, B. Cavallier, P. Delobelle, L. Hirsinger, E. Cattan, D. Remiens, M. Marzencki, B. Charlot, S. Basrou, S. Ballandras, "A bistable micro-machined piezoelectric transducer for mech. to electr. energy transformation", *Integr. Ferroelectrics* 76, pp. 3-12, (2006).
- [p-16] L.Aigouy, G.Tessier, M.Mortier, B.Charlot, "Scanning thermal imaging of microelectronic circuits with a fluorescent nanoprobe", *Appl. Phys. Lett.* 87, 184105 (2005).
- [p-17] C.Filloy, G.Tessier, S.Holé, G.Jérosolimski, D.Fournier, B. Charlot, "Hot spot detection in integrated circuits working at up to 1 GHz", *J. Phys. IV* 125, pp.105-107 (2005).
- [p-18] B.Charlot, F.Parrain, N.Galy, S.Basrou and B.Courtois, "A Sweeping Mode Integrated Fingerprint Sensor With 256 Tactile Microbeams". *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol 13, Issue 4, pp. 636-644, (2004)
- [p-19] C.Roman, S.Mir and B.Charlot. "Building an analogue fault simulation tool and its application to MEMS". *Microelectronics Journal*, 34(10), 2003, pp. 897-906.
- [p-20] S.Mir and B.Charlot, "From Microelectronics to Integrated Microsystems Testing", *Nano et micro technologies*. Hermes Science Publications, Paris, 12(1-2, pp. 249-270, (2002).

- [p-21] F.Parrain, B.Charlot, B.Courtois, "Capteur infrarouge CMOS à thermopiles comportant des fonctions de self-test", Nano et Micro-Technologies, microcapteurs et microsystèmes intégrés, Hermès Sciences publications, Volume 1-n°3-4, pp. 387-412, (2002).
- [p-22] B.Charlot, S.Mir, F.Parrain and B.Courtois, "Generation of Electrically Induced Stimuli for MEMS self-test", JETTA, Journal of electronic testing: theory and applications, Volume 17, issue 6, pp. 459-470, (2001)
- [p-23] S.Mir, F.Parrain, B.Charlot, D.Veychard, "Microbeams with Electronically Controlled High Thermal Impedance", ALOG Analog Integrated and Signal Processing, Volume 29, Issue 1/2, pp. 71-83, (2001)
- [p-24] S.Mir, B.Charlot, B.Courtois, "Extending Fault-Based Testing To Microelectromechanical capteurs", JETTA, Journal of electronic testing :theory and applications, Volume 16, Issue 3, pp. 279-288, (2000)
- [p-25] S.Mir, B.Charlot, "On the integration of design and test for chips embedding MEMS", IEEE Design and Test of computers, pp. 28-38, (1999)
- [p-26] B.Charlot, S.Mir, B.Courtois, "Fault Simulation of MEMS Using HDLs", Journal of Modeling and Simulation of Microsystems, JMSM, Volume 2, N°1, (1999).

2. Conférences invitées

- [p-27] B.Charlot, "Micro mouvement, Nano mouvement", Journée de la Société de Biologie "Le Mouvement dans tous ses Etats", Montpellier, Octobre 2013.
- [p-28] B.Charlot, W.Sun, K.Yamashita, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "Bistable Nanowire For micromechanical memory", The 8th Japan-France Workshop on Nanomaterials. June 15-17th, 2009, NIMS Sengen site, Tsukuba, Japan.
- [p-29] B.Charlot, "La micro thermique dans les systèmes micro-électro-mécaniques", Congrès Français de Thermique, SFT 2005, Reims, 30 mai - 2 juin 2005.
- [p-30] S.Mir, B.Charlot, L. Rufer and B.Courtois, "On-Chip Testing of Embedded Transducers", IEEE System On Chip Conference, SOCC'04, 12-15 Sept 2004, Santa Clara, CA, USA.
- [p-31] B.Charlot, "Microsystèmes thermiques et applications", Journée thématique Micro et Nano Thermique, Exposition de Physique, 21-22-23 octobre 2003, Paris Expo.
- [p-32] B.Charlot, "Les microsystèmes thermiques, exemples de réalisations", Séminaire invité, Réunion du groupe de Micro et Nanothermique de la Société Française de Thermique, Reims, Janvier 2002.

3. Conférences Internationales

- [p-33] L.Paris, B.Charlot, M.Dumas, J.Valmier and F.Bardin, "Stimulation of dorsal root ganglion neurons by infra-red laser millisecond pulses", IEEE EMBS Neural engineering conférence, Montpellier, France, (2015)
- [p-34] B.Charlot, M.Lechelon, F.Bardin, R.Teissier, L.Paris, J.Valmier, "Axonal growth guidance by surface nano-topology for the regeneration of sensori motor neurons", IEEE EMBS Neural engineering conférence, Montpellier, France, (2015)
- [p-35] A.Vena, B.Sorli, B.Charlot and S.Naudi, "An RFID-based Implant for Identification and Pressure Sensing of Orthopedic Prosthesis", 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC) May 18 - 22, (2015)
- [p-36] B.Charlot, N.Sanchez, P.Roux, S.Teixeira, "Double emulsion generation and separation by microfluidic consecutive flow focusing", DTIP, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2-4 April 2014, Cannes, France
- [p-37] B. Charlot, F. Bardin, N. Sanchez, P. Roux, S. Teixeira and E.Schwob, "Mechanism of DNA combing through receding meniscus assembly on microstructured substrate", 7th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2013), Freiburg, Germany.
- [p-38] M.Balde, F. Bibi, B. Charlot, P. Combette, B.Sorli, "Growth and characterization of anodized aluminum oxide thin film on paper-based substrate", DTIP, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 16-18 April 2013, Barcelona, Spain.
- [p-39] B.Charlot, D.Coudouel, P.Combette, A.Giani, "Pyroelectric PZT sensors screen printed on glass", DTIP, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 16-18 April 2013, Barcelona, Spain.
- [p-40] M.Balde, F.Jacquemoud-Collet, B.Charlot, P.Combette, B.Sorli, "Microelectronic technology on paper substrate", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 25-27 April 2012

- [p-41] B.Charlot, G.Sassine, A.Garraud, A.Giani, P.Combette, "Micropatterning and casting PEDOT-PSS/DMSO layers", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2012, 25-27 April 2012
- [p-42] D.Coudouel, A.Garraud, S.Gauthier, A Giani, B.Sorli, B.Charlot, P.Combette, "Convective thermal accelerometers using screen printed pyroelectric thick-films", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2012, pp.177-18.
- [p-43] A.Garraud, P.Combette, J.M.Gosalbes, B.Charlot, A.Giani, "First high-g measurement by thermal accelerometers", 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011.
- [p-44] P.Combette, A.Garraud, B.Charlot, A.Giani, "A new thermal accelerometer based on pyroelectric thin films", 14th International Symposium on Electrets (ISE), 28-31 Aug. 2011
- [p-45] A.Garraud, P.Combette, B.Charlot, P.Loisel, A.Giani, "A closed-loop micromachined accelerometer based on thermal convection", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2011.
- [p-46] A. Garraud, A.Giani, B.Charlot, Ph.Combette, "A Dual Axis CMOS Frontside Bulk Micromachined Thermal Accelerometer", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'10, 5-7 May 2010, Sevilla, Spain
- [p-47] B.Charlot, F.Pichot, A.Giani, Ph.Combette, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "A-Si:H bistable microbeams for memory applications", MME'09, 20th workshop on micromachining, micro mechanics and micro systems, September 20-2, Toulouse, France, 2009.
- [p-48] B.Charlot, K.Yamashita, W.Sun, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "Field Emission displacement gauge for microelectromechanical resonators », Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'09, 1-4 April 2009, Roma, Italy.
- [p-49] J.W.Park, N.Pereira Rodrigues, O.Ducloux, B.Charlot, T.Fujii, and H. Fujita, "development of Calcium ISFET array dedicated to endocrine cells High throughput analysis", MMB 2009, International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, Quebec City, Quebec, CANADA, April 1 - 3, 2009
- [p-50] B.Courtois, B.Charlot, G. Dipendina, L.Rufer, "Electronics Manufacturing Infrastructures for Education and Commercialization", 30th Annual International IEEE EMBS Conference, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 20-24, 2008, Vancouver, British Columbia, Canada
- [p-51] B.Courtois, B.Charlot, G. Dipendina, L.Rufer, "Infrastructures for Education, Research and Industry: CMOS and MEMS for BioMed", The 12th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, WMSCI, Orlando USA, 29 June - 2 July 2008, Orlando CA, USA.
- [p-52] B.Charlot, K.Yamashita, W.Sun, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "In-plane Bistable nanowire for micromechanical memory", Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'08.
- [p-53] K.Yamashita, B.Charlot, W.Sun, K.Kakushima, H.Fujita, and H.Toshiyoshi, "Modulation and detection of field emission current by using MEMS resonator for application to RF-MEMS band-pass filters " Asia Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT) 08', TAYIH Landis Hotel, Tainan, Taiwan 22-25 June, 2008.
- [p-54] W. Sun, K. Yamashita, B. Charlot, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "A MEMS Vacuum Tube Resonator with Field-Emission Type Pick-up Mechanism", in Proc. The 3rd Japan-Taiwan Workshop on Future Frequency Control Devices, March 8-9, 2007, Keyaki Hall, Chiba University, Japan, pp. 93 - 96.
- [p-55] K.Yamashita, W.Sun, B.Charlot, K.Kakushima, H.Fujita, and H.Toshiyoshi, "Time dependence of field-emission current for silicon RF-MEMS applications," Proc. 32nd Int. Conf. on Micro- and Nano-Engineering 2006 (MNE 2006), Barcelona, Spain, Sept. 17-20, 2006.
- [p-56] M.Marzencki, S.Basrour, B.Charlot, S.Spirkovich, M.Colin, "A MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Device", in PowerMEMS 05, Nov 28-30, Tokyo, Japan.
- [p-57] Y.Ammar, A.Buhrig, M.Marzencki, B.Charlot, S.Basrour, K.Matou and M.Renaudin, "Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator", in SoC-EUSAI, Smart Objects & Ambient Intelligence, October 12th - 14th 2005, Grenoble, France.
- [p-58] G.Tessier, S.Pavageau, C.Filloy, B.Charlot, G.Jerosolimski and D.Fournier, "Quantitative thermoreflectance imaging: calibration method and validation on a dedicated integrated circuit", in 11th Int'l Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems, THERMINIC 2005, 27 - 30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy.
- [p-59] N.Trannoy, F.Nepveu, S.Gomes, P.O.Chapuis, S.Volz, B.Charlot, B.Cretin, S.Dilhaire, G.Tessier and P.Vairac, "Temperature measurement of microsystems by Scanning Thermal Microscopy", in 11th Int'l Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems, THERMINIC 2005, 27 - 30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy.

- [p-60] L.Aigouy, G.Tessier, Y.De Wilde, M. Mortier, and B. Charlot, "A scanning fluorescent probe for local temperature imaging of microelectronic circuits", in 11th Int'l Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems, THERMINIC 2005, 27 - 30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy.
- [p-61] S.Grauby, A.Salhi, L-D.Patino Lopez, S.Dilhaire, B.Charlot, W.Claeys, B.Cretin, S.Gomes, G.Tessier, N.Trannoy, P.Vairac and S.Volz, "Temperature variations imaging by thermoreflectance and SThM techniques", in 11th Int'l Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems, THERMINIC 2005, 27 - 30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy.
- [p-62] P.Vairac, B.Cretin, B.Charlot, S.Dilhaire, S.Gomes, G.Tessier, N.Trannoy and S.Volz, "Ultra-Local temperature mapping with an intrinsic thermocouple, in 11th Int'l Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems, THERMINIC 2005, 27 - 30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy.
- [p-63] S.Basrour, B.Charlot, G.Despesse, J.J.Chailout, I.Dekkaki, T.Jager, J.M.Leger, A.Vassilev, "High Damping Electrostatic System For Vibration Energy Scavenging", In Technical Proceedings of the 2005 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show (2005) 375 - 378.
- [p-64] K.Dogheche, B.Cavallier, P.Delobelle, L.Hirsinger, S. Ballandras, E.Cattan, D.Remiens, M.Marzencki, B.Charlot, S. Basrour, S, "Piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer (pMUT) for energy harvesting", IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 2, 18-21 Sept. 2005 Page(s):939 - 942.
- [p-65] M.Marzencki, S.Basrour, B.Charlot, M.Colin, L.Valbin, "Design and fabrication of piezoelectric micro power generators for autonomous microsystems", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'05*, 01-03 June 2005, Montreux, Switzerland.
- [p-66] G.Despesse, T.Jager, J.J.Chailout, J.M.leger, A.Vassilev, S.Basrour and B.Charlot, "Fabrication and characterization of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'05*, 01-03 June 2005, Montreux, Switzerland.
- [p-67] M.Marzencki, S.Basrour and B.Charlot, "Design, modelling and optimisation of integrated piezoelectric micro power generator", Modeling and Simulation of MEMS, MSM'05, Anaheim, California, USA, 8-12 Mai 2005.
- [p-68] V.Szekely, G.Bognar, M.Rencz, F.Ciontu, B.Charlot and B.Courtois, "Design and verification of an electrostatic MEMS simulator", *Nanotechnology Conference and TradeShow (NanoTech'04)*, Boston, Massachusetts, U.S.A., March 7-11.
- [p-69] B.Charlot, B. Courtois, V.Szekely, M.Rencz, G. Bognár, "An 8X8 Thermopile Based Uncooled Infrared Imager", *European Micro and Nanosystems*, 20-21 Oct 2004, Noisy le Grand, Paris, France.
- [p-70] B.Charlot, K.Torki, G.Tessier, C.Filloy and D.Fournier, "A Digital CMOS Circuit For Reflectance Thermography", *10th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, THERMINIC'04*, 29 Sept-2 Oct, Sophia Antipolis, France.
- [p-71] N.Galy, B.Charlot, F.Parrain and B.Courtois, "A Full Identification System For A Tactile Fingerprint Sensor", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'04*, 12-14 May 2004, Montreux, Switzerland
- [p-72] B.Charlot, F.Parrain, N.Galy and B.Courtois, "A Sweeping Mode Tactile Integrated Fingerprint Sensor", *12th International conference on solid-state sensors, actuators and microsystems TRANSDUCERS'03*, 8-12 June 2003, Boston.
- [p-73] C.Roman, S.Mir, B.Charlot, "Building an Analog Fault Simulation Tool and Its Application to MEMS", *IMSTW'02 International Mixed Signal Test Workshop*, 18-21 Juin 2002, Montreux, Switzerland.
- [p-74] F.Parrain, B.Charlot, N.Galy, B.Courtois, "A CMOS Micromachined Tactile Fingerprint Sensor", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, 6-8 Mai 2002, Cannes - Mandelieu, France.
- [p-75] G.Nicolescu, S.Martinez, L.Kriaa, W.Youssef, S.Yoo, B.Charlot, A.Jerraya, "Application of Multi-domain and Multi-language Cosimulation to an optical MEM switch Design", *ASPDAC/VLSI Design*, 7-11 Janvier 2002, Bangalore Inde.
- [p-76] B.Charlot, S.Mir, F.Parrain, B.Courtois, "Electrically Induced Stimuli for MEMS self-test", *19th VLSI test symposium, VTS2001*, Los Angeles, 29 Avril-3 Mai, 2001, pp. 210-125.
- [p-77] B.Charlot, F.Parrain, S.Mir, B.Courtois, "A Self-testable CMOS Thermopile-based Infrared Imager", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'2001*, Cannes - Mandelieu, France, 25-27 avril 2001, pp. 96-103.
- [p-78] Z.Juneidi, K.Torki, B.Charlot, B.Courtois, "MEMS synthesis and optimisation", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP'2001*, Cannes - Mandelieu, France, 25-27 avril 2001, pp. 159-164.

- [p-79] B.Courtois, S.Mir, B.Charlot and M.Lubaszewski, "From Microelectronics to MEMS Testing", MRQ 2000, *IEEE Microelectronics Reliability and Qualification Workshop*, 31 Oct-1 Nov, 2000, Hilton, Glendale, California.
- [p-80] S.Mir, B.Charlot, G.Nicolescu, P.Coste, F.Parrain, N.Zergainoh, B.Courtois, A.Jerraya, M.Rencz, "Towards design and validation of mixed technology SOCs", *10th Great Lakes Symposium on VLSI*, Chicago USA, 2000.
- [p-81] S.Mir, B.Charlot, F.Parrain, D.Veychard, "High thermal impedance beams for suspended MEMS", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP2000*, 9-11 Mai 2000, PARIS.
- [p-82] B.Courtois, B.Charlot, H.Delori, S.Eyraud, J.F.Pailotin, K.Torki, "Achievements and advances at CMP", *EWME 2000, European Workshop on Microelectronics Education*, Aix en Provence, 18-19 Mai 2000.
- [p-83] B.Charlot, S.Mir, E.F.Cota, M.Lubaszewski, B.Courtois, "Fault modeling of suspended thermal MEMS", *ITC'99, IEEE International Test Conference*, Atlantic city, NJ, USA, 28-30 septembre, 1999, pp. 319-328.
- [p-84] B.Charlot, S.Moussouris, S.Mir, B.Courtois, "Fault modeling of electrostatic comb-drives for MEMS", *DTM'99, SPIE Symposium on Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS*, Paris, France, Mars-Avril 1999, pp. 398-405.
- [p-85] B.Charlot, S.Mir, E.F. Cota, M.Lubaszewski, B.Courtois, "Fault simulation of MEMS using HDLs", *DTM'99, SPIE Symposium on Design, Test and Microfabrication of MEMS/MOEMS*, Paris, France, Mars-Avril 1999, pp.70-77.
- [p-86] S.Mir, B.Charlot, B.Courtois, "Extended fault based testing to microelectromechanical systems", *ETW'99, European Test Workshop*, Constance, Germany, Mai 1999.

4. Workshops

- [p-87] W. Sun, K. Yamashita, B. Charlot, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "A MEMS Vacuum Tube Resonator with Field-Emission Type Pick-up Mechanism", in Proc. The 3rd Japan-Taiwan Workshop on Future Frequency Control Devices, March 8-9, 2007, Keyaki Hall, Chiba University, Japan, pp. 93 - 96.
- [p-88] S.Mir, B.Charlot, "MEMS testing", MIGAS summer school, Autrans, September 2002.
- [p-89] F.Parrain, B.Charlot, N.Galy, "Capteur intégré d'empreintes digitales à micropoutres piezorésistives", Journées Micro/Nanotechnologies, Paris, Novembre 2001.
- [p-90] B.Charlot, F.Parrain, "A Self testable CMOS thermopile based Infrared Imager", Journées Micro/Nanotechnologies, Paris, Novembre 2000.
- [p-91] B.Charlot, S.Mir, "Intégration de la Conception et du Test dans des Puces avec Dispositifs Microsystèmes Embarqués", Colloque CAO de circuits intégrés et systèmes, Aix en Provence, Fuveau, 10-12 mai 1999.

5. Livres et chapitres de livres

- [p-92] S.Mir, B.Charlot, L.Rufer, F.Parrain, S.Martinez, "Conception de microsystèmes sur silicium", *Traité EGEM, série Electronique et micro-électroniques*, Hermes sciences - Lavoisier 2002.
- [p-93] S.Mir, B.Charlot, L.Rufer, F.Parrain, S.Martinez, "Dispositifs et physique des microsystèmes sur silicium", *Traité EGEM, série Electronique et micro-électroniques*, Hermes sciences - Lavoisier 2002.
- [p-94] S. Mir and B. Charlot. "From Microelectronics to Integrated Microsystems Testing". Chapter in *Microsystems Technology – Fabrication, test and reliability*, J. Boussey (Ed.), Hermes Penton Science, 2003.

13. CURRICULUM VITÆ

13.1. Etat Civil

Nom : **CHARLOT**

Prénoms : Benoît, Antoine

Date de naissance : 6 juin 1972 à Vichy (03)

Situation familiale : Marié, deux enfants

Grade : CR1 Chargé de recherches de première classe

Date d'entrée au CNRS : 1^{er} octobre 2002

Adresse :

IES Institut d'Electronique et des Systèmes

CNRS UMR 5214 / Université Montpellier II

860 rue de Saint Priest, Bâtiment 5

34097 Montpellier, France

Tel: 0467144654

lab: www.ies.univ-montp2.fr

email : benoit.charlot@um2.fr

Page personnelle : <http://mitea.univ-montp2.fr/perso/charlot/>

13.2. Diplômes

Dates	Diplôme	Libellé	Lieu
Déc. 1997 Mars 2001	Thèse	« Modélisation de fautes et conception en vue du test structurel des microsystemes » Directeurs de thèse (co-tutelle) : Bernard COURTOIS (TIMA) et Alain CHOVET (LPCS)	Laboratoire TIMA (UMR5159) et LPCS INP-Grenoble
1996	DEA	Optique, Optoélectronique et Micro-ondes	INP-Grenoble
1993-1995	Licence Maîtrise	Physique et applications, option physique des composants semiconducteurs (PhySce)	Université Montpellier II
1991-1993	DEUG	Physique	Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
1990-1991	Math sup	T (Technologique)	Lycée Jean ZAY, Thiers
1990	Baccalauréat	Série E	LEGT Vichy-Cusset

13.3. Positions

Dates	Poste
Depuis Sept. 2007	Chargé de recherches au CNRS affecté au laboratoire IES (UMR5214 dirigée par M. Foucaran), Montpellier dans l'équipe MITEA dirigée par le Pr. Giani.
Sept. 2005-Sept. 2007	Chargé de recherches au CNRS affecté au laboratoire LIMMS, Tokyo (UMI2820 dirigée par D.Collard) dans l'équipe du Pr. Toshiyoshi.
Oct. 2002 –Sept. 2005	Chargé de recherches au CNRS affecté au laboratoire TIMA, Grenoble, dans l'équipe MNS.
Mars 2001-Oct.2002	Post doc, contractuel à l'Université Joseph Fourier affecté au laboratoire TIMA
Mars 1996-Juin 1996	Stagiaire (DEA) au LEPES (laboratoire d'étude des propriétés électroniques des solides) à Grenoble, sujet : "Caractérisation optique du mode de croissance de couches de diamant poly cristallines
Juin 1995-Sept. 1995	Stagiaire (maîtrise) au CNET (centre national de recherches en télécommunications), Centre Norbert SEGARD, groupement DCF (dispositifs et caractérisation des filières) à Grenoble, sujet : "Optimisation des procédures de gravure et de dépôt par faisceaux d'ions focalisés".

13.4. Encadrement

13.5. Encadrement de thèses

- Fabien PARRAIN, 1999-2002, fingerprint sensor. (Co-encadrement avec Bernard COURTOIS)
- Nicolas GALY, 2002-2005, fingerprint recognition algorithms. (Co-encadrement avec Bernard COURTOIS)
- Marcin MARZENCKI, 2004-2007, piezoelectric micro power generator. (Co-encadrement avec Skandar BASROUR)

13.6. Participation à des jurys de thèses

- Fabien PARRAIN, INP Grenoble, 2002, co-encadrant de la thèse
- Nicolas GALY, 2005, INP Grenoble, co-encadrant de la thèse
- Sébastien NAZEER, IEF Université Paris Sud, 2011, examinateur
- Pierre ALLAIN, IEF Université Paris Sud, 2012, examinateur

13.7. Encadrement de Master

Nom	Type	Sujet	Date
Erika Fernandes COTA	M2	Modélisation de fautes avec le langage HDL-A	Janvier 1999
Benjamin CAILLARD	PFE	Etude, conception et réalisation d'une interface électronique hybride pour micro-résonateur électromécanique	Avril-septembre 2000
Fabien PARRAIN	M2	Etude, conception et réalisation d'un capteur d'empreintes digitales à micropoutres	Avril-septembre 1999
Narcisse NNA-OYANNE	M1	Réalisation d'un banc de test pour microsystemes	Janvier - mars 2001
Nicolas GALY	M2	Réalisation d'un système de reconnaissance d'empreintes digitales	Mars - Septembre 2002
Guillaume PRENAT	M2	Etude d'un micro-actionneur électrostatique pour l'optique adaptative	Mars - Septembre 2002
Renaud NICOLAS *	M2	Conception d'un micro générateur électromagnétique	Mars-Juillet 2002
Laurent PETIT *	M2	Conception d'un microgénérateur piézoélectrique pour l'alimentation électrique d'un microsysteme autonome	Mars-Septembre 2003
Marcin MARZENCKI	M2	Conception d'un capteur APS pour application aux biopuces	Mars-Juillet 2003
Tobias GUEHNE	M1	Caractérisation d'un capteur infrarouge	Mars-Juillet 2003
Giovanni SILENO*	M2	Conception d'un microgénérateur piézoélectrique pour l'alimentation électrique d'un microsysteme autonome	Mars-Septembre 2003
Paolo CUSINU*	PFE	Caractérisation d'un micro générateur piézoélectrique.	Mars-Juillet 2005
Antonio GRASSO*	PFE	Modélisation d'un transducteur piézoélectrique.	Mars-Juillet 2005
Lucas ESPINASSE	M1	Conception d'un circuit intégré pour l'analyse biochimique	Mars - Juillet 2008
Michèle TUMARAE	M1	Développement de circuits microfluidique pour l'étude de levures en culture.	Mars - Juillet 2012
Hadjer EL HANSARI	M1	Création de circuits nanofluidiques pour le peignage d'ADN	Mars - Juillet 2012
Clément ROUGE	M2	Elongation d'ADN par dépôt par capillarité sur substrat microstructuré	Janv-Juin 2013
Gregory NICOL	M1	Elongation d'ADN par dépôt par capillarité sur	Avril-Juin

		substrat nanostructuré	2014
Alexandre POIRIER	M1	Auto assemblage de nanobilles pour la réalisation de résonateurs plasmonique en vue d'une stimulation neuronale optique	Avril-Juin 2014
Mathias LECHELON	M2	Substrats microstructures en PEGDMA pour la croissance guidée de neurones DRG	Avril-Aout 2014

* en co direction avec le Pr. Skandar BASROUR.

13.8. Enseignements

Type	Date	Titre	Volume	Audience
Cours	2002-2006	Conception des microsystèmes	4 heures	Elèves ingénieurs de l'option de 3 ^e année microsystèmes ENSERG/ENSPG
TP	2002-2006	Simulation des microsystèmes par analyse en éléments finis	16 heures	Elèves ingénieurs de l'option de 3 ^e année microsystèmes ENSERG/ENSPG. Elèves ingénieurs de l'option de 3 ^e année micro et nano ingénierie Polytech'Grenoble Formation continue INP Grenoble.
Cours	2010-	Interface neuro électronique	3 heures	Formation TELECOM TIC Santé, Institut TELECOM Montpellier.
Cours	2010	Histoires, Sciences et technique de la photographie	4 heures	UE Art et Sciences, Faculté de Sciences, Université Montpellier II
Cours	2012	Microfluidique	16 heures	Master TEC Santé, Faculté de Sciences, Université Montpellier II.

13.9. Participation à des projets de recherches coopératifs

13.10. Projets Européens

Nom	Type	Participants	Domaine	Dates
VIBES <i>VIBration Energy Scavenging</i>	STREP 6 ^e PCRD IST	PHILIPS research TIMA PHILIPS digital system labs UNIV. Southampton NMRC MEMSCAP METRAVIB LPMO CNRS	Micro génération de puissance pour microsystèmes autonomes	2003 2006

PROFIT <i>Prediction of Temperature Gradients Influencing the Quality of Electronic Products</i>	5°PCRD	PHILIPS research	Analyse et modélisation	2000
	IST	STmicroelectronics INFINEON PHILIPS semiconductors CQM TIMA BUTE MICRED FLOWMERICS NOKIA	thermique des boîtiers de circuits intégrés	2003
TALENT <i>Tools Adaptation and Library development towards microsystems design environment</i>	5°PCRD	AMS	CAO des microsystèmes	1998
	IST	SENSOROR MEMSCAP TIMA BOSCH BUTE ANACAD NMRC		2001

Projets non retenus

- QUALITY (IP, 6°PCRD, NMP),
- μSECURITY (NoE, 6°PCRD, IST),
- EUROSOC (NoE, 6°PCRD, IST)
- CAMPATCH (2004 Strep 6eme PCRD)
- MAGMAS (IP, 6°PCRD, 2005)
- TEP (ERC starting grant 2011)
- REGENANO (ERC synergy 2012)

13.11. Projets Agence Nationale de la Recherche

Nom	Type	Participants	Domaine	Dates
RAGE	ANR ASTRID	DGA IES	<i>Réalisation d'accéléromètres à haute étendue de mesure</i>	2012 2015
AMNESIA	ANR Jeune chercheur	STmicro IES LPMO	<i>Advanced memory and nanodevices for energy saving and innovative applications</i>	2012 2015
SUPREME B	ANR	IES UTT Sikemia	<i>LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE IN HIGHLY DOPED SEMICONDUCTORS FOR INFRARED BIOSENSING</i>	2014 2018

Projets non retenus

- TEMP (ANR PNano) 2008 (porteur)
- TEP (ANR P3N) 2009 (porteur)
- TEP (ANR blanche) 2010 (porteur)
- SUPREME (programme blanc) 2013 (partenaire)
- MONITO (ECO-TS) 2013 (partenaire)
- RAS (ECO-TS) 2014 (partenaire)
- SUPREME (ANR blanche) 2014 (partenaire)
- RAS (2015) (partenaire)
- NEUROPIUM (2015) (partenaire)
- NANOCOTH (2015) (partenaire)
- MALPAREXIT (2015) (partenaire)

13.12. Autres projets Nationaux et Internationaux

Nom	Type	Participants	Domaine	Dates
BQR	Bonus qualité recherche INPG	TIMA	Capteur d'empreintes digitales	2001
BQR	Bonus qualité recherche INPG	TIMA LEG	Micro générateur de puissance	2002
OSMOSE	Projet Région Rhône Alpes	TIMA LEOM STmicroelectronics	Simulation globale	2003
ACI mécanique	CNRS	TIMA LPMO LMARC	Micro génération de puissance	2003
IC for biosensing,	JST CREST	FUJITA lab, IIS Univ. of Tokyo.		2008 2009
STIMDIF	CNRS Interface chimie Biologie, soutien à la prise de risque	IES INM	Physical constraints at the cellular level: impact on differentiation of mesenchymal stem cells	2010
NEURILED	CNRS PEPS	IES INM		2013

A ceci s'ajoute les projets qui n'ont pas été soutenus :

- Biopuce Active (programme Puces à ADN du CNRS)
- Biopuce Active (programme EMERGENCE de la région Rhône Alpes)
- Biopuce Active (ACI jeune chercheur du ministère de la recherche)
- MISTIC (RTP 45 du CNRS)
- HUMS (DGA)

13.13. Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

13.14. PHS MEMS

A la suite d'une demande émanant de la société PHSmems nous avons conçu un circuit intégré de commande d'une matrice de micro bobines sur cahier des charges. Le circuit (Figure 17) se compose d'une matrice de diodes de puissances faisant office de sélection XY. Le cahier des charges stipulait des conditions en termes de courant maximum et de résistance interne des diodes. La structure de la puce devait en outre respecter un positionnement des plots pour un montage en *flip chip*. Les modèles de diodes du kit de conception AMS étant insuffisamment précis nous avons eut recours à des caractérisations électriques sur des dispositifs fabriqués auparavant. La puce a été conçue en quatre versions différentes (différentes jonctions p/n) pour palier le manque d'informations sur plusieurs paramètres. Suite aux résultats de test fournis par la société PHSmems, il s'est avéré que deux circuits sur quatre rentraient dans les spécifications avec des rendements de fabrication supérieurs à 90%. Le circuit va faire l'objet d'une fabrication en petit volume de 100 wafers via le service CMP.

13.15. CMP

J'ai été responsable depuis 1999 du service de prototypage de microsystemes au sein du service CMP. A ce titre mon activité concernait :

- L'organisation des runs de prototypage microsystemes (AMS, OMMIC et MEMSCAP)
- Qualification ISO 9002 du service de prototypage de microsystemes
- Qualifications de la technologie AMS 0.6µm plus micro-usinage en volume
- Support technique aux clients et stands sur différentes conférences (DTIP, DATE, DAC) depuis 1999.
- Développement de technologies microsystemes

13.16. SANOFI

En 2012, j'ai répondu à la demande de la société SANOFI de transfert de compétences en technologies microfluidiques. Nous avons donc conclu un accord de partenariat sous la forme d'une formation professionnelle organisée par la structure CNRS formation entreprise. J'ai donc formé trois personnes de la société SANOFI de Montpellier aux techniques de fabrication de circuits microfluidiques. Nous continuons aussi à travailler ensemble sur le développement de circuits pour la génération de polymersome par la technique dite du flow focusing.

13.17. Activité éditoriale

- Chairman de DTIP 2012 : Symposium on Design, Test, Integration and packaging of MEMS and MOEMS, conference on microfabrication.
- Co-Chair du Symposium on Heterogeneous Integration Challenges of MEMS, Sensor, and CMOS within the 2012 MRS Spring meeting.
- Membre du comité scientifique du Symposium DTIP : Design, Test, Integration and packaging of MEMS and MOEMS et THERMINIC conferences.
- Reviewer pour les journaux scientifiques :
 - IEEE journal of Microelectromechanical Systems,
 - IEEE SENSORS
 - IOP Journal of micromechanics and microengineering.
 - Springer Microsystem Technologies
 - Sensor and Actuators
 - Biomechanics

13.18. Diffusion de la Culture Scientifique

- **Bar des sciences.** « Aimez-vous l'interactivité ? »
Expérimentations, innovations et recherches dans les Sciences et les Arts.
En présence notamment de Yann Nguema, artiste concepteur, bassiste, graphiste – Ez3kiel,
- Benoît Charlot, chercheur à l'IES Institut d'Electronique du Sud / groupe MITEA CNRS / Université Montpellier 2.
- Philippe Fraisse, professeur Université Montpellier 2 (Polytech), responsable du département Robotique du LIRMM.
Jeudi 17 février 2011 à 20h30. Carré St Anne, 2 rue Phillippy, Montpellier
- **Festival Sciences en Fictions.** Montpellier mars 2012. Discussions scientifiques grand public autour de la projection du reportage « Astroboy à Roboland » de Marc Caro
- **Nuit des chercheurs.** Participation à la nuit des chercheurs, organisée par l'association Connaissance. Editions 2010 et 2011.

13.19. Groupements de recherche et réseaux

13.20. GDR

Participation active aux groupements de recherches suivants :

- GDR Micro Nano Systèmes, GDR Français de la communauté microsystemes.
- GDRI NAMIS (NANO and Micro Systems) GDR international entre la France (CNRS), le Japon (Univ.Tokyo), l'Allemagne, la Finlande (VTT), la suisse (EPFL), la Corée (KIMM) et les EU. (Univ.Washington)
- GDRE Micro and nano heat transfers, GDR européen de la communauté des physiciens thermiciens.

13.21. LABEX

Participation active au montage du **LABEX NUMEV**, « Solutions numériques pour l'environnement et le vivant » au sein du projet « Aide à la personne malade ou déficiente : neuro-prothèses, robotique médicale, capteurs physiologiques » projet intégré dirigé par David Guiraud. A ce titre lauréat d'un financement de post doc (2012) et d'un demi financement de thèse (2014).

13.22. Activité administrative

- Membre élu du conseil d'administration de l'Université Montpellier II. Elu sur la liste de Michel ROBERT (Mai 2012), et à ce titre unique représentant du CNRS au sein du conseil d'administration de l'Université Montpellier II.

13.23. Divers

Langues	Français, Anglais, Japonais (premier niveau / 4)
Service National	nov. 1996-sept. 1997, Marine Nationale, Porte-avions Clemenceau, division Conduite Du Navire
Permis	Véhicule B Permis Mer hauturier

13.24. Bibliométrie

ISI Web of Knowledge : H-index 7 (137 citations sur 35 publications référencées)

Google Scholar : H-Index 16 (812 citations sur 81 publications référencées)