

UNIVERSITE DE TOULOUSE
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée et soutenue publiquement le

16 Mars 2012

par

Patrick PONS

Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse

**Capteurs sans fils passifs à transduction électromagnétique :
A la frontière entre le monde des capteurs et les MEMS RF**

Membres du Jury

BALLANDRAS Sylvain, Directeur de Recherches FEMTO-ST :	Rapporteur
BLONDY Pierre, Professeur Université Limoges :	Rapporteur
BOSSEBOEUF Alain, Directeur Recherches IEF :	Rapporteur
PELLET Claude, Professeur Université Bordeaux :	Président
SEMERIA Marie Noelle, CEA-LETI	Membre
PLANA Robert, Professeur Université Toulouse,	Membre
AUBERT Hervé, Professeur INP Toulouse	Membre-Correspondant

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CAPTEURS DE PRESSION ET MEMS RF	9
1 DEVELOPEMENT DE MICROSYSTEMES	11
1.1 Introduction	11
1.2 Capteurs de pression	11
1.2.1 Introduction	11
1.2.2 Capteur de pression pour l'automobile	12
1.2.3 Capteur de pression haute température pour l'aéronautique	13
1.2.4 Capteur de pression intracrânienne	13
1.3 Microsystèmes pour application haute fréquence	17
1.3.1 Introduction	17
1.3.2 Circuits métalliques à faible pertes	17
1.3.3 Micro-commutateurs RF à MEMS	19
1.3.4 Circuits RF passifs micro-fluidiques accordables	25
2 MICROTECHNOLOGIES – MICROSTRUCTURES	27
2.1 Introduction	27
2.2 Membranes	27
2.2.1 Introduction	27
2.2.2 Membranes diélectriques	28
2.2.3 Membrane Silicium	29
2.2.4 Membranes métalliques	30
2.3 Assemblage hétérogène 3D	32
2.3.1 Introduction	32
2.3.2 Packaging collectif pour capteur pression	34
2.3.3 Packaging pour micro-commutateurs RF	36
3 PROPRIETES DES MATERIAUX	40
3.1 Propriétés mécaniques	40
3.1.1 Introduction	40
3.1.2 Banc de gonflement de membrane	41
3.1.3 Résultats obtenus	43
3.2 Contact métal-métal	44
3.2.1 Introduction	44
3.2.2 Méthodologie de modélisation	46
3.2.3 Méthodologie de caractérisation	49
3.3 Propriétés électriques	52
3.3.1 Chargement des diélectriques	52
3.3.2 Dérive thermique de la mobilité électrique dans les résistances en silicium	60
CAPTEURS SANS FIL PASSIFS A TRANSDUCTION ELECTROMAGNETIQUE	61
1 INTRODUCTION	63
1.1 Capteurs sans fil	63
1.2 Capteur actif / passif	63
1.3 Capteur passif à ondes acoustiques	65
1.4 Comparaison des différents types de capteurs sans fil	68
2 CAPTEURS SANS FIL PASSIFS A TRANSDUCTION ELECTROMAGNETIQUE	71
2.1 Introduction	71
2.2 Revue bibliographique	72
2.3 Bilan des travaux réalisés	76
2.3.1 Introduction	76
2.3.2 Capteur de pression	77
2.3.3 Capteur de contrainte	80
2.3.4 Capteur de température à MEMS	82
2.3.5 Capteur de température fluide	84
2.3.6 Interrogation des capteurs	85
2.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	91

INTRODUCTION

C'est en 1951 que John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain de AT&T présentent au monde leur découverte du premier transistor, invention pour laquelle ils reçurent le prix Nobel de physique en 1956. Depuis, les progrès technologiques permanents de la micro-électronique ont permis, de fabriquer des circuits électroniques toujours plus performants et miniatures à des coûts toujours plus faibles.

En parallèle les technologies collectives de la microélectronique se sont diversifiées et complexifiées pour diffuser dans d'autres domaines d'application. Un des premiers domaines concerne les capteurs de pression au silicium, dont les travaux de recherche ont débuté à partir des années 1960 et qui ont progressivement diffusés dans le marché grand public à partir du milieu des années 1970. Les développements de la micromécanique ont été motivés par le fait que les matériaux de la micro-électronique comme le silicium et le polysilicium possédaient des propriétés mécaniques intéressantes pour les applications visées. Il faudra attendre la fin des années 1980 pour assister à l'essor véritable de ces nouvelles technologies qui ont diffusé aujourd'hui dans de très nombreux domaines d'application (mécanique, optique, chimique, biologique, électronique,) et font appel à des matériaux très variés (silicium et ses dérivés mais également métaux, matériaux piézoélectriques, polymères, etc.....). Le domaine des MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) qui correspond en Europe aux Microsystèmes couvre encore aujourd'hui un large champ de recherche qui va du développement des technologies aux applications industrielles.

Mes recherches se placent dans ce cadre général du développement de nouveaux microsystèmes pour différentes applications. Le cheminement scientifique général que j'essaye d'appliquer à l'ensemble de mes activités peut être décrit par quatre phases dont la durée varie en fonction des thèmes, des moyens mis en œuvre (humains, technologiques, financiers) et de l'environnement (scientifique, politique, ..) :

- Validation de nouveaux concepts
- Optimisation des dispositifs en rapport avec un cahier des charges
- Etude de fiabilité
- Transfert industriel

Les trois premières phases mettent en œuvre des cycles de travaux que l'on peut classer en trois catégories :

- Conception/Simulation des dispositifs
- Fabrication des dispositifs

- Caractérisation des dispositifs et Modélisation.

Pour chaque phase, un nombre plus ou moins important de cycles est alors nécessaire afin d'arriver à une modélisation acceptable du dispositif qui correspond à une compréhension correcte de son fonctionnement.

Deux remarques principales apparaissent à la lumière de ce cheminement :

- Les recherches peuvent conduire à mener des travaux de plusieurs types (conception, technologie, caractérisation) et qui peuvent correspondre à plusieurs niveaux d'intégration (matériau, composant, système). Ces recherches sont donc par définition pluridisciplinaires et nécessitent de mettre en place des collaborations denses afin de s'entourer des meilleurs spécialistes de chaque domaine.
- Un thème scientifique possède à priori un début (nouveaux concepts) et une fin (transfert industriel). Il est donc primordial de lancer régulièrement de nouvelles thématiques avant la fin de la phase de transfert industriel car cela permet non seulement de profiter des opportunités qui se présentent mais également de pouvoir les financer en partie grâce aux rentrées financières industrielles.

C'est cette démarche qui m'a amené progressivement à travailler sur trois thématiques scientifiques : les capteurs de pression qui sont dans la phase de transfert industriel, les MEMS RF qui se trouvent dans la phase d'étude de fiabilité et les capteurs sans fil passifs à transduction électromagnétique qui restent encore en grande partie dans la phase de validation des concepts.

Maître es Physique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, j'ai intégré le Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes (LAAS) du CNRS en 1986, dans l'équipe "Génie des Capteurs Mécatroniques", en qualité de stagiaire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies d'Electronique. Au cours de ce stage j'ai réalisé et caractérisé les premiers capteurs de pression piézorésistifs à membrane de silicium du laboratoire.

Mes travaux de doctorat ont ensuite porté sur l'étude du comportement dynamique des plaques minces de silicium et leurs applications aux capteurs de pression, thèse qui a été soutenue en Mai 1990. En parallèle à mes travaux spécifiques de thèse j'ai amélioré et développé la filière technologique Silicium / Verre mise en place au début des années 1980.

En 1991 j'ai été admis, en qualité de Chargé de Recherches au CNRS, au LAAS dans le groupe "Microstructures et Microsystèmes Intégrés" (M2I). Les activités de ce groupe ont fortement

participé à l'émergence d'une communauté scientifique sur les micro-technologies et les microsystèmes.

J'ai participé à ce titre au développement des différentes filières technologiques pour les capteurs de pression au silicium. Tous ces travaux m'ont permis développer, jusqu'en 2000, des démonstrateurs de capteurs de pression aussi bien piézorésistifs que capacitifs et de valoriser ainsi ces acquis sur des applications en relation avec le milieu industriel.

Depuis cette date je suis responsable de la thématique scientifique sur les capteurs de pression au LAAS. Les deux applications qui font l'objet de travaux depuis le milieu des années 2000 concernent un capteur de pression intracrânienne et un packaging collectif pour des capteurs de pression aéronautiques haute température. Ces travaux sont effectués actuellement au sein du groupe « Microdispositifs et Microsystèmes de Détection » (M2D), dirigé depuis 2004 par Pierre Temple.

Afin de participer à la diffusion des micro-technologies dans de nouveaux domaines qui permettent de développer les collaborations multidisciplinaires et compte tenu de l'émergence des applications de télécommunication grand public, nous avons lancé en Novembre 1995, avec Robert Plana, un programme de recherches qui visait l'étude de microsystèmes micro-ondes. Nous avons été le premier laboratoire en France à nous engager dans ce nouvel axe de Recherches. En 1998, j'ai pris la responsabilité scientifique de cet axe au sein du nouveau groupe de Recherche « Technologie-Micro et Nanostructures » qui avait en charge le développement technologique.

Depuis 1999, cette activité sur les microsystèmes pour application hyperfréquence a connu un fort développement qui s'est concrétisé au niveau Toulousain par la création en 1999 du GREMO (Groupement de Recherche en Micro-onde), puis par l'entrée au LAAS de nouveaux permanents ainsi que d'un nombre conséquent de doctorants dans cette thématique. Cette activité s'est formalisée en 2006, par la création d'un nouveau groupe de Recherche au LAAS-CNRS sur les « Micro et Nanosystèmes pour les Communications sans fils » (MINC) dirigé par Robert Plana. Dans ce cadre je suis Responsable du développement des nouveaux matériaux et filières technologiques. Je continue par ailleurs à développer de nouveaux microsystèmes pour ces applications avec un objectif de performance et de fiabilité.

En parallèle, j'ai démarré en Février 2005 un nouvel axe de recherche qui couple mes activités sur les capteurs et sur les microsystèmes haute fréquence. Aujourd'hui j'assume la responsabilité scientifique de cet axe de Recherche en collaboration étroite avec Hervé Aubert, spécialiste en électromagnétisme. Ces travaux, qui portent sur le développement de nouveaux modes de transductions et qui utilisent des fonctions hautes fréquence, permettront d'obtenir des capteurs sans

films complètement passifs qui ne nécessitent aucune énergie embarquée. Ces travaux, à cheval sur les groupes M2D et MINC, s'inscrivent dans la demande croissante de réseaux de capteurs autonomes communicants sans fils.

La majorité de ces travaux s'inscrivent dans deux axes prioritaires du laboratoire :

- Micro-Nano-Systèmes pour les systèmes distribués
- Micro-Nano-Systèmes pour la biologie et les applications médicales

Ce mémoire est divisé en deux grandes parties. La première partie fait le bilan des travaux démarrés depuis longtemps sur les capteurs de pression et les MEMS RF. La seconde partie traite des capteurs passifs à transduction électromagnétique qui représente l'axe de recherche privilégié pour le long terme.

CAPTEURS DE PRESSION ET MEMS RF

1 DEVELOPEMENT DE MICROSYSTEMES

1.1 INTRODUCTION

La recherche en microsystèmes est par nature pluridisciplinaire et nécessite donc des travaux dans des domaines variés aussi bien du point technologique, que du point de vue de la caractérisation ou de la modélisation/simulation. Cette recherche ne peut donc se concevoir que de manière collaborative avec de nombreux partenaires au sein du laboratoire mais également avec d'autres laboratoires extérieurs plus spécialisés.

Les deux applications pour lesquelles je mène des travaux concernent les capteurs de pression et les microsystèmes RF à base de micro-commutateurs. Dans les deux cas il s'agit de répondre à des problématiques de conception de composants innovants avec un soucis de performance et de fiabilité et dans une optique à plus ou moins long terme de transfert industriel. Ce premier chapitre expose les travaux réalisés sur ces recherches applicatives mais les deux chapitres suivants traitent de travaux plus amont sur les matériaux et procédés technologiques qui sont nécessaires à l'étude de ces microsystèmes.

1.2 CAPTEURS DE PRESSION

1.2.1 Introduction

Les capteurs de pression ont été un des premiers champs d'application des microsystèmes. Ils représentent encore aujourd'hui une part très importante de ce marché suite à la demande croissante qui se manifeste dans les domaines grand public de l'automobile et des applications domestiques, mais aussi dans ceux professionnels de la production, de l'aéronautique et de la santé. Les caractéristiques principales demandées aujourd'hui à ces composants sont le plus souvent d'être miniatures, performants, économiques et intégrables dans des systèmes électroniques complexes.

Les travaux au LAAS dans cette thématique ont démarré en 1981 et ont portés sur la filière silicium-verre pour le développement de capteur à transduction capacitive.

Lors de mon stage de DEA au LAAS en 1986, j'ai réalisé et caractérisé les premiers capteurs de pression à transduction piézorésistive et à membrane de silicium du laboratoire.

Mes travaux de doctorat ont ensuite porté d'une part sur l'optimisation de la filière silicium/verre pour le développement des capteurs à transduction capacitive et d'autre part sur l'étude du comportement dynamique des plaques minces de silicium appliquée aux capteurs de pression à

transduction piézorésistive et capacitive. J'ai notamment caractérisé et modélisé les différents modes propres de vibration à l'aide d'une structure capacitive.

Les différents savoir faire acquis ont permis de développer des capteurs de pression pour différentes applications industrielles qui sont précisées dans ce qui suit.

1.2.2 Capteur de pression pour l'automobile

Dans le cadre du programme Européen Eureka/Prometheus/Prochip (1989-1994), nous avons étudié la faisabilité technologique d'un capteur intégré de pression et de température faible coût pour des applications automobiles. Ces travaux ont en partie été concrétisés par la soutenance de la thèse de Philippe Ménini en Février 1998.

Le capteur que nous avons conçu est constitué de deux modules intégrés. Le premier comprend une sonde résistive de température et une sonde capacitive de pression réalisés par la filière Silicium/Verre. Le second module est un circuit intégré qui lit l'état des sondes et délivre une réponse numérique ou électrique.

Le thermomètre est une résistance obtenue par dépôt métallique de Nickel de 300 nm sur un substrat de verre. La sonde de pression est en fait constituée par deux capacités dont l'armature commune est la membrane de silicium. Deux armatures métalliques centrales et périphériques constituent avec le silicium les deux capacités : la première pour la mesure, la seconde servant de référence. Cette référence permet notamment de minimiser la non linéarité du capteur ainsi que ces dérives thermiques.

Deux types de circuit ont été étudiés. Le premier est de type ratiométrique (basé sur le principe de la charge et la décharge de la capacité à courant constant) et de technologie BICMOS. Il a été conçu par l'IXL de l'Université de Bordeaux et fondu par SGS Thomson. Le second est de type différentiel à capacités commutées et de technologie CMOS. Il a été conçu par Ht Mikroelektronik et fondu par l'IMS de Stuttgart.

Les caractérisations de ces démonstrateurs ont montré la validité des concepts de mesure mis en œuvre, ainsi que la faisabilité de capteurs faibles coûts et performants fonctionnant sans compensation dans une gamme de température étendue.

1.2.3 Capteur de pression haute température pour l'aéronautique

Dans le cadre d'un contrat avec la société AUXITROL (1996-1999), nous avons étudié la faisabilité d'un capteur de pression haute température pour application aéronautique. Nous avons pour cela développé un capteur de pression de type piézorésistif sur substrat SOI. Les jauges sont ainsi obtenues par usinage ionique d'une fine couche de silicium monocristallin isolé du substrat par une couche d'oxyde. Ceci permet d'obtenir de forts coefficients de piézorésistivité et une bonne isolation électrique à haute température.

Les cellules ont été testées entre 20 et 350 °C et entre 0 et 30 bars. L'offset obtenu est inférieur à 1 mV/V avec une dérive thermique de l'ordre de 1 $\mu\text{V}/\text{V}/^\circ\text{C}$. La sensibilité à la pression est proche de 2 mV/V/bar avec une dérive thermique de -1200 ppm /°C. La non linéarité de la réponse est inférieure à 0.5%.

Le procédé technologique a ensuite été transféré à la société AUXITROL-ESTERLINE qui commercialise aujourd'hui ce type de capteur sur substrat SOI.

1.2.4 Capteur de pression intracrânienne

1.2.4.1 Introduction

Ce projet a démarré fin 1998 avec la société Toulousaine NEWMEDIC International qui était spécialisée dans l'application des hautes technologies au domaine médical et, plus particulièrement, aux neurosciences. Le capteur est basé sur des jauges en silicium implantées dans une membrane de silicium.

Les travaux sur ce projet ont été stoppés entre début 2002 et fin 2004 à cause des difficultés de la société pour continuer cette activité. Fin 2004, l'activité "Capteur de pression" a été rachetée par la société Toulousaine HEMODIA. Depuis 2006 de nouveaux travaux ont été engagés avec cette société pour finaliser le développement de ce capteur de pression intracrânienne. Ceci s'est concrétisé par le démarrage en Janvier 2007 d'un nouveau projet (CAPTAM, 2007-2010) financé par l'ANR-TECSAN. Ce projet prévoyait :

- La miniaturisation du capteur pour limiter le traumatisme lié à l'implantation du capteur. Pour cela il est nécessaire de réaliser des membranes en silicium de faible épaisseur (quelques microns), c'est pourquoi des substrats de SOI ont été choisis.
- La réalisation d'une fonction d'auto-étalonnage in situ pour minimiser les dérives du capteur. Cette fonction est réalisée par l'intégration d'un générateur de pression électrostatique avec le capteur de pression. Pour cela il est nécessaire de réaliser une contre-électrode très proche de la

membrane en silicium. Une nouvelle filière technologique a été développée pour cela (cf. 2.2.3).

- L'intégration d'un capteur de température pour une compensation des dérives thermiques.
- Le packaging de la cellule sensible dans une capsule biocompatible
- Une liaison sans fil pour un meilleur confort du patient et du personnel. Les circuits électroniques seront déportés à l'extérieur de la capsule. Ces études ont été réalisées par l'UPJV à Amiens.

Ce nouveau projet fait l'objet d'une thèse CIFRE (Pierre YAMEOGO, soutenance prévue début 2012) avec la société CAPTOMED-HEMODIA. Deux thèses en cotutelle avec l'Université de Lodz (Pologne) ont également été soutenues en Juillet 2009 sur ce projet par Cesary MAJ et Michal OLSZACKI dans le cadre d'un Programme de Coopération International du CNRS (CAPTAB). Un brevet international a également été déposé sur ce principe d'auto-calibration in situ.

1.2.4.2 Développement outil de simulation analytique

Les simulations numériques sont relativement longues à réaliser pour l'optimisation des cellules à cause d'un nombre de paramètres d'entrée importants (Profil de dopage des jauges en profondeur, dimensions et localisation des jauges, dimensions de la membrane, profondeur de la cavité, forme de l'électrode d'actionnement) et également d'un nombre de fonctions de sortie élevées (Valeur des jauges et leur dérive thermique, Offset et sa dérive thermique, sensibilité à la pression et sa dérive thermique, pression électrostatique générée). C'est pourquoi nous avons entrepris l'élaboration d'un modèle analytique le plus complet possible qui permette de prendre en compte l'ensemble de ces paramètres. Ce modèle analytique a été implémenté sous Matlab et permet également de réaliser facilement des boucles d'optimisation ainsi que des analyses statistiques.

Des structures de tests en technologie SOI ont été réalisées et ont montré un très bon accord entre les modèles analytiques et les caractérisations pour la sensibilité à la pression du capteur de pression et pour la sensibilité à la tension du générateur de pression électrostatique. Par contre la dérive thermique mesurée sur les jauges de contraintes est très différente de celle obtenue par les modèles. Cette différence a été attribuée au modèle de dérive thermique de la mobilité électrique issu de la littérature qui a été utilisé et qui n'est pas fiable. Afin d'obtenir des données plus représentatives de la réalité nous avons entrepris des travaux plus fondamentaux sur la dérive thermique de la mobilité (cf. 3.3.2).

1.2.4.3 Conception de la sonde de pression et du générateur de pression électrostatique

A partir des spécifications du capteur :

- Diamètre extérieur du cathéter < 1.13mm
- Gamme de pression : -40mmHg à + 100mmHg
- Sensibilité du capteur de pression > 10 μ V/V/mmHg
- Résistance des jauges > 1k Ω
- Sensibilité du générateur de pression > 50mmHg pour 6V

et en tenant compte des contraintes technologiques, les simulations utilisant l'outil analytique développé ont mené à un premier dimensionnement des différentes parties de la cellule sensible :

- Une taille de puce de 700 μ m x 2000 μ m.
- Une épaisseur de membrane de 5 μ m.
- Une dimension de membrane de 300 μ m x 300 μ m ou 300 μ m x 900 μ m.
- Des jauges de 4 μ m (largeur) x 50 μ m (longueur) x 0.5 μ m (profondeur) montées en pont de Wheastone. Pour les membranes carrées, les jauges sont situées au bord de la membrane et pour les membranes rectangulaires elles sont placées au centre.
- Un dopage des jauges en surface de 10¹⁹at/cm³. Les jauges de type P sont isolées de la membrane de type N par jonction polarisée en inverse.
- Une distance interélectrode comprise entre 0.3 μ m et 1.8 μ m en fonction du type de capteur (absolu ou différentiel) et du type de membrane (carrée ou recatngulaire). Compte tenu de la phase de développement de la filière technologique, la contrainte sur cette dimension a été relachée et la distance interélectrode a été relachée à 2 μ m.

La fabrication de structures de tests intermédiaires (capteur de pression et générateur de pression séparés) a permis de valider en grande partie les conceptions.

1.2.4.4 Fabrication et caractérisation du capteur

Le capteur prend la forme d'un cathéter d'une vingtaine de centimètre de long pour un diamètre légèrement supérieur au millimètre au bout duquel est connecté une capsule qui supporte la cellule sensible. Le rôle de cette sonde est de placer la cellule sensible dans son environnement de mesure en réalisant les contacts électriques pour les différents capteurs et l'actionneur tout en respectant scrupuleusement les exigences de biocompatibilité. Elle sera implantée au travers du cuir chevelu, de la galéa aponévrotique, de l'os du crane et des méninges pour atteindre le parenchyme cérébral.

Cette sonde de mesure est donc constituée des éléments principaux suivants :

- La cellule sensible en silicium comprenant la sonde de pression, l'actionneur électrostatique et la sonde de température (résistance de platine).
- La capsule en polymère biocompatible dans laquelle vient se loger la cellule sensible. L'assemblage et l'étanchéité sont assurées par un cordon de colle silicone biocompatible.
- L'interconnexion électrique à l'intérieur du cathéter qui permet de connecter la cellule sensible avec le circuit électronique à l'extérieur du crane. Cette interconnexion est assurée par un substrat flexible en Kapton de 50 μm d'épaisseur sur lequel a été déposé 8 lignes métalliques (4 par face) de cuivre de 12 μm d'épaisseur et de 70 μm de large. La liaison électrique entre la cellule sensible et les pistes métalliques est obtenue par flip chip pour la face inférieure du Kapton et par soudure classique de fils pour la face supérieure.
- Le connecteur électrique qui permet de relier les interconnexion sur Kapton avec la carte électronique. Ce connecteur est réalisé sur PCB et les interconnexions sont obtenues par soudure classique de fils.

Les tests in vitro présentent les caractéristiques suivantes :

- Une réponse en pression linéaire avec une forte sensibilité (voisine de 37 $\mu\text{V/V/mmHg}$).
- Une faible dérive en température du capteur de pression (<0.02mmHg/ $^{\circ}\text{C}$) après compensation analogique grâce au capteur de température intégré.
- Une bonne réponse du capteur de température avec une résolution meilleure que 0.1 $^{\circ}\text{C}$.
- Une pression électrostatique générée pour le moment insuffisante (1.2mmHg pour 6V). Ceci est lié à la distance inter-électrode de 2 μm qui est trop grande et qui doit être ramenée à 0.5 μm dans les dispositifs finaux.

Des premiers tests in vivo ont également été réalisés sur la brebis en comparant un capteur du commerce avec le capteur développé (incluant le système de communication sans fil). Une excellente corrélation a été trouvée entre les 2 capteurs.

En conclusion, les résultats obtenus sont encourageants et montrent que les choix réalisés sont pertinents. Des tests plus approfondis (in vitro puis in vivo) sont en cours chez HEMODIA pour évaluer plus précisément et plus statistiquement les performances de ces capteurs. Un fondeur est également recherché par HEMODIA pour obtenir des cellules sensibles optimisées et plus représentatives.

1.3 MICROSYSTEMES POUR APPLICATION HAUTE FREQUENCE

1.3.1 Introduction

Les circuits passifs (capacités, inductances, filtres, ...) millimétriques sont classiquement réalisés par des techniques conventionnelles sur des substrats à faibles pertes diélectriques (Alumine, ..). En 1991, l'équipe du Dr. L. KATEHI de l'Université du Michigan, a pour la première fois montrée toutes les potentialités des micro-technologies pour ce type de composants : l'intégration potentielle de circuits actifs par l'utilisation de substrats de silicium et la possibilité de réaliser des fonctions accordables grâce aux MEMS.

Les travaux sur ce type de dispositifs ont démarré au laboratoire fin 1995 et ont tout d'abord porté sur le développement d'une filière permettant de réaliser des circuits métalliques épais suspendus sur une membrane diélectrique pour minimiser les pertes introduites par le substrat de silicium.

Puis une nouvelle brique a été développée à partir de la fin de l'année 2000, pour rendre accordable ces circuits en ajoutant une microstructure mobile métallique actionnable électro-statiquement. La réalisation d'un court-cuit local entre la ligne du signal et la masse permet ainsi de modifier les propriétés RF du circuit utilisé.

Enfin, à partir de début 2008, nous avons également exploré les potentialités de la micro-fluidique pour réaliser des circuits passifs accordables.

1.3.2 Circuits métalliques à faible pertes

La minimisation des pertes résistives passe par l'utilisation de métaux à faible résistivité et avec des épaisseurs supérieures à 3 fois l'épaisseur de peau. Les circuits métalliques de $2.5\mu\text{m}$ d'épaisseur sont obtenus par dépôt électrolytiques d'or dans des moules de résine. Cette technique permet d'obtenir un très bon contrôle dimensionnel des pistes métalliques avec des flancs droits, ce qui présente l'avantage de pouvoir contrôler précisément les couplages électromagnétiques.

Le substrat privilégié au début des travaux pour supporter les circuits métalliques a été le silicium car il est compatible avec une intégration monolithique des circuits actifs. Il est par ailleurs parfaitement compatible avec les micro-technologies. Le principal défaut de ce type de substrat concerne ses pertes diélectriques qui sont trop grandes avec une résistivité standard. Les différentes solutions pour minimiser ces pertes portent sur :

- L'utilisation d'un substrat de silicium haute résistivité ($> 3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$). Dans ce cas il faudra minimiser les charges à l'interface Si/SiO₂ qui diminuent drastiquement la résistivité à la

surface du silicium. Cette solution bien que séduisante pour des circuits passifs, n'est cependant pas compatible avec l'intégration monolithique de circuits actifs.

- L'usinage du substrat de silicium : localement dans les zones où le champ électromagnétique est le plus grand ou bien totalement sous l'ensemble du circuit. Dans ce cas une fine membrane diélectrique permet de supporter les circuits métalliques.
- L'insertion d'une couche diélectrique épaisse entre le substrat et les circuits métalliques.
- Le remplacement du substrat de silicium par un substrat diélectrique à faible perte. Cette solution, bien que ne permettant pas une intégration monolithique de circuits actifs, est compatible avec un certain nombre d'applications (par exemple les réseaux réflecteurs). Elle autorise également l'intégration hybride de circuits actifs grâce aux techniques d'assemblage (flip-chip par exemple) qui ont été validées depuis quelques années pour les fréquences millimétriques.

La première filière technologique, développée à partir de 1996, concerne les circuits suspendus sur membranes diélectriques de quelques microns d'épaisseur (cf. 2.2.2). Les pertes obtenues sont alors très faibles (principalement métalliques) et voisines de 0.6dB/cm à 30GHz. Ces circuits, avec des membranes de 1.5mm de côté, ont subi avec succès les différents tests généralement utilisés pour la qualification spatiale des composants. Cette filière a permis la réalisation d'un très grand nombre de démonstrateurs (filtres, antennes) dans le cadre de projets notamment collaboratifs.

L'utilisation de couches diélectriques intermédiaires de forte épaisseur entre le substrat de silicium et les circuits métalliques a démarré en 2000. Le matériau choisi est le BCB (BenzoCycloButène) car il possède de nombreux avantages : très faibles pertes diélectriques, dépôt par centrifugation, obtention de couches de 10µm à 20µm d'épaisseur, photosensible. Les pertes obtenues sont de l'ordre de 1dB/cm à 2dB/cm à 30GHz en fonction de l'épaisseur du BCB.

Afin de simplifier la filière technologique, nous avons développé à partir de 2008 une filière à partir de substrats en silice fondue. Bien que présentant un coût d'achat plus élevé, ces substrats présentent l'avantage de posséder intrinsèquement de très faibles pertes diélectriques et sont disponibles sous formes de plaquettes compatibles avec les procédés de micro-technologies. Les pertes obtenues sont de l'ordre de 1.2dB/cm à 30GHz.

De nombreux démonstrateurs ont été réalisés depuis avec cette filière technologique aussi bien pour des recherches propres au laboratoire que pour projets collaboratifs avec des laboratoires partenaires. On peut citer notamment :

- Des antennes dans le cadre d'un projet Européen IST (ARTEMIS)
- Des filtres et antennes faibles pertes dans le cadre d'un Réseau d'Excellence (AMICOM), d'un projet ERANET-MNT (MEMIS)
- Des membranes diélectriques pour bolomètre dans un projet ESA (HEB)

1.3.3 Micro-commutateurs RF à MEMS

1.3.3.1 Introduction

Les micro-commutateurs RF à base de MEMS sont un des composants les plus étudiés de ces dix dernières années car ils présentent de grandes potentialités par rapport aux autres types d'interrupteurs tels que les diodes (très grande linéarité, faible consommation, faibles pertes). Malgré les nombreux développements réalisés depuis plus de dix ans dans le monde, ces nouveaux micro-commutateurs à base de MEMS ont du mal à franchir le cap de l'industrialisation. En effet, comparativement aux autres types de micro-commutateurs, ceux à base de MEMS souffrent encore aujourd'hui de problèmes de fiabilité plus ou moins prononcés en fonction de la technologie choisie ou du type d'interrupteur développé.

Il existe différents niveaux de fiabilité quand on parle d'un composant. Le premier niveau, généralement appelé rendement de fabrication, correspond à la reproductibilité des performances du composant lors de sa fabrication. Le second niveau concerne la reproductibilité des performances du composant tout au long de son utilisation et est caractérisé par la durée de vie du composant pour une application donnée.

La particularité des micro-commutateurs à base de MEMS est liée au caractère multi-physique du composant qui combine des propriétés mécaniques et électriques ce qui complexifie la maîtrise de la fiabilité.

1.3.3.2 Paramètres de fiabilité

Le principe d'un commutateur est basé sur deux états de fonctionnement :

- Un état passant qui consiste à laisser passer un signal électrique avec un affaiblissement minimal (faibles pertes).
- Un état bloqué dans lequel le signal électrique doit être arrêté avec une efficacité maximale (grande isolation).

La fonction d'interrupteur peut être obtenue suivant deux types de configuration électriques :

- Une configuration série dans laquelle l'interrupteur est inséré en série dans la ligne du signal et permet d'ouvrir ou fermer cette ligne.
- Une configuration parallèle dans laquelle l'interrupteur est inséré entre la ligne de signal et le plan de masse et permet de court-circuiter ou non le signal.

Il existe deux types de courts circuits dans le domaine haute fréquence :

- Un court-circuit capacitif direct qui est obtenu en intercalant un diélectrique entre la ligne métallique RF et la structure mobile métallique. Cette configuration est généralement utilisée pour les hautes fréquences ($> 10\text{GHz}$) car l'impédance capacitive diminue avec l'augmentation de la fréquence. L'avantage principal de cette configuration concerne la faible valeur de la résistance de court-circuit qui est uniquement fonction du design de la microstructure. L'inconvénient majeur de type de court-circuit est lié à la maîtrise de la capacité de court-circuit qui dépend de nombreux facteurs (forme de la microstructure, rugosités des matériaux en contact). Cet inconvénient peut être supprimé en élaborant une capacité MIM (métal/isolant /métal) directement sur la ligne RF et en réalisant un contact métal /métal avec la structure mobile métallique. On parlera alors d'un contact capacitif indirect. Mais cette nouvelle configuration génère de nouveaux inconvénients lié au contact métal/métal et qui sont décrits ci-dessous.
- Un court circuit résistif qui est obtenu par le contact direct de la ligne métallique RF et la structure mobile métallique. Ce type de court circuit est généralement utilisé pour les fréquences plus faibles ($<10\text{Ghz}$) car la résistance de contact augmente avec la fréquence. Il introduit tout d'abord une résistance de contact en série avec la résistance électrique de la microstructure surtout si les forces de contact sont faibles, ce qui est généralement le cas avec les modes et les tensions d'actionnement utilisées. En fonction de la configuration électrique choisie (série ou parallèle) cette augmentation de la résistance engendre soit une augmentation des pertes soit une dégradation de l'isolation. Un inconvénient majeur de ce type de court-circuit concerne notamment la fiabilité du contact métal/métal : sensibilité à la pollution de surface, points chauds localisés (surtout aux fortes puissances) générant un transport de matière (dégradant la résistance de contact) voire un collage lors du cyclage.

Les performances des commutateurs à MEMS sont fortement liées aux conditions environnementales dans lesquelles la microstructure évolue. En effet, qu'il s'agisse des capacités parasites, des capacités de court-circuit ou des résistances métal/métal, ces fonctions électriques dépendent notamment de l'humidité présente autour de la microstructure. Il est donc nécessaire de réaliser une encapsulation du composant sous vide ou sous atmosphère contrôlée pour éviter ces

problèmes. L'encapsulation des microsystèmes en général et des micro-commutateurs RF en particulier est un sujet qui a donné lieu à d'intenses travaux dans le monde entier depuis les années 2000 car elle conditionne fortement la diffusion de ces technologies dans le monde industriel.

L'actionnement du commutateur pour le faire changer d'état (état bloqué/état passant) est réalisé dans la majorité des cas de manière électrique à l'aide d'une source de courant ou plus souvent d'une source de tension. Le paramètre important concerne ici la consommation électrique qui est obtenue lors de la commutation de l'interrupteur et qui doit être la plus faible possible notamment dans le cas d'applications mobiles. Pour ces applications, la minimisation de la tension nécessaire à l'actionnement de l'interrupteur est également importante car elle permet de limiter les circuits électroniques nécessaires à l'amplification de la tension de commande. En effet ces applications mobiles sont généralement alimentées par des batteries à faible tension (3V).

Il existe différents type d'actionnement qui présentent chacun avantages et inconvénients :

- L'actionnement électrostatique qui est le plus ancien car il présente l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre. Il nécessite uniquement la réalisation d'une contre électrode pour appliquer une différence de potentiel entre cette électrode et la microstructure mobile. Un autre avantage de ce type d'actionnement concerne la force relativement importante appliquée sur la microstructure lorsque le contact est réalisé. La faiblesse de ce type d'actionnement est par contre liée au niveau de tension généralement nécessaire pour actionner la microstructure dans de bonnes conditions et qui est incompatible avec les applications portables. Mais l'inconvénient majeur, qui a fortement ralenti l'industrialisation de ces dispositifs, concerne le chargement des diélectriques qui sont soumis à de forts champs électriques. Ces charges stockées génèrent un champ électrique résiduel qui vient s'opposer au champ créé par la tension de commande. On assiste à terme au collage de la microstructure sur le diélectrique.
- L'actionnement thermique permet d'obtenir un déplacement important de la microstructure pour de faibles tensions de commande mais présente le double inconvénient d'une consommation élevée et d'un temps de réponse particulièrement élevé.
- L'actionnement magnétique permet d'obtenir de grands déplacements de la microstructure avec des forces importantes sous des tensions modérées. Mais le principal inconvénient de l'actionnement magnétique concerne sa complexité de mise en œuvre au niveau technologique ce qui entraîne des coûts de fabrication assez élevés.
- L'actionnement piézoélectrique est celui qui a suscité le plus de travaux depuis les années 2005 pour le développement de matériaux piézo-électriques en couches minces de bonne qualité. Ce type d'actionnement permet d'obtenir également de grands déplacements de la microstructure avec de faibles tensions de commande. La force de contact obtenue est relativement modérée

mais elle peut être augmentée en couplant cet actionnement avec un actionnement électrostatique. L'inconvénient majeur concerne la complexification du procédé technologique qui nécessite la réalisation de nombreuses couches supplémentaires sur la microstructure. Celles-ci entraînent souvent une déformation parasite de la microstructure à causes des contraintes mécaniques présentes dans ces couches qui sont difficiles à contrôler.

Le phénomène de chargement des diélectriques lors de l'actionnement électrostatique est particulièrement étudié car ce type d'actionnement est le plus simple à mettre en œuvre. Ce chargement est d'autant plus important que la tension de commande est élevée, que le diélectrique est de faible épaisseur et que le contact est intime entre le pont et le diélectrique. Différentes solutions existent pour minimiser le chargement du diélectrique :

- Ajouter des électrodes d'actionnement séparées qui ne viennent pas en contact avec le diélectrique,
- Diminuer la tension d'actionnement,
- Modifier la forme de la commande pour compenser le chargement (charges positives et négatives),
- Minimiser la capacité de chargement du diélectrique.

La première solution n'est pas applicable dans tous cas puisqu'il faut pouvoir rajouter des électrodes supplémentaires. Il est par ailleurs souvent nécessaire d'appliquer également une polarisation au niveau de la partie active de la capacité afin de garantir un bon contact. La seconde solution est également explorée pour d'autres raisons (systèmes portables). La troisième solution permet de diminuer le chargement mais doit être finement compensée car les phénomènes sous polarisations positives et négatives ne sont pas symétriques. La minimisation de la capacité de chargement des diélectriques fait l'objet de travaux spécifiques au LAAS et sont présentés dans le chapitre 3.3 dédié aux propriétés des matériaux.

1.3.3.3 Micro-commutateurs à contact capacitif et à actionnement électrostatique

Les travaux sur les micro-commutateurs à MEMS ont démarré au LAAS en 1999 par l'étude d'interrupteurs à court-circuit capacitif en configuration parallèle. La filière technologique qui a été choisie est basée sur la réalisation de ponts métalliques en or actionnables électro-statiquement. L'optimisation des différents paramètres technologiques et de conception ont permis d'obtenir des composants possédant une tension d'actionnement d'une quinzaine de Volts.

Le contact capacitif permet de réaliser une capacité de court-circuit qui doit être adaptée à la fréquence de travail souhaitée. En effet cette valeur de capacité, lorsque le pont est à l'état bas, fixe

la fréquence pour laquelle l'isolation du micro-commutateur est maximale. Une erreur sur cette valeur de capacité entraîne un décalage de la fréquence de résonance du circuit ainsi réalisé et dégrade donc l'isolation. Des travaux importants ont été entrepris depuis 2004 pour mieux comprendre l'origine de cette non reproductibilité de la valeur de la capacité à l'état bas. Ils ont montré qu'une couche d'air de 10nm entre le pont métallique et le diélectrique suffisait pour réduire la valeur de la capacité de 30% dans le cas d'un diélectrique de permittivité relative proche de 6. Trois facteurs conditionnent la valeur de cette capacité :

- Le contact parasite d'une partie du pont avec la ligne coplanaire. Dans le procédé de fabrication classique, la couche sacrificielle qui supporte le pont présente un relief qui suit les discontinuités générées par les lignes RF. Ce profil initial est donc reporté sur celui du pont ce qui induit un contact parasite du pont avec les bords de la ligne coplanaire avant le contact de la partie active du pont.
- La rugosité moyenne des surfaces en contact. Le contact est réalisé entre le pont métallique en or et le diélectrique. En première approximation la rugosité du dessous du pont peut être négligée car elle correspond à la rugosité de la résine sacrificielle. La rugosité du diélectrique est par contre directement liée à la rugosité de la ligne coplanaire car le dépôt du diélectrique peut être considéré comme conforme. Les lignes coplanaires étant souvent obtenues par dépôt électrolytique pour réaliser des lignes épaisses (minimisation des pertes), il convient de minimiser cette rugosité.
- La présence de pics sous le pont. La rugosité moyenne d'une surface ne donne qu'une information générale sur la qualité de la surface. La présence de pics nettement plus hauts que cette rugosité moyenne peut bloquer le pont à des distances suffisantes pour dégrader la valeur de la capacité. Une étude statistique de la probabilité de présence de pics de hauteur donnée est donc nécessaire.

L'ensemble des améliorations technologiques réalisées ont permis de ramener le ratio (Capacité théorique / Capacité réelle) d'un facteur quatre à un facteur deux. Ces travaux sont consignés notamment dans la thèse de Frédéric Flourens soutenue en Juillet 2006. Suite au déménagement dans la nouvelle centrale de technologie en 2006 et au changement d'un certain nombre d'équipements, il a été nécessaire de reprendre entièrement le développement de cette filière technologique. Ces travaux, réalisés entre fin 2007 et fin 2010 par Christina Villeneuve dans le cadre de son post-doctorat, sont explicités dans le chapitre 2.2.4.

Afin de pouvoir mieux prédire les effets de la qualité des surfaces sur la valeur de la capacité, une méthode d'ingénierie inverse a été développée. Celle-ci consiste à mesurer par profilométrie optique ou par AFM la rugosité des surfaces qui doivent venir en contact, puis de simuler ce contact à l'aide de logiciels multi-physiques tel ANSYS ou COMSOL en introduisant la rugosité réelle des surfaces dans le simulateur. Les premiers résultats obtenus, qui ne prennent pas en compte la déformation des surfaces après le premier contact, ont permis d'approcher la capacité mesurée à 40% près.

De nombreux démonstrateurs ont été réalisés depuis avec cette filière technologique aussi bien pour des recherches propres au laboratoire que pour des projets collaboratifs avec des laboratoires partenaires. On peut citer notamment :

- Des antennes à déphasage électronique dans le cadre d'un projet Régional (RAMEMS) et national (R3MEMS)
- Des filtres accordables dans le cadre d'un Réseau d'Excellence (AMICOM) et d'un projet ERANET-MNT (MEMIS)
- Des structures de test dans le cadre d'un projet Inter-Région (MEMICOM).
- Des déphaseurs dans le cadre d'un projet NANOINNOV (NANOCOM)
- Des SPDT dans le cadre d'un projet RNRT (TREMICROMEDIA)

1.3.3.4 Micro-commutateurs à contact métal/métal et à actionnement électrostatique

Le développement du contact métal/métal permet de mieux adresser certaines applications aux fréquences plutôt basses (téléphonie mobile) en réalisant un court circuit résistif mais également de connecter des capacités MIM (Métal/Isolant/Métal) comme cela a été présenté au chapitre 1.3.3.2.

La filière technologique a été complétée à partir de 2006 pour pouvoir réaliser dans le même lot de fabrication des contacts métal/métal et des contacts capacitifs. La couche de résine sacrificielle est partiellement insolée localement pour réaliser un trou de 1 μ m de profondeur environ et d'une dizaine de microns de diamètre. Le pont métallique, qui suit le profil de résine, présentera alors localement une petite marche qui permettra d'obtenir un contact localisé et assurera ainsi une résistance de contact plus faible.

Cette filière a été utilisée dans le cadre d'un projet Intégré Européen MIMOSA pour étudier un micro-commutateur à faible tension d'actionnement pour les applications de téléphonie mobile. Des conceptions RF et mécaniques ont été menées afin d'optimiser les performances du composant et répondre au cahier des charges fixé. Des démonstrateurs à configuration série et parallèle ont été fabriqués et caractérisés. Pour les micro-commutateurs de type série, une isolation meilleure que

35dB et des pertes inférieures à 0.2dB ont été obtenus dans la bande 1GHz/5GHz. Pour les interrupteurs parallèles, les pertes sont inférieures à 0.1db et l'isolation meilleure que 12dB dans la bande 1GHz/5GHz. Dans les deux cas la résistance électrique du contact or/or a été évaluée à 1,1ohm pour une force de contact de 30 μ N. Ces résultats ont été obtenus avec une tension d'actionnement de 30Volts car les poutres métalliques présentaient une déformation de 7 μ m au lieu des 3 μ m prévus. Les simulations ont montré que des résultats comparables pouvaient être obtenus avec une tension d'actionnement de 10V si la hauteur du pont métallique était de 3 μ m et même de 6V pour une hauteur de 1.5 μ m.

En parallèle nous avons débuté des travaux plus fondamentaux sur le contact métal/métal à partir de simulations mécaniques tridimensionnelles qui tiennent compte de la rugosité réelle des surfaces en contact. Ces études sont couplées avec le développement d'un banc de caractérisation de la résistance de contact en collaboration avec la société NOVAMEMS. Ces travaux sont décrits dans le chapitre 3.2 consacré à l'étude des matériaux.

1.3.4 Circuits RF passifs micro-fluidiques accordables

Dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Monastir en Tunisie, nous avons exploré les potentialités de la micro-fluidique pour rendre accordable les circuits passifs RF. Le démonstrateur choisi concerne une inductance variable pour des applications à quelques GHz.

L'inductance est constituée d'une métallisation en or de 20 μ m de large et 2 μ m d'épaisseur en forme de double spirale (une spirale pour l'aller et une pour le retour). La distance entre les deux brins est de 20 μ m et le diamètre de l'inductance est de 1.2mm de diamètre. Cette configuration en double spirale permet d'intégrer les deux brins dans un canal micro-fluidique en SU8 de 100 μ m de large et 10 μ m de hauteur. L'ensemble est ensuite capoté par lamination d'un film de SU8. Des accès micro-fluidique sont finalement réalisés sur un niveau supérieur (élaboration de murs de SU8 puis lamination d'un film de SU8), qui permettent la connexion avec des tubes miniatures de 1.5mm de diamètre (extérieur). L'introduction d'un liquide conducteur dans le canal réalise un court-circuit entre les deux spirales de l'inductance. La longueur totale de l'inductance diminue donc progressivement en fonction de l'avancée du liquide dans le canal, ce qui a pour effet de diminuer la valeur de l'inductance.

Les simulations électromagnétiques ont été effectuées avec du Galinstan (alliage de Gallium, Indium et Etain) et avec de l'eau salée. Les résultats ont montré d'excellents résultats avec le Galinstan (variation d'inductance d'un facteur 4 et facteur de qualité minimum de 25) très proches de ceux obtenus avec un conducteur parfait et des performances/

Des structures ont été fabriquées et les caractérisations ont été réalisées avec de l'eau salée car le Galinstan s'oxyde à l'air et nécessite donc des équipements non disponibles au laboratoire. Les résultats obtenus, conformes aux simulations, montrent une variation de l'inductance de 100% environ (5.5nH à 2.5nH) avec un facteur de qualité de 5 minimum.

2 MICROTECHNOLOGIES – MICROSTRUCTURES

2.1 INTRODUCTION

Le développement des briques de bases technologiques est une étape indispensable pour la réalisation de Microsystèmes. La compréhension des phénomènes mis en jeux dans l'élaboration des matériaux et la mise en œuvre des procédés technologiques est en effet nécessaire pour assurer une bonne maîtrise des performances des microsystèmes étudiés. C'est pourquoi ces études nécessitent souvent un investissement important en temps et en compétences et sont la plupart du temps réalisées en collaboration avec des partenaires spécialisés dans les domaines étudiés.

2.2 MEMBRANES

2.2.1 Introduction

Un grand nombre de Microsystèmes utilisent des membranes soit comme élément mécanique actif soit comme élément passif. Une membrane se définit comme un élément dont l'épaisseur est très petite par rapport aux dimensions latérales. Il existe également une grande variété de membrane qu'on peut classer de différentes manières :

- Suivant le rapport de forme entre la longueur et la largeur. Les cas les plus classiques concernent soit des membranes dont les dimensions latérales sont comparables, soit des membranes dont une dimension latérale est très petite devant l'autre.
- Suivant le type d'encastrement. La membrane peut être encadrée sur un à quatre cotés, les autres cotés restant libres.
- Suivant le type de matériaux. Le silicium a été le premier matériau utilisé dans les Microsystèmes pour ses excellentes propriétés mécaniques mais de nombreux matériaux sont aujourd'hui utilisés comme les dérivés du silicium (polysilicium, oxyde et nitrure de silicium, ...) mais également les métaux, les polymères,
- Suivant le type de fabrication. Typiquement la membrane peut être obtenue par deux techniques. La première utilise un usinage de volume du substrat sur lequel la couche constituant la membrane est déposée. La seconde technique est basée sur la gravure d'une couche sacrificielle déposée entre le substrat et la couche structurelle.

Les cas les plus communs concernent :

- Une membrane encadrée sur ses 4 cotés, qui présente généralement des dimensions comparables suivant les deux directions latérales et qui est obtenue par usinage de volume du

substrat de silicium. Les matériaux constituant la membrane peut être du silicium ou tout autre matériau déposé à la surface du silicium.

- Une membrane encastrée sur ses 2 cotés, avec une dimension latérale très inférieure devant l'autre et qui est obtenu par usinage de surface. On parle alors de « pont ». Par extension, ce type de membrane avec un seul coté encastré, est appelé « poutre ».

2.2.2 Membranes diélectriques

Une filière de membrane diélectrique SiO₂/SiN_x ultra fine (0.6µm/0.8µm) a été développée à partir de 1996 et sert encore aujourd'hui pour la réalisation de différents démonstrateurs pour applications hyperfréquence mais également pour d'autres applications microsystèmes notamment pour la réalisation de plateformes chauffantes.

Une nouvelle filière à base de membranes diélectriques SiO_xN_y obtenues à basse température par PECVD a également été développée à partir de 2002. Cette filière a permis d'obtenir des membranes plus épaisses (5µm) et ainsi des membranes de grande dimension (1cm de coté) ont pu être réalisées pour étudier des antennes RF.

Des travaux plus spécifiques ont également été menés à partir de 2004 pour la réalisation de membranes faiblement encastrées sur un coté afin d'étudier des antennes Yagi émettant par la surface. Afin de ne pas trop perturber le signal de ces antennes, il convient de minimiser les murs de silicium qui se trouvent dans l'axe de la propagation.

Une nouvelle filière technologique a été développée basée sur l'utilisation consécutive d'une gravure sèche (DRIE) puis d'une gravure humide (KOH). Cette technique permet d'obtenir des flancs de silicium de forme trapézoïdale de faible largeur (70µm) et de faible hauteur (50µm), ce qui réduit l'impact de ces murs en silicium sur la propagation du signal.

Néanmoins ces membranes sont relativement fragiles et présentent notamment des déformations importantes (10µm) du coté faiblement encastré liées justement au caractère non parfait de cet encastrement. Des simulations ont été effectuées pour évaluer les possibilités de minimiser ces déformations. Les résultats obtenus ont montré que la déformation, au niveau du bord faiblement encastré, était liée non seulement au gradient de contrainte dans la membrane mais également à la contrainte moyenne. Pour minimiser la déformation il convient donc de réduire ces deux paramètres simultanément, ce qui est impossible avec la technologie de membranes bicouches SiO₂/SiN_x. Par contre avec des membranes SiO_xN_y dont la contrainte moyenne est voisine de 20MPa, et pour les gradients de contraintes mesurés sur ces couches, il est possible d'obtenir des déformations inférieures à 1µm.

2.2.3 Membrane Silicium

Mes premiers travaux, lors de mon doctorat, ont concernés la gravure chimique anisotrope à base à base d'hydroxyde de potassium qui est aujourd'hui largement utilisée dans le laboratoire pour la réalisation de différentes microstructures.

En 1999, avec l'acquisition d'une nouvelle machine de gravure ionique réactives permettant d'usiner le silicium sur de grandes profondeurs (jusqu'à 1 mm), j'ai également participé à la mise au point de cette technique pour la réalisation de membranes en silicium et diélectriques. Cette technique est également largement utilisée aujourd'hui au laboratoire pour ce type de dispositif.

Grâce à l'acquisition en 2006 d'un équipement d'assemblage de plaques, il a été possible de développer une nouvelle filière technologique qui permet la réalisation de membranes en silicium avec une cavité enterrée. Cette filière a été mise en œuvre pour le projet CAPTAM (cf. 1.2) afin d'obtenir un capteur de pression avec un générateur de pression intégré.

Le procédé est basé sur le collage moléculaire de deux substrats de silicium. Dans le premier est réalisé un oxyde de silicium d'épaisseur spécifique ($2\mu\text{m}$ dans notre cas) qui est gravé localement pour former une cavité. Le second substrat est une plaquette de silicium SOI qui est assemblée avec la face du SOI contre le premier substrat. Après assemblage sous vide et recuit à haute température, la partie massive du substrat SOI est supprimée pour ne laisser que la membrane en SOI d'épaisseur calibrée.

Après une phase d'optimisation des différents paramètres, nous avons pu obtenir des cavités scellées avec des membranes de $5\mu\text{m}$ d'épaisseur sur la quasi-totalité de la plaquette. Néanmoins les membranes présentent des déformations vers le haut (non reproductibles) de quelques centaines de nanomètres.

Les analyses ont montré qu'une grande part de cette déformation était liée à une pression résiduelle dans la cavité. Cette pression a été évaluée en mesurant la variation de la déformation de la membrane avant et après perçage de la membrane. Ce trou de $10\mu\text{m}$ de diamètre a été réalisé au laser dans un angle de la membrane afin de minimiser les modifications du comportement mécanique de la membrane. Pour les membranes carrées (rectangulaires) la pression moyenne est égale à 180mmHg (70mmHg) avec une déviation standard de 70mmHg (20mmHg). On peut noter que la pression à l'intérieur des cavités rectangulaire est plus de 2 fois plus faible que celle présente dans les cavités carrées. Ce résultat est cohérent si on considère que la quantité de gaz est la même dans chaque cavité car le volume des cavités rectangulaires est 3 fois plus grand que celui des cavités carrées.

La cavité a été scellée sous vide mais, lors de la création des liaisons chimiques entre les deux surfaces des plaquettes de silicium, des espèces chimiques sont créées sous forme gazeuse. Il y a en général création d'hydrogène, mais ce gaz diffuse normalement à l'extérieur de la cavité lors des recuits haute température. En fonction des conditions de soudure, de la surface des zones soudées et du volume de la cavité, la pression à l'intérieur est plus ou moins faible. Les solutions pour minimiser la pression à l'intérieur des cavités sont de plusieurs ordres :

- Optimiser les conditions de soudure pour minimiser la création de gaz dans les cavités.
- Minimiser la surface des zones soudées.
- Réaliser des puits en dehors de la zone de la membrane afin d'augmenter considérablement le volume de la cavité.

2.2.4 Membranes métalliques

La réalisation d'éléments mécaniques mobiles au dessus des circuits passifs RF (lignes métalliques) permet d'obtenir des fonctions micro-ondes intéressantes comme des interrupteurs, des déphaseurs et des filtres accordables. L'objectif de ces travaux est donc de développer une filière technologique qui permet de réaliser au dessus des circuits passifs des ponts métalliques actionnables électrostatiquement. La voie choisie a été de réaliser des ponts métalliques en or obtenus par usinage de surface d'une couche sacrificielle organique. Le procédé de réalisation de ces ponts métalliques est basé sur le dépôt d'une couche sacrificielle en polymère sur laquelle est ensuite déposée une bicouche d'or évaporé (couche d'accrochage) et d'or électro-déposé (couche structurale). Ce procédé est réalisé sur des lignes métalliques épaisses (3 μ m) qui servent à réaliser la fonction micro-onde.

Ces travaux ont été initiés en 1999 dans la thèse de Katia GRENIER (soutenue en Novembre 2000) et ont permis de réaliser les premiers micro-commutateurs au laboratoire. Les résultats obtenus bien qu'encourageants, ont montrés une mauvaise reproductibilité du comportement mécanique ainsi qu'une tension d'actionnement élevée (60 Volts).

Afin de minimiser cette tension d'actionnement nous avons alors engagé des travaux sur la compréhension du comportement mécanique de ces structures mais également sur l'optimisation des différents procédés technologiques de cette filière. En effet la diminution de la tension d'actionnement nécessite la réduction de la raideur mécanique de la microstructure ce qui la rend plus sensible aux déformations parasites (contraintes et gradient de contraintes internes) ainsi qu'au collage lié notamment au chargement du diélectrique. Ces travaux ont été concrétisés par les thèses de Laurent RABBIA (soutenue en Juillet 2005), et Frédéric FLOURENS (soutenue en Juillet 2006).

Nous avons pu ainsi obtenir de structures avec une tension d'actionnement comprise entre 10V et 20V.

L'ensemble du procédé mis au point par Frédéric FLOURENS a été complètement repris en 2007 pour différentes raisons. La première est liée à des problèmes d'équipements qui ont changé ou qui ont été réaffectés suite à l'aménagement de la nouvelle centrale de technologie en juillet 2006 puis juillet 2007. La maîtrise des performances mécaniques des ponts en or est en effet fortement liée aux propriétés mécaniques des différentes couches (sacrificielles, d'accrochage, structurelle) et donc aux équipements utilisés. La seconde raison concerne les imperfections de l'ancien procédé qui ne permettait pas d'obtenir des ponts parfaitement plats à cause de la présence des lignes métalliques épaisses qui sont présentes sous le pont. Cette non-planéité du pont entraîne d'une part une déformation initiale des ponts non reproductible pour les structures de faible raideur mécanique et d'autre part génère un mauvais contact capacitif.

Les nouveaux procédés ont été étudiés avec pour objectif principal de comprendre et maîtriser la forme et les déformations parasites des MEMS. Deux post doctorants (Christina VILLENEUVE et Stéphane AOUBA) ont été recrutés en Novembre 2007 pour mener à bien cette tâche. Christina VILLENEUVE a pris en charge les développements technologiques génériques qui sont utilisés sur substrat de silicium. Stéphane AOUBA a développé une nouvelle filière sur substrat de silice fondue dans le cadre du projet ANR-TCOM R3MEMS (cf. 1.3.3.3) en adaptant les procédés mis au point par Christina VILLENEUVE.

La modification principale a consisté à changer de couche sacrificielle organique afin d'avoir un matériau qui présente les caractéristiques suivantes :

- Un très faible dégazage lors du dépôt d'or par évaporation. Ce dégazage modifie en effet les contraintes mécaniques dans les couches d'or évaporé.
- Une température de transition vitreuse suffisamment élevée pour supporter les traitements thermiques présents dans le procédé technologique.
- Une vitesse de gravure élevée pour minimiser le temps de libération du MEMS.

La planarisation des lignes RF (de 3 μ m de hauteur) a été obtenue par le dépôt et la structuration d'une première couche de résine sacrificielle avant la réalisation de la couche sacrificielle. Après optimisation, le profil obtenu présente des discontinuités comprises entre 100nm et 150nm de hauteur en fonction de la largeur de la discontinuité entre les lignes RF.

Une étude approfondie a été réalisée pour analyser la provenance de la déformation parasite des MEMS. La contrainte et le gradient de contrainte ont été mesurés dans les deux couches d'or (or évaporé de 100nm d'épaisseur et or électro-déposé de 1µm à 3µm d'épaisseur). Les analyses ont montré que le gradient de contrainte dans chaque couche était négligeable mais que la contrainte moyenne était très différente dans chaque couche (-100MPa dans l'or évaporé et +10MPa dans l'or électro-déposé). Avec ce gradient de contrainte, la déformation d'une poutre de 2µm d'épaisseur et de 400µm de longueur est proche de 20µm vers le haut. Cette déformation parasite rend ce type de structure inutilisable pour les applications visées.

Les optimisations ont porté sur un recuit à faible température (100°C environ) effectué avant gravure de la couche sacrificielle. Ce recuit a permis de relaxer les contraintes dans la couche d'or évaporé jusqu'à une valeur quasi nulle. Les poutres décrites précédemment présentent alors une déflexion vers le haut inférieure à 3µm (au lieu de 20µm).

Toutes ces optimisations ont permis d'obtenir une capacité à l'état bas égale à 50% de la valeur théorique en n'utilisant que des électrodes déportées (sans actionnement au niveau du contact capacitif).

2.3 ASSEMBLAGE HETEROGENE 3D

2.3.1 Introduction

Il existe trois familles de techniques collectives pour réaliser des microsystèmes tridimensionnels :

- L'usinage de matériaux massifs comme par exemple la gravure du silicium.
- Le dépôt de couches très épaisses sur un substrat.
- L'assemblage de différents substrats qui peuvent être eux-mêmes déjà structurés ou non par les deux techniques précédentes.

La dernière technique présente l'avantage de pouvoir réaliser des structures plus complexes et plus variées. Il existe différentes variantes à cette technique dont les plus répandues sont :

- L'assemblage par soudure anodique Silicium/Pyrex. Ce procédé développé dès les années 1960 pour les capteurs présente l'avantage de réaliser un assemblage au niveau atomique et garanti ainsi un excellent contrôle des distances entre les différentes parties des deux substrats assemblés. Ce procédé utilise le champ électrique créé par la migration des ions sodium du pyrex lors de la polarisation (plusieurs centaines de volts) du Pyrex à haute température (300°C à 500°C) pour mettre les deux substrats en contact intime. Des liaisons chimiques de type Si-OH sont ensuite créées entre les deux substrats Cette technique a été introduite au laboratoire dès

1980 et a fait l'objet de plusieurs études (au niveau procédés et équipements) auxquelles j'ai participé entre 1987 et 2000. On peut citer notamment l'amélioration d'un équipement de soudure développé au laboratoire en minimisant le gradient de température entre les deux plaques à souder puis la qualification de la qualité de la soudure dans un premier prototype d'équipement dédié à ce type de soudure (cf. Thèse de Patrick Favarro soutenue le 17 Février 2000). Aujourd'hui ce procédé est largement répandu et des équipements performants sont disponibles pour les applications microsystemes.

- L'assemblage par soudure directe silicium/silicium. Démontrée pour la première fois en 1986, ce procédé permet de lier deux substrats de silicium d'excellente planéité ($< 5\mu\text{m}$ pour une plaquette de 4 » de diamètre) et de faible rugosité (quelques Å). Cette méthode est basée sur la création de liaison de type Van Der Waals (à température ambiante) puis de type Si-O-Si à haute température ($>800^\circ\text{C}$ en général). Cette technique a également été étudiée par d'autres chercheurs du laboratoire dans les années 1990/2000 pour des applications micro-électroniques. Aujourd'hui cette technique est utilisée à grande échelle pour la fabrication de substrat de silicium monocristallin possédant une couche d'oxyde enterrée (substrat SOI).
- L'assemblage par soudure eutectique directe. Ce procédé consiste à assembler deux substrats possédant des matériaux compatibles en surface à l'aide d'un scellement métallique réalisant un alliage eutectique. La température eutectique étant bien inférieure à la température de fusion des couches en présence, la liaison procurée par cette soudure est forte et hermétique. L'eutectique le plus connu et largement utilisé en microélectronique pour le report des composants sur un boîtier est l'eutectique or/silicium.
- L'assemblage par thermo-compression. Ce procédé, largement utilisé également en microélectronique pour souder des fils sur des plots métalliques, consiste à mettre en contact deux matériaux à des températures de plusieurs centaines de degrés Celsius sous des pressions de quelques dizaines de bars. Les matrices des deux matériaux s'interpénètrent alors et permettent d'assurer l'assemblage deux substrats. Les deux techniques les plus connues concernent l'assemblage or/or et l'assemblage par verre fritté.

Le choix de la technique utilisée dépendra d'une part de la filière complète utilisée pour fabriquer le microsysteme car le procédé d'assemblage devra être compatible avec cette filière. D'autre part le choix du procédé d'assemblage sera fortement dépendant de la fonction que doit réaliser l'assemblage (assemblage simple, étanchéité, herméticité, ...).

Depuis les années 2000 on assiste a une forte mobilisation de la communauté scientifique des microsystèmes pour étudier ces différentes techniques d'assemblage collectives grâce notamment à la disponibilité d'équipements dédiés à l'assemblage de substrat entiers et qui permettent également d'utiliser l'ensemble des techniques listées précédemment.

Le laboratoire ayant acquis une de ces machines (AML-AWB04) en 2006, nous avons pu investiguer ce nouveau champ de recherche pour le packaging des capteurs de pression et le packaging des micro-commutateurs RF.

2.3.2 Packaging collectif pour capteur pression

En Octobre 2006, la société ESTERLINE (anciennement AUXITROL) qui fabrique des capteurs de pression pour l'aéronautique, nous a sollicités pour développer un packaging collectif de leurs capteurs de pression. Cette collaboration s'est concrétisée à travers une thèse CIFRE de Jean François LeNéal (soutenue le 2 Décembre 2011) et dans le cadre d'un contrat industriel (PACOPRESS).

Le capteur commercialisé par ESTERLINE est basé sur des jauges en silicium piézorésistives et comprend :

- Une puce en silicium SOI. Les jauges de contraintes sont gravées dans le SOI et le substrat de silicium est usiné face arrière pour réaliser la membrane.
- Un substrat de Pyrex soudé anodiquement sur la face arrière du silicium pour réaliser une cavité sous vide de référence. Ce vide doit être de très bonne qualité (ou très reproductible) puisqu'il conditionne fortement les performances du capteur, notamment pour les faibles gammes de pression.
- Un boîtier métallique dans lequel est reporté de manière individuelle la puce Silicium/Pyrex. Celle-ci est collée sur le boîtier métallique avec une colle spécifique qui permet de relaxer une partie des contraintes thermomécaniques. Une interconnexion par fil est réalisée entre les plots de la puce en silicium et les traversées électriques du boîtier métallique.
- Une membrane métallique soudée sur le boîtier métallique. Cette membrane métallique permet de protéger le capteur des éléments chimiques agressifs présents dans les applications adressées par ce capteur. De l'huile incompressible est insérée dans le boîtier afin d'assurer le transfert de la pression (appliquée sur la membrane métallique) sur la membrane en silicium.

Outre l'inconvénient du coût de revient élevé du packaging utilisé lié notamment au caractère individuel des techniques mises en œuvre, les performances du capteur sont détériorées par la présence de l'huile surtout pour les applications hautes températures. L'objectif des travaux

entrepris est de réaliser une partie de la mise en boîtier de façon collective et de supprimer notamment l'huile et la membrane métallique qui sont présentes dans la mise en boîtier traditionnelle. Pour cela il est nécessaire d'appliquer la pression non plus sur la face supérieure du silicium (sur laquelle se trouvent les interconnexions électriques) mais sur la face inférieure. Ceci a pour conséquence la réalisation :

- De la cavité de référence sur la face supérieure du silicium
- D'une interconnexion électrique à travers le capot servant à réaliser la cavité de référence

Différentes solutions sont en cours d'étude quand au choix du capot et de la technique d'assemblage :

- Un capot en Pyrex. Cette solution présente l'avantage d'être déjà maîtrisée par ESTERLINE (et par le LAAS) au niveau de la soudure avec le silicium. Par contre elle nécessite de trous les substrats en Pyrex de 500 μ m d'épaisseur puis de récupérer le contact électrique par ses trous.
- Un capot en silicium avec un assemblage par thermo-compression ou eutectique. Le choix d'un capot silicium permet de minimiser les contraintes thermomécaniques entre le substrat en silicium du capteur et le capot.
- Un capot en silicium avec un assemblage par soudure directe Si-Si. Cette solution présente également l'avantage d'un dispositif tout silicium qui minimise les contraintes thermomécaniques. L'amélioration par rapport à la solution précédente concerne la suppression du métal qui peut générer également des contraintes thermomécaniques. La difficulté concerne ici la nécessité d'avoir des déformations de substrat et des rugosités de surface très faibles alors que les plaquettes ont déjà subi un processus technologique complet. Cette solution nécessite également un recuit à haute température qui peut modifier les propriétés du capteur. Un autre avantage par rapport au capot en pyrex concerne la réalisation des trous dans le capot. En effet le silicium est facilement usinable par des techniques collectives ce qui réduira le coût de fabrication. Par ailleurs les flancs non abrupts qui peuvent être obtenus par gravure chimique anisotrope faciliteront la prise de contact électrique à travers le capot.

Compte tenu des remarques précédentes, la première solution qui a été étudiée est celle qui met en œuvre un substrat de pyrex pour le capot. Les trous dans le pyrex (de 750 μ m de diamètre) ont été réalisés par ultrasons, avant soudure, par une société spécialisée. Plusieurs types d'interconnexions électriques ont été évaluées pour prendre le contact à travers les trous du pyrex (polysilicium fortement dopé, différents métaux). Cette filière a été en grande partie validée sur des capteurs

fabriqués à Esterline. La cellule a ensuite été reportée par « flip-chip » sur un support en pyrex de 500µm d'épaisseur comprenant des pistes de métallisation. L'isolation des interconnexions entre la puce et le boîtier en pyrex est assurée par une colle isolante. L'épaisseur totale du capteur est ainsi inférieure à 2mm, ce qui permet de répondre à des spécifications d'Airbus pour des essais en vol. Les erreurs totales obtenues dans la gamme -25°C/+125°C, après compensation numérique, sont identiques à celles obtenues avec le capteur déjà commercialisé (< 5000ppm). Cette filière est en cours de qualification chez ESTERLINE pour des capteurs 1.2 bars pleine échelle et pour des gammes de températures comprises entre -55°C et 250°C. Les premiers tests de capteurs chez des industriels sont prévus en 2013-2014.

Une étude plus amont a été également menée avec des capots en silicium.

Concernant l'assemblage par eutectique Au-Si, les structures de tests ont montré une résistance mécanique équivalente à la soudure silicium-pyrex. Les analyses ont montré que la rupture était cohésive même si l'homogénéité du cordon de soudure n'était pas toujours optimale. Ceci a été attribué notamment à une pression de soudure insuffisante (force limitée à 2kN sur l'équipement utilisé).

Les tests de scellement par thermo-compression Au-Au n'ont pas été concluants en grande partie à cause de la pression insuffisante disponible sur la machine.

Des premiers tests concluants ont également été réalisés avec la soudure directe Si-Si. La soudure est correcte sur la majeure partie de la plaquette avec une résistance mécanique supérieure à celle obtenue pour la soudure Si-Pyrex.

Un nouveau contrat de collaboration (2012-2014) est en cours de discussion avec la société ESTERLINE pour finaliser le packaging Si-Si avec des applications plus haute température (> 250°C). Ces études devraient être facilitées par l'acquisition en Mai 2011 d'un nouvel équipement d'assemblage de plaques qui permet d'appliquer des forces plus importantes (20kN) et de manière plus contrôlée.

2.3.3 Packaging pour micro-commutateurs RF

2.3.3.1 Introduction

Dns le cas des micro-commutateurs RF il n'est pas nécessaire d'avoir un packaging sous vide mais il est par contre important d'obtenir un packaging hermétique afin de minimiser les problèmes liés à l'humidité qui modifie la valeur des capacités et entraîne le collage des structures mobiles. La

température maximale des procédés utilisés pour le packaging ne doit pas excéder si possible 200°C afin de ne pas trop modifier les propriétés mécaniques des MEMS en or.

Les technologies développées pour réaliser le packaging des micro-commutateurs RF doit tenir compte par contre de la spécificité de ce composant au niveau des interconnexions électriques. En effet les interconnexions RF sont sensibles aux couplages capacitifs parasites. Il existe différentes solutions pour extraire les interconnexions électrique RF de la cavité qui est réalisée lors du packaging :

- L'interconnexion à travers le substrat qui supporte le circuit RF en réalisant des vias traversant métalliques. Cette technique nécessite d'utiliser des substrats de silicium de forte résistivité et de faible épaisseur (typiquement inférieur à 50 μ m) si on veut minimiser les pertes aux hautes fréquences.
- L'interconnexion à travers le capot. Cette technique présente les mêmes inconvénients que la précédente mais nécessite également de sceller la cavité après l'assemblage du capot.
- L'interconnexion entre le substrat et le capot. Cette technique ne nécessite pas de réaliser des trous métallisés et présente par ailleurs l'avantage d'être applicable à différents types de substrat et de capots.

Deux variantes sont possibles avec cette dernière solution :

- La première fait appel à une couche diélectrique déposée sur une couche sacrificielle qui permet après libération d'obtenir une cavité. Il est ensuite nécessaire de sceller cette cavité sous atmosphère contrôlée ou sous vide en bouchant les trous qui ont servi à graver la couche sacrificielle. Cette technique est particulièrement intéressante car elle est assez générique et permet de limiter les couplages capacitifs. Par contre elle est en général limitée à des cavités de petite dimension (\approx 500 μ m) à cause des vitesses de gravure limitées des couches sacrificielles et de la tenue mécanique de la couche diélectrique constituant le capot. Le scellement du capot est par ailleurs assez délicat à réaliser puisqu'il faut boucher les trous du capot sans gêner le fonctionnement du MEMS.
- La seconde variante consiste à réaliser un cordon diélectrique sur les lignes RF qui servira à les isoler du capot et assurera également l'assemblage du substrat et du capot. Les diélectriques utilisés sont en général des polymères qui présentent l'avantage de pouvoir être déposés à basse température (<200°C) et avec des épaisseurs importantes afin de minimiser les couplages électromagnétiques avec le capot. Mais cette technique ne présente pas toujours des niveaux d'herméticité suffisants à cause de la perméabilité élevée des polymères à l'humidité (typiquement 10^6 à 10^8 fois plus que le métal). Cette herméticité peut être améliorée (d'un

facteur 10 à 100) en complétant l'encapsulation par un dépôt de diélectrique minéral. Le niveau de pertes obtenu est très faible car les polymères utilisés (généralement du BCB) possèdent d'excellentes propriétés RF et les composants présentent peu de discontinuités électriques avec cette technique. De nombreux laboratoires de recherche et d'industriels ont ainsi choisi cette technique car elle est très simple à développer même si l'herméticité n'est pas garantie. Dans certaines applications ce niveau d'herméticité peut en effet être suffisant et garanti facilement la protection mécanique des MEMS.

2.3.3.2 Packaging par cordon de polymère

Les travaux sur la mise en boîtier des micro-commutateurs RF ont débuté fin 2003 au LAAS par la thèse de David PEYROU soutenue en Décembre 2006. Ces travaux ont porté d'une part sur les procédés technologiques d'encapsulation et d'autre part sur la modélisation RF du packaging.

En collaboration avec la société MEMSCAP, une étude a été menée sur un boîtier micro-usiné qui est assemblé à l'aide d'un cordon de BenzoCycloButène (BCB) déposé sur le substrat de silicium comprenant le micro-commutateur. Ce cordon de BCB est déposé à l'aide d'une seringue. Des simulations 3D sous HFSS ont permis d'estimer l'impact des différents paramètres du packaging (hauteur de la cavité, matériau constituant le capot, largeur du mur du capot, épaisseur du cordon de BCB). Après confrontation des contraintes technologiques et des résultats de simulations, un démonstrateur a été réalisé comprenant un capot en Foturan (verre photosensible) fabriqué par MEMSCAP et un micro-commutateur fabriqué au LAAS. Les caractérisations RF ont montré que les pertes supplémentaires rapportées par le boîtier étaient inférieures à 0.02dB dans la bande de fréquence 1GHz/40GHz.

Les développements technologiques ont porté au début de l'étude sur l'utilisation de la machine de « flip-chip ». Des tests ont été réalisés pour effectuer la dispense du cordon de BCB à l'aide d'une seringue pilotée par la machine. L'optimisation des paramètres de dispense (vitesse, hauteur de l'aiguille) a permis de réaliser des cordons de BCB assez reproductibles et d'épaisseur contrôlée.

L'assemblage avec le capot en Foturan micro-usiné a été réalisé à 180°C et a permis la réticulation du BCB. La pression appliquée lors de l'assemblage était voisine de 3 bars. Des simulations thermomécaniques ont en effet montré qu'il était nécessaire d'appliquer une pression supérieure à 1.5 bar pour que le BCB vienne s'écraser et combler les fentes coplanaires. La largeur du cordon de BCB a été fixé à 200µm afin d'être supérieur à la longueur de fissure critique estimée à 190µm pour l'interface Si/BCB.

Afin de rendre le procédé technologique plus collectif, les cordons de BCB (de 20µm d'épaisseur) ont été ensuite déposés par centrifugation sur un capot en pyrex puis structurés par

photolithographie. Cette étude nous a permis de déterminer les conditions requises pour obtenir un assemblage de bonne qualité :

- Largeur des cordons de BCB > 200µm
- Pression d'assemblage = 4.5 bars
- Recuit du BCB après assemblage : $T > 210^{\circ}\text{C}$ pendant 40mn

2.3.3.3 Packaging par vias métalliques

Des travaux ont démarré fin 2009 sur un packaging hermétique basse température mettant en œuvre un alliage de SnAuCu (SAC) pour l'assemblage du capot. Cet alliage, dont la température de fusion est voisine de 217°C , est déposé par voie électrolytique dans des moules de résine.

Les premiers tests ont été effectués, à l'aide de la machine de « flip-chip », sur des puces unitaires avec des cordons de scellement de 200µm de large pour une surface totale de 1.5mm^2 . Nous avons montré qu'un assemblage de bonne qualité était possible à 220°C et avec une pression de 5 bars. On assiste à une rupture cohésive pour des forces voisines de 75N.

Deux voies sont explorées pour extraire les interconnexions électriques de la cavité :

- Des vias traversant par le substrat. Des tests préliminaires ont montré qu'il était possible de réaliser des vias de 50µm de diamètre à travers un substrat de silicium de 400µm d'épaisseur ; puis de remplir ces vias par un dépôt électrolytique de cuivre sans utiliser de couche d'accrochage métallique.
- Une interconnexion par le capot obtenu par report de couches minces diélectriques. Les contacts électriques sont ensuite pris en ouvrant la couche diélectrique.

Ces travaux sont actuellement stoppés par manque de moyens.

3 PROPRIETES DES MATERIAUX

3.1 PROPRIETES MECANIQUES

3.1.1 Introduction

L'optimisation du comportement thermomécanique de microstructures nécessite de bien comprendre leurs fonctionnements. Pour cela les logiciels 3D à éléments finis sont d'une aide précieuse car ils permettent d'identifier et de valider les phénomènes souvent complexes et multiples en présence. Néanmoins l'analyse des résultats ne peut être fiable que si les paramètres thermomécaniques des différents matériaux utilisés sont connus avec une assez bonne précision. Les valeurs généralement utilisées pour ces paramètres proviennent de base de données concernant des matériaux massifs. Mais les matériaux employés dans les microstructures sont principalement des couches minces dont les propriétés mécaniques dépendent fortement des conditions d'élaboration.

Le premier paramètre qui conditionne le comportement mécanique de ces MEMS est la rigidité à travers le module d'Young et la contrainte moyenne initiale. La détermination de ces paramètres mécaniques est donc nécessaire pour réaliser des conceptions mécaniques fiables.

Le second paramètre important concerne le fluage sous contrainte mécanique. Ce phénomène a pour conséquence la relaxation des contraintes mécaniques présentes dans les couches et modifie donc la rigidité et la déformation résiduelle des structures. Ce problème peut apparaître non seulement lors de la libération des structures mais également en fonctionnement puisque les contraintes mécaniques engendrées par les déformations peuvent être relativement importantes. Lors de cyclages mécaniques ce phénomène conduit à une fatigue du matériau qui entraîne à terme la rupture du dispositif. Il convient donc d'étudier avec attention les propriétés mécaniques non élastique (contrainte de plasticité, module d'écrouissage, fatigue) de ces matériaux afin d'évaluer la fiabilité des dispositifs en fonctionnement.

C'est pourquoi nous avons engagé en 2003 au LAAS des études sur les propriétés mécaniques des matériaux en collaboration avec le Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse (Institut Clément Ader depuis Janvier 2009).

La première thèse sur ce sujet au laboratoire a démarré en Octobre 2003 (Karim Yacine) qui a abandonné le doctorat fin 2007 à cause de problèmes personnels. Les travaux ont repris en Février 2008 dans le cadre de la thèse de Youssef Hicham (soutenue le 2 Novembre 2011).

De nombreuses techniques ont été étudiées depuis le début des années 1990 qui permettent d'obtenir des informations sur les propriétés mécaniques des matériaux en couches minces :

- La nano-indentation qui consiste à imprimer une empreinte dans la couche à caractériser à l'aide d'un indenteur dont les propriétés mécaniques sont connues. L'analyse des courbes charge/déformation permet notamment d'obtenir des informations sur le module d'Young du matériau indenté. Mais il est nécessaire de connaître précisément la surface d'indentation, ce qui est assez difficile. La couche à caractériser doit par ailleurs être déposée sur un substrat suffisamment rigide pour minimiser la déformation de ce dernier et être suffisamment épaisse pour éviter l'interaction avec le substrat. Les conditions de caractérisation ne correspondent donc pas forcément aux conditions réelles de fabrication des microstructures.
- La micro-vibrométrie qui consiste à mettre en vibration une microstructure et à mesurer les fréquences de résonance des différents modes propres. En considérant connue la masse volumique du matériau, il est alors possible de calculer le module d'Young.
- La micro-flexion qui consiste à appliquer une charge ponctuelle sur une microstructure et à relever la déformation. Un nano-indenteur est généralement utilisé pour appliquer la charge. L'application d'une charge ponctuelle nécessite de bien maîtriser le point d'application de la charge et introduit par ailleurs des concentrations de contraintes.
- La micro-traction uni-axiale qui consiste à mesurer l'allongement d'une éprouvette sous chargement uni-axial. Cette technique est la plus utilisée pour les matériaux massifs mais elle est délicate à mettre en œuvre pour les couches minces car la taille des éprouvettes est nettement plus petite. Il faut notamment bien contrôler la qualité de la fixation des échantillons et la direction un-axiale du chargement.
- La technique de gonflement de membranes qui consiste à mettre sous pression hydrostatique une membrane et à relever sa déformation. Cette solution est très utilisée car elle présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'appareillages trop coûteux comme le nano-indenteur. C'est cette technique que nous avons choisi de développer au LAAS.

3.1.2 Banc de gonflement de membrane

La technique de gonflement de membrane permet de caractériser le module d'Young, la contrainte initiale et éventuellement le coefficient de Poisson de matériaux déposés en couche mince dans les microsystèmes. Elle est également employée pour déterminer les énergies d'adhésion de film (« blister test ») ou la contrainte à rupture ainsi que les comportements élasto-plastiques dans les travaux les plus récents.

Sous l'effet d'une pression différentielle entre la cavité d'une membrane scellée et l'extérieur, la membrane défléchit hors plan. L'étude de la caractéristique de chargement (pression, déflexion) permet de remonter à la déformation due à l'étirement de la membrane sous un état de contrainte plane ou de déformation plane.

Bien que relativement simple à mettre en œuvre, la technique de gonflement de membrane peut présenter des biais si le banc de test utilisé n'est pas soigneusement développé. Une première source d'erreur concerne la fixation de l'échantillon qui ne doit pas engendrer de déformations de la membrane ni introduire des contraintes dans celle-ci, tout en garantissant une excellente étanchéité du système. La seconde source d'erreur concerne la précision des mesures : mesures géométriques tout d'abord et notamment les dimensions latérales de la membrane puisqu'elles interviennent à la puissance 4 dans la déflexion, mais également la détermination de la pression et de la déflexion. Un objectif important concerne aussi l'automatisation des mesures afin de pouvoir réaliser un grand nombre de mesures. Afin de répondre à ces exigences le banc de test suivant a été mis en place et comprend :

- Un porte échantillon cylindrique pour le maintenir et la mise en pression de l'échantillon. L'assemblage de ses deux parties se fait par filetage, cette solution permettant d'avoir un serrage uniforme sur l'ensemble de la surface. L'échantillon à caractériser, est pris en sandwich entre les deux pièces métalliques. Des joints toriques permettent d'assurer l'étanchéité dans le circuit pneumatique. Pour assurer la stabilité du porte échantillon sur la table du profilomètre optique, celui-ci est maintenu dans un étau présentant une masse suffisante. Des méplats sont usinés sur le porte échantillon pour faciliter le maintien dans l'étau.
- Un générateur de pression d'air (0 - 6bars à 10^{-6}), piloté par un ordinateur équipé d'un programme « Labwindows ». Cet ordinateur est relié par une liaison série avec l'ordinateur qui commande le profilomètre optique.
- Un profilomètre optique « Fogale Nanotech » pour les mesures de déflexion, piloté par un ordinateur équipé d'un logiciel « F3D PILOT » développé et fourni par « Fogale ». Les dimensions latérales de la membrane sont également obtenues en analysant la forme de la déformée proche de l'encastrement pour une gamme de faibles pressions. Un programme permet d'extraire automatiquement les propriétés des matériaux.

La fiabilité des paramètres extraits des mesures dépend également fortement de la précision des modèles théoriques utilisés. Les modèles issus de la littérature utilisent généralement des formulations analytiques qui ne permettent pas de prendre en compte la réalité du comportement de

la membrane (encastrement parfait, géométries parfaites, ..). C'est pourquoi nous avons mis en place une procédure de recalage paramétrique qui permet de faire converger des simulations numériques avec une courbe expérimentale en faisant varier les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les simulations.

3.1.3 Résultats obtenus

Afin de pouvoir valider le banc et la procédure de test, nous avons fabriqué des membranes en silicium monocristallin de $5\mu\text{m}$ d'épaisseur à partir de substrats SOI. Le silicium a en effet des propriétés mécaniques bien connues (module d'Young de 169GPa pour la direction cristallographique $\langle 110 \rangle$ utilisée) et servira de référence. La membrane en silicium pourra également servir de support pour caractériser une couche inconnue déposée à sa surface.

Le premier résultat intéressant concerne la répétabilité des valeurs de module d'Young et de la contrainte interne extraites lors de mesures successives avec le même échantillon remis en place à chaque fois dans son support. Le premier support développé montrait des non reproductibilités de 15% sur le module d'Young et de 25% sur la contrainte. Avec le nouveau support décrit précédemment ces erreurs ont été ramenées respectivement à 1.5% et 7% pour le module d'Young et la contrainte.

Nous avons également estimé l'incertitude sur l'extraction des paramètres mécaniques propre au banc de test qui a été obtenue en considérant que les modèles analytiques étaient corrects. L'écart type obtenu est inférieur à $\pm 0.5\%$ aussi bien pour le module d'Young que pour la contrainte initiale. Cette incertitude est principalement liée à l'erreur sur la dimension latérale de la membrane.

Une campagne de tests a été menée sur 22 membranes carrées de côté compris entre 2mm et 4mm. Les extractions ont d'abord été réalisées à l'aide d'un modèle analytique classique. Les valeurs de module d'Young (contrainte initiale) obtenues sont comprises en 153GPa et 182GPa (10MPa et 60MPa) en fonction de la dimension (côté) de la membrane. Pour un même côté de membrane on obtient des variations sur le module d'Young (contrainte initiale) de $\pm 6\%$ ($\pm 100\%$). Des analyses sont en cours en utilisant la méthode de recalage pour voir si cette dispersion des résultats est diminuée.

3.2 CONTACT MÉTAL-MÉTAL

3.2.1 Introduction

Les micro-commutateurs RF à contact résistif présentent de fortes potentialités notamment pour les fréquences inférieures à 10GHz, ce qui est le cas des applications de téléphonie mobile. Des travaux plus récents portent également sur des nano-commutateurs à contact résistif pour réaliser les fonctions logiques. C'est pourquoi de nombreux travaux de recherches se concentrent sur l'étude des contacts métal/métal.

Bien que très prometteur ce type de microcontact souffre encore aujourd'hui d'un problème de fiabilité qui se traduit notamment par l'augmentation de la résistance de contact. Cette dégradation réduit alors considérablement les performances de ces microcontacts.

Une particularité du contact dans ce type de microstructure concerne l'échelle à laquelle se passent les phénomènes physiques. En effet dans les macro-contacts la force appliquée est relativement importante ce qui permet d'obtenir des surfaces de contact relativement grandes. Dans ce cas ces surfaces de contact sont peu dépendantes de la rugosité des surfaces car la force appliquée est suffisante pour écraser toutes les aspérités. Dans les microcontacts les forces appliquées sont faibles ($<500\mu\text{N}$), les surfaces de contacts petites et la rugosité des surfaces joue un rôle prépondérant dans la valeur de la résistance de contact. En effet le contact ne peut plus être considéré comme uniforme mais est constitué d'une mise en parallèle d'un certain nombre de spots de contact de taille nanométrique ($\approx 10\text{nm}$).

Les paramètres qui conditionnent la valeur et la fiabilité des résistances de contact métal/métal dans les microcontacts sont les suivants :

- La nature des matériaux à travers leurs propriétés mécaniques (élastique et plastiques), leurs propriétés électriques, (résistivité électrique) et thermique (conductivité thermique).
- La répartition et l'intensité des lignes de courant au niveau du contact (surface de chaque spot de contact, répartition de ces spots, nombre de spot de contact).
- L'oxydation de surface des matériaux.
- Les pollutions de surface. Elles peuvent provenir du procédé de fabrication et/ou de la contamination par l'air ambiant.
- Les conditions environnementales (température, humidité).

Pour obtenir une valeur de résistance de contact faible il est donc nécessaire d'avoir :

- Une surface non polluée.
- Des matériaux qui ne s'oxydent pas.

- Des matériaux suffisamment « mous » qui permettent un écrasement maximal des aspérités et donc une grande surface de contact pour de faibles pressions appliquées.
- Des matériaux de faible résistivité électrique.

C'est pourquoi de nombreux travaux sont réalisés avec des contacts or-or. Mais un des inconvénients de l'or concerne sa faible contrainte de limite élastique et une faible température de ramollissement qui entraînent souvent un fonctionnement dans le régime plastique. Ceci a pour effet de dégrader la stabilité de la résistance de contact. C'est pourquoi des études de plus en plus importantes sont réalisées avec des matériaux plus « durs » comme le Ruthénium, mais avec l'inconvénient de présenter des résistances de contact plus élevées.

L'objectif de ces travaux est donc dans un premier temps de développer une méthodologie par étudier la fiabilité de ces contacts métal/métal à travers des outils de modélisation et de caractérisation représentatifs des microcontacts. La modélisation du contact est en effet un outil indispensable pour mieux comprendre les mécanismes mis en jeu car elle permet de séparer artificiellement les différents effets qui influencent la valeur de la résistance de contact, ce qui n'est pas possible lors de la caractérisation. Cette modélisation, nécessairement couplée à une caractérisation fine du contact, doit permettre ensuite l'optimisation de la fiabilité de ce type de microcontacts.

Ces travaux ont démarré au LAAS fin 2006 et ont été réalisés dans le cadre de projets :

- Industriel (SPRINT) pour la société Freescale.
- Européen EDA-POLYNOE, ESA-HRMEMS
- National ANR-PNANO FAME.
- Régional FITMEMS et SYMIAE.

Ces études ont été réalisées dans le cadre de la thèse de

- Fabienne PENNEC soutenue en Juin 2009
- Adrien BROUE démarrée en Octobre 2007 et qui doit être soutenue début 2012, sous contrat CIFRE avec la société NOVAMEMS.
- Hong LIU, démarrée en Octobre 2009.

3.2.2 Méthodologie de modélisation

3.2.2.1 Introduction

La méthodologie mise en œuvre consiste tout d'abord à réaliser la simulation mécanique du contact en prenant en compte la rugosité réelle des surfaces en contact. Pour cela la topographie AFM est introduite dans le simulateur et la surface réelle de contact est ensuite extraite en fonction de la force appliquée. En fonction de la surface et du nombre de chaque spot de contact, la résistance est ensuite calculée par des modèles analytiques appropriés :

- Régime diffusif (ou ohmique) si le rayon de l'aire de contact « a » est très supérieur au libre parcours moyens des électrons « l_e » (38nm pour l'or). Dans ce cas le courant circule à la périphérie de l'interface de contact (constriction ohmique).
- Régime balistique si $a < l_e$. Dans ce cas le courant circule uniformément sur l'aire de contact.
- Régime quasi-balistique si $a \approx l_e$

Cette modélisation permet ainsi d'estimer la résistance contact. Pour obtenir des informations plus poussées comme l'influence du niveau de courant (avec par exemple l'auto-échauffement), il faut réaliser alors une simulation multi-physique pour extraire directement la valeur de la résistance de contact des simulations.

3.2.2.2 Mise en place des outils et méthodes

Les travaux réalisés ont porté tout d'abord sur la validation des outils de simulations disponibles au laboratoire (ANSYS et COMSOL). Les résultats ont montré notamment que le logiciel COMSOL (version 3.3) présentait des problèmes de convergence dès que plusieurs points de contacts étaient utilisés. Par contre le logiciel ANSYS a permis de simuler le contact de deux surfaces rugueuses de plusieurs dizaines de microns de côté avec une résolution du maillage de $0.23\mu\text{m}$.

Le premier problème rencontré pour réaliser la simulation du contact concerne la description des surfaces en présence. Les relevés topographiques tridimensionnels, obtenus par un relevé AFM, peuvent en effet avoir des résolutions sub-nanométriques. L'utilisation de l'ensemble de ces données génère des simulations qui nécessitent des moyens de calculs très importants. Plusieurs solutions permettent de contourner ce problème :

- La description statistique de la surface. La difficulté de cette approche se trouve dans l'extraction des bons paramètres statistiques et dans la détermination d'une distribution des hauteurs des aspérités adaptée. Le contact électrique est, de plus, généralement très localisé et la présence de quelques pics aléatoires (généralement observé dans les dépôts étudiés) peut

modifier considérablement le contact. Par ailleurs l'état de surface des matériaux en contact va également dépendre de l'historique de cyclage du dispositif. Ainsi une surface qui pourra apparaître initialement stochastique devra être traitée par une approche déterministe au bout de quelques cycles d'actionnement.

- La description déterministe en réduisant l'échelle de résolution du relevé topographique. C'est cette méthode que nous avons choisie. Nous avons montré qu'un pas de discrétisation de 10nm permettait de diminuer considérablement les temps de calcul (nombre d'éléments réduits d'un facteur 100 par rapport à un pas de 1nm) en commettant une erreur inférieure à 20% sur l'aire de contact. En régime ohmique, cette erreur se traduit par une erreur inférieure à 5% sur la résistance de contact car le courant est concentré en périphérie du spot de contact et la prise en compte des nano-aspérités à l'intérieur de ce spot ont peu d'influence. En régime balistique, l'erreur sur la résistance de contact sera identique à celle obtenue sur la surface de contact puisque le courant circule uniformément sur l'aire de contact.

Un autre moyen pour diminuer le nombre de données consiste à mailler finement uniquement la zone qui va réellement rentrer en contact. Typiquement la taille des relevés AFM est de $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ qui correspond à la dimension des plots de contact qui sont fabriqués. Mais les zones de contact vont se limiter à quelques zones de surface nettement inférieure à $0.1\mu\text{m}^2$ à cause de la présence de pics sur la surface. Ce sont ces zones les plus hautes qui sont plus finement maillées.

Pour réduire encore la complexité des simulations, il est possible de remplacer le contact de deux corps déformables par un corps rigide et un corps déformable en prenant le matériau déformable avec un module d'Young équivalent qui dépend des modules d'Young et du coefficient de Poisson des deux matériaux en contact. Nous avons montré que cette approximation n'était valable que pour un contact élastique. Pour un contact élasto-plastique, l'erreur commise sur la surface de contact peut être de l'ordre de 25%.

Enfin il est aussi possible de réduire le nombre de degrés de liberté du système en implémentant la rugosité sur une seule des surfaces en contact, la seconde étant considérée comme parfaitement lisse. Dans ce cas la rugosité équivalente de la surface rugueuse est obtenue en faisant la différence entre les profils des rugosités des deux surfaces. Ceci a été vérifié pour un contact élastique et un contact élasto-plastique, même si une légère erreur est introduite dans ce dernier cas.

3.2.2.3 Comparaison simulation/mesures

Des microstructures spécifiques ont été utilisées pour caractériser la résistance des microcontacts (cf. 3.2.3.2). La simulation a été réalisée avec une force de contact de $100\mu\text{N}$ et a permis d'estimer la résistance de contact entre $60\text{m}\Omega$ et $90\text{m}\Omega$. Les mesures électriques ont donné une valeur de résistance de 3.5Ω pour un courant appliqué de 1mA et une force de contact de $100\mu\text{N}$. Un certain nombre de pistes peuvent être avancées pour expliquer cette différence :

- La présence de résidus de couche sacrificielle. En effet la résistance de contact mesurée est relativement élevée par rapport aux valeurs généralement trouvées dans la littérature. Ces dernières sont en général comprises entre $80\text{m}\Omega$ et $200\text{m}\Omega$.
- La non prise en compte de la rugosité sous le pont dans la simulation ce qui a pour effet de minimiser la résistance simulée.
- La modification de la topographie de la surface lors des mesures. En effet la résistance n'est mesurée qu'après plusieurs cycles d'actionnement afin de minimiser les films contaminants. Mais cette modification de topographie a généralement pour effet de diminuer la résistance de contact puisque les aspérités sont écrasées et la surface de contact est ainsi augmentée.
- L'échauffement thermique, du au passage du courant, n'est pas pris en compte dans les simulations. Mais ceci a pour effet de maximiser les valeurs de résistance simulées.
- Le dépôt de contaminants d'épaisseur nanométrique qui sont présents dans l'atmosphère. En fonction des forces locales appliquées (notamment de cisaillement) et des échauffements, la surface effective de contact électrique peut être nettement inférieure à la surface de contact mécanique.

Une nouvelle campagne de simulations et mesures est en cours, à l'aide des micro-ponts actionnables par nano-indentation, pour finaliser la validation du modèle développé. Cette campagne d'étude est réalisée avec la démarche suivante :

- Les structures de tests sont tout d'abord cyclées pour minimiser les contaminations. Ces cyclages sont réalisés avec des forces et des courants nettement supérieurs à ceux qui seront utilisés pour mesurer la résistance de contact. Dans ce cas, on pourra considérer que la mesure de la résistance de contact modifie peu la topographie des surfaces.
- La topographie des surfaces (sur le plot de contact et sous le pont) sont ensuite relevées exactement sur l'échantillon qui a été testé après avoir arraché le pont.
- Les simulations sont réalisées plusieurs fois en décalant les points d'acquisition afin de minimiser les erreurs dues au pas de discrétisation choisi.
- Un nombre suffisant d'échantillons sera mesuré et simulé.

Afin de mieux simuler la réalité il sera également nécessaire de prendre en compte l'échauffement local lors du passage du courant en réalisant des simulations couplées électro-thermo-mécaniques. Outre les difficultés inhérentes à ce type de simulations couplées, la difficulté supplémentaire concerne les modèles de conduction disponibles dans le simulateur ANSYS utilisé qui ne prend en compte que le régime ohmique.

Une réflexion est également en cours pour réaliser des tests avec un AFM pour essayer d'identifier les zones qui participent réellement à la conduction par des mesures de résistivité de surface. L'AFM pourrait être également utilisé pour faire des mesures directes de résistance de contact à l'échelle d'une nano-aspérité en profitant également d'une ambiance très bien contrôlée.

3.2.3 Méthodologie de caractérisation

3.2.3.1 Introduction

La fiabilité du contact métal-métal dépend de sa capacité à supporter les dégradations apparaissant aux interfaces. Le banc de test doit donc permettre l'étude de la physique du microcontact afin de pouvoir identifier finement puis comprendre les mécanismes (mécaniques, électriques, chimiques) responsables de ces dégradations (topographiques, mécaniques, électriques). Pour atteindre ces objectifs, le banc de test doit répondre aux critères suivants :

- Utiliser des structures de tests dont les conditions de fabrication sont identiques ou très proches de celles utilisées pour les microcontacts.
- Reproduire le plus fidèlement possible les conditions réelles d'utilisation du microcontact : Force appliquée, conditions environnementales (température, humidité, ...), paramètres électriques (niveau de courant), cyclages.
- Etre capable de mesurer précisément ces différents paramètres ainsi que la résistance de contact.

L'ensemble de ces travaux fait l'objet de la thèse d'Adrien Broué en convention CIFRE avec la société NOVAMEMS. Le banc de test est développé sur le site du CNES qui a une convention de collaboration avec la société NOVAMEMS.

3.2.3.2 Description du banc et de la procédure de test

Le banc de test développé est basé sur :

- Un nano-indenteur qui permet d'appliquer une charge contrôlée ($\pm 1\text{nN}$) de faible valeur dans la gamme de celles utilisées dans les microcontacts ($< 500\mu\text{N}$). Cette charge est appliquée à l'aide d'une pointe sphérique de $5.9\mu\text{m}$ de rayon de courbure afin de minimiser l'indentation du

matériau et de répartir la contrainte. Le positionnement précis ($\pm 10\text{nm}$) de la charge appliquée est assuré par un relevé pseudo AFM de la structure de tests à l'aide de la pointe du nano-indenteur. Ce positionnement est assuré grâce à une table pilotée par un actionneur piézo-électrique.

- Une source de courant/tension de haute résolution qui permet de mesurer la résistance à $\pm 10\text{m}\Omega$.
- Une structure de test spécifique qui comprend : un micro-pont de raideur mécanique ($\approx 500\text{N/m}$) adaptée au nano-indenteur utilisé et une ligne métallique sous le pont. La méthode utilisée pour extraire la résistance de contact est basée sur les lignes croisées à 4 fils qui permettent de s'affranchir de toutes les résistances d'accès. Ainsi seule la résistance de contact entre le micro-pont et la ligne métallique est mesurée.

Les caractérisations sont réalisées dans une chambre environnementale dans laquelle la pression, la température et l'humidité peuvent être contrôlés.

Ce banc de test permet deux types d'analyses :

- La caractérisation mécanique de la structure : les informations recueillies permettent d'analyser en détail le comportement de la structure lors de l'actionnement mécanique. Le mode de déformation des aspérités sur la surface de contact (élastique, élasto-plastique ou plastique) peut être étudié. Ceci permet d'en déduire le nombre de micro aspérités en contact mécanique ou encore de caractériser le phénomène de fluage se déroulant à l'interface du contact. La résolution en déplacement du nano-indenteur est de $\pm 0.05\text{ nm}$.
- La caractérisation électrique de la structure : en faisant varier la tension (ou le courant) appliquée aux bornes du contact ainsi que la charge appliquée par la pointe sur la structure, on peut ainsi observer l'évolution de la résistance de contact.

La procédure de test utilisée est la suivante :

- Test de nano-indentation classique (analyse charge/déplacement) avec la charge maximale qui sera appliquée. Ce test est réalisé sur les ancrages du micro-pont afin de pouvoir soustraire la déformation du matériau.
- Pseudo test AFM pour localiser précisément le centre du micro-pont.
- Charge croissante appliquée au centre du pont. L'analyse charge/déplacement du pont avant contact permet de déterminer la raideur du pont. Cette donnée servira ensuite pour calculer la force de rappel mécanique du pont qui sera retranchée à la force appliquée par le nano-indenteur pour obtenir la force de contact.

- Cyclage avec une force maximale suffisante (typiquement $500\mu\text{N}$ à 1mN) et avec un courant suffisant (typiquement 100mA) afin de supprimer les films contaminants.
- Mesure de la résistance de contact pour des forces croissantes (typiquement entre $1\mu\text{N}$ et $150\mu\text{N}$ par pas de $1\mu\text{N}$) pour des courants croissants (typiquement compris entre 1mA et 100mA).

Un paramètre important est la température de contact définie comme étant la température au niveau des deux matériaux en contact. Lorsqu'un contact est traversé par un courant, l'augmentation de température (par rapport à la température ambiante) est proportionnelle (dans le cas d'un régime ohmique) à la racine carrée de la chute de tension aux bornes du contact. La mesure de cette chute de tension permet ainsi d'estimer cet échauffement au niveau du contact qui va modifier notamment les propriétés mécanique des matériaux.

3.2.3.3 Résultats

Les structures de tests utilisées ont été fabriquées par le LETI dans le cadre des projets SPRINT et ANR-FAME. Celles ci sont constituées par un micro-pont en or et une ligne métallique en or sur laquelle a été déposé un plot en silice fondue quasi-sphérique de $5\mu\text{m}$ de diamètre lui-même recouvert d'or. Ces structures ont permis d'étudier le contact [or-or] mais sont aussi utilisables pour étudier des contacts [or-autre matériau] en changeant la nature du matériau déposé sur le plot en silice.

Les premières campagnes de tests ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La résistance de contact décroît en augmentant la force de contact. Cette décroissance est d'autant plus faible que le courant est élevé.
- L'origine de cette décroissance est liée à l'augmentation de la surface réelle de contact. La déformation des aspérités est d'autant plus grande que la température de contact est proche de la température de ramollissement des matériaux en contact ($\approx 100^\circ\text{C}$ pour l'or). Cependant la variation de la résistance de contact est déterminée par la compétition entre deux phénomènes : l'écrasement des aspérités qui entraîne une augmentation de la surface de contact (une diminution de la résistance de contact) et l'augmentation de la température qui peut activer les mécanismes de dégradation (modification de la topographie par transport de matière notamment).
- Lorsque la température de contact atteint la température de ramollissement, la résistance de contact continue de diminuer avec l'augmentation du courant mais la température de contact reste quasiment constante.

De nouvelles campagnes de tests sont en cours avec un nombre plus important d'échantillons afin de confirmer les premières conclusions. D'autres matériaux de contact plus dur seront également étudiés comme le Ruthénium qui permet d'obtenir des contacts plus fiables.

3.3 PROPRIETES ELECTRIQUES

3.3.1 Chargement des diélectriques

3.3.1.1 Introduction

Après plus de dix années de recherches intensives dans la communauté internationale sur les micro-commutateurs RF à MEMS, il faut constater qu'à ce jour très peu de composants ont réussi à franchir le cap de l'industrialisation à cause généralement d'un problème de fiabilité. C'est pourquoi, depuis quelques années, un effort considérable est engagé dans le monde pour résoudre ces problèmes de fiabilité afin que ce type de composant, qui possède d'excellentes performances RF intrinsèques, ne reste pas éternellement un composant d'avenir.

Une défaillance majeure des micro-commutateurs RF à actionnement électrostatique concerne le chargement des diélectriques lorsqu'un fort champ électrique est appliqué à ses bornes (cf. 1.3.3.2). Cette défaillance concerne surtout les micro-commutateurs à contact capacitifs dans lesquels il est préférable d'appliquer la tension dans les zones où le contact aura lieu afin d'améliorer la qualité du contact.

Afin d'adresser efficacement ce problème, nous avons démarré rapidement, des collaborations avec des spécialistes des diélectriques : le Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse (faisant partie du LAPLACE maintenant) en 2004 (L. SEGUY, G TESSEYDRE, L. BOUDOU) et l'Université d'Athènes (NKUA) en 2005. A ce titre un professeur du NKUA (G.J. PAPAIONNOU) a travaillé au LAAS à mi-temps en tant que chercheur invité entre 2007 et 2010.

Une nouvelle collaboration a été lancée fin 2009 avec le « Nanoprobe Laboratory for Bio- & Nanotechnology and Biomimetics (NLBB) » du Pr BHUSHAN à l'Ohio State University (USA) afin d'investiguer les problèmes de nano-tribologie.

L'objectif de ces travaux est tout d'abord d'avoir à disposition un outil de caractérisation performant qui permet d'évaluer simplement le chargement des diélectriques dans des conditions proches des conditions réelles de fonctionnement. Puis cet outil permettra de travailler à l'élaboration de diélectriques aux propriétés optimisées.

Ces travaux sont réalisés dans le cadre des projets :

- Européen EDA-POLYNOE
- National ANR-PNANO FAME.
- Régional FITMEMS et SYMIAE.

Ces études ont fait l'objet de la thèse de

- Mohamed LAMHAMDI soutenue le 1 Juillet 2008.
- Usama ZAGHLOUL soutenue le 16 Septembre 2011.

3.3.1.2 Mécanismes de chargement des diélectriques

Un diélectrique parfait est, par définition, le cas idéal où aucune charge ne peut traverser le matériau. Dans la réalité, tout diélectrique est le siège de courants électriques plus ou moins importants lorsqu'il est soumis à des champs électriques suffisants. Un des paramètres importants qui caractérise la couche isolante est la densité de courant qui la traverse lorsqu'une tension continue est appliquée à ses bornes. Cette grandeur traduit la conductivité et/ou la capacité à se charger du matériau, qui est définie dans un premier temps par la nature physique et chimique du diélectrique. Ce dernier peut être le siège d'une grande variété de mécanisme de propagation des charges.

Chargement par polarisation.

Un matériau se polarise sous l'effet d'un champ électrique externe si les charges liées (c'est à dire les charges qui ne peuvent se déplacer librement dans le matériau) se déplacent sur des courtes distances ou s'orientent. L'origine de cette polarisation est différente selon la structure du matériau. La polarisation totale est la contribution de plusieurs mécanismes distincts dus à des types de charge différents, qui se mettent en place sur des gammes de fréquence différentes. Plus la fréquence sera élevée et moins les charges pourront suivre le champ appliqué. Ceci sera d'autant plus marqué que la masse de la particule chargée est grande. A chaque processus de polarisation correspond une constante de temps différente, encore appelée temps de relaxation du processus :

- Polarisation électronique : distorsion des couches électroniques par rapport au noyau atomique.
- Polarisation ionique : déplacement relatif des atomes les uns par rapport aux autres à l'intérieur même d'une molécule.
- Polarisation dipolaire : orientation des molécules dipolaires.

- Polarisation par charge d'espace : migration de charges sous l'effet du champ électrique externe qui se retrouvent piégées, ou limités dans leurs mouvements, par des potentiels chimiques ou électriques locaux.

Chargement par injection de charges

L'injection de charges a lieu lorsque le champ créé dans le volume du matériau, grâce aux charges déposées en surface, est suffisamment grand pour provoquer la pénétration d'au moins une partie de ces charges à l'intérieur de l'isolant par un mécanisme d'injection contrôlé par l'interface. Pour que cette injection se produise, les porteurs doivent acquérir un minimum d'énergie. Ce flux de porteurs sera soit contrôlé par des phénomènes d'interface électrode-diélectrique, soit par des phénomènes de volume au sein du diélectrique.

Plusieurs paramètres influencent le chargement des diélectriques : le champ électrique, la température, la nature des électrodes, la composition du diélectrique, l'environnement

3.3.1.3 Description des tests réalisés

Les diélectriques étudiés sont des diélectriques minéraux classiquement utilisés dans la filière technologique des micro-commutateurs RF développée au LAAS. Il s'agit de nitrure de silicium PECVD déposés à 200°C. Deux types de nitrure ont été étudiés ils ne diffèrent que par la fréquence d'excitation du plasma utilisée : une fréquence d'excitation basse (BF : 380kHz), une fréquence d'excitation haute (HF : 13.56MHz). Pour les nitrures HF, nous avons également étudié l'impact du ratio de débit des gaz (SiH_4/NH_3) et de la puissance RF sur le chargement.

L'analyse du chargement des diélectriques nécessite la réalisation de structures de tests. Plusieurs types de structures de tests sont disponibles et présentent chacune des avantages et des inconvénients :

Micro-commutateur RF

Le véhicule de tests le plus représentatif est bien sûr basé sur la réalisation d'un micro-commutateur RF. Le paramètre observé est ici le décalage de la tension d'actionnement du MEMS à travers la mesure du paramètre de transmission du signal RF. L'inconvénient majeur de cette structure est que le chargement du diélectrique dépend de la qualité du contact entre le MEMS et le diélectrique qui n'est pas très reproductible. Un autre inconvénient de cette structure est qu'elle ne permet pas de découpler complètement la partie mécanique de la partie électrique. En effet une modification des propriétés mécaniques du MEMS (fluage, ...) générera une modification de la raideur mécanique de la structure mais surtout de la hauteur du MEMS. Ces deux paramètres impactent directement la

tension d'actionnement du MEMS. Ce type d'étude est réalisé au LAAS mais elle est plus particulièrement suivie par d'autres chercheurs du laboratoire.

Capacité MIM

Il s'agit simplement d'une capacité métal/isolant/métal qui utilise les mêmes matériaux que ceux présents dans le MEMS. Les caractérisations consistent à relever les courants de charge et de décharge (DCT : Discharge Current Transient) de la capacité.

Les avantages de cette structure de tests sont les suivants : une grande simplicité de fabrication, un contrôle de la qualité du contact puisque celui-ci est parfait, une suppression des effets mécaniques. L'inconvénient majeur est que cette structure de test présente une configuration qui est très éloignée de la configuration réelle, notamment lors de la décharge puisque les deux électrodes de la capacité sont mises en court-circuit. Néanmoins elle permet d'étudier les qualités intrinsèques des diélectriques.

Nano-caractérisation électrique par AFM

La pointe de l'AFM, qui est métallisée, est tout d'abord amenée en contact avec le diélectrique à caractériser. Une tension connue est alors appliquée pendant un temps donné afin d'injecter des charges dans le diélectrique. Puis la tension est ramenée à zéro et la pointe AFM est ramenée à une distance de travail permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle des charges injectées. Les avantages de cette technique sont les suivants : des structures très simples à fabriquer puisqu'il suffit de réaliser le dépôt du diélectrique sur le métal considéré, un contact ponctuel lors du chargement qui est très proche du cas réel (contact localisé d'une aspérité), un contrôle des paramètres d'injection facile à maîtriser (tension, temps, qualité du contact), un déchargement très proche du cas réel en circuit ouvert. L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle nécessite un équipement de caractérisation complexe et difficile à maîtriser.

Il existe deux principaux modes de détection possible.

Dans le premier mode de détection (KFM : Kelvin Force Microcopy), la pointe AFM est amenée à une distance d'une vingtaine de nanomètres de la surface du diélectrique. Une excitation électrostatique sinusoïdale est ensuite appliquée entre la pointe et la surface à caractériser, qui génère une force électrostatique proportionnelle au carré de cette tension. L'asservissement est ici basé sur l'annulation de l'oscillation du micro-levier à la fréquence fondamentale à l'aide d'une tension continue appliquée sur la pointe. Cette tension continue donne une image du potentiel de la surface à caractériser. Dans ce mode l'excitation du bi-morphe piézoélectrique est désactivée.

Dans le second mode de détection (FDC : Force Distance Curve), la pointe de l'AFM est amenée en contact avec le diélectrique et la force d'adhésion est déterminée lors du retrait de la pointe. Les

charges injectées dans les diélectriques génèrent une force électrostatique qui modifie cette force d'adhésion. L'avantage de cette technique est qu'elle donne directement la force qui retient la pointe et peut être directement corrélée à la force de rappel appliquée à la microstructure mobile. Par ailleurs cette technique permet de séparer les forces de collage générées par la présence d'un film d'eau adsorbé à la surface du diélectrique et les forces électrostatiques, en réalisant des mesures avec et sans chargement. Elle permettra ainsi de mieux caractériser l'influence de l'environnement.

Une variante consiste à réaliser les caractérisations AFM non plus directement sur le diélectrique mais sur une capacité MIM. Ceci permet d'avoir un chargement uniforme sur toute la surface de la capacité, ce qui permet de s'affranchir des problèmes d'intégration du potentiel lors des mesures KPFM.

Ces travaux, qui ont débuté en 2007, ont nécessité une première phase d'apprentissage qui a demandé un important investissement en caractérisation. La maîtrise de cet outil est en effet délicate et nous avons montré que des précautions doivent être prises pour obtenir des résultats fiables et supprimer les artefacts de mesures :

- Maîtriser tous les paramètres de l'AFM : état de la pointe (la même pointe doit être utilisée pour pouvoir comparer les résultats), force de contact à l'injection, hauteur de la pointe lors de la mesure du potentiel de surface, ...
- Contrôler les conditions de stockage des échantillons : l'absorption d'humidité peut en effet modifier les propriétés de chargement des diélectriques.
- Maîtriser les conditions environnementales lors des mesures (hydrométrie notamment, température).

La fin de cette première phase s'est concrétisée par la soutenance de thèse de Mohamed Lamhamdi en Juillet 2008. La seconde phase des travaux a débuté dans le cadre de la thèse d'Usama Zaghloul en 2008. La première étape a consisté à améliorer la reproductibilité des conditions de mesure mais également à optimiser les paramètres utilisés :

- Automatisation de la procédure d'injection de charge afin de contrôler la force, le niveau, le temps et la localisation de l'injection. Une alimentation externe a été mise en place afin de pouvoir appliquer des tensions jusqu'à 100V.
- Automatisation de la phase de lecture. La décroissance du potentiel étant assez rapide dans certains cas au départ, il convenait de maîtriser la durée entre la fin de l'injection et le début de la lecture du potentiel.
- Préparation des échantillons en effectuant une phase d'étuvage.

- Maîtrise des conditions environnementales. L'AFM du LAAS ne disposant pas d'une enceinte en ambiance contrôlée, les mesures ont été réalisées au NLBB (USA) avec qui nous avons démarré une collaboration fin 2009. Les résultats AFM présentés par la suite sont issus des caractérisations effectuées par Usama Zaghoul dans ce laboratoire lors plusieurs stages.

Caractérisations physico-chimiques

Afin de pouvoir relier les caractérisations électriques des structures de tests aux propriétés intrinsèques des diélectriques, nous avons également étudié les propriétés physico-chimiques des diélectriques utilisés : rugosité, liaisons chimiques (par FTIR), stœchiométrie (par XPS).

Modélisation de la cinétique de déchargement

La cinétique de déchargement a été modélisée, avec toutes les techniques utilisées, par une équation exponentielle à puissance variable avec une excellente corrélation par rapport aux mesures. Le temps de relaxation des charges obtenus diffère notablement suivant la technique utilisée pour le suivi du déchargement. Pour la technique classique (DCT) les charges sont collectées par l'électrode supérieure de la capacité MIM et le temps de relaxation est donc inférieur. Pour les techniques AFM (KPFM et FDC), les charges sont collectées par l'électrode inférieure (comme dans le cas réel des MEMS) et le temps de relaxation est plus long.

3.3.1.4 Résultats obtenus

La densité de charge injectée et la constante de temps de relaxation de ces charges augmentent avec l'intensité du champ électrique, avec la durée d'injection et pour des tensions négatives (par rapport aux tensions positives). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur les études de fiabilité menées sur des micro-commutateurs à contact capacitif.

Pour un niveau de stress électrique identique (même champ électrique) appliqué sur un film de SiNx, la densité de charge injectée augmente avec l'épaisseur du diélectrique mais la constante de temps de relaxation reste comparable. Il est donc préférable d'utiliser une épaisseur de diélectrique la plus élevée possible pour limiter les problèmes de chargement dans les MEMS.

Le type de matériau présent sous le diélectrique a également un impact sur le chargement. Un dépôt sur du métal présente une densité de charge injectée plus élevée et une constante de temps de relaxation plus court que ceux obtenus avec un dépôt sur silicium. Nous avons montré que la stœchiométrie du diélectrique était identique dans les deux cas et ce comportement est attribué principalement à la présence d'une région de déplétion et d'état d'interfaces plus importants dans le

cas du silicium. Ceci explique les résultats obtenus dans la littérature concernant l'influence du chargement par le substrat en silicium dans les micro-commutateurs RF. Par contre peu d'effets significatifs ont été trouvés en fonction du type de métal (or évaporé, or électro-déposé, titane) présent sous le diélectrique ni en fonction de la rugosité du métal.

L'impact du rapport des gaz, de la puissance RF, de la fréquence RF (HF ou BF), de la température du substrat sur la cinétique de chargement/déchargement a également été analysé. Les paramètres les plus importants sont ceux qui modifient la stœchiométrie du dépôt de SiN_x (rapport du débit de gaz, fréquence RF). Plus le diélectrique est riche en silicium (débit de SiH₄/NH₃ élevé, SiN_x HF), plus la densité de charges et la constante de temps de relaxation sont faibles. Ceci est attribué à un courant de fuite plus important, à une concentration de défauts plus grande et un nombre plus important de pièges dans le diélectrique. L'écoulement des charges à travers le volume du diélectrique est donc augmenté ce qui donne une plus faible concentration de charges à la surface du diélectrique.

Le chargement de films de SiN_x a été étudié pour différentes conditions environnementales de tests. L'augmentation du niveau d'humidité (aussi bien sous air que sous azote) entraîne une augmentation de la densité de charge et une diminution de la constante de temps de relaxation (facteur 50 entre 3.5%RH et 10%RH). Ceci est attribué à la présence du film d'eau adsorbé à la surface. Celui-ci entraîne une augmentation de la quantité de charges injectées grâce à une plus forte conductivité électrique de surface et à un champ électrique moins confiné. La diminution du temps de relaxation est attribuée à la neutralisation plus rapide des charges par ce film d'eau. Ces résultats confirment les études reportées dans la littérature sur l'augmentation du chargement dans les micro-commutateurs RF lorsque le taux d'humidité augmente.

Nous avons montré également que l'azote était plus favorable que l'air pour réduire le chargement (densité de charge et temps de relaxation plus faible) dans les diélectriques, ce qui est confirmé par les études de fiabilité sur les micro-commutateurs RF de la littérature. Ceci peut être attribué aux propriétés différentes des deux gaz qui entraînent une modification de l'injection entre la pointe AFM et la surface et de la neutralisation des charges en surface.

Par ailleurs, l'utilisation de filtres (à oxygène ou à hydrocarbures), sur la ligne de gaz entraîne une diminution de la densité de charge et du temps de relaxation. Cet effet est plus prononcé pour l'air que pour l'azote. Le packaging des MEMS doit donc être très bien contrôlé pour minimiser le chargement des diélectriques.

Des études de nano-tribologie ont été menées grâce à la technique FDC.

Nous avons montré tout d'abord que les forces d'adhésion étaient prépondérantes devant les forces de friction.

S'il est bien connu que la présence d'humidité augmente les forces d'adhésion, nous avons mis en évidence que les forces d'adhésion augmentaient considérablement lorsqu'un champ électrique était couplé avec cette humidité. Ceci est lié à la formation d'un ménisque d'eau (entre la pointe de l'AFM et la surface du diélectrique), dont la hauteur augmente avec le champ électrique. La surface de contact s'en trouve donc augmentée. Ceci explique clairement l'importance de la suppression de toute présence d'humidité pour améliorer la fiabilité des MEMS. Le recuit des échantillons avant caractérisation permet de réduire considérablement ce phénomène en désorbant le film d'eau présent à la surface.

3.3.1.5 Conclusions

Ces travaux ont permis d'identifier les paramètres clés qui gouvernent le chargement des diélectriques grâce à une nouvelle méthodologie de caractérisation basée sur l'utilisation de l'AFM. Différentes techniques ont été développées (KPFM, FDC) aussi bien sur des films diélectriques que sur des capacités MIM et sur des MEMS et ont été comparées aux techniques classiques. Il apparaît clairement que ces nouvelles techniques apportent un nouvel éclairage sur l'étude du chargement des diélectriques et permettent de mieux appréhender la complexité des phénomènes tout en ne nécessitant pas de dispositifs complexes à fabriquer.

Un nouveau projet Régional (2011-2013) en collaboration avec le LAPLACE vient de démarrer. L'objectif de ce projet est de modéliser les différentes étapes du processus de chargement à l'aide de la pointe AFM :

- Chargement par la pointe en 3D qui tient compte des zones en contact et sans contact avec le diélectrique.
- Conduction en surface et en volume.

Ces modèles permettront à terme de prédire l'impact du chargement sur le comportement mécanique du MEMS.

En parallèle nous avons également engagé des travaux avec le LAPLACE sur des oxynitride de silicium obtenus par PECVD dans lesquels sont inclus des nano-cristaux de silicium. Le contrôle de la densité de ces nano-cristaux permet de contrôler la résistivité électrique de la couche diélectrique. L'objectif est de réaliser des diélectriques à gradient de résistivité afin d'optimiser l'évacuation des charges.

Suite à l'achat d'un nouvel AFM en ambiance contrôlée en 2011 au LAAS, l'ensemble des caractérisations AFM seront faites au LAAS.

3.3.2 Dérive thermique de la mobilité électrique dans les résistances en silicium

De très nombreux micro-capteurs utilisent l'effet piézorésistif dans des résistances électriques en silicium monocristallin pour mesurer la contrainte. Mais l'inconvénient principal du silicium est sa forte dépendance de la mobilité électronique avec la température, qui est également fonction du type de dopage (P ou N) et du niveau de dopage. Même si de nombreux dispositifs existent pour limiter l'impact de ces dérives thermiques, la connaissance de la dérive thermique de mobilité électrique est importante pour pouvoir modéliser finement le comportement thermique des capteurs.

Très peu de données expérimentales existent sur la dérive thermique de la mobilité électronique en fonction du dopage. Les données généralement utilisées ont été publiées par BULLIS en 1968 et ont été obtenues sur des substrats de silicium dopés in situ et amincis à 120 μ m. Les mesures ont été effectuées uniquement entre 0°C et 50°C et la dérive thermique a été approximée par un comportement linéaire. De nombreux modèles théoriques ont été développés entre 1980 et 2000 mais aucun ne permettent de modéliser avec précision les résultats expérimentaux obtenus par BULLIS en 1968.

Dans le cadre du projet ANR-TECSAN-CAPTAM nous avons entrepris le développement d'un capteur de pression à jauge de contrainte en silicium de type P en technologie SOI. Un modèle complet décrivant le comportement thermique du capteur a été mis en œuvre mais compte tenu du manque de fiabilité des modèles électriques de mobilité existant et de l'absence de données sur des substrats SOI, nous avons décidé de déterminer expérimentalement la dérive thermique de la mobilité.

Pour cela des résistances de 10 μ m x 100 μ m ont été réalisées sur des substrats SOI de 300nm d'épaisseur par implantation ionique de Bore, avec des dopages compris entre 2.10¹⁷at/cm³ et 2.10¹⁹at/cm³. Grâce à la faible épaisseur du SOI, nous avons obtenus des dopages quasi-uniformes (\pm 20% maximum) sur les 300nm d'épaisseur du SOI. L'impact de cette non uniformité sur la détermination de la dérive thermique de la mobilité a été estimé à \pm 20% dans le pire des cas (lorsque la dépendance avec le dopage est la plus forte).

Les résistances ont été mesurées sous pointes sur un support chauffant pour des températures comprises entre 0°C et 50°C par pas de 10°C. Plus de 25 échantillons de chaque niveau de dopage ont été mesurés. La dérive thermique de la résistance a été modélisée par un polynôme d'ordre 2.

Les résultats obtenus pour les coefficients thermiques de la mobilité au premier ordre sont assez proches de ceux obtenus par BULLIS et confirment que les modèles théoriques ne sont pas adaptés. Concernant les coefficients du second ordre, les valeurs expérimentales sont également très différentes des modèles théoriques (facteur 2 à 3 en général).

**CAPTEURS SANS FILS PASSIFS A
TRANSDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

1 INTRODUCTION

1.1 CAPTEURS SANS FIL

Depuis la fin des années 1990, l'« Intelligence Ambiante » (aussi appelée « Internet des Objets ») fait l'objet d'intenses recherches dans le monde avec l'objectif d'interconnecter de très nombreux objets intelligents comme des capteurs, des tags, des téléphones mobiles, ... [EPoSS-2008], [ATZORI-2010]. Ces nouveaux objets intelligents auront la possibilité de produire de l'information sur leur environnement et de les partager sur Internet grâce aux communications sans fil.

Dans ce contexte, les réseaux de capteurs sans fils apparaissent comme une technologie clé pour de très nombreuses applications domestiques, de santé, environnementales, industrielles, militaires, ...(bâtiment intelligent, surveillance des structures, qualité de l'air, traçabilité d'un produit, surveillance de données physiologiques, détection des incendies, instrumentation du fantassin,) [AKYILDIZ-2002], [RUIZ-2009], [SARDINI-2009], [ALEMDAR-2010].

La communication sans fil entre les capteurs et la station de base (ou lecteur) peut exploiter différents modes de propagation, comme les ondes acoustiques [UMBRECHT-2010], [BOUKABACHE-2011] ou optiques [O'TOOLE-2008]. Mais le plus souvent la communication utilise les ondes radiofréquences (quelques MHz à plusieurs dizaines de GHz) car la plupart des applications concernent une propagation dans l'air. Ce type d'onde permet en effet d'adresser des distances d'interrogation jusqu'à plusieurs kilomètres et est moins sensible aux obstacles que la liaison optique. Les solutions technologiques pour la réalisation des modules électroniques d'émission et de réception radiofréquences sont ainsi très développées. Il existe des gammes de fréquences non spécifiques pour les applications Industrielles, Scientifiques, Médicales et domestiques (ISM) pour lesquelles aucune autorisation particulière n'est demandée à partir du moment où la puissance utilisée respecte certaines normes.

Une problématique essentielle des capteurs sans fil concerne leur autonomie énergétique. Cette énergie sert d'une part au fonctionnement de la partie sensible du capteur (transducteur + circuits électroniques de conditionnement) et d'autre part à la communication entre le lecteur et le capteur. La durée de vie du capteur dépendra donc de la quantité d'énergie disponible et de la consommation des différentes parties du capteur.

1.2 CAPTEUR ACTIF / PASSIF

Au début des années 2000, la disponibilité de capteurs MEMS et de modules de communication à faible consommation et de faible dimension ainsi que de batteries miniatures performantes et de

protocoles de communications standard (Zigbee, Bluetooth) a ouvert la voie au développement de capteurs « actifs » sans fils [AKYILDIZ-2002]. La terminologie « actif » fait ici référence à la présence, dans le capteur, d'un module d'émission qui lui permet de communiquer avec le lecteur. Dans ce type de capteurs la majeure partie de la consommation est liée au module de communication (dans le cas où la consommation du transducteur peut être négligée).

Depuis, cette approche s'est beaucoup développée et de nombreux produits sont disponibles actuellement sur la marché [RUHANEN-2008]. L'autonomie de ces capteurs « actifs » dépendra de la distance d'interrogation et du débit d'information au regard de la quantité d'énergie disponible. En fonction de ces paramètres des distances d'interrogation d'une centaine de mètres ou plus peuvent être obtenues avec des durées de vie de plusieurs années. En 2009, la start up Française « SIGFOX Wireless » a annoncé la mise sur le marché d'une puce radio fonctionnant à 433MHz avec des portées de 50 km en zone rurale (3km en zone urbaine) et une durée de vie de plusieurs années pour un débit de 100b/s. Ceci est rendu possible grâce à l'excellente limite de détection du lecteur, de -140dBm (-153dBm) pour des débits de 100b/s (10b/s).

La durée de vie étant limitée par la quantité d'énergie présente dans la batterie, d'importants efforts de recherche ont été entrepris dans le monde depuis le début des années 2000 sur la récupération d'énergie (solaire, mécanique, électromagnétique, thermique, biologique, ..) [HARB-2011], sur des unités de stockage haute capacité [PECH-2011] et sur de nouvelles micro-source d'énergie performantes (électrochimiques, nucléaires, thermoélectrique, thermo-ionique, ...) [ROSSI-2011].

On peut trouver bien sûr toute une gamme de capteurs « actifs » avec ou sans batteries, avec ou sans récupération d'énergie. Les capteurs « actifs » les plus utilisés aujourd'hui concernent des capteurs avec batterie pour les grandes distances d'interrogation (10m à 100m ou plus).

En parallèle, à partir du milieu des années 1990 les technologies RFID (Radio Frequency IDentification) se sont développées [SCHNEIDERMAN-1994]. Initialement utilisées pour de l'identification, elles servent également aujourd'hui à la réalisation de capteurs sans fils « passifs » grâce à l'intégration de capteurs MEMS [SANCHEZ-2011]. La terminologie « passif » fait ici référence à l'absence, dans le capteur, d'un module d'émission. La communication entre le capteur et le lecteur est alors assurée en modulant la charge connectée à l'antenne du capteur.

Pour les basses fréquences (en général $< 30\text{MHz}$), on parle alors de couplage inductif. Le capteur est alors le plus souvent constitué d'une capacité variable aux bornes d'une antenne, réalisant ainsi un circuit résonant LC. La variation de la capacité du capteur entraîne alors une variation analogique de l'impédance qui est détectée par lecteur. L'alimentation électrique du capteur est aussi assurée par le couplage inductif.

Le principal défaut de ce type de capteur concerne la très faible distance d'interrogation (< 10cm) et la grande taille des antennes (plusieurs centimètres de diamètre) [BUTLER-2002], [FONSECA-2002], [JIA-2006], [LOH-2007], [WANG-2008], [CHEN-2010].

Pour les plus hautes fréquences, on parle de rétro diffusion (ou back scattering en anglais). Les données du capteur sont alors stockées sous forme numérique dans un microcontrôleur et cette suite de signaux binaires sert à moduler l'impédance de charge de l'antenne du capteur entre deux états qui correspondent à un signal rétrodiffusé maximal et minimal reçu par le lecteur. Chaque capteur est également identifié par un numéro pouvant être codé sur 96 bits, ce qui permet la réalisation de réseaux de capteurs.

L'alimentation électrique du capteur (transducteur, circuits électroniques) est assurée par télé-alimentation à l'aide de l'onde RF. Les bandes de fréquence utilisées sont centrées autour de 868MHz, 2.45GHz et 5.8GHz.

L'avantage principal de cette technologie est qu'elle permet de supprimer la batterie grâce à la télé-alimentation par onde RF. Contrairement aux capteurs « actifs » sans batteries dont la distance d'interrogation est inférieure à 1m, les capteurs « passifs » peuvent être interrogés sur des distances plus grandes mais généralement inférieures à 5 mètres. Cette limitation est liée à la puissance reçue pour alimenter les circuits électroniques du capteur et non par le niveau de signal rétrodiffusé reçu par le lecteur [GRIFFIN-2009]. Cette remarque est bien sûr valable pour des transducteurs dont la consommation peut être négligée devant celle des circuits électroniques. Ces capteurs « passifs » télé alimentés sont ainsi moins encombrants et plus légers, tout en ne souffrant pas de problèmes d'autonomie énergétique.

Il existe également des capteurs passifs télé-alimentés avec de petites batteries pour alimenter les circuits électroniques et qui permettent d'augmenter la distance d'interrogation mais au détriment de l'encombrement et de l'autonomie.

En 2008 la société MOJIX annonçait par ailleurs la sortie d'un module RFID passif télé alimenté autorisant des distances d'interrogation de 180m. Ce module est commercialisé pour le moment pour des applications d'identification seulement (sans capteurs au sens strict) mais il montre que des progrès rapides sont effectués dans le domaine de modules électroniques RF.

1.3 CAPTEUR PASSIF A ONDES ACOUSTIQUES

Comme nous l'avons vu précédemment, les capteurs passifs à rétro diffusion sont constitués de capteurs à MEMS et de circuits électroniques (microcontrôleur, circuits de conversion AC/DC, ..). Ils sont donc relativement complexes à fabriquer et présentent aussi l'inconvénient d'être non compatibles avec les environnements sévères (haute température [PEREIRA-2011], radiations, ..). Afin de remédier à ces limitations, des capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) ont été

développés à partir du début des années 1990 [SEIFERT-1994], [POHL-2000]. Bien connus depuis le début des années 1960, les dispositifs à onde de surface ont été étudiés au départ pour des applications électroniques (filtre, résonateurs, ..).

Le principe de fonctionnement de ces capteurs est basé sur la génération d'une onde acoustique à la surface d'un matériau piézoélectrique grâce à des électrodes métalliques inter digitées polarisées par une onde électromagnétique à travers une antenne. La période inter-électrode doit être égale à la moitié de la longueur d'onde guidée dans le matériau piézoélectrique afin d'assurer le maximum de transfert en puissance. Le transducteur piézoélectrique est alors constitué par une ligne à retard ou un résonateur. La vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le matériau piézo-électrique étant dépendante de plusieurs facteurs (contrainte, température,), le signal retro diffusé vers le lecteur peut être alors analysé de manière temporelle ou fréquentielle pour extraire l'information désirée.

Le Tableau 1 et le Tableau 2 donnent respectivement un aperçu des différentes propriétés des matériaux piézoélectriques ainsi que leur sensibilité à différentes sollicitations.

Matériau	Vitesse onde acoustique V (m/s)	Coefficient de couplage transverse entre onde EM et acoustique	Dérive thermique de V (ppm/°C)	Permittivité relative	Module Young E (GPa)	Densité volumique (kg.m ³)
Quartz	5092	0.1% (-30dB)	0	5	90	2650
LiNbO3	3980	5.5% (-12.6dB)	75	30 à 90	180	4650
LiTaO3	3300	6.6% (-11.8dB)	30	30 à 50	200	7450

Tableau 1 : Propriétés typiques des matériaux piézoélectriques utilisés pour les capteurs SAW [FINKENZELLER-2003] page155

	Température	Pression, contrainte	Force	Masse	Tension
Sensibilité	Jusqu'à 100ppm/°C	2ppm/kPa	10ppm/kN	30ppm/μg.cm ²	1ppm/V

Tableau 2 : Sensibilité typique de la vitesse de propagation des ondes acoustiques à différents paramètres [POHL-2000]

Profitant des progrès dans le domaine des micro-technologies, ces capteurs ont pu progressivement exploiter des fréquences de fonctionnement de plus en plus élevées (cf Tableau 3) qui permettent notamment une réduction de la taille des antennes. En parallèle le développement des technologies RFID a permis d'obtenir des circuits d'interrogation de plus en plus performants qui autorisent une distance d'interrogation de plus en plus grande.

Fréquence (MHz)	138	433	2444	5800
Période inter-électrode (µm)	14.5	4.7	0.8	0.3

Tableau 3 : Période inter-électrodes des capteurs SAW

(Pour une vitesse de propagation typique de l'onde acoustique dans le matériau piézoélectrique égale à 4000m/s)

Ainsi de très nombreux capteurs SAW ont été étudiés (température : [WEN-2004] [STELZER-2008] [DOWLING-2009] [BARTON-2010] [FRIEDT-2011] [LI-2011], contrainte : [KALININ-2004] [KONNO-2007], pression : [SCHIMETTA-2000] [DIXON-2006] [TOURETTE-2010] [YE-2011], gaz, gyroscope, biocapteurs, ..). Des études récentes ont également montrées les potentialités des capteurs SAW sur de nouveaux matériaux piézoélectriques (GaPO₄, La₃Ga₅SiO₁₄) pour les très hautes températures (>>500°C) [PEREIRA-2011]. Confirmation de la maturité de cette technologie, plusieurs compagnies commercialisent aujourd'hui ce type de produits (Environetix aux USA, Transense Technologies au Royaume Uni, SENSEOr en France, ...).

La distance d'interrogation de ce type de capteur est généralement deux fois plus grande que celle des autres capteurs passifs autoalimentés de type RFID, grâce à la suppression (dans le capteur) des circuits électroniques et des transducteurs qui consomment de l'énergie [KALININ-2005], [DROIT-2010], [FRIEDT-2010].

La majorité de ces capteurs utilisent la fréquence de 433MHz car les pertes en espace libre sont plus faibles qu'à 2.44GHz et 5.8GHz. Néanmoins devant la faible largeur de bande disponible (29MHz à 433MHz) et la longueur d'onde guidée (onde électromagnétique) assez grande ($\lambda = 40\text{cm}$ sur du quartz à 433MHz), de plus en plus de capteurs sont conçus pour fonctionner à 2.44GHz (Tableau 5). L'utilisation de cette fréquence permet en effet d'obtenir une bande plus importante (83MHz) et de diminuer la taille des antennes (ou d'obtenir des gains d'antenne plus importants). L'augmentation des pertes sera compensée par l'augmentation des puissances utilisables (pour les applications RFID) et des gains des antennes (directivité plus grande, dimension optimisée des antennes). Une étude détaillée du bilan de liaison a été menée par Griffin en 2009 pour des interrogations de RFID à rétro diffusion [GRIFFIN-2009]. Il a montré, par modélisation, que la distance d'interrogation pouvait être multipliée par 4 en passant de 915MHz à 5.8GHz, en gardant constante la surface des antennes (cf. Tableau 4). La majorité du gain se fait sur les antennes mais une part non négligeable est liée à la réduction des pertes par interférences. Il est ainsi possible, en augmentant la fréquence, d'augmenter la distance d'interrogation tout en diminuant la taille des antennes.

Support	Pertes espace libre	Antenne Capteur	Antenne Lecteur	Interférences	Total
Diélectrique	-32.1	16.4	32.9	7.1	24.4

Tableau 4 : Gain en dB sur le bilan de liaison entre 915MHz et 5.8GHz [GRIFFIN-2009]

Depuis quelques années des travaux sont effectués sur des capteurs à ondes acoustiques de volume (BAW) [BARON-2010], [BALLANDRAS-2011]. Les résonateurs à ondes de volume sont basés sur l'excitation d'une onde acoustique dans un film piézoélectrique pris entre deux électrodes métalliques. Ces dispositifs ont vu le jour à la fin des années 1990 pour des applications de filtrage grâce aux progrès réalisés dans le dépôt de couches minces piézoélectriques. Malgré le succès des ces dispositifs pour ces applications, peu de travaux ont été réalisés pour des applications capteurs à cause de la qualité des couches piézoélectriques obtenues. Récemment, les techniques de soudure moléculaire à température ambiante ont permis de reporter un substrat massif de LiNbO₃ sur du quartz puis de l'amincir à 6µm par polissage [PIJOLAT-2010] ou à des épaisseurs largement submicroniques par le procédé « smart-cut » [MOULET-2008], permettant d'adresser la fréquence de 433MHz ou 2.44GHz. La couche de LiNbO₃ permet d'obtenir un bon couplage (40% environ) entre l'onde électromagnétique et l'onde acoustique. Le couplage avec le substrat en quartz se fait ensuite par des modes d'ordre supérieur. Le coefficient de couplage total effectif est alors compris entre 0.2% et 0.5%, ce qui est plus important que le quartz (0.1% théorique, 0.05% effectif). Les avantages d'un capteur BAW par rapport à un capteur SAW sont : une surface plus petite mais surtout un coefficient de qualité plus important (30 000 au lieu de 10 000) qui permet d'améliorer l'interrogation en mode impulsif. La sensibilité à la contrainte est également 50 fois plus grande pour les capteurs BAW [BENES-1998].

1.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS SANS FIL

Le Tableau 5 donne les gammes de fréquences utilisables en France pour les applications ISM et qui pourraient être possibles pour les capteurs passifs. Les valeurs sont données à titre illustratif car les réglementations dans ce secteur peuvent évoluer rapidement. La puissance maximale autorisée est une puissance équivalente à celle d'une antenne de référence isotrope. L'acronyme employé EIRP fait référence à «Equivalent Isotrope Radiated Power» (ou PIRE en Français pour «Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente»). L'unité employée est parfois le ERP (Equivalent Radiated Power ou PER en Français et fait référence à antenne dipôle $\lambda/2$ (EIRP = 1.64 ERP).

Bande	Pmax EIRP	Equipement
433.050 à 434.790 MHz ($\pm 0.2\%$)	16.4 mW (12.1dBm)	Non spécifique
863.000 à 869.200 MHz ($\pm 0.35\%$)	41 mW (16.1dBm)	Non spécifique
865.000 à 868.000 MHz ($\pm 0.17\%$) 865.600 à 868.000 MHz ($\pm 0.14\%$) 865.600 à 867.600 MHz ($\pm 0.11\%$)	164 mW (22.1dBm) 820 mW (29.1dBm) 3820 mW (35.8dBm)	RFID
2.400 à 2.4835 GHz ($\pm 1.71\%$)	10 mW (10dBm)	Non spécifique
2.446 à 2.454 GHz ($\pm 0.16\%$)	500 mW (27dBm)	RFID
5.725 à 5.875 GHz ($\pm 1.29\%$)	25 mW (14dBm)	Non spécifique
24.000 à 24.100 GHz ($\pm 0.41\%$) 24.150 à 24.250 GHz ($\pm 0.41\%$)	100 mW (20dBm)	Non spécifique
61 à 61.5 GHz ($\pm 1.25\%$)	100 mW (20dBm)	Non spécifique

Tableau 5 : Normes d'utilisation des fréquences ISM entre 433MHz et 24.125GHz

(Agence Nationale des Fréquences – Arrêté du 4 Oct 2011)

(Annexe 7 : Fréquences utilisables pour certains matériels de faible puissance et de faible portée)

Le Tableau 6 résume les caractéristiques des principaux types de capteurs sans fil passifs et actifs. Comme nous l'avons déjà explicité, le terme actif fait référence à la présence d'un module d'émission dans le capteur qui consomme donc une énergie importante. Ce type de capteur est donc généralement doté d'une batterie (cas analysé dans tableau).

Par opposition, le terme passif fait référence à l'absence de module d'émission dans le capteur. Ainsi, grâce à sa plus faible consommation, ce type de capteur est le plus souvent utilisé sans batterie et est télé-alimenté par l'onde RF. C'est pourquoi, par abus de langage, le terme actif/passif est souvent employé en référence à la présence ou non de batterie.

La distance d'interrogation dépendra également des normes concernant la puissance d'émission qui varient suivant le pays, la fréquence, les applications et les pays et qui évoluent par ailleurs très rapidement. Ces distances sont donc données à titre indicatif.

On peut noter que, de manière simplifiée, les capteurs actifs sont plutôt destinés aux grandes distances d'interrogation. La présence d'une source d'énergie embarquée leur permet également d'intégrer de l'intelligence (mémoire, traitement de l'information, ...) et rend ainsi ces capteurs très intéressants pour la mise en place de réseaux distribués de grande envergure. Bien sûr tous ces avantages se font au détriment de leur autonomie énergétique. C'est pourquoi de nombreuses recherches se concentrent aujourd'hui sur ce point. Mais la présence de tous ces modules électroniques limite aussi leur utilisation dans les environnements très sévères.

Compte tenu des standards mis en place, ces capteurs peuvent être utilisés dans de très nombreuses applications. En effet cela permet l'intégration de modules électroniques et de transducteurs à MEMS variés.

A l'opposé, les capteurs passifs sont plutôt destinés à de plus faibles distances d'interrogation car ils ne possèdent pas d'énergie embarquée. L'énergie nécessaire au fonctionnement du capteur est ainsi assurée par la liaison RF. Leur principal avantage concerne donc une autonomie uniquement limitée par la durée de vie du capteur. Deux types de couplages sont utilisés pour réaliser l'échange d'information entre le capteur et le lecteur.

Le couplage inductif est limité à des distances d'interrogation très faible (<10cm) et ne concerne donc que peu d'applications. L'encombrement est assez important compte tenu de la taille des antennes utilisées à ces fréquences (en général < 30MHz).

Le couplage par réflexion de l'onde incidente permet d'atteindre des distances d'interrogation très intéressantes pour de nombreuses applications. Il faut ici distinguer deux types de capteurs.

Les premiers, de type RFID, comportent des circuits électroniques et sont couplés à des transducteurs à MEMS. Ces capteurs profitent de la disponibilité de transducteurs variés et de modules électroniques qui permettent d'intégrer un certain niveau d'intelligence. Néanmoins, la puissance disponible plus faible limite la complexité et la variété des circuits électroniques et des transducteurs intégrables. Comme pour les capteurs actifs, la présence de tous ces modules électroniques limite aussi leur utilisation dans les environnements très sévères. La distance d'interrogation de ces capteurs (sans batterie) est en général inférieure à 10m.

Le second type de capteur, à ondes acoustiques, ne comporte pas de circuits électroniques ni de transducteurs à MEMS. Ils sont uniquement constitués d'un substrat piézoélectrique et d'électrodes de polarisation. Cette simplicité de fabrication les rend naturellement intéressants. Toute l'intelligence de ces dispositifs étant reportée au niveau du lecteur. Il est alors possible de garder le même capteur tout en faisant évoluer les performances du lecteur. Le capteur devient ainsi indépendant des évolutions techniques et des réglementations (dans la mesure où la gamme de fréquence est toujours disponible). Leur distance d'interrogation est généralement inférieure à 10m, ce qui est comparable aux capteurs RFID avec batteries. Toutes ces qualités confèrent à ce type de capteurs des avantages indéniables notamment pour les environnements sévères. Revers de cette simplicité, les applications adressables sont beaucoup moins importantes que pour les autres types de capteurs.

	Distance interrogation	Encombrement	Autonomie	Environnement sévère	Durée vie	Applications
Capteur actif	>100m (qq km)	-	---	---	--	+++
Capteur passif à couplage inductif	< 10 cm	-- (antenne)	++++	-	+	-
Capteur passif à retro diffusion avec circuits électroniques	< 5 m	++	++++	--	+	++
Capteur passif à retro diffusion sans circuits électroniques à ondes acoustiques	< 10 m	+++	++++	+++	+++	+

Tableau 6 : Caractéristiques des principaux types de capteurs sans fil
Actif : avec module émission et avec batterie, *Passifs* : sans module émission et sans batterie

2 CAPTEURS SANS FIL PASSIFS A TRANSDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

2.1 INTRODUCTION

Comme nous venons de le voir, les capteurs sans fil passifs à retro diffusion et sans circuits électroniques basés sur des dispositifs à ondes de surface présentent des caractéristiques très intéressantes malgré des limitations quand aux applications adressables. Mais un des inconvénients propre à ce type de capteurs est le faible coefficient de couplage entre l'onde électromagnétique et l'onde acoustique. Compte tenu de la double conversion électromagnétique-acoustique-électromagnétique nécessaire pour interroger le capteur, une partie importante de la puissance est ainsi perdue lors de ces conversions.

Une solution consiste à remplacer le résonateur acoustique par un dispositif résonant électromagnétique, supprimant ainsi la conversion électromagnétique-acoustique-électromagnétique. Ce nouveau type capteur permet ainsi de garder en principe la majeure partie des avantages des capteurs passifs à onde acoustique (autonomie illimitée, tenue aux environnements sévères, complexité reportée au niveau du lecteur), tout en augmentant la distance d'interrogation. La puissance reçue par le lecteur étant inversement proportionnelle à la distance à la puissance 4, il est possible de calculer le gain potentiel en termes de distance d'interrogation par rapport à différents capteurs à ondes acoustiques. Les calculs ont été réalisés pour une fréquence de fonctionnement constante (2.44 GHz par exemple) et des gains d'antennes identiques (Tableau 7). Le gain potentiel est compris entre un facteur 1.6 et 31 en fonction des différentes technologies à

onde de surface utilisées. Compte tenu des gains possibles en augmentant la fréquence de fonctionnement ([GRIFFIN-2009]), un facteur 2 supplémentaire sur la distance d'interrogation peut être envisagé en passant à 5.8GHz. Néanmoins un bilan de liaison complet doit être réalisé pour confirmer le gain réel en termes de distance d'interrogation, notamment pour des fréquences plus élevées de 24.125GHz.

Un autre avantage des transducteurs électromagnétique concerne la plus grande latitude quand aux choix des matériaux qui doivent seulement présenter de faibles pertes diélectriques. Enfin le type de structure peut être beaucoup complexe (intégrant des MEMS, des liquides, ...) ouvrant ainsi la voie à des applications plus variées.

	SAW sur quartz	SAW sur LiNbO3	SAW sur LiTaO3	BAW sur LiNbO3
Pertes de conversion EM-Ac-EM	60dB	25.2dB	23.6dB	8dB
Gain sur la distance d'interrogation	x 31.6	x 4.3	x 3.9	x 1.6

Tableau 7 : Gain potentiel sur la distance d'interrogation en supprimant les pertes de conversion -acoustique-électromagnétique.

Le principe de fonctionnement d'un capteur passif à transduction électromagnétique est basé sur la modification de la fréquence de résonance d'un dispositif résonant électromagnétique par la grandeur à mesurer. Ce type de dispositif résonant est déjà très développé pour les ondes RF (qq centaine de MHz à qq dizaine de GHz) grâce notamment aux applications en télécommunication. Il existe ainsi de très nombreux concepts disponibles surfaciques ou volumiques (cavités résonantes, résonateurs diélectriques, résonateurs planaires, ...). Le choix du concept dépendra notamment de l'application visée (grandeur à mesurer, précision, encombrement, ...).

2.2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Un bref historique des travaux publiés est présenté dans ce qui suit (Tableau 8). Des informations plus détaillées seront données par la suite pour les différents types de capteurs qui font l'objet de ce mémoire.

La première publication trouvée sur un capteur autonome, datée de 1998, concerne un capteur d'humidité et provient de l'Université de Pune en Inde [YOGI-1998]. Le capteur est basé sur la variation de permittivité d'un substrat sur lequel est imprimé un résonateur en anneau.

Le second type de capteur étudié concerne un capteur de gaz et provient de l'Université de Californie [MCGRATH-2004]. Le capteur est basé sur un résonateur diélectrique (recouvert de nano-tubes de carbone) dont la fréquence de résonance (autour de 5GHz) varie par modification de la permittivité de la couche de nano-tubes de carbone suite à l'absorption de gaz. D'autres principes ont été publiés par la suite :

- en 2007, la modification de la permittivité d'un diélectrique utilisé dans un câble coaxial par l'Institut Carnot de Bourgogne [JOUHANNAUD-2007].
- en 2008, le couplage entre une onde électromagnétique et des plasmons de surface générés sur une surface recouverte de nanotubes de carbone, par le Georgia Institute of Technology [THAI-2008].
- en 2009, le couplage entre un résonateur diélectrique excité en mode de galeries et une ligne coplanaire, par le LAAS [HALLIL-2009].
- en 2009, la variation d'impédance d'un tissu tressé à base de fils de nanotubes de carbone, par le Georgia Institute of Technology [THAI-2009-2].
- en 2011, une antenne patch chargée par un stub dont une partie est constituée par une résistance en nanotube de carbone, par le Georgia Institute of Technology [LEE-2011].

Le troisième type de capteur étudié concerne un capteur de contrainte et provient de l'Université de Manitoba au Canada [CHUANG-2005]. Le capteur est basé sur un résonateur volumique métallique à 2.45GHz et sert à la mesure de contraintes. D'autres principes seront publiés par la suite pour la mesure de la contrainte :

- en 2009, une inductance spirale couplée au substrat par une capacité variable à travers la modification de la surface par l'Université de Bilkent en Turquie [MELIK-2009].
- en 2009, une antenne patch dont la longueur change par l'Université de Manitoba au Canada [TATA-2009]. Ce type de dispositif sera repris en 2010 par l'Université RMIT en Australie [DALIRI-2010].
- en 2011 une capacité localisée variable insérée dans un résonateur planaire couplé par le LAAS [THAI-2011].
- en 2011, une structure résonante à base de méta-matériaux dans laquelle il existe un couplage capacitif variable par l'Université Technique de Darmstadt en Allemagne [MANDEL-2011].

Dès Février 2005, j'ai démarré au LAAS un nouvel axe de Recherches sur ces capteurs passifs par l'étude d'un capteur de pression. Ces travaux se font depuis en collaboration avec Hervé AUBERT (spécialiste en électromagnétisme) qui codirige aujourd'hui cet activité. Ce capteur était basé sur le couplage entre un résonateur planaire et une membrane en silicium et les premiers résultats ont été publiés en 2007 [JATLAOUI-2007]. D'autres principes ont été publiés par la suite :

- en 2009, 2 patchs superposés couplé une capacité variable, par Georgia Institute of Technology aux USA [THAI-2009].
- en 2011, une antenne dipôle sur membrane dont la longueur varie, par l'Université de Glasgow au Royaume Uni [IBRAHIM-2011].
- en 2011, une cavité métallique couplée avec un résonateur en anneau (Split Ring Resonator) déposé sur une membrane de PDMS, par l'Université de Floride aux USA [SENIOR-2011].

Les premiers travaux trouvés sur des capteurs de température ont été publiés en 2007 par l'Université de Perdue (USA) [MAHMOOD-2007]. Le capteur est basé sur le couplage capacitif entre le pilier central d'un résonateur volumique et un réseau de bilames inter-digités. D'autres principes ont été publiés par la suite :

- en 2009, une antenne à fente chargée par un réseau de bilames inter-digités, par l'Université de Perdue aux USA [SCOTT-2009].
- en 2010, un résonateur planaire couplé localement à une capacité variable réalisée à partir d'un bilame, par le LAAS [THAI-2010].
- en 2011, une capacité RF inter-digitée sur un substrat de BST dont la permittivité varie avec la température, par l'Université Technique de Darmstadt [MANDEL-2011-2].
- en 2011, un réseau d'antenne dipôle dont les 2 brins sont progressivement court-circuités suite à la dilation d'un fluide conducteur, par le LAAS [TRAILLE-2011].

Dès 2008, des travaux ont également été publiés par le Georgia Institute of Technology sur des capteurs de flux pour lesquels la déformation d'une membrane modifie le couplage capacitif avec un résonateur volumique [ZHAO-2008].

Les premiers travaux trouvés dans la littérature sur les capteurs de fissure datent de 2009 et ont été réalisés par l'Institut Technologique de Tokyo au Japon [MATSUZAKI-2009]. Le principe est basé sur la modification de la longueur des brins d'une antenne dipôle. Un concept similaire, basé sur la modification de la répartition du courant dans une antenne patch, a été présenté à partir de 2010 par l'Université d'Arlington aux USA [MOHAMMAD-2010], [XU-2011], [MOHAMMAD-2012].

Année	Référence	Laboratoire	Type capteur	Principe de variation
1998	[YOGI-1998]	Pune Univ. - Inde	Humidité	ϵ_{eff} résonateur planaire en anneau
2004	[MCGRATH-2004]	California Univ. - USA	Gaz	ϵ_{eff} résonateur diélectrique recouvert de NTC
2005	[CHUANG-2005]	Manitoba Univ. - Canada	Contrainte	Longueur cavité cylindrique
2007	[JATLAOUI-2007].	LAAS - France	Pression	Couplage résonateur planaire avec membrane Si
2007	[JOUHANNAUD-2007]	Inst. Carnot Bourgogne - France	Gaz	ϵ_{eff} câble coaxial
2007	[MAHMOOD-2007]	Purdue University - USA	T°	Capacité couplage cavité volumique avec bilames
2008	[ZHAO-2008]	Georgia Inst. of Tech. - USA	Flux	Capacité couplage cavité volumique avec membrane
2009	[MELIK-2009]	Bilkent Univ. -Turquie	Contrainte	Capacité surfacique dans inductance spirale
2009	[SCOTT-2009]	Purdue University - USA	T°	Capacité couplage antenne à fente chargée par bilames
2009	[THAI-2009]	Georgia Inst. of Tech. - USA	Pression	Capacité couplage entre 2 patchs
2009	[HALLIL-2009]	LAAS - France	Gaz	ϵ_{eff} résonateur diélectrique
2009	[THAI-2009-2]	Georgia Inst. of Tech. - USA	Gaz	Impédance d'un tissu tressé à base de fils de nanotubes de carbone
2009	[MATSUZAKI-2009]	Tokyo Inst. Tech. - Japon	Fissure	Longueur antenne dipôle
2009	[TATA-2009]	Manitoba Univ. - Canada	Contrainte	Longueur antenne patch
2010	[THAI-2010]	LAAS – France	T°	Capacité couplage localisée dans résonateur planaire
2011	[MANDEL-2011]	Darmstadt Univ. Tech.	Contrainte	Capacité couplage méta-matériaux
2011	[MANDEL-2011-2]	Darmstadt Univ. Tech.	T°	Capacité inter digitée BST
2011	[IBRAHIM-2011]	Glasgow Univ. - UK	Pression	Longueur antenne dipôle
2011	[SENIOR-2011]	Floride Univ. - USA	Pression	Capacité couplage cavité métallique avec un résonateur en anneau
2011	[TRAILLE-2011]	LAAS – France	T°	Court circuit antenne dipôle par fluide
2011	[THAI-2011]	LAAS – France	Contrainte	Capacité couplage localisée dans résonateur planaire couplé
2011	[XU-2011]	Arlington Univ. - USA	Fissure	Répartition courant dans antenne patch
2011	[LEE-2011]	Georgia Inst. of Tech. - USA	Gaz	Antenne patch chargée par stub avec résistance en nanotube de carbone

Tableau 8 : Liste des premières publications sur les différents capteurs à transduction électromagnétique

2.3 BILAN DES TRAVAUX REALISES

2.3.1 Introduction

L'ensemble des travaux présentés ont été menés en étroite collaboration avec Hervé Aubert, spécialiste en électromagnétisme. La première phase consiste à valider de nouveaux concepts de transduction électromagnétique par la caractérisation de démonstrateurs. Ces nouveaux concepts sont développés avec un objectif double :

- Obtenir des concepts performants en termes de sensibilité.
- Mettre en œuvre des procédés technologiques et des structures réalistes pour une application capteur.

La qualité d'un capteur dépend aussi de sa précision/résolution. Dans le cas d'un capteur passif à interrogation sans fil, la résolution du capteur dépendra beaucoup de la capacité du lecteur à détecter de faibles variations de fréquence de résonance. Néanmoins, dans cette première phase des travaux la priorité a été donnée à la validation des concepts de transduction électromagnétique. Ces transducteurs seront ainsi le plus souvent caractérisés sous pointe car l'interrogation sans fil demande la mise en place de moyens qui sont assez lourds à mettre en œuvre.

La solution la plus simple pour faire varier la fréquence de résonance du transducteur consiste à faire varier la dimension géométrique de la structure. En effet cette solution est facilement implémentable en réalisant un résonateur planaire sur un substrat souple ou sur une membrane. On obtiendra alors une variation relative de la fréquence de résonance égale à l'allongement. Cet allongement de la structure peut être obtenu soit par une sollicitation mécanique (contrainte/déformation, pression) soit par dilatation thermique, pouvant ainsi adresser ces différentes applications. Les allongements devant rester inférieurs à la limite élastique (ou de rupture) du matériau, la variation relative maximale de la fréquence de résonance sera limitée par cette borne. Pour les matériaux « durs » cela correspond à des allongements inférieurs à quelques 10^{-3} et le capteur sera donc peu sensible. Cette valeur peut être multipliée par dix environ pour les matériaux « souples » comme certains polymères, ce qui permettra d'atteindre des variations relatives de fréquence de résonance intéressantes (qq %). Mais ce type de matériaux ne sera pas utilisable pour les environnements sévères.

Nous avons donc choisi une autre voie qui consiste à modifier les couplages électromagnétiques et qui présentent potentiellement plus de possibilités et une plus grande sensibilité. Ceci peut se faire en modifiant (globalement ou localement) l'environnement autour des lignes de champ électromagnétique. Cette perturbation peut être obtenue par déplacement d'une microstructure

mécanique ou d'un liquide, ou directement par modification des propriétés électromagnétiques des matériaux utilisés.

Deux gammes de fréquence ont été étudiées pour la réalisation des capteurs : 3GHz (représentative de la bande à ISM à 2.44GHz) et 30GHz (bande ISM 24GHz). Les dimensions des capteurs seront ainsi de l'ordre de quelques centimètres (millimètres) à 3GHz (30GHz) en fonction de la permittivité du substrat utilisé.

La solution à 3GHz présente l'avantage de pouvoir utiliser des techniques de fabrication conventionnelles (qui ne font pas appel aux micro-technologies) et est donc relativement facile à mettre en œuvre. Cette solution sera privilégiée chaque fois que les procédés technologiques nécessitent un développement important. A cette fréquence la taille des dispositifs, tout en étant non négligeables, restent encore compatible avec de nombreuses applications et les pertes de propagation sont plus faibles à cette fréquence.

La solution à 30GHz présente l'avantage de pouvoir réaliser des structures de petite dimension avec un très bon contrôle dimensionnel grâce aux micro-technologies, ce qui doit assurer des couplages électromagnétiques importants.

2.3.2 Capteur de pression

Compte tenu de mes travaux antérieurs sur les capteurs de pression capacitifs en technologie silicium verre, c'est tout naturellement que les premiers capteurs passifs à transduction électromagnétiques étudiés ont concerné des capteurs de pression utilisant cette technologie. L'idée de départ était relativement simple : en remplaçant l'électrode métallique présente au fond de la cavité de verre par un résonateur RF coplanaire, on devait pouvoir obtenir facilement une modification de la fréquence de résonance de ce filtre suite à la déflexion de la membrane de silicium. En effet la répartition des lignes de champ se situent entre les fentes coplanaires et se répartissent entre le substrat de verre et l'air au dessus du résonateur. En rapprochant suffisamment la membrane de silicium de la surface du résonateur, on obtiendra en effet une variation très importante de la permittivité électrique effective. La majorité de ces travaux sont consigné dans la thèse de Medhi Jatlaoui soutenue le 20 Avril 2009.

Une première phase de conception, à l'aide de logiciels électromagnétiques 3D, a permis de dimensionner le capteur qui est constitué par un résonateur coplanaire à ligne couplées quart d'onde en Aluminium déposé au fond d'une cavité de pyrex de quelques microns de profondeur. Des accès 50ohms sont réalisés pour réaliser les caractérisations sous pointe. Un substrat de silicium de haute résistivité ($> 3k\Omega.cm$) de $400\mu m$ d'épaisseur est préalablement usiné par gravure DRIE

pour pouvoir accéder aux plots de contacts RF puis reporté sur les substrat de pyrex par soudure anodique à 450°C. Pour un fonctionnement autour de 30GHz, le résonateur est de dimension inférieure à 2mm et se situe dans une cavité de 2.8 mm de diamètre. La dimension totale de la puce est de 5.8mm par 3.8mm.

Les simulations ont été tout d'abord été réalisées pour un déplacement de membrane uniforme (variation de la profondeur de la cavité de pyrex). Pour des distances silicium-résonateur comprises entre 0.25 μ m et 6 μ m la réponse du capteur est linéaire avec une sensibilité proche de 1GHz/ μ m. Au delà la sensibilité diminue progressivement. Ces résultats sont en accord avec les modèles développés de ligne coplanaire qui montrent une variation très rapide de permittivité effective.

Des structures de tests ont été fabriquées pour 3 profondeurs de cavités différentes comprises entre 2.1 μ m et 5.4 μ m, avec une membrane de silicium de 400 μ m d'épaisseur. Les caractérisations, effectuées sous pointes, ont montré des facteurs de qualité supérieurs à 10 avec une variation de fréquence de résonance linéaire de 1.03 GHz/ μ m, très proche des simulations.

Puis des structures actionnables avec la pression ont été fabriquées avec des membranes de silicium de 50 μ m d'épaisseur et de 2.8mm de diamètre. Celles-ci ont été obtenues par gravure chimique localisée avant l'assemblage avec le substrat de pyrex.

Ces membranes ont été actionnées entre 1bar et 3bars à l'aide d'un générateur de pression localisé. Celui-ci comprend un générateur de flux d'air calibré qui est appliqué sur la membrane à travers une buse de 700 μ m de coté située 40 μ m au dessus de la surface de la membrane. Ce générateur de pression a été couplé à une station RF sous pointe. Les caractérisations ont montré une sensibilité de 0.37GHz/bar environ. Ces mesures n'ont pas pu être comparées directement aux simulations car la pression exercée sur la membrane n'est pas hydrostatique (pression localisée au centre de la membrane). Des simulations, réalisées pour ces membranes avec une déformée réelle (pression hydrostatique), ont montré une sensibilité à la pression supérieure à 2.7GHz/bar.

Des simulations préliminaires ont également montré que la sensibilité était environ 4 fois plus grande si la membrane de silicium était recouverte de métal. Ceci peut s'expliquer par le couplage des modes évanescent (présents à la surface du résonateur) avec le substrat de silicium qui créent ensuite une onde stationnaire dans celui-ci. Lorsque le silicium est recouvert de métal il y a une réflexion plus importante des ondes à l'interface silicium-métal et l'interaction est plus importante. Lorsque le silicium n'est pas recouvert de métal, une partie plus importante des ondes part vers l'extérieur.

Trois autres laboratoires ont publié des résultats sur des capteurs de pression à transduction électromagnétique en 2009 et 2011. Afin de faire une comparaison grossière des sensibilités des différents capteurs, la variation relative de fréquence de résonance a été estimée à partir de la pleine échelle possible en pression (Tableau 9). Cette pleine échelle a été estimée en prenant comme limite la contrainte maximale (400MPa pour la membrane en silicium) ou la déformation relative maximale (2% pour la membrane en PDMS).

Pour [THAI-2009], le transducteur est composé de deux antennes patches couplées. Les deux antennes sont séparées par de l'air et l'une d'elle est réalisée sur une membrane déformable. Les conceptions ont été réalisées pour deux fréquences de fonctionnement (60GHz et 7GHz). A 60GHz (7GHz), la dimension du transducteur est de 3.4mm x 3.4mm (32mm x 32mm) et la profondeur de la cavité d'air est de 100µm (1575µm). A 60GHz (7GHz), la variation relative de fréquence est proche de 1900ppm/µm (45ppm/µm) pour une distance entre patch variant entre 100µm et 40µm (1575µm et 787µm). Il est difficile de comparer ces résultats avec les autres capteurs car les travaux ne sont pas finalisés avec une approche capteur (notamment matériaux utilisés plutôt orientés RF). On peut tout de même dire que les résultats obtenus à 60GHz sont comparables à ceux du LAAS pour des hauteurs de cavités similaires (plusieurs dizaines de microns). Mais l'utilisation de cavités moins profondes permettrait sûrement d'obtenir une meilleure sensibilité.

Pour [IBRAHIM-2011], il s'agit d'une antenne dipôle $\lambda / 2$ à méandre qui est déposée sur une membrane composée d'une bicouche (SiO₂-SiHRS ,2µm/2µm) de 700µm de côté. La déformation de la membrane hors plan entraîne un allongement de cette dernière qui augmente la longueur du dipôle sur une fraction de celui-ci.. La fréquence de fonctionnement est de 10GHz. La pleine échelle en pression a été estimée en considérant une contrainte maximale dans la membrane de 400MPa, ce qui correspond à une déflexion de 20µm environ. La variation relative de fréquence est très faible (0.07%) car elle correspond à un allongement relatif maximum (situé au centre de la membrane) inférieur à 0.3%. Comme cet allongement décroît ensuite en s'éloignant du centre et que la membrane ne couvre qu'une fraction du dipôle, la variation relative de fréquence est nettement inférieure à l'allongement. Ceci montre que ce principe n'est pas adapté pour la réalisation de capteurs de pression.

Pour [SENIOR-2011], le résonateur est constitué par une cavité métallique obtenue en réalisant des vias métallisés espacés de 1.4mm dans un substrat d'Arlon [SENIOR-2011]. Cette cavité est ensuite couplée avec un résonateur en anneau (Split Ring Resonator) déposé sur une membrane de PDMS (recouverte de métal) de 5mm de côté et de 90µm d'épaisseur. La cavité à air entre la membrane et le substrat d'Arlon est obtenue par des parois de PDMS de 200µm de hauteur. Le résonateur fonctionne à 5GHz (Q=17.5) et sa dimension est de seulement 7mm x 7mm, ce qui est faible compte tenu de la fréquence de travail. La pleine échelle estimée (2% de déformation relative), est

obtenue pour une pression de 0.15bars et entraine une déflexion de 250 μ m environ de la membrane (qui correspond en première approximation au maximum de déflexion possible avant de toucher le fond de la cavité). La variation relative de fréquence obtenue est très bonne (27%) et comparable à celle obtenue par le LAAS.

[IBRAHIM-2011]	[SENIOR-2011]	LAAS
0.07%	27%	27%

*Tableau 9 : Variation relative de fréquence pour différents capteurs (pleine échelle en pression PE)
PE estimée avec allongement relatif max de 2 % pour membrane PDMS ([SENIOR-2011])
PE estimée avec contrainte max de 400MPa pour membranes Si ([IBRAHIM-2011] et LAAS)*

Liste publications

[JATL-I07] , [JATL-I07-2] , [JATL-I08] , [JATL-I08-2], [JATL-I09] , [MING-I09], [JATL-I09-2], [JATL-I09-3], [MING-I10-1] , [BOUA-I10-1], [JATL-I10-3], [JATL-R11-2]

2.3.3 Capteur de contrainte

Les travaux au LAAS sur les capteurs de contrainte/déformation ont démarré en Octobre 2010. Ils font l'objet actuellement d'une collaboration avec le Georgia Institute of Technology aux USA.

Le capteur est basé sur deux résonateurs planaires couplés (une antenne patch et une boucle ouverte) dont les fréquences de résonance sont proches de 2.4 GHz. La boucle est fermée par une capacité variable qui change avec la déformation. Cette capacité est formée par une poutre métallique libre et le métal de la boucle, séparés par un isolant de 15 μ m d'épaisseur environ. Une déformation du support (Kapton de 100 μ m d'épaisseur) entraine alors un déplacement du point d'ancrage de la poutre. La surface de la capacité est alors modifiée avec une sensibilité dépendante de la longueur de la poutre. La variation relative de surface est encore multipliée par 2 en taillant l'extrémité de la poutre et de la boucle en biseau. La dimension totale du capteur est de 40mm x 25mm.

Les résultats de simulation montrent une sensibilité maximale de 4.5ppm/ $\mu\epsilon$. Des démonstrateurs ont été fabriqués avec des technologies conventionnelles pour réaliser les résonateurs et la poutre. Puis l'assemblage s'est déroulé de manière plus ou moins manuelle ce qui n'a pas permis de réaliser un positionnement précis qui garanti le maximum de sensibilité. Néanmoins une sensibilité mesurée de 1.3ppm/ $\mu\epsilon$ a été obtenue. Cette valeur est déjà aussi grande que ce qui a été publié à ce jour.

Historiquement les capteurs de contrainte/déformation ont été un des premiers types de capteurs passifs à transduction électromagnétique étudiés avec comme application le suivi des infrastructures (ponts, immeubles, ...). Une comparaison des sensibilités des différentes solutions étudiées est présentée dans le Tableau 10.

Le premier capteur étudié était basé sur la déformation d'un résonateur volumique métallique à 2.45GHz constitué par un cylindre de 25mm de diamètre et de 44mm de long [CHUANG-2005]. La sensibilité obtenue (1ppm/ $\mu\epsilon$) est conforme à la sensibilité théorique.

Des antennes patch ont également été étudiées par la suite. Une antenne patch est constituée d'une plaque métallique et d'un plan de masse arrière séparés par un diélectrique. Pour Tata, le diélectrique était constitué de 50 μ m de Kapton et le patch était de type rectangulaire [TATA-2009]. La résonance de l'antenne était fixée autour de 15GHz Le capteur de dimension 4mm x 5.3mm, présente un facteur de qualité voisin de 100 et une sensibilité de 0.8ppm/ $\mu\epsilon$. [DALIRI-2010] a utilisé par contre un substrat de FR4 de 1.5mm d'épaisseur avec patch circulaire fonctionnant à 1.5GHz. La sensibilité obtenue était de 1.3ppm/ $\mu\epsilon$. L'avantage de ces dispositifs par rapport à la cavité volumique développée par [CHUANG-2005], est qu'ils sont plus facilement intégrables sur une structure grâce à sa taille réduite et son aspect planaire

La modification d'un couplage par la déformation a également été étudiée. [MELIK-2008] a utilisé une inductance spirale avec un plan de masse arrière en silicium dopé et séparée par 0.1 μ m de SiNx. La déformation de la structure change la surface de la capacité de couplage. La dimension des dispositifs, fonctionnant autour de 10GHz, sont de petite dimension (<500 μ m x 500 μ m) mais la sensibilité obtenue est assez faible (<0.4ppm/ $\mu\epsilon$). En remplaçant le silicium par un plan métallique et en réalisant l'ensemble sur un substrat de Kapton la sensibilité obtenue est nettement meilleure (1.12ppm/ $\mu\epsilon$) [MELIK-2009]. Ces différences de comportement ne semblent pas très cohérentes et de nombreuses interrogations apparaissent à la lecture de ces publications.

[MANDEL-2011] a également utilisé un couplage capacitif localisé à l'intérieur d'une structure résonante. Le résonateur est constitué par deux plaques métalliques séparées par un diélectrique (Rogers 5880) et reliées par des vias métalliques. La face supérieure du diélectrique présente des tranchées régulières formant ainsi un méta-matériau (les 4 éléments étudiés occupent une surface de 2cm x 2cm environ pour un fonctionnement à 3GHz). La sensibilité a été mesurée en modifiant, lors de la fabrication, la largeur des tranchées (de 300 μ m à 700 μ m). Ces variations de largeurs sont incompatibles avec un cas réel et les sensibilités obtenues sont très faibles (<0.04ppm/ $\mu\epsilon$).

[CHUANG-2005]	[MELIK-2009]	[TATA-2009]	[DALIRI-2010]	[MANDEL-2011]	LAAS
1 ppm/ $\mu\epsilon$	1.1 ppm/ $\mu\epsilon$	0.98 ppm/ $\mu\epsilon$	1.3 ppm/ $\mu\epsilon$	< 0.04 ppm/ $\mu\epsilon$	4.5 ppm/ $\mu\epsilon$ (simu) 1.3 ppm/ $\mu\epsilon$ (mes)

Tableau 10 : Sensibilité relative ($\Delta F/F$) des différents capteurs de déformation

Liste publications

[THAI-I11-1], [THAI-I11-2]

2.3.4 Capteur de température à MEMS

Les travaux au LAAS sur les capteurs de température à MEMS ont démarré en Octobre 2009. Ils font l'objet actuellement d'une collaboration avec le Georgia Institute of Technology aux USA.

Le capteur est constitué par deux résonateurs planaires en anneau couplés. Chaque anneau est fermé par une capacité variable constituée par une poutre bilame et le métal de l'anneau. Le bilame permet de transformer la variation de température en une déflexion hors plan de la poutre à partir de la dilatation thermique différentielle des deux matériaux constituant la poutre. La variation de capacité entraîne une variation de la fréquence de résonance de la structure. L'excitation du résonateur est réalisée par une ligne coplanaire située sur la face inférieure du substrat. Deux design ont été effectués autour de 3 GHz et 30 GHz.

A 30GHz, le design a été conçu pour être réalisé sur un substrat de pyrex avec des micro-poutres obtenues par micro-technologie. La dimension du résonateur est inférieure à 0.6mm x 0.6mm. Deux filières ont été explorées. La première utilise les procédés développés pour les micro-commutateurs RF (couche sacrificielle en polymère et poutre en or). Une étape supplémentaire de dépôt d'oxyde par PECVD à 200°C sert à réaliser le bilame. Les résultats technologiques n'ont pas été concluants à cause de la modification des contraintes dans la couche d'or suite au dépôt d'oxyde à 200°C qui ont entraînés une déformation initiale excessive de la poutre. Une deuxième filière est en cours de développement et met en œuvre un bilame Silicium-Or. La poutre en silicium de 2 μ m d'épaisseur est obtenue par l'assemblage eutectique Or-Silicium (plaque à plaque) d'une plaque de silicium haute résistivité (sur laquelle sont réalisés les résonateurs) et d'une plaque de SOI. La distance entre la poutre et le résonateur est assurée par le dépôt préalable d'une couche d'oxyde PECV de 5 μ m. Après assemblage et suppression de la partie massive du SOI, un dépôt d'or de 3.2 μ m est réalisé par électrolyse. La déflexion simulée au bout d'une poutre de 300 μ m de long est de 0.23 μ m/°C, ce qui correspond à une déflexion moyenne de 0.18 μ m/°C sur les 100 μ m de la fin de la poutre. Les résultats de simulation électromagnétique donnent une variation relative de fréquence de résonance

de $9\%/ \mu\text{m}$ pour un déplacement uniforme de la poutre, ce qui correspond à une sensibilité estimée de $1.6\%/^{\circ}\text{C}$. En considérant une gamme de déflexion pleine échelle de $3\mu\text{m}$, on obtient une variation relative de fréquence de résonance de 27%.

A 3 GHz, le design a été conçu pour être réalisé avec des technologies conventionnelles. Les résonateurs ont été fabriqués sur un substrat Neltec de $790\mu\text{m}$ d'épaisseur et ont une dimension inférieure à $6\text{mm} \times 6\text{mm}$. La poutre de 4mm de long doit être obtenue par découpe à la scie diamantée d'un substrat de silicium aminci à $50\mu\text{m}$ sur lequel a été déposée préalablement une couche de cuivre électrolytique de $30\mu\text{m}$ d'épaisseur. La poutre est ensuite assemblée sur le résonateur à l'aide d'une machine de report de type « flip-chip » par thermo-compression. La hauteur initiale de la poutre ($100\mu\text{m}$) est obtenue par la réalisation de plots métalliques par « stud-bump ». Le procédé technologique est en cours de développement. La déflexion calculée du bilame Silicium-Cuivre en bout de poutre est de $1.8\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à une déflexion moyenne de $1.4\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ sur le dernier millimètre de la poutre. La sensibilité des capteurs a été caractérisée dans un premier temps à l'aide de poutre non fonctionnelle en température en modifiant la hauteur initiale lors de la fabrication. Entre $65\mu\text{m}$ et $165\mu\text{m}$ de haut, la fréquence de résonance change de 800 MHz, soit une variation relative de $0.2\%/ \mu\text{m}$. La sensibilité finale estimée est donc voisine de $0.3\%/^{\circ}\text{C}$. En considérant une gamme de déflexion pleine échelle de $100\mu\text{m}$, on obtient une variation relative de fréquence de résonance de 20%.

Les différents concepts de capteurs température étudiés dans la littérature sont décrits ci-dessous et les performances sont récapitulées dans le Tableau 11.

Les premiers travaux trouvés sur des capteurs de température ont été publiés en 2007 par l'Université de Perdue (USA) [MAHMOOD-2007]. Le capteur est composé d'un résonateur volumique qui présente un pilier en son centre. Des bilames en Ti/Au ($20\text{nm}/500\text{nm}$) sont ensuite fabriqués sur un substrat silicium. La puce de silicium obtenue (individuelle) est alors collée au dessus du résonateur, les bilames sont situés au dessus du pilier. La fréquence de résonance est centrée à 12GHz. La variation de température entraîne une déformation des bilames et ainsi une modification de la capacité de couplage. Dans la gamme de température testée (T_{amb} à 90°C), la sensibilité du capteur est voisine de $300\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$

En 2009, [SCOTT-2009] propose un capteur constitué par une antenne à fente (fonctionnant autour de 19GHz) chargée par un réseau de bilame SiO_2/Au ($0.5\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$) inter-digitées de $200\mu\text{m}$ de long. A température ambiante, la déflexion des bilames est de $200\mu\text{m}$ vers le haut et la capacité entre les deux bords de la fente est voisine de 22fF. Lorsque la température augmente, les poutres fléchissent et la capacité augmente jusqu'à 38fF lorsque les poutres sont plates ($T=300^{\circ}\text{C}$). Le

comportement est à peu près linéaire mais la variation relative de fréquence est relativement faible (28ppm/°C). Pour la pleine échelle en température (25°C à 300°C) la variation relative de totale de fréquence est inférieure à 1%.

En 2011, [MANDEL-2011-2], propose un capteur constitué par une capacité inter-digitée réalisée sur un substrat de BST. La variation de permittivité relative du BST avec la température entraine une variation de la capacité ($\cong 2600\text{ppm}/^\circ\text{C}$ entre 40°C et 100°C). La fréquence centrale de fonctionnement est de 2.2GHz

	[MAHMOOD-2007].	[SCOTT-2009].	LAAS
Sensibilité ($\Delta F/F$)	290 ppm / °C	28 ppm / °C	530 ppm / °C (4GHz)
Variation $\Delta F/F$ pleine échelle en température		0.8%	20% (4GHz)

Tableau 11 : Sensibilité et variation relative de fréquence pleine échelle des différents capteurs de température

Liste publications

[THAI-I10-1] , [THAI-I10-2] , [THAI-I10-3]

2.3.5 Capteur de température fluidique

Comme l'ont fait les MEMS il y a une vingtaine d'années, la micro-fluidique est en train de modifier profondément le monde des microsystèmes depuis une dizaine d'années. Si les applications en biologie sont déjà très nombreuses, celles concernant les microsystèmes RF sont beaucoup plus récentes [CHEN-2007], [LIU-2009], [LI-2010], [IRSHAD-2011] et aucuns travaux n'ont été menés jusqu'à présent (à notre connaissance) sur des capteurs passifs utilisant la micro-fluidique.

Pour les capteurs passifs à transduction électromagnétique, les potentialités offertes par la micro-fluidique sont grandes car l'utilisation de fluides conducteurs ou diélectriques au voisinage des résonateurs peut fortement modifier les fréquences de résonance.

Les premiers travaux que nous avons menés sur ce sujet ont démarré en Avril 2010. Ils font l'objet actuellement d'une collaboration avec le Georgia Institute of Technology aux USA. Ils concernent un capteur de température dont le principe est basé sur la modification de la longueur d'une antenne obtenue en court-circuitant les deux brins d'une antenne dipôle $\lambda/2$ à l'aide d'un fluide conducteur. Chaque dipôle est constitué de deux brins métalliques de 1mm x 1.5mm. Un réservoir de 1mm³ de volume et situé au dessus d'un des deux brins métalliques du dipôle, est rempli de liquide

conducteur. Sous l'effet de la température, ce liquide se dilate et se déplace dans un micro-canal (de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) qui relie les deux brins du dipôle. En utilisant comme liquide conducteur du Galinstan, les calculs montrent qu'on peut obtenir une progression dans le canal de $12\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Pour une certaine température, dépendante de la distance séparant les deux brins, un court-circuit entre les deux brins est ainsi établi ce qui a pour effet de modifier drastiquement la Surface Equivalente Radar (SER) du capteur. En réalisant un réseau de dipôles dont la distance entre brins est de longueur progressive, on peut obtenir une indication sur la valeur de la température.

Des simulations électromagnétiques (avec courts circuits parfaits) ont été réalisées avec un réseau de 7 dipôles $\lambda/2$ sur Kapton et fonctionnant autour de 30GHz. La SER varie de -44dBsm à -28dBsm lorsque on passe de zéro à 7 dipôles court-circuités. Les dispositifs ont été fabriqués et caractérisés à l'aide d'un RADAR FMCW en déposant des gouttes de Galinstan pour réaliser les court-circuits. Des résultats proches des simulations ont été obtenus (-46dBsm à -34dBsm).

Les développements technologiques sont en cours pour la fabrication des dispositifs réel incluant la partie micro-fluidique. La difficulté principale provient de l'oxydation du Galinstan même sous très faible quantité d'oxygène (5ppm) qui transforme le Galinstan en un liquide visqueux impossible à injecter dans les micro-canaux [LIU-2010]. Le Galinstan, qui est un des rares métaux liquides à température ambiante, est un alliage de Gallium (68.5%), Indium (21.5%) et Etain (10%) qui remplace le mercure présentant des problèmes de sécurité. Des structures micro-fluidiques à base de résine SU8 ont pu être fabriquées et un test de remplissage d'un micro-canal avec du Galinstan a pu être réalisé dans une boîte à gant à atmosphère contrôlée. Une boîte à gant spécifique (à cause des problèmes de pollution par le Galinstan) est en cours de commande pour pouvoir poursuivre les travaux. En parallèle, une filière à base de Pyrex et silicium est en cours de développement. Cette filière permettra de recouvrir les parois du micro-canal de téflon pour limiter les problèmes d'adhérence du Galinstan sur les parois et la pénétration d'oxygène dans le canal (la SU8 est un polymère donc non hermétique).

Liste publications

[BOUA-I11-1], [TRAIL-I11-2]

2.3.6 Interrogation des capteurs

L'interrogation sans fil des capteurs passifs, qu'ils soient de type RFID, à onde acoustique ou électromagnétique, est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par le capteur. Mais contrairement aux capteurs RFID pour lesquels le signal reçu est de type logique (0 ou 1 en fonction du niveau de signal reçu), les capteurs à transduction électromagnétique (et acoustiques) analysent le signal de

manière analogique. Les avantages principaux de ce type d'interrogation sont comme nous l'avons vu précédemment : la suppression de tous les circuits électroniques au niveau du transducteur et par voie de conséquence le transfert de toute l'intelligence au niveau du lecteur ainsi qu'une distance d'interrogation potentiellement plus grande (pour les capteurs électromagnétiques). Cette configuration permet ainsi non seulement d'adresser des applications à environnements sévères mais également de pouvoir laisser le transducteur en place tout en profitant des améliorations réalisées au niveau du lecteur. Le revers de cette solution est bien sûr une plus grande sensibilité de l'interrogation aux erreurs introduites lors de la propagation. Le lecteur est ainsi une brique importante du capteur puisque c'est de lui dont dépendra en partie la qualité de la mesure et la distance d'interrogation possible.

Le choix de la technique d'interrogation sans fil nécessite également une forte interaction avec la conception du transducteur électromagnétique. En effet celui-ci doit tout d'abord être visible par l'onde électromagnétique envoyée par le lecteur et une antenne est le plus souvent connectée au transducteur sauf quand l'antenne constitue le capteur. Ensuite le transducteur doit pouvoir interagir avec l'onde électromagnétique et renvoyer au lecteur une signature lisible qui permettra de déduire l'information sur la mesurande.

Les travaux publiés les plus avancés sur l'interrogation sans fil pour les capteurs à transduction électromagnétique concernent l'Université de Manitoba au Canada [THOMSON-2009] qui a également publié un des premiers articles sur un capteur à transduction électromagnétique [CHUANG-2005]. Le capteur de contrainte, constitué par un résonateur volumique métallique à 2.45GHz, est relié à une antenne de 10dBm de gain. Le lecteur comprend une source RF qui envoie une onde électromagnétique à une fréquence donnée pendant une durée de 500ns environ et un détecteur RF qui mesure (après amplification) le niveau de signal rétrodiffusé. En faisant varier progressivement la fréquence du signal, le pic de résonance est détecté. L'antenne du lecteur présente un gain de 16dBm. Avec une puissance d'émission de 1mW, la distance d'interrogation est de 10m (avec un SNR de 100). En augmentant la puissance d'émission de 10dB (maximum des normes à 2.44GHz), la distance d'interrogation pourrait être doublée.

Dans la plupart des autres travaux les caractérisations sont réalisées le plus souvent sous pointe car les études se focalisent sur la partie transduction, ou avec des distances d'interrogation inférieures à 1m.

Pour notre part nous avons démarré les études en Avril 2007 en choisissant une interrogation à l'aide d'un RADAR FMCW (Frequency Modulated Continuous-Wave). Ce type de Radar génère une onde électromagnétique dont la fréquence est modulée de façon linéaire avec le temps entre une

fréquence maximale et une fréquence minimale. Ce Radar, utilisé classiquement par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse, permet de déterminer la vitesse et la position de la cible (avec une précision de qq cm). Les signaux d'émission et de réception du Radar sont mélangés afin d'obtenir un signal de battement qui est liée au temps de propagation de l'onde électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal basse fréquence permet d'obtenir des informations sur la réponse du capteur. Deux modes d'interrogation sont possibles.

Dans le premier cas, la modulation de fréquence reste identique et le radar analyse ainsi toujours la même bande de fréquence. Si le design du capteur est correct, la variation d'impédance du capteur dans cette bande de fréquence est suffisante pour modifier le niveau de signal de battement. Les premiers travaux, consignés dans la thèse de Franck CHEBILA (soutenue le 31 Mars 2011), ont porté sur la conception, la fabrication et la caractérisation de deux Radar FMCW de ce type (à 3GHz et 30GHz).

Pour le Radar à 30GHz, nous avons montré qu'il était possible d'interroger une cible métallique de 1cm^2 à 14m avec une puissance d'émission de 13dBm et des gains d'antenne d'émission et de réception de 35dBi et 15dBi respectivement.

Ce Radar a également permis de valider l'interrogation des capteurs de pression à une distance de 3m dans un environnement « bruité » (salle de caractérisation). Un port du capteur de pression été connecté à une antenne cornet à travers les pointes RF du banc de test et un câble coaxial de 1m de long. Le second port du capteur est relié à une charge 50Ω . Le câble RF qui constitue la ligne à retard permet de séparer l'écho associé au mode de structure de celui associé au mode d'antenne. En appliquant la pression sur le capteur, une variation d'environ 0.8dBsm/bar de la SER (Surface équivalente Radar) associée au mode d'antenne a été observée.

Dans le second cas, la bande de fréquence balayée par le radar est décalée progressivement en fonction du temps. Ceci permet de détecter le pic de résonance du capteur qui correspond à un extrémum de niveau de signal de battement. Les avantages de cette technique sont une plus faible sensibilité à l'environnement et une résolution plus grande. Une thèse a démarré en Octobre 2011 sur ce sujet.

Un brevet a été déposé par ailleurs sur l'identification des capteurs qui est basée sur l'analyse du spectre électromagnétique multi bandes rétrodiffusé. Une raie sert à la mesure de la grandeur et les autres raies constituent un code barre électromagnétique pour l'identification [WO-2010-136388].

Liste publications

[CHEB-I09] , [CHEB-I10-1] , [JATL-I10-2] , [AUBE-B09]

2.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AKYILDIZ-2002]	Wireless sensor networks, a survey	IF Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, E Cayirci	Computer Networks 38 (2002) 393–422
[ALEMDAR-2010]	Wireless sensor networks for healthcare, A survey	H Alemdar, C Ersoy	Computer Networks 54 (2010) 2688–2710
[ATZORI-2010]	The Internet of Things: A survey	L Atzori, A Iera, G Morabito	Computer Networks Volume 54, Issue 15, 28 October 2010, 2787-2805
[BALLANDRAS-2011]	High overtone Bulk Acoustic resonator built on single crystal stacks	S Ballandras, T Baron, E Lebrasseur, G Martin, S Alzuaga, JM Friedt	IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland
[BARON-2010]	A pressure sensor based on a HBAR micromachined structure	T Baron, D Gachon, JP Romand, S Alzuaga, S Ballandras, J Masson, L Catherinot, M Chatras "	IEEE Frequency Control Symposium, 1-4 June 2010, Newport, USA
[BARTON-2010]	Detection, Identification, Location, and Remote Sensing using SAW RFID sensor tags	RJ Barton, TF Kennedy, RM Williams, PW Fink, PH Ngo	IEEE Aerospace 2010, 6-13 March 2010, Manhattan, USA
[BENES-1998]	Comparison between BAW and SAW sensor principles	E Benes, M Groschl, F Seifert, A Pohl	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 45, no. 5, September 1998
[BOUKABACHE-2011]	Sensors/Actuators network development for aeronautics structure health monitoring	H. Boukabache, M. Matmat, C. Escriba, J.Y Fourniols	IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland
[BUTLER-2002]	Wireless, passive resonant circuit, inductively coupled, inductive strain sensor	JC Butler, AJ Vigliotti, FW Verdi, SM Walsh	Sensors and actuators A 102 (2002) 61-66
[CHEN-2007]	Liquid RF MEMS Wideband Reflective and Absorptive Switches	C Chen, D Peroulis	IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol. 55, No. 12, December 2007
[CHEN-2010]	Wireless Intraocular Pressure Sensing Using Microfabricated Minimally Invasive Flexible-Coiled LC Sensor Implant	P.J. Chen, S. Saati, R. Varma, M.S. Humayun, Member, Y.Ch. Tai	Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 19, No. 4, August 2010
[CHUANG-2005]	Embeddable wireless strain sensor based on resonant rf cavities	J. Chuang, D. J. Thomson, and G. E. Bridges	Review of Scientific Instruments, 76 (2005)
[DALIRI-2010]	Circular Microstrip Patch Antenna Strain Sensor for Wireless Structural Health Monitoring	A Daliri, A Galehdar, S John, W Rowe, K Ghorbani	WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
[DIXON-2006]	A second generation in-car tire pressure monitoring system based on wireless passive SAW sensors	B Dixon, V Kalinin, J Beckley, R Lohr	IEEE Int. Freq. Control Symposium, 5-7 Jun. 2006, Miami, USA,
[DOWLING-2009]	RFID-enabled Temperature Sensing Devices	J Dowling, MM Tentzeris , N Beckett	IEEE MTT-S, 24-25 Sept. 2009, Cavtat, Croatia"
[DROIT-2010]	A frequency modulated wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement	C Droit, G Martin, S Ballandras, JM Friedt	Rev. Sci. Instrum. 81, 056103 (2010)
[EPoSS-2008]	Internet of Things in 2020		EPoSS Report
[FINKENZELLER-2003]	RFID Handbook	K Finkenzeller	Wiley, second Edition 2003
[FONSECA-2002]	Wireless Micromachined Ceramic Pressure Sensor for High-Temperature Applications	M.A. Fonseca, J.M. English, M. Von Arx, M.G. Allen	Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 11, No. 4,

			August 2002
[FRIEDT-2010]	A wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement	JM Friedt, C Droit, G Martin, S Ballandras	Rev. Sci. Instrum. 81, 014701 (2010)
[FRIEDT-2011]	Surface Acoustic Wave Devices as Passive Buried Sensors	JM Friedt, T Returnaz, S Alzuaga, T Baron, G Martin, T Laroche, S Ballandras, M Griselin, JP Simonnet	Journal of Applied Physics, Vol 109, Issue 3, Feb 2011
[GRIFFIN-2009]	Complete Link Budgets for Backscatter-Radio and RFID Systems	JD.Griffin, GD Durgin	IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, No.2, April 2009
[HALLIL-2009]	Novel Microwave Gas sensor using Dielectric Resonator With SnO ₂ Sensitive Layer	H.Hallil, P.Menini, H.Aubert	Euroensors XXIII conference, Lausanne (Suisse), 6-9 Septembre 2009
[HARB-2011]	Energy harvesting: State-of-the-art	Adnan Harb	Renewable Energy 36 (2011), pp2641-2654
[IBRAHIM-2011]	Passive single chip wireless microwave pressure sensor	A. Ibrahim, D.R.S. Cumming	Sensors and Actuators A 165 (2011) 200–206
[IRSHAD-2011]	A 12-18 GHz Electrostatically Tunable Liquid Metal RF MEMS Resonator with Quality Factor of 1400-1840	W Irshad, D Peroulis	IEEE MTT-S 2011, 5-10 June 2011, Baltimore, USA
[JATLAOUI-2007]	Radio Frequency Pressure Transducer	M Jatlaoui, P. Pons, H.Aubert	European Microwave Week (EUMC2007), 8-12 October 2007, Munich, Germany
[JIA-2006]	Design and characterization of a passive wireless strain sensor	Y Jia, K Sun, FJ Agosto, MT Quinones	Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 2869–2876
[JOUHANNAUD-2007]	Développement d'un nouveau capteur de gaz basé sur la détection à large bande micro-onde	J Jouhannaud, J Rossignol, D Stuerger	C. R. Physique 8 (2007) 456–461
[KALININ-2004]	Passive Wireless Strain and Temperature Sensors Based on SAW Devices	V Kalinin	Radio and Wireless Conference, 19-22 Sept. 2004, Atlanta
[KALININ-2005]	Influence of receiver noise properties on resolution of passive wireless resonant SAW sensors	V Kalinin	IEEE Int. Ultrasonics Symposium, Rotterdam, Holland, 19-21 Sep. 2005
[KONNO-2007]	A Highly Sensitive Strain Sensor Using SAW	R Konno, M Mitsui, H Kuwano, S Nagasawa, K Sano, J Hayasaka	IEEE Sensors 2007, 28-31 Oct 2007, Sendai, Japan
[LEE-2011]	Carbon-Nanotube Loaded Antenna-Based Ammonia Gas Sensor	H Lee, G Shaker, K Naishadham, X Song, M McKinley, B Wagner, M Tentzeris	IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, Vol. 59, No. 10, October 2011
[LI-2010]	Liquid-Tunable Frequency Selective Surfaces	M Li, B Yu, N Behdad	IEEE Microwave And Wireless Components Letters, Vol. 20, No. 8, August 2010
[LI-2011]	A SAW Passive Wireless Sensor System for Monitoring Temperature	P Li, H Xie, Y Wen, C Wang, S Huang, Z Ren, J He, D Lu	IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland
[LIU-2009]	Non-toxic liquid metal microstrip resonators	X Liu; L Katehi, D Peroulis	APMC 2009, 7-10 Dec 2009, Singapore
[LIU-2010]	Characterization of Nontoxic Liquid-Metal Alloy Galinstan for Applications in Microdevices	T Liu, P Sen, C Kim;	Journal of Microelectromechanical Systems, Issue:99
[LOH-2007]	Passive Wireless Strain and pH Sensing Using Carbon Nanotube-Gold Nanocomposite Thin Films	KJ Loha, JP Lynch, NA Kotov	Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007
[MAHMOOD-2007]	An Evanescent-mode Cavity Resonator Based Thermal Sensor	A Mahmood, H Sigmarsson, H Joshi, W Chappell, D Peroulis	IEEE sensors 2007, 28-31 Oct 2007, Atlanta, USA
[MANDEL-2011]	A Wireless Passive Strain Sensor	C Mandel, M Schußler, R Jakoby	IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland

[MANDEL-2011-2]	Passive Wireless Temperature Sensing with BST-Based Chipless Transponder	C Mandel, H Maune, M Maasch, M Sazegar, M Schussler, R Jakoby	6th German Microwave Conference, 14–16 March 2011, Darmstadt, Germany
[MATSUZAKI-2009]	Antenna/sensor multifunctional composites for the wireless detection of damage	R Matsuzaki, M Melnykowycz, A Todoroki	Composites Science and Technology 69 (2009) 2507–2513
[MELIK-2009]	Flexible metamaterials for wireless strain sensing	R Melik, E Unal, NK Perkgoz, C Puttlitz, HV Demir	Applied Physics Letters 95, 181105 (2009)
[MOHAMMAD-2010]	Monitoring fatigue crack growth and opening using antenna sensors	I Mohammad and H Huang	Smart Mater. Struct. 19 (2010) 055023 (8pp)
[MOHAMMAD-2012]	Detecting crack orientation using patch antenna sensors	I Mohammad, V Gowda, H Zhai, H Huang	Meas. Sci. Technol. 23 (2012)
[MOULET-2008]	High piezoelectric properties in LiNbO3 transferred layer by the Smart Cut (TM) technology for ultra wide band BAW filter applications	JS Moulet, M Pijolat, J Dechamp, F Mazen, A Tauzin, F Rieutord, A Reinhardt, E Defay, C Deguet, B Ghyselen, L Clavelier, M Aid, S Ballandras, C Mazure	IEEE International Electron Devices Meeting, 15-17 Dec 2008, San Fransisco, USA
[O'TOOLE-2008]	Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices	M O'Toole, D Diamond	Sensors 2008, 8, 2453-2479
[PARRET-2008]	RFID en UHF-SHF	D Parret	Dunod, 2008
[PECH-2011]	Energy storage on chip: realization and characterizations of micro-super capacitors"	D Pech, M Brunet	Journées thématiques sur les enjeux et problématiques de l'énergie dans les microsystèmes autonomes, Bidart (France), 28-29 Novembre 2011
[PEREIRA-2011]	Wireless Acoustic Wave Sensors and Systems for Harsh Environment Applications	M Pereira, RJ Lad, P Davulis, A Canabal, T Moonlight, S Moulzolf, DJ Frankel, T Pollard, D McCann, E Dudzik, A Abedi, D Hummels, G. Bernhardt	Wireless Sensors and Sensor Networks Conference, 16-19 Jan. 2011, Phoenix, USA
[PIJOLAT-2010]	LiNbO3 Film Bulk Acoustic Resonator	M Pijolat, S Loubriat, D Mercier, A Reinhardt, E Defay, C Deguet, M Aid, S Queste, S Ballandras	IEEE Ultrasonics, 2-5 November 2008, Beijing, China
[POHL-2000]	A Review of Wireless SAW Sensors	A Pohl	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 47, no. 2, march 2000
[ROSSI-2011]	Multifunctional nano-energetical material on chip	C Rossi, M Petrantoni, MM Bahrami, G Taton, F Severac, A Berber, A Esteve, A Bancaud	WPC 2011, Reims (France), 16-19 Mai 2011, 3p.
[RUHANEN-2008]	Sensor-enabled RFID tag handbook	A Ruhanen, M Hanhikorpi, F Bertuccelli, A Colonna, W Malik, D Ranasinghe, T López, N Yan, M Tavilampi	BRIDGE Project report 2008
[RUIZ-2009]	A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry	L Ruiz-Garcia, L Lunadei, P Barreiro, J Robla	Sensors 2009, 9, 4728-4750
[SANCHEZ-2011]	RFID and sensor integration standards: State and future prospects	T Sanchez Lopez	Computer Standards & Interfaces 33 (2011) 207–213
[SARDINI-2009]	Passive and Self-Powered Autonomous Sensors for Remote Measurements	E Sardini, M Serpelloni	Sensors 2009, 9, 943-960
[SCHIMETTA-2000]	A Wireless Pressure-Measurement System Using a SAW Hybrid Sensor	G Schimetta, F Dollinger, R Weigel	IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol. 48, No. 12, December 2000
[SCHNEIDERMAN-1994]	RFID tags locate growing wireless markets	R Schneiderman	MicroWaves & RF, Volume 33, Issue 2, Feb 1994
[SCOTT-2009]	A Capacitively-Loaded MEMS Slot Element for Wireless Temperature Sensing of up to 300 C	S Scott, D Peroulis	IEEE MTT-S 2009, 7-12 June 2009, Boston, USA

[SEIFERT-1994]	Mechanical sensors based on surface acoustic waves	F Seifert, WE Bulst, C Ruppel	Sensors and Actuators A 44 (1994) 231-239
[SENIOR-2011]	Wireless Passive Sensing Application Using a Cavity Loaded Evanescent Mode Half Mode Substrate Integrated Waveguide Resonator	D. E. Senior, X. Cheng, P. Jao, C. Kim, J.K. Kim, Y.K. Yoon	Transducers'11, Beijing, China, June 5-9, 2011
[STELZER-2008]	Wireless sensor marking and temperature measurement with SAW-identification tags	A Stelzer, S Scheiblhofer, S Schuster, R Teichmann	Measurement 41 (2008) 579–588
[TATA-2009]	Exploiting a patch antenna for strain measurements	U Tata, H Huang, RL Carter, C Chiao	Meas. Sci. Technol. 20 (2009) 015201 (7pp)
[THAI-2008]	Development of a Fully-Integrated Ultrasensitive Wireless Sensor Utilizing Carbon Nanotubes and Surface Plasmon Theory	T Thai, A Haque, J Ratner, G DeJean, M Tentzeris	IEEE Electronic Components and Technology Conference, 27-30 May 2008, Buena Vista, USA
[THAI-2009]	A Novel Front-End Radio Frequency Pressure Transducer based on a Dual-band Resonator for Wireless Sensing	T. T. Thai, G.R. DeJean, M.M. Tentzeris	International Microwave Symposium, 7-12 June 2009, Boston, USA
[THAI-2009-2]	Characterization and Testing of Novel Polarized Nanomaterial Textiles for Ultrasensitive Wireless Gas Sensors	T Thai, J Ratner, WH Chen, G DeJean, MM Tentzeris	2009 IEEE 59TH Electronic Components And Technology Conference, Vols 1-4 Pages: 1049-1052
[THAI-2010]	A Novel Passive Wireless Ultrasensitive Temperature RF Transducer for Remote Sensing	T Thai, M Jatlaoui, H Aubert, P Pons, GR DeJean, MM Tentzeris, R Plana	International Microwave Symposium, May 23-28 2010, Anaheim (USA)
[THAI-2011]	A Newly Developed Radio Frequency Wireless Passive Highly Sensitive Strain Transducer	T Thai, H Aubert, P Pons, R Plana, MM Tentzeris	IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland
[THOMSON-2009]	RF Cavity Passive Wireless Sensors With Time-Domain Gating-Based Interrogation for SHM of Civil Structures	D J Thomson, D Card, G E Bridges	IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 11, November 2009
[TOURETTE-2010]	Captur SAW implantable dédié à la télémessure de la température et de la pression artérielle	S. Tourette, L. Chommeloux, J.F. Le Guen, J.M. Friedt, P. Ménage, G. Collin, R. Staraj, D. Hermelin, S. Ballandras, C. Luxey, P. Le Thuc	IRBM 31 (2010) 101–106
[TRAILLE-2011]	A Wireless Passive RCS-based Temperature Sensor using Liquid Metal and Microfluidics Technologies	A Traille, S Bouaziz, S Pinon, P Pons, H Aubert, A Boukabache, M Tentzeris	European Microwave Week (EUMC), Oct 9-14 2011, Manchester, UK
[UMBRECHT-2010]	Wireless implantable passive strain sensor	F Umbrecht, P Wagli, S Dechand, F Gattiker, J Neuenschwander, U Sennhauser, C Hierold	J. Micromech. Microeng. 20 (2010) 085005 (14pp)
[WANG-2008]	A Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications	Y Wang, Y Jia, Q Chen, Y Wang	Sensors 2008, 8, 7982-7995
[WEN-2004]	A Passive Coding Resonant Wireless SAW Temperature Sensor Array	Y Wen, P Li, Z Zhoy	IEEE Sensors 2004, October 24-27, Vienna, Austria
[XU-2011]	Multiplexing passive wireless antenna sensors for multi-site crack detection	X Xu, H Huang	Smart Mater. Struct. 20 (2011)
[YE-2011]	Studies of a high-sensitive surface acoustic wave sensor for passive wireless blood pressure measurement	X Ye, L Fanga, B Liang, Q Wang, X Wang, L Heb, W Bei, WH Koc	Sensors and Actuators A 169 (2011) 74– 82
[YOGI-1998]	Microwave ring resonator as a novel bio-material moisture sensor	R. Yogi, S. Gangal, R. Aiyer, R. Karekar	Sensors and Actuators B 50 (1998) 38–44
[ZHAO-2008]	A Micromachined Airflow Sensor Based on RF Evanescent-Mode Cavity Resonator	Y Zhao, SH Kim, Y Li, B Pan, X Wu, M Tentzeris, J Parapolymmerou, MG Allen	IEEE MTT-S 2008, 15-20 June 2008, Atlanta, USA

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Mes travaux de Recherche s'inscrivent dans le développement de nouveaux microsystemes pour différentes applications. Ils partent tout d'abord de la validation de concepts par la réalisation et la caractérisation de démonstrateurs pour ensuite développer des microsystemes performants et fiables avec le souci in fine d'un transfert industriel. Dans chaque domaine étudié capteurs de pression, MEMS RF, capteurs RF, mes recherches essayent de suivre ce cycle qui part de travaux plus amont vers une recherche appliquée et finalement vers un transfert industriel.

Pour les micro-capteurs de pression, les travaux sont anciens et ont démarré au LAAS au début des années 1980 avant mon arrivée au laboratoire. Durant une dizaine d'année j'ai participé au développement de ce type de capteurs de pression à détection capacitive et piézorésistive. Les procédés technologiques étudiés et mis en place (gravure anisotrope, soudure anodique), sont maintenant utilisés classiquement par de très nombreux chercheurs. Depuis 2000 je suis responsable de la thématique scientifique sur les capteurs de pression au LAAS

Un premier transfert technologique a été finalisé à la fin des années 1990 avec la société AUXITROL-ESTERLINE sur des capteurs piézorésistif sur SOI pour des applications haute température dans le domaine aéronautique. Ce type de capteurs est encore commercialisé de nos jours par cette société.

Plus récemment, nous avons démarré des travaux sur le packaging collectif de ces capteurs afin d'augmenter leur température de fonctionnement et de diminuer leur prix de fabrication. Une première phase vient de se terminer avec le transfert d'un procédé à base de capots en pyrex. Les tests de qualification de cette filière sont en cours chez AUXITROL-ESTERLINE avec l'objectif de fournir les premiers prototypes à leurs clients en 2013-2014.

Une seconde phase va démarrer prochainement sur des capots en silicium pour des applications plus haute température (>250°C).

Une autre filière de capteur de pression a également été développée pour un capteur de pression intracrânienne avec la société HEMODIA. Démarré à la fin des années 1990, ce projet s'est concrétisé début 2007 et a fait l'objet d'un financement par l'ANR. Ce capteur comprend non seulement un capteur de pression mais également un capteur de température et un générateur de pression électrostatique qui doit permettre une auto calibration in situ du capteur de pression (Brevet US2009036754). L'ensemble de la chaîne a été développée (cellules sensibles, interconnexions, cathéter) et les premiers tests réalisés in vivo sur la brebis sont très encourageant. Le capteur possède une liaison sans fil grâce à une interface RF. Des tests plus approfondis (in vitro puis in vivo) sont en cours chez HEMODIA pour évaluer plus précisément et plus statistiquement

les performances de ces capteurs. Un fondeur est également recherché par HEMODIA pour obtenir des cellules plus représentatives du dispositif final. Pour la suite, mes travaux porteront essentiellement sur une phase de conseil à HEMODIA pour finaliser le transfert industriel et l'optimisation des capteurs.

D'une manière générale, la prospective de recherche dans ce domaine est axés sur le transfert industriel et la valorisation.

Le deuxième volet concerne le développement de microsystèmes pour application hyperfréquence. Cette nouvelle thématique, lancée au laboratoire en 1995 en collaboration avec Robert Plana, a été la première en France dans ce domaine.

La brique de base de ce type de microsystème est un micro-commutateur à contact capacitif ou résistif (métal-métal). Une filière technologique a ainsi été mise en place et optimisée pour pouvoir réaliser en même temps les deux types de commutateurs. La filière, maintenant stabilisée, est basée sur des ponts/poutres en or obtenus par gravure d'une couche sacrificielle de polymère. L'actionnement, de type électrostatique, peut être réalisé à l'aide d'électrodes enterrées en polysilicium. La tension d'actionnement typique de ces micro-commutateurs est d'une quinzaine de volts. La maîtrise des contraintes dans les poutres a permis de minimiser la déformation initiale de ces dernières ($< 3\mu\text{m}$ pour une longueur de $400\mu\text{m}$). La qualité du contact capacitif obtenu permet d'atteindre des valeurs de capacité à l'état bas proche de 50% de la capacité théorique correspondant à contact parfait, et ceci sans actionnement au niveau du contact.

De nombreux démonstrateurs (micro-commutateurs, filtres accordables, déphaseurs, antennes agiles, ...) ont pu être réalisées grâce à cette filière technologique dans le cadre de projets le plus souvent collaboratifs Régionaux, Nationaux et Européens.

Le développement de cette filière a généré des études plus fondamentales concernant le chargement des diélectriques pour le contact capacitif et le contact métal/métal afin de résoudre les problèmes de fiabilité rencontrés dans ces structures.

Pour le chargement des diélectriques des collaborations ont été menées avec l'équipe « Diélectriques Solides et Fiabilité » du LAPLACE à Toulouse (spécialiste des propriétés électriques des matériaux), l'université NKUA à Athènes (compétences en physique des matériaux) et le « Nanoprobe Laboratory for Bio- and Nanotechnology & Biomimetics » aux USA (spécialisé dans la nano-tribologie). Ces collaborations ont permis de mettre en place et valider un banc de caractérisation performant basé sur un AFM pour caractériser le chargement à l'échelle nanométrique à partir de simple couches diélectriques. Ces travaux ont permis d'identifier les paramètres clés qui gouvernent le chargement des diélectriques avec notamment l'influence de

l'environnement (humidité, gaz, ..) et le couplage entre les forces électrostatiques et la formation du ménisque d'eau au niveau des aspérités. Preuve de la qualité des recherches menées dans ce domaine, une quinzaine de publications a été acceptées depuis 2007 dans des revues internationales, dont 2 récemment dans la revue « Journal of Colloid and Interface Sciences » qui est crédité d'un facteur d'impact moyen supérieur à 3.2 sur les cinq dernières années. L'une d'elle a par ailleurs été sélectionnée pour la couverture d'un numéro.

Pour l'étude du contact métal-métal, une collaboration est menée avec l'équipe « Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques » de l'Institut Clément Ader à Toulouse spécialisée dans la simulation mécanique et avec la société NOVAMEMS qui a développé un banc de caractérisation dédié à l'étude du contact métal-métal. Une particularité du contact dans les micro-commutateurs est liée aux très faibles forces de contact mises en jeu qui génèrent des contacts très localisés (échelle nanométrique). Les phénomènes de surface jouent alors un très grand rôle et la résistance de contact est nettement supérieure à la résistance théorique obtenue avec un contact parfait. Afin de mieux comprendre les phénomènes présents lors de ce type de contact, une plateforme de simulation originale est en cours de développement. Celle-ci permet de simuler le contact à l'échelle nanométrique en introduisant dans le simulateur un relevé AFM des surfaces en regard. La partie purement mécanique est opérationnelle et a permis de montrer que la valeur élevée de la résistance de contact obtenue lors des caractérisations ne pouvait pas être expliquée par la valeur de la surface de contact mécanique définie par les nano-aspérités de surface. Cette différence ne peut s'expliquer que par la présence, à la surface du métal, d'un film isolant non continu sûrement lié à des problèmes de pollution (lors de la fabrication ou de la pollution de l'air) qui réduit encore la surface de contact électrique effective. Les travaux sont en cours pour pouvoir simuler le couplage électro-thermo-mécanique qui permettra d'appréhender notamment les phénomènes d'auto-échauffement liés au passage du courant dans les nano-aspérités.

En parallèle un banc de gonflement de membranes a été développé afin de pouvoir caractériser les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la filière technologique, notamment l'or. Ce banc permet déjà d'obtenir des informations fiables à $\pm 6\%$ sur la valeur du module d'Young. Des discussions sont en cours avec la société NOVAMEMS pour un transfert industriel de ce banc de caractérisation à cette société.

La prospective de recherche dans le domaine des MEMS RF concerne tout d'abord l'optimisation des plateformes de simulation et de caractérisations mises en place (gonflement de membranes, étude du chargement des diélectriques par AFM, simulation du contact métal/métal à l'échelle nanométrique), puis l'utilisation de ces outils pour l'étude des MEMS RF mais à terme des NEMS RF. La filière technologique étant maintenant développée, une phase de transfert industriel pourra être mise en place si l'opportunité se présente.

Grâce à mon expérience dans les capteurs et les microsystèmes RF, j'ai démarré en Février 2005 un nouvel axe de recherche sur les capteurs à transduction électromagnétique qui se situent à la frontière entre ces deux disciplines. Le LAAS a ainsi été un des pionniers au niveau international sur cette thématique puisque seulement deux publications antérieures aux nôtres ont été trouvées sur un capteur de gaz et un capteur de contrainte. Preuve de l'attractivité de notre laboratoire dans ce domaine, un laboratoire du « Georgia Institute of Technology » aux USA nous a sollicités en 2009 pour démarrer une collaboration sur ce sujet. Des travaux sont actuellement en cours avec ce laboratoire avec l'accueil au LAAS de doctorants provenant du « Georgia Institute of Technology ». Le responsable de ce laboratoire a également passé plusieurs mois en détachement au LAAS en 2011 et doit revenir en 2012.

Aujourd'hui j'assume la responsabilité scientifique de cet axe de Recherche en collaboration étroite avec Hervé Aubert, spécialiste en électromagnétisme. Ces capteurs sans fils sont complètement passifs, c'est-à-dire sans circuits d'émission, ne nécessitent aucune d'énergie embarquée et peuvent être interrogés à plusieurs dizaines de mètres. Dénudés de circuits électroniques et de batteries, ils sont particulièrement intéressants pour les applications en environnements sévères.

Ces capteurs, basés sur la modification de la fréquence de résonance d'un résonateur RF par la grandeur à mesurer, sont interrogés par radar en analysant le signal rétrodiffusé. Cette thématique, très prometteuse (un brevet déposé) est en forte progression car elle concerne les systèmes autonomes communicants embarqués en réseau.

La première phase de ces travaux concerne actuellement la validation de différents concepts pour réaliser différents capteurs. Nous avons déjà validé un capteur de pression avec une excellente sensibilité qui a été le premier publié au monde. Un capteur de contrainte, potentiellement 2 à 4 fois plus sensible que ceux présentés dans la littérature, est également en cours de validation. Enfin des capteurs de température à base de MEMS ou utilisant la micro-fluidique sont également en cours de validation. Ces travaux sont encore aujourd'hui uniques dans le monde à notre connaissance.

Un radar FMCW a également été développé pour réaliser l'interrogation à distance des capteurs. Les tests ont montré qu'il était possible d'interroger une cible métallique de 1cm^2 à une distance de 14m avec des puissances compatibles avec la réglementation.

Ces travaux ont déjà fait l'objet de nombreuses publications dont deux comme papier invité en 2011 (International Conference on Microwave and High Frequency Heating) et en 2012 (Indo-French Symposium on Sensors Technologies and Systems).

La prospective de recherche sur le thème des capteurs sans fils passifs à transduction électromagnétique reste entière puisque la validation des concepts des transducteurs n'est pas

finalisée. Les filières technologiques sont également en phase de développement avec notamment les travaux qui touchent à l'intégration micro-fluidique et au Galinstan.

Il faudra ensuite passer à la phase d'optimisation pour chaque application avec des spécifications précises. Cette phase sera réalisée avec des utilisateurs (Industriels, Institut,) dans le cadre de projets collaboratifs. On peut déjà citer un capteur de radiation pour les fortes doses basé sur le dégazage d'un polymère dans une microcavité couplée à un capteur de pression. Les travaux démarreront en 2012, dans le cadre d'un projet Européen ERANET-MNT en partenariat avec l'université de Wroclaw, le Soltan Institut en Pologne et une société Toulousaine.

Comme nous l'avons vu, la transduction électromagnétique permet d'adresser un grand nombre d'applications. De nouveaux types de capteurs seront également explorés en fonction des moyens disponibles. On peut citer notamment l'utilisation de matériaux comme le graphène ou les couches constituées de nanoparticules qui présentent de très forte variation de résistivité avec la contrainte et qui peuvent ainsi être utilisées comme impédance variable.

Une brique commune à tous ces différents capteurs concerne le lecteur qui est constitué par le Radar et le traitement du signal associé. Le développement de lecteurs performants conditionnera également fortement la qualité des capteurs réalisés.