



**HAL**  
open science

# Les micro-nanotechnologies pour les systèmes hyperfréquences: au-delà des conventions

Katia Grenier

► **To cite this version:**

Katia Grenier. Les micro-nanotechnologies pour les systèmes hyperfréquences: au-delà des conventions. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. tel-00627334

**HAL Id: tel-00627334**

**<https://theses.hal.science/tel-00627334>**

Submitted on 28 Sep 2011

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

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

## **MEMOIRE**

Préparé au  
**Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du C.N.R.S.**

En vue de l'obtention de  
**L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**  
**de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**

par

**Katia GRENIER**  
Chargée de Recherche au C.N.R.S.

## **Les micro-nanotechnologies pour les systèmes hyperfréquences: au-delà des conventions**

**Directeur de recherche:**  
**Jacques GRAFFEUIL**, Professeur de l'Université de Toulouse

**Rapporteurs:**  
**Jean-Baptiste Béguéret**, Professeur de l'Université de Bordeaux - Laboratoire IMS  
**Henri HAPPY**, Professeur de l'Université de Lille - Laboratoire IEMN  
**Serge VERDEYME**, Professeur de l'Université de Limoges - Laboratoire XLIM

**Examineur:**  
**Jean-Jacques Fournié**, Directeur de Recherche CNRS, Unité 563 de l'INSERM,  
Centre de Physiopathologie Toulouse Purpan

15 Novembre 2010

## SOMMAIRE

---

<i>Introduction générale : démarche suivie</i> .....	3
<b><i>Partie 1 : Positionnement et synthèse des activités de recherche</i></b> .....	<b>7</b>
<b><i>I. Apports des microtechnologies pour dépasser les verrous du substrat silicium lors de l'élaboration de microsystèmes hyperfréquences</i></b> .....	<b>7</b>
1. Compatibilité technologique des Circuits Intégrés .....	7
2. Technologies de circuits passifs à fort Q par suppression localisée du silicium.....	9
3. Intégration tridimensionnelle .....	10
4. Approche matériau composite polymère modifié par des nanotubes de carbone .....	17
5. Approche microsystème : intégration de circuits actifs et passifs à fort Q .....	19
<b><i>II. Comment apporter de l'intelligence aux microsystèmes hyperfréquences ?</i></b> .....	<b>23</b>
1. MEMS RF : Approche composants.....	25
2. MEMS RF - Approche circuits : reproductibilité technologique de composants MEMS.....	40
3. MEMS RF - Approche microsystème .....	43
<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>45</b>
<b><i>Partie 2 : Projet et perspectives de recherche - Au delà des disciplines: que peut apporter la microfluidique aux systèmes hyperfréquences ? Ouverture à de nouveaux domaines applicatifs tels que la biologie et la médecine.</i></b> .....	<b>46</b>
<b><i>I. Positionnement des travaux</i></b> .....	<b>47</b>
<b><i>II. Travaux initiés</i></b> .....	<b>52</b>
<b><i>III. Perspectives de recherche</i></b> .....	<b>56</b>
<b><i>Références</i></b> .....	<b>63</b>
<b><i>Partie 3 : CV détaillé et production scientifique</i></b> .....	<b>66</b>
<b><i>I. Curriculum vitae détaillé</i></b> .....	<b>66</b>
<b><i>II. Activités d'encadrement</i></b> .....	<b>68</b>
<b><i>III. Responsabilités scientifiques et rayonnement</i></b> .....	<b>70</b>
<b><i>IV. Production scientifique</i></b> .....	<b>73</b>

## Introduction générale : démarche suivie

L'évolution de notre société est spectaculaire. Les nouvelles technologies apportent sans cesse des bouleversements dans nos vies, dont nous n'avons d'ailleurs pas toujours conscience tellement ces changements sont rapides et naturels.

Qui aujourd'hui ne possède pas un téléphone portable extra miniature, avec peut être de multiples fonctionnalités intégrées: appareil photo, boussole, loupe et j'en passe?

Qui ne circule pas dans des infrastructures en constante évolution: modernité des voitures avec climatisation, GPS, radar anti-collisions, trains à grande vitesse, extension des lignes de TRAMS ou métro toujours plus sûres, avions de plus en plus larges, visite de l'espace dans un futur proche...

Qui n'a pas entendu parlé des progrès phénoménaux réalisés en médecine avec par exemple la technique d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ou encore l'accès des chirurgiens à des outils extrêmement précis, assistés par ordinateur?

Oui, notre monde évolue très rapidement et ce grâce aux nouveaux développements technologiques réalisés. Tout ceci est régi pour partie par notre société de consommation, certes, mais aussi avec la volonté de rendre la vie plus facile, plus efficace, plus sûre à tous.

Parmi ce contexte très général de révolutions technologiques, ma très modeste contribution se situe dans le *développement de microsystèmes hyperfréquences*.

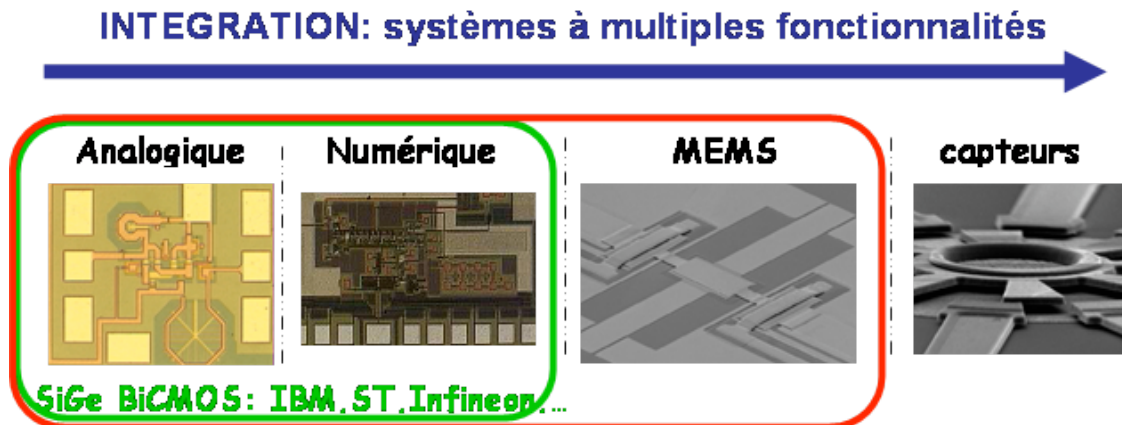
Du point de vue communication et transfert d'informations, de nouvelles solutions technologiques sont à trouver et mettre en place afin de satisfaire les besoins croissants des utilisateurs que nous sommes. Pour des raisons de débits d'information, d'encombrement des bandes de fréquence ainsi que de sensibilité aux rayonnements, il est nécessaire de s'orienter vers des systèmes fonctionnant à des fréquences de plus en plus élevées et véhiculant des niveaux de puissances réduits (pour des raisons de santé). Ces premiers impératifs, ajoutés à une multiplication des applications et utilisateurs associés, se traduisent par des demandes de circuits aux performances électriques améliorées en particulier vis à vis du bruit, de la linéarité, de la consommation, de la souplesse d'utilisation et de la fiabilité pour des coûts de fabrication toujours plus faibles et un encombrement minime.

Ces demandes se situent aux limites des possibilités des techniques conventionnelles de fabrication de circuits intégrés. Il est donc nécessaire d'initier de nouvelles solutions technologiques pour les futurs systèmes de communication, tout en les considérant d'emblée dans leur environnement, c'est-à-dire associés à d'autres fonctionnalités telles que des capteurs, des actionneurs, le traitement des signaux. Or, les technologies correspondantes sont rarement compatibles car elles font appel à des matériaux et techniques de réalisation bien distinctes suivant l'application visée. Le développement de technologies mixtes permettant de réaliser de multiples fonctionnalités séparément et/ou simultanément représente donc depuis des décennies un challenge énorme.

J'ai donc travaillé à associer les technologies conventionnelles de fabrication de circuits intégrés avec celles moins conventionnelles des micro et nano technologies et développer ces dernières afin d'ajouter de nouvelles fonctionnalités aux systèmes électroniques hautes fréquences (cf. illustration d'intégration multi-fonctionnelle de la Figure 1).

Des approches similaires avaient émergé dans les années 80s-90s à basses fréquences avec l'association de circuits intégrés de type MOS avec des capteurs, mais peu de travaux et résultats

existaient sur la réalisation de microsystèmes pour les communications du futur. Ce vaste sujet a donc constitué mon thème de recherche depuis 1997 sous les directions des Professeurs Jacques Graffeuil et Robert Plana à mes débuts.



**Figure 1.** Vers une forte intégration des systèmes de communications ‘intelligents’

Comme vous le verrez, ces recherches ont débuté par le développement de composants passifs à fort coefficient de qualité, étendues ensuite à leur intégration avec des circuits actifs à base d’hétérostructure SiGe dès mon post-doctorat à Bell Labs. Pour ajouter de la reconfigurabilité aux systèmes – certains aiment à utiliser plutôt le terme d’intelligence –, l’utilisation d’éléments électromécaniques actionnables classiquement développés pour la réalisation de capteurs a nécessité de très lourds développements technologiques pour les rendre compatibles non seulement en terme de fréquence aux gammes micro-ondes et millimétriques, mais aussi dans une approche d’intégration microsystème avec des technologies de circuits intégrés.

Est venu le temps des nanotubes de carbone et de leurs propriétés hors du commun. Comment ne pas réagir face à un tel matériau ? Quelles pourraient être les intérêts de ces nanotubes pour les microsystèmes hyperfréquences ? Toutes ces questions nous ont amené avec mon collègue David Dubuc à initier au LAAS leur exploitation pour des applications hyperfréquences dès 2005. La réponse n’est pas triviale et demandera encore beaucoup d’année d’investigations en raison des énormes sauts technologiques nécessaires pour permettre leur complète implémentation dans un microsystème HF.

Enfin, suite à une présentation suivie à Bell Labs en 2001 sur des systèmes microfluidiques, l’idée de combiner fluides et microsystèmes hyperfréquences a progressivement germé dans mon esprit. Mon intérêt pour la biologie a refait surface. Et en laissant mijoter tout cela quelques années, j’ai pensé que les microsystèmes HF pouvaient avoir des intérêts forts pour le domaine de la santé, mais pas uniquement via l’établissement de réseaux communicants. L’idée consiste à exploiter l’interaction des ondes ElectroMagnétiques (EM) avec la matière et notamment des liquides biologiques afin d’élaborer de nouveaux outils d’analyse biologique. Le but est simple. Il consiste à mieux répondre aux besoins de la société en terme de surveillance de la santé de chacun, de prévention médicale, mais aussi de dépistage et diagnostic précoce de maladies telles que le cancer. Afin de donner toute l’ampleur que j’accorde à ce concept, j’ai demandé mon affectation au LIMMS pour une durée de 2 ans avec le Prof. Fujita, du fait de sa forte expertise à la fois en BioMEMS et en MEMS/NEMS avancés.

Et avec mon collègue David Dubuc, nous nous sommes rendu compte au fur et à mesure de nos travaux respectifs que l’utilisation de fluides dans des microsystèmes hyperfréquences présentent des

attraits forts pour la biologie mais aussi pour l'électronique haute fréquence (HF), qui conventionnellement utilise des composants à l'état solide depuis des décennies.

Suite à nos premiers travaux sur ce domaine, nous avons initié une nouvelle thématique de recherche à notre retour au LAAS. Ces travaux se positionnent à l'interface de 3 disciplines : Fluidique, Electronique HF et Micro-Nanotechnologies, pour proposer des innovations technologiques :

- d'imagerie, d'outils de diagnostic, pronostic, et plus largement d'analyse pour la biologie, la pharmacologie, la médecine, la sécurité alimentaire et même l'environnement,
- mais aussi pour l'intégration de microsystèmes à fonctionnalités nouvelles et multiples dans le domaine de l'électronique haute fréquence : instrumentation, aéronautique, communication...

La **Figure 2** apporte une vision globale de cette démarche scientifique depuis une dizaine d'année.

Avec ce préambule, j'espère que vous aurez compris ma démarche scientifique : implémenter de nouvelles micro et nanotechnologies au sein de systèmes hyperfréquences en allant le plus possible au-delà des solutions conventionnelles et en dépassant les frontières des disciplines.

Excellente lecture...

## Les micro et nanotechnologies pour les systèmes hyperfréquences: au-delà des conventions

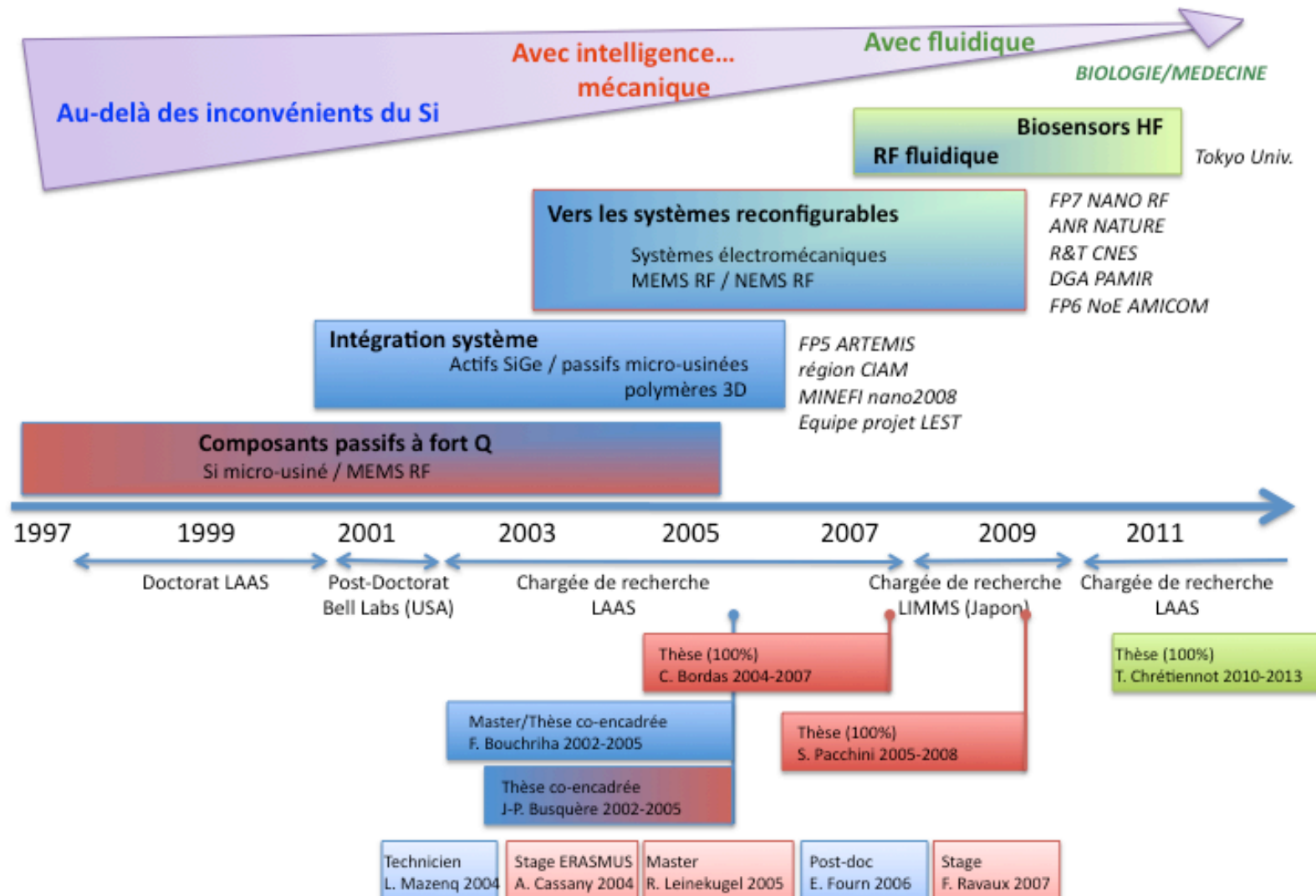


Figure 2. Vue générale des activités/projets et des encadrements associés

## Partie 1 : Positionnement et synthèse des activités de recherche

Les travaux présentés dans cette partie ont trait au développement de micro-nanosystèmes hyperfréquences pour applications en télécommunication. Différents aspects sont abordés :

- d'une part le fait de développer des microtechnologies hyperfréquences intégrables qui permettent de s'affranchir des verrous imposés par l'utilisation de substrat en silicium, qui est classiquement utilisé par les fondeurs de circuits intégrés pour sa très grande disponibilité à faible coût ;
- d'autre part l'ajout de reconfigurabilité aux systèmes grâce à des fonctions électromécaniques issues des technologies utilisées pour la réalisation de capteurs et actionneurs MEMS.

### I. Apports des microtechnologies pour dépasser les verrous du substrat silicium lors de l'élaboration de microsystèmes hyperfréquences

Encadrement de:

*DEA et Thèse de Fouad Bouchriha, 2002-2005*

*Travaux de Laurent Mazon, 2004*

*Thèse de Sébastien Pacchini, 2005-2008*

Participation active aux travaux de:

*Thèse de Ming Nhut Do, 2003-2007*

Afin de minimiser l'encombrement et coût des futurs systèmes de communications, il est important de pouvoir associer facilement des circuits intégrés avec des composants passifs améliorés. Néanmoins, les technologies des circuits actifs, que ce soit pour les parties bande de base ou réception/émission des signaux hyperfréquences avec les technologies CMOS ou à hétérostructure SiGe, impliquent systématiquement l'utilisation de substrat en silicium de basse résistivité étant donné son très faible coût. Or le silicium n'est pas un bon substrat pour les applications hyperfréquences car il présente intrinsèquement, de part sa tangente de perte et sa conductivité, des pertes diélectriques et des dispersions considérables aux fréquences micro-ondes et millimétriques.

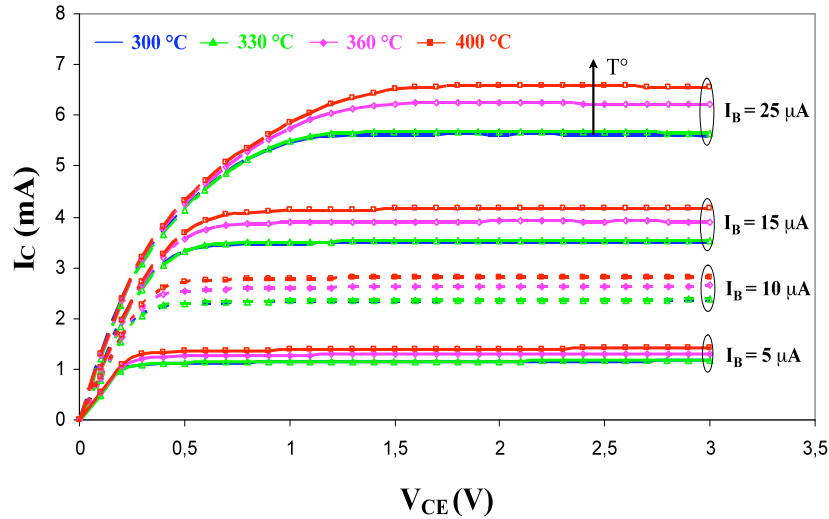
D'autre part, le fort coût des circuits intégrés (ICs) inhérent non seulement à la fabrication des jeux de masques nécessaires mais aussi aux machines d'insolation submicroniques implique la minimisation de l'espace occupé par les circuits passifs à ajouter auprès des ICs.

Différentes solutions technologiques sont donc à envisager pour pallier à ces limitations imposées par l'utilisation du silicium pour des applications hyperfréquences. Elles s'axent autour de la suppression localisée du silicium et d'une intégration tridimensionnelle grâce à des technologies polymères. Mais avant tout, il faut savoir le budget thermique possible pour pouvoir « post-processer » des circuits passifs avec des ICs.

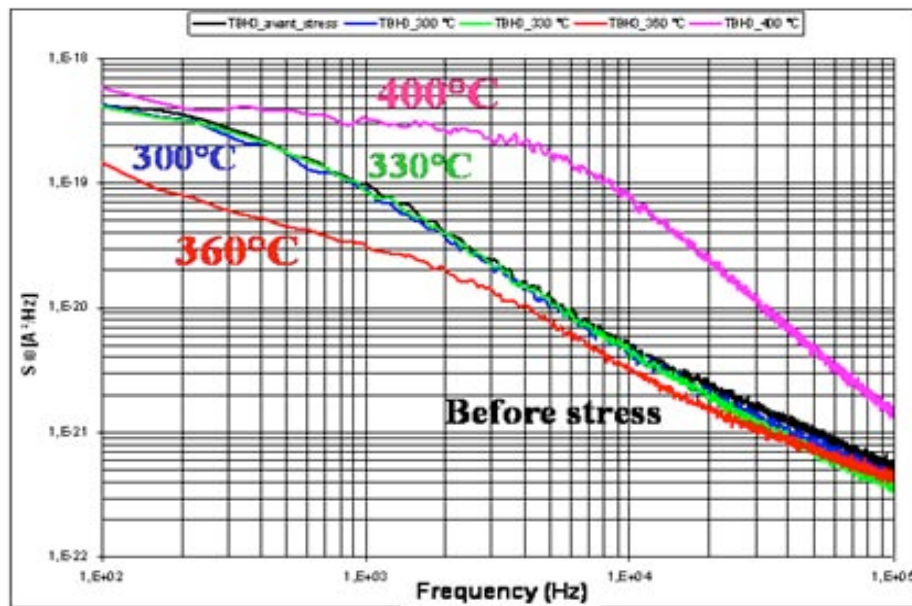
#### 1. Compatibilité technologique des Circuits Intégrés

Pour définir la température maximale qu'un substrat avec ICs peut supporter sans modification rédhibitoire, différentes températures de recuit avaient été testées sur des transistors HBT SiGe du fondeur ATMEL. Que ce soit en mesure statique ou pour des mesures de bruit basse fréquence, qui donnent des informations importantes sur l'état de l'hétérostructure SiGe (cf. Figure 3 et Figure 4), la température maximale possible se situe aux alentours de 350°C. Au-delà de cette limite, des modifications irréversibles des composants actifs ont lieu : le gain en statique est modifié et des sources de génération-recombinaison apparaissent.





**Figure 3.** Caractéristique directe d'un transistor TBH-SiGe test après un recuit thermique à différentes températures (300 °C, 330 °C, 360 °C et 400 °C) [33]



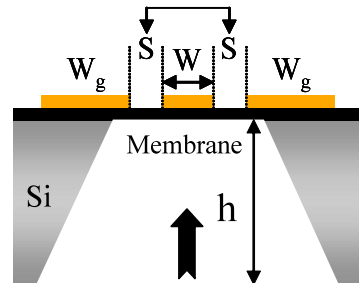
**Figure 4.** Densité spectrale du bruit basse fréquence du courant de base lors d'une rampe en température [33]

En conséquence, toute technologie de post-processing sur substrats avec circuits intégrés ne doit pas dépasser 330°C. Ceci élimine bon nombre d'étapes technologiques telles que l'utilisation d'oxyde de silicium thermique ou de nitrure de silicium par LPCVD par exemple.

Cette étude a également permis de mettre en avant l'utilité de mesures en bruit basse fréquence par rapport à une caractérisation purement statique pour vérifier la compatibilité d'étapes technologiques avec les circuits SiGe. Ces mesures en bruit présentent en effet un état précis de l'hétérostructure SiGe que ne peuvent fournir des mesures en régime statique.

## 2. Technologies de circuits passifs à fort Q par suppression localisée du silicium

Une première solution initiée à l'Univ du Michigan par L. Katehi [Katehi 1998] consistait à totalement micro-usiner le silicium sous le circuit avec une configuration coplanaire par exemple, comme indiquée sur la Figure 5.

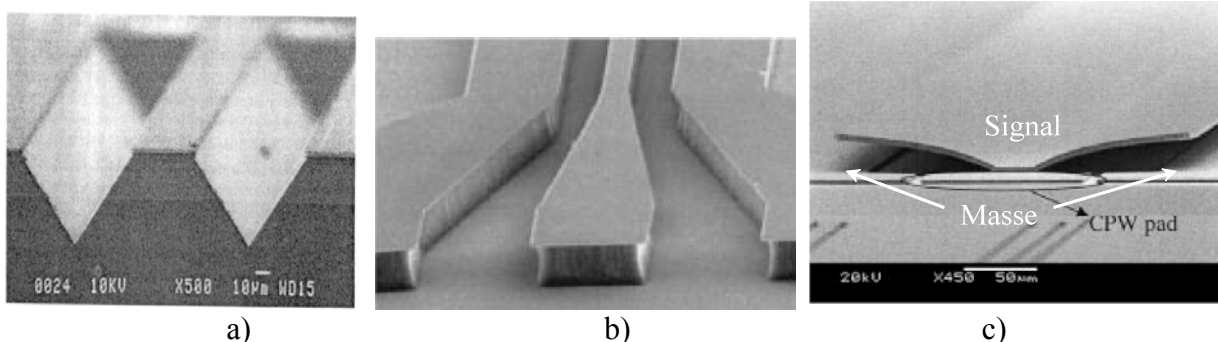


**Figure 5.** Schéma en coupe d'une ligne coplanaire suspendue sur membrane

C'est bien entendu une solution très efficace en terme de pertes puisque l'on s'affranchit du substrat, qu'il soit de haute ou faible résistivité. Néanmoins, la permittivité effective des lignes étant proche de celle de l'air, les circuits présentent alors de très larges dimensions. Suivant le type de circuit à post-processer, cet encombrement accru peut être rédhibitoire.

Par exemple, la réalisation de filtre à fort facteur de qualité peut paraître particulièrement attrayante au premier abord avec une telle technologie faibles pertes (cf. mes travaux de thèse). Néanmoins, l'espace nécessaire à des tronçons mi-onde ou quart d'onde peut représenter plusieurs millimètres voir centimètre, ce qui n'est pas compatible avec le coût de substrat avec ICs. En revanche, cette technologie s'est révélée particulièrement attractive pour la réalisation d'antennes pour un microsysteme de communication centré à 24 GHz (cf. la partie du manuscrit dédiée à l' "approche microsysteme: intégration de circuits actifs et passifs").

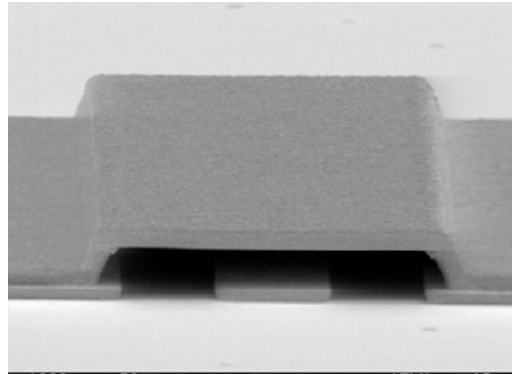
Une autre approche a consisté à micro-usiner le substrat de façon plus précise, localisée à des endroits où les lignes de champ sont maximales [112]. Quelques exemples de la littérature sont donnés sur la Figure 6.



**Figure 6.** Vues au MEB de lignes coplanares a) et b) micro-usinées en surface dans les fentes coplanares [Herrick 2003, Ponchack 2001], et c) avec le conducteur central sur-élevé au-dessus des plans de masse [Kwon 2001].

Des micro-usinages de surface dans les fentes coplanares ont été testés avec succès ainsi qu'une solution avec des "ailes d'avion" comme conducteur central au-dessus des plans de masse latéraux. Cette dernière solution permet de maintenir de faibles pertes pour une large plage d'impédance caractéristique ( $Z_c$ ).

Une ligne coplanaire blindée a également été proposée par Happy (cf. photographie en **Figure 7**). Elle permet de minimiser les pertes sur substrat silicium standard, de supprimer les modes indésirables qui se manifestent en présence de discontinuités et d'élargir la plage de variation de l'impédance caractéristique.



**Figure 7.** Ligne coplanaire blindée utilisant un capôt métallique [Happy 2000]

Toutes ces solutions correspondent historiquement à une étape importante vers la minimisation des pertes induites par le substrat silicium. Le stade suivant consistait naturellement à envisager toujours plus d'intégration et donc l'ajout de circuits en utilisant la voie tridimensionnelle.

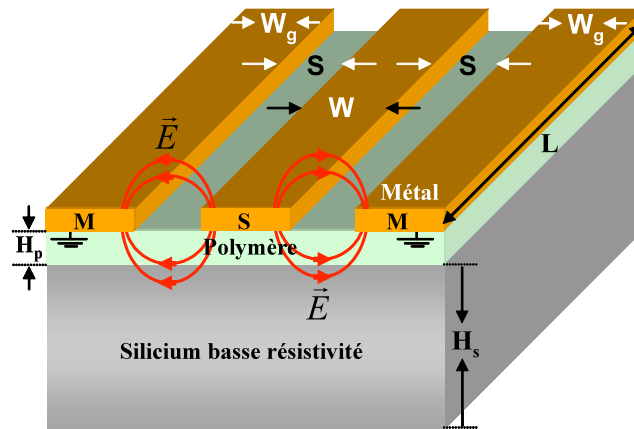
### 3. Intégration tridimensionnelle

Une autre voie importante vers l'intégration monolithique de circuits passifs à fort Q avec des circuits intégrés porte sur l'intégration tridimensionnelle des systèmes. Cette solution est parfaitement compréhensible si l'on observe l'évolution de nos grandes mégapoles, comme ici le quartier de Shinjuku à Tokyo sur la Figure 8, où l'espace n'est plus gagné uniquement en surface mais également à la verticale.



**Figure 8.** Quartier de Shinjuku à Tokyo

L'un des grands précurseurs dans cette voie pour les hyperfréquences a été G. Ponchack [Ponchack 2001] avec l'utilisation de couche polymère pour éloigner les circuits par rapport au substrat à pertes, comme pour l'exemple d'une ligne coplanaire indiquée sur la Figure 9.

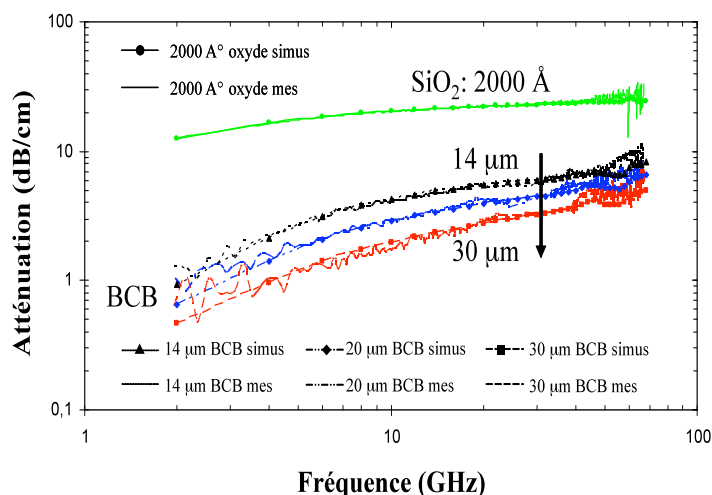


**Figure 9.** Vue en coupe d'une ligne coplanaire éloignée du substrat Si par une couche polymère

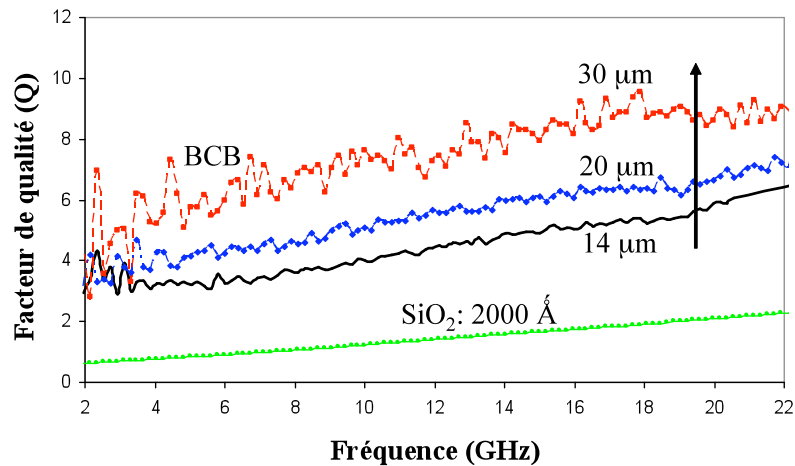
Pour être compatible "hyperfréquences", le matériau choisi doit présenter de faibles pertes aux fréquences désirées, ce qui est le cas du benzocyclobutène (BCB) de Dow Chemicals, du PI-1111 de Dupont ou encore des Liquid Crystal Polymers (LCPs).

Les avantages de cette technologie sont multiples. D'une part, le budget thermique nécessaire est compatible avec du "post-processing" sur circuits intégrés. L'étape de polymérisation du polymère en général ne dépasse pas 300°C. La polymérisation complète du BCB se fait même à 250°C durant une heure. D'autre part, certains de ces polymères peuvent être simplement déposés à la tournette et ce à plusieurs reprises, ce qui permet l'élaboration de circuits tridimensionnels facilement. Les LCPs sont quant à eux laminés.

Au niveau du LAAS, nous nous sommes intéressés au BCB. Suivant son épaisseur, les pertes sont d'autant plus diminuées (cf. Figure 10) et le facteur de qualité de la ligne augmentée (cf. Figure 11).



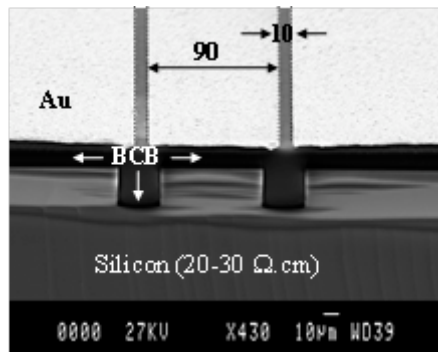
**Figure 10.** Impact de l'épaisseur de BCB sur le coefficient d'atténuation d'une ligne CPW [45]



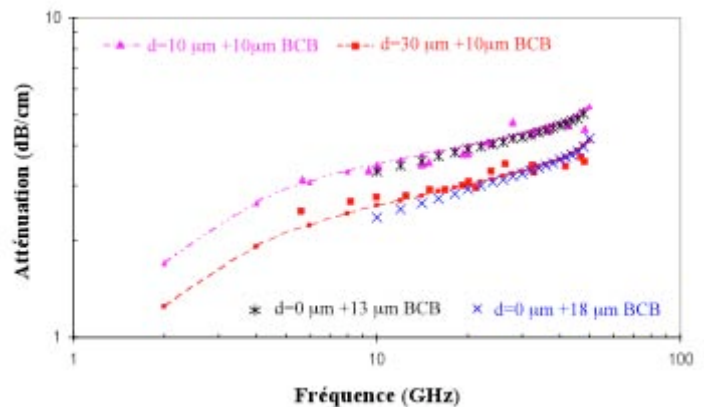
**Figure 11.** Facteur de qualité des lignes CPW sur différentes épaisseurs de BCB

Or, si les performances électriques s'améliorent avec l'augmentation de l'épaisseur de polymère, la contrainte mécanique, elle, se dégrade. Au-delà de 40 µm d'épaisseur, les couches sont trop contraintes et finissent par se détacher du substrat ou encore se craqueler.

Pour palier à cet inconvénient, nous avons opté avec Fouad Bouchriha à l'ajout d'un micro-usinage de surface du substrat silicium au niveau des fentes coplanaires, associé à une couche polymère à faibles pertes [129]. Pour plus de clarté une photographie en coupe d'une ligne coplanaire est indiquée sur la Figure 12.



**Figure 12.** Photographie MEB d'une ligne micro-usinée en surface et comblée de polymère



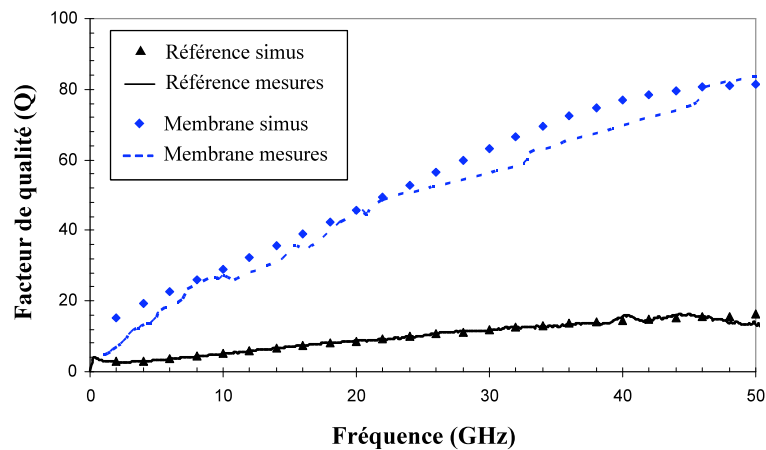
**Figure 13.** Correspondance entre des lignes CPW sur 10 µm de BCB avec 10 µm et 30 µm de silicium gravé dans les fentes (d) et des lignes CPW sans micro-usinage sur différentes épaisseurs de BCB

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de minimiser l'épaisseur de polymère grâce à la gravure localisée du silicium dans les gaps coplanaires. Une structure comprenant une gravure localisée du Si de 30µm de profondeur avec une épaisseur de 10µm de polymère est finalement équivalente à une structure coplanaire réalisée sur 18µm de BCB (sans micro-usinage), comme l'indique la Figure 13. Grâce à ce micro-usinage de surface localisé dans les gaps coplanaires, l'épaisseur de BCB est ainsi quasiment diminuée par un facteur 2 tout en assurant des performances similaires à une couche polymère uniforme. La contrainte résiduelle diminue également d'une valeur de 31MPa à 25MPa.



Grâce à l'utilisation du micro-usinage, la limitation en épaisseur et contrainte du polymère peut être éloignée, ce qui permet d'envisager plus facilement l'élaboration de structures 3D à faibles pertes avec un faible risque de craquage des couches polymères.

Enfin cette technique a été comparée au micro-usinage complet du silicium (cf. Figure 5). Comme attendu, les performances en terme de facteur de qualité sont bien supérieures pour une ligne sur membrane que pour une ligne sur substrat massif basse résistivité ( $20 \Omega \cdot \text{cm}$ ), comme indiqué sur la Figure 14.



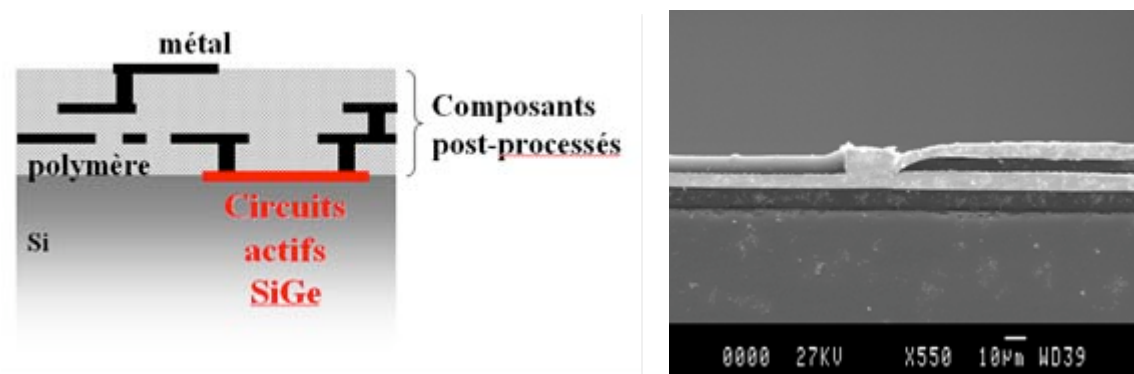
**Figure 14.** Comparaison des technologies sur membrane (en bleu) et sur substrat massif avec couche polymère intermédiaire (en noir)

Chaque technologie présente donc leurs inconvénients et avantages respectifs. En conséquence, suivant le type de circuits à implémenter avec des circuits actifs, choix de la technologie des passifs et compromis sont à effectuer.

La technologie sur membrane assure un facteur de qualité important mais avec une permittivité effective relative proche de l'air, ce qui implique des dimensions de circuits très larges.

La technologie sur couche polymère (avec ou sans micro-usinage de surface) assure un niveau de pertes amélioré avec la possibilité non négligeable de pouvoir intégrer verticalement de multiples composants avec un encombrement limité.

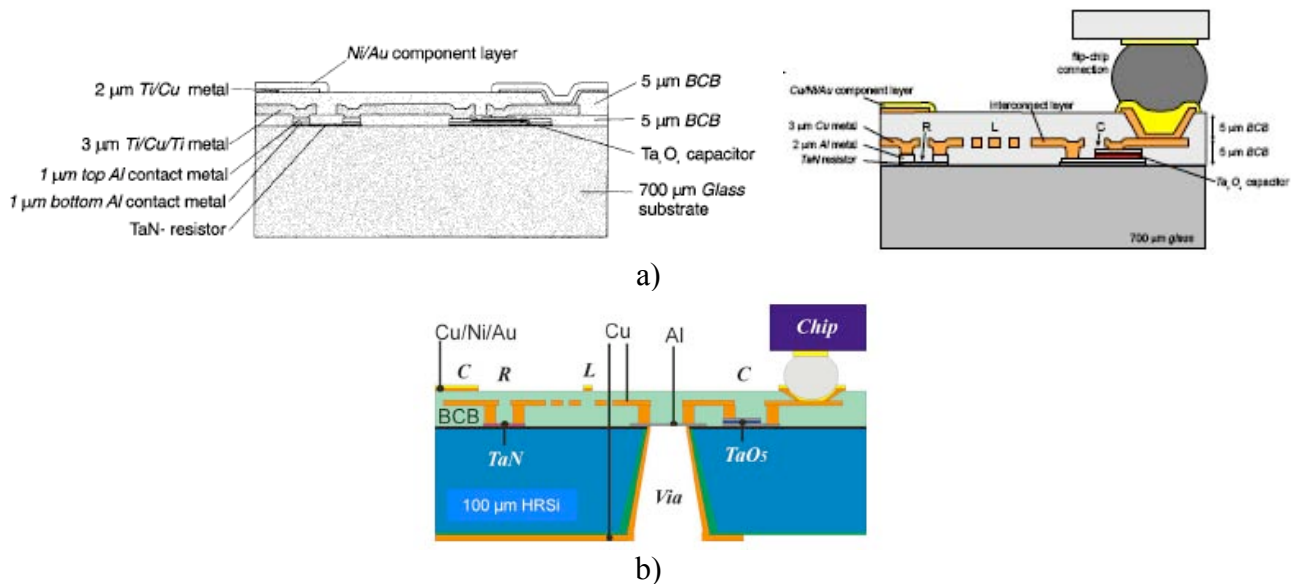
Voyons maintenant cette intégration tridimensionnelle avec l'empilement de circuits sur différents niveaux de polymère (du 'BCB' dans notre cas), comme indiqué sur la Figure 15, le tout étant compatible avec des circuits intégrés puisque la technologie nécessite un faible budget thermique de réalisation et peut être appliquée sur divers types de substrat (Si basse résistivité inclus).



**Figure 15.** Technologie polymère multicouche et vue MEB d'une interconnexion entre deux niveaux métalliques

Ce type de structure 3D est couramment utilisé dans l'industrie dans les technologies conventionnelles CMOS, SiGe, avec des couches diélectriques classiques en SiO<sub>2</sub>, SiN et des couches métalliques limitées en épaisseur. L'attrait majeur d'une technologie 3D avec couches polymères réside dans l'obtention de couches diélectriques bien plus épaisses, de plusieurs µm à quelques dizaines de µm, et de l'utilisation de métallisation de quelques µm d'épaisseur. Ceci permet non seulement de minimiser les pertes induites par le substrat et les métallisations, mais aussi d'ouvrir de nouvelles possibilités de conception de circuits avec des plages d'impédances caractéristiques plus vastes et des gammes de couplages plus étendues. Ce n'est que bien plus tard que les fondeurs, tel ST Microelectronics, ont travaillé à augmenter les épaisseurs de leurs couches diélectriques et métalliques pour satisfaire les besoins de montée en fréquences millimétriques.

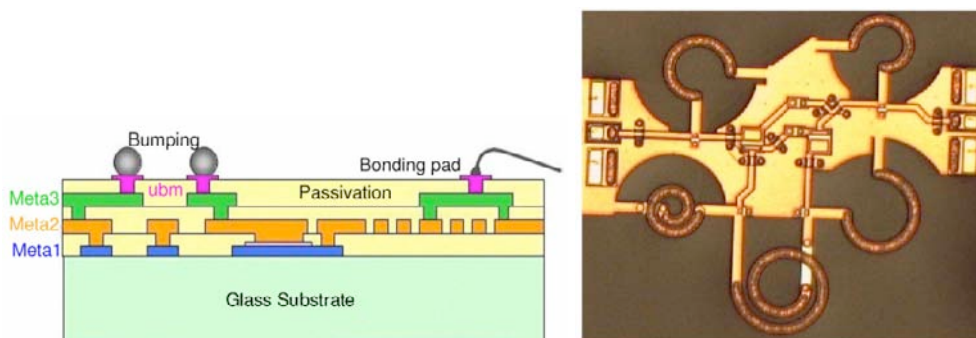
Cette démarche d'intégration verticale avec couches épaisses avait été initiée à l'IMEC par l'équipe de De Raedt [De Raedt 2001]. Il s'agissait, comme indiqué sur la Figure 16, de la superposition de couches de BCB de 5 µm d'épaisseur avec des couches de métaux (tels que aluminium ou cuivre), au début sur un substrat en verre pour des raisons de faibles pertes [De Raedt 2001] puis sur sicilium haute résistivité [De Raedt 2008].



**Figure 16.** Vue en coupe de la technologie MCM-D de l'IMEC

a) sur verre en 2001 [De Raedt 2001] puis b) sur Si haute résistivité en 2008 [De Raedt 2008]

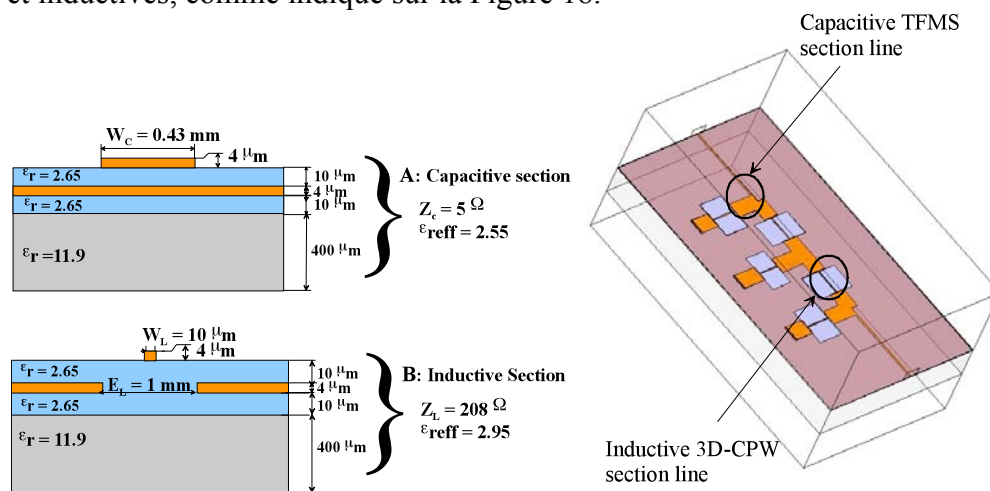
La technologie IPD (Integrated Passive Devices) du fondeur ST Micro reprend également cette même architecture sur verre et donne accès à l'élaboration de circuits originaux tels que ce filtre Ultra Large Bande (UWB) [Verdeyme 2010].



**Figure 17.** Technologie IPD (Integrated Passive Devices) et filtre Ultra Large Bande (UWB) [Verdeyme 2010]

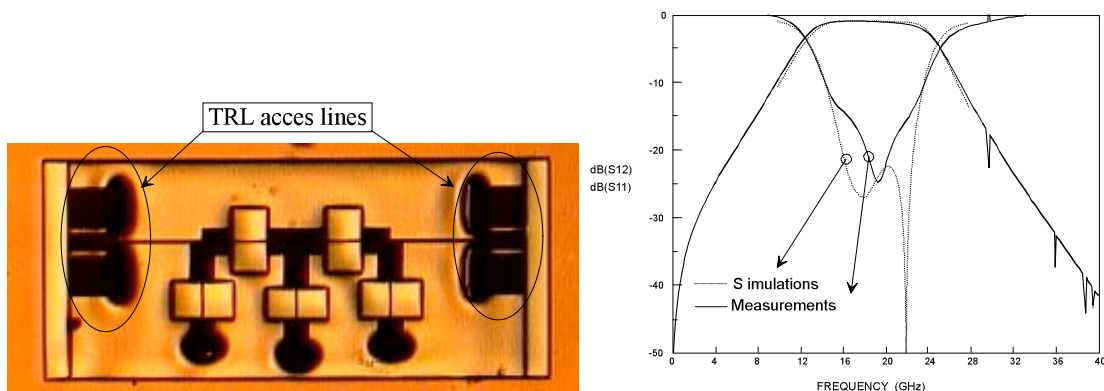
Au niveau du LAAS, notre étude a débuté dès mon entrée au CNRS en 2002 dans le cadre d'un projet européen pour élaborer un système de communication ultra compact centré à 24 GHz. La technologie des circuits actifs HF était prise en charge par le fondeur ATMEL avec des transistors à hétérostructure SiGe sur substrat Si de basse résistivité (SiBR). La filière technologique 3D polymère a donc été mise en place et évaluée sur Si haute résistivité (SiHR) mais surtout sur SiBR. Les premiers démonstrateurs conçus pour cette technologie correspondait à des interconnexions entre niveaux métalliques, que Fouad Bouchriha avait étudié durant sa thèse (2002-2005). Des circuits plus évolués ont ensuite été envisagés.

L'évaluation de la technologie pour la réalisation de filtre a été faite via une collaboration avec le LEST de Brest en 2003-2004. Il s'agissait d'un filtre passe-bande à stub avec différentes sections capacitatives et inductives, comme indiqué sur la Figure 18.



**Figure 18.** Vues en coupe des sections capacitatives et inductive utilisées et vue globale du filtre sur le logiciel de simulation HFSS [101] [107]

Sa fabrication impliquait deux couches diélectriques BCB ainsi que deux niveaux métalliques en or, dont la connexion était assurée par des vias métalliques en or électrolytique. Les vias sont facilement identifiables sur la photographie du filtre de la Figure 19 en bout de stubs et au niveau des retours de masse sur le plan métallique supérieur des accès de mesure coplanaires. Bien qu'il s'agissait des premières structures 3D BCB réalisées avec cette technologie, les performances mesurées étaient en très bonne concordance avec les simulations, ce qui laissait présager une technologie particulièrement robuste aux dispersions technologiques (a contrario des technologies MEMS RF présentées plus tard qui ont nécessité des années de développement pour non seulement les réaliser fonctionnels mais surtout autoriser la fabrication de circuits à MEMS quasi-identiques entre eux).



**Figure 19.** Photographie du filtre passe-bande et ses performances mesurées et simulées [101] [107]

En interne au LAAS, j'ai travaillé avec mon collègue David Dubuc et Ming Nhut Do, alors en



thèse, qui se sont occupés de toute la partie conception de circuits 3D avec cette nouvelle filière technologique, modifiée suivant les besoins. Différents circuits ont été abordés avec notamment des coupleurs. Pour leur réalisation, la filière technologique correspondante intègre un micro-usinage de surface du silicium ainsi que la superposition de couches polymères et métalliques interconnectées. La Figure 20 indique la vue en coupe correspondante.

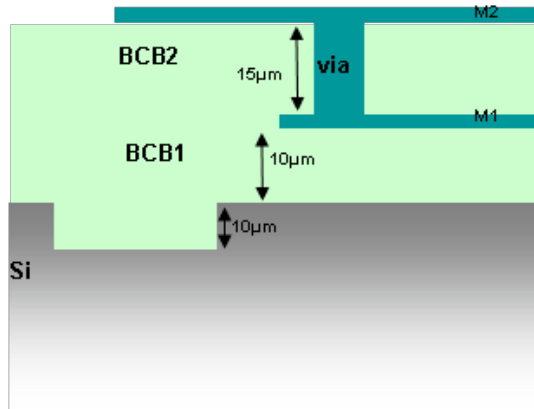


Figure 20. Vue en coupe de la technologie des coupleurs 3D

Elle comporte :

- un micro-usinage de surface du silicium pour une profondeur de 10µm, qui assure localement une épaisseur totale de 20µm de la première couche polymère,
- deux couches métalliques M1 et M2, réalisées en cuivre par électrochimie avec flash d’or,
- deux couches polymères en benzocyclobutène (BCB de Dow Chemicals),
- et enfin la possibilité d’interconnecter les niveaux M1 et M2 à l’aide de vias métalliques en cuivre.

Les Figure 21 et Figure 22 présentent quelques photographies et vues de circuits réalisés : coupleur broadside, inductance, élément de calibrage et vue au profilomètre optique d’un coupleur branchline.

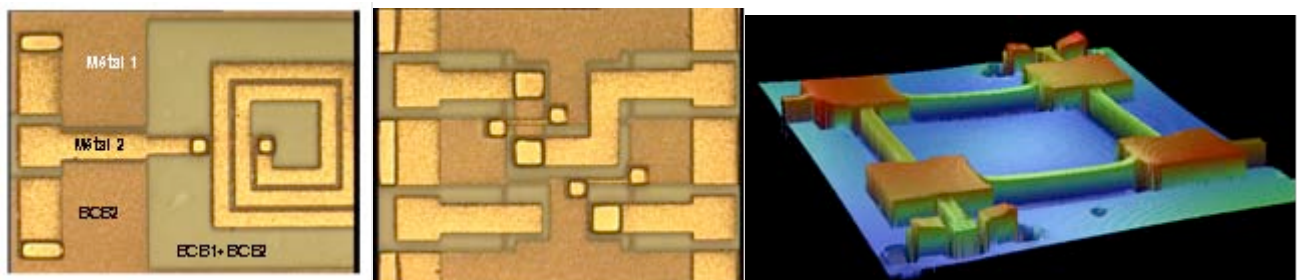


Figure 21. Exemples de circuits réalisés : inductance, kit de calibrage, coupleur 3D branchline [81]

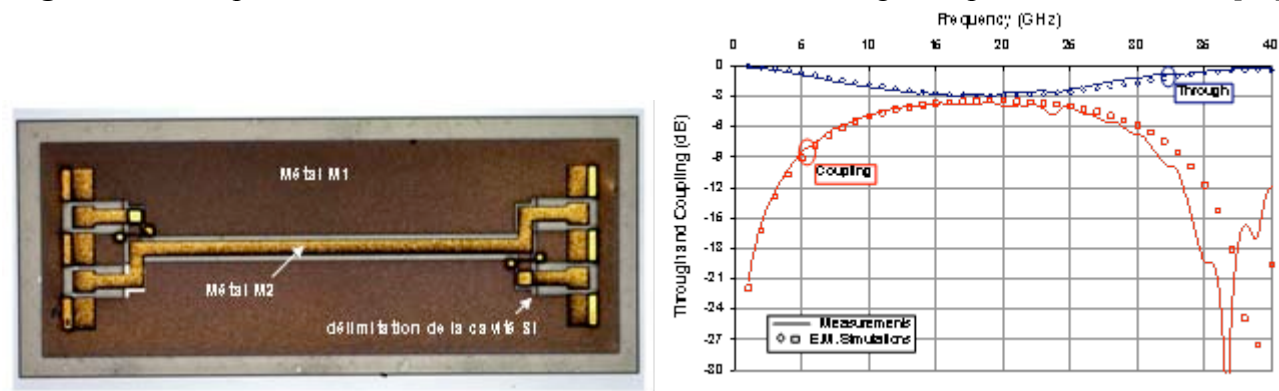
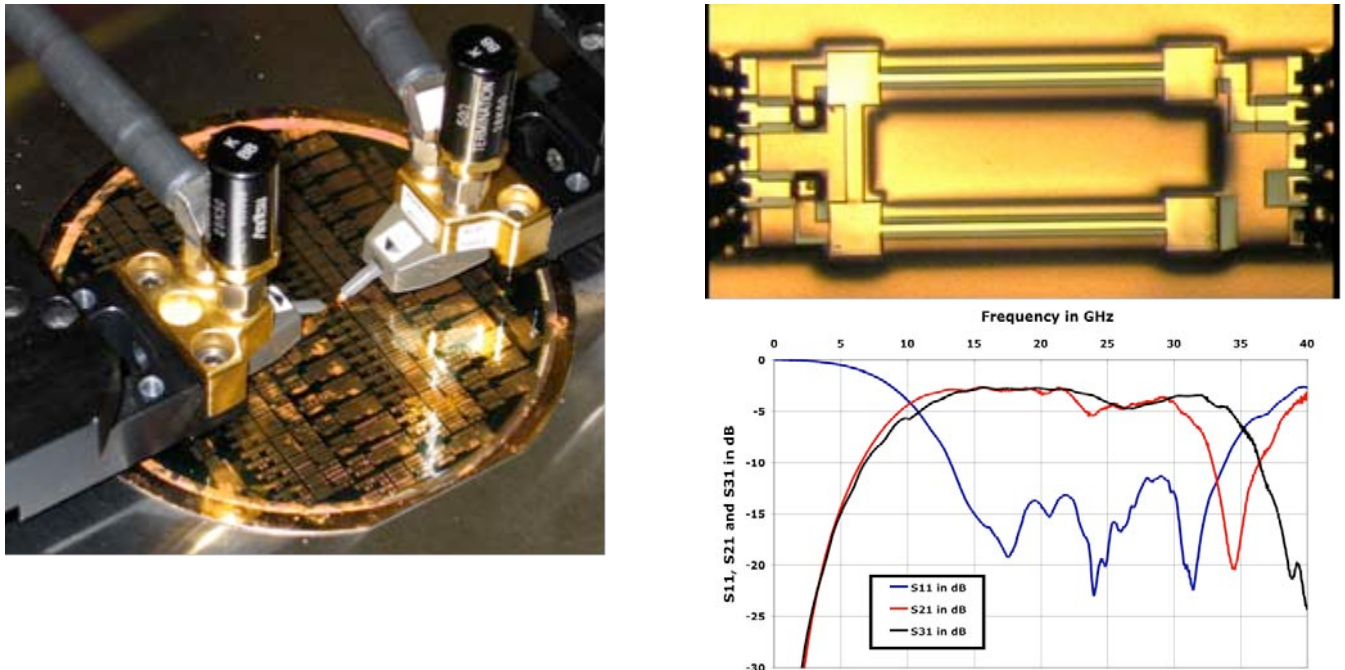


Figure 22. Coupleur broadside : photographie et résultats de mesures et simulations [72]

Ces démonstrateurs ont très bien fonctionné, comme le montre l'exemple de la Figure 22 avec une excellente concordance entre simulations et mesures. Et un nouveau run de composants 3D comprenant une deuxième génération de coupleurs branchline et broadside, ainsi qu'une nouvelle topologie originale de coupleur de Marchand a confirmé la maturité de la technologie (exemple du coupleur de Marchand indiqué sur la Figure 23).



**Figure 23.** Photographies d'une plaquette 3D en cours de test, d'un coupleur de Marchand et ses performances

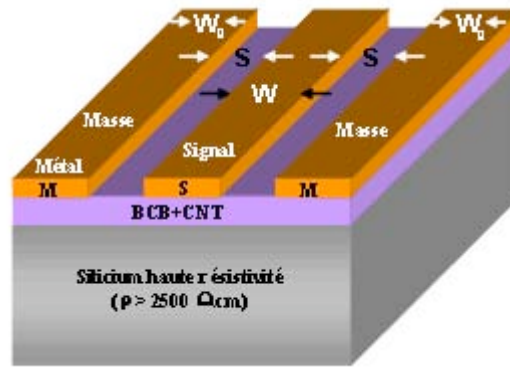
Tous ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet Minefi Nano2008 avec ST Microélectronique ainsi qu'au cours des projets région CIAM et CIAM2.

Comme nous venons de le voir, les polymères présentent pour les applications hyperfréquences de très forts attraits (très faibles pertes adéquates pour la fabrication de circuits passifs par post-processing, propices à la fabrication de structures 3D et compatibles avec les circuits intégrés...), mais comportent néanmoins des inconvénients en terme de contrainte mécanique et de dissipation thermique... Leur utilisation pourrait de fait être étendue s'ils présentaient de nouvelles propriétés, notamment en les modifiant grâce à l'ajout de nanotubes de carbone (CNTs). Ceux-ci présentent en effet des propriétés physiques hors du commun. Des études similaires ont déjà émergé pour diverses applications non hyperfréquences, avec de la PMMA, du polyéthylène et beaucoup d'époxy... Les applications envisagées dans ces cas sont à l'échelle macroscopique avec des épaisseurs utilisées de 2cm minimum. Avec l'euphorie liée aux CNTs, l'idée de les mélanger au polymère BCB a émergé pour étendre les propriétés hyperfréquences de ce matériau.

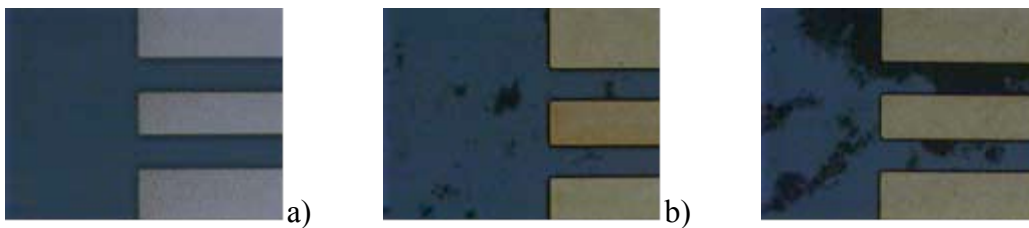
#### 4. Approche matériau composite polymère modifié par des nanotubes de carbone

Dans le cadre de la thèse de Sébastien Pacchini, l'impact de CNTs mélangés au polymère BCB en utilisant des lignes coplanaires de longueurs différentes (cf. Figure 24 et Figure 25) a donc été étudié. Cette étude s'est faite en collaboration avec Emmanuel Flahaut, chercheur chimiste au CIRIMAT, qui nous a fourni toute son expertise dans la fabrication des CNTs de très grande qualité et

sous différentes formes (poudre, solutions liquides).

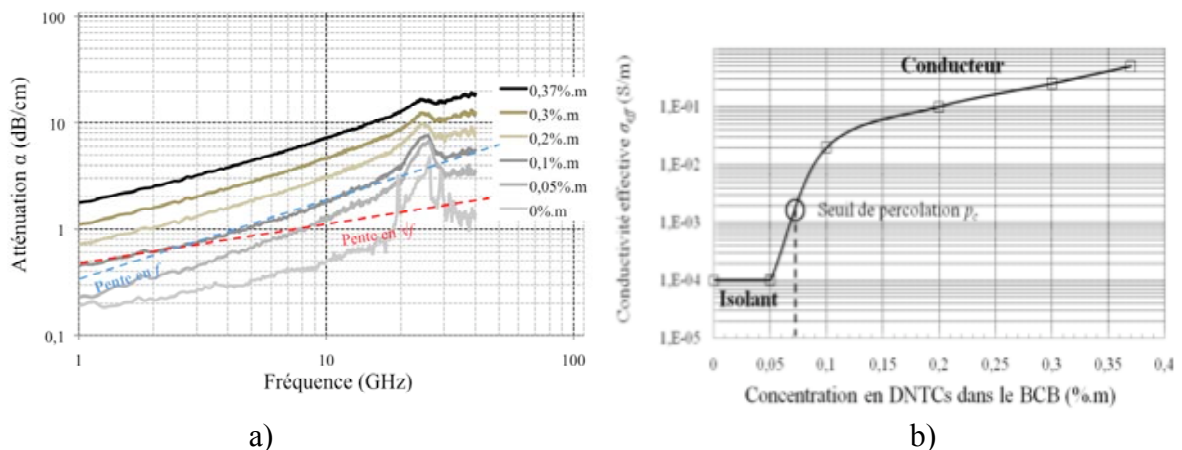


**Figure 24.** Schéma d'une ligne CPW sur BCB et CNTs incorporés



**Figure 25.** Photographies de lignes coplanaires pour différentes concentration de CNTs dans le BCB : 0%, 0,06% et 0,16% [67]

La Figure 26 présente les résultats de caractérisation pour différentes concentrations de CNTs. Les pertes des lignes augmentent en lien avec la concentration des CNTs, ce qui s'explique par la forte proportion de CNT métalliques (80%) par rapport aux semi-conducteurs. Ceci est d'ailleurs confirmé par la conductivité effective du mélange qui augmente également avec la concentration.



**Figure 26.** a) Pertes mesurées pour différentes concentrations de DNTCs dans le BCB et b) conductivité [67] [8]

En outre, la puissance absorbée du signal HF dépend de la concentration de CNTs dans le polymère: celle-ci croît grandement lorsque le dopage augmente. Ce résultat est particulièrement intéressant puisqu'il signifie que l'on peut contrôler et configurer notre matériau et sa puissance absorbée suivant l'application voulue.

De plus, un comparatif par rapport à l'état de l'art (cf. Tableau 1) indique l'excellent niveau de puissance absorbée du nanomatériau développé. Ceci est d'autant plus vrai que nous utilisons une couche polymère de 14µm uniquement.

**Tableau 1.** Matériaux composites et leur puissance absorbée

	Said, IEEE MTT, V. 54, June 2006		Ki-Yeon Park, Composite Struct., V. 81, Dec 2007	LAAS/CIRIMAT
Polymer	Polyethylene		Glass fabric/epoxy	BCB
Composite thickness	~ 2cm		~ 10mm	14um
Additive type	CNTs suspension	Carbon black powder	MWNT	CNTs suspension
Additive concentration	0.5 wt. %	5 wt. %	5 wt. %	0.37 wt. %
Power absorption	~28dB @ 30GHz	~15dB @30GHz	~20dB* @ 0.6GHz	11dB @ 30GHz

En conclusion de ce développement, un nouveau type de **matériau absorbant** pour applications **HF, intégrable** dans les filières de **micro-technologies** a été développé. **Il ouvre notamment la voie à de la protection électromagnétique à l'échelle micrométrique.**

Ces technologies développées sont intéressantes non seulement du point de vue des composants originaux qu'elles permettent d'élaborer mais aussi parce qu'elles sont toutes compatibles avec des circuits intégrés avec leur faible budget thermique. Tout ceci autorise une plus grande intégration des futurs modules de communication sans fils avec une approche « système ».

## 5. Approche microsystème : intégration de circuits actifs et passifs à fort Q

J'ai débuté cette approche « microsystème hyperfréquence » lors de mon post-doctorat chez Agere Systems/Bell Labs, sous les directions de Peter Gammel et Victor Lubecke, avec l'intégration monolithique d'inductances post-processées et sur-élevées par rapport au substrat au sein d'un oscillateur contrôlé en tension (VCO).

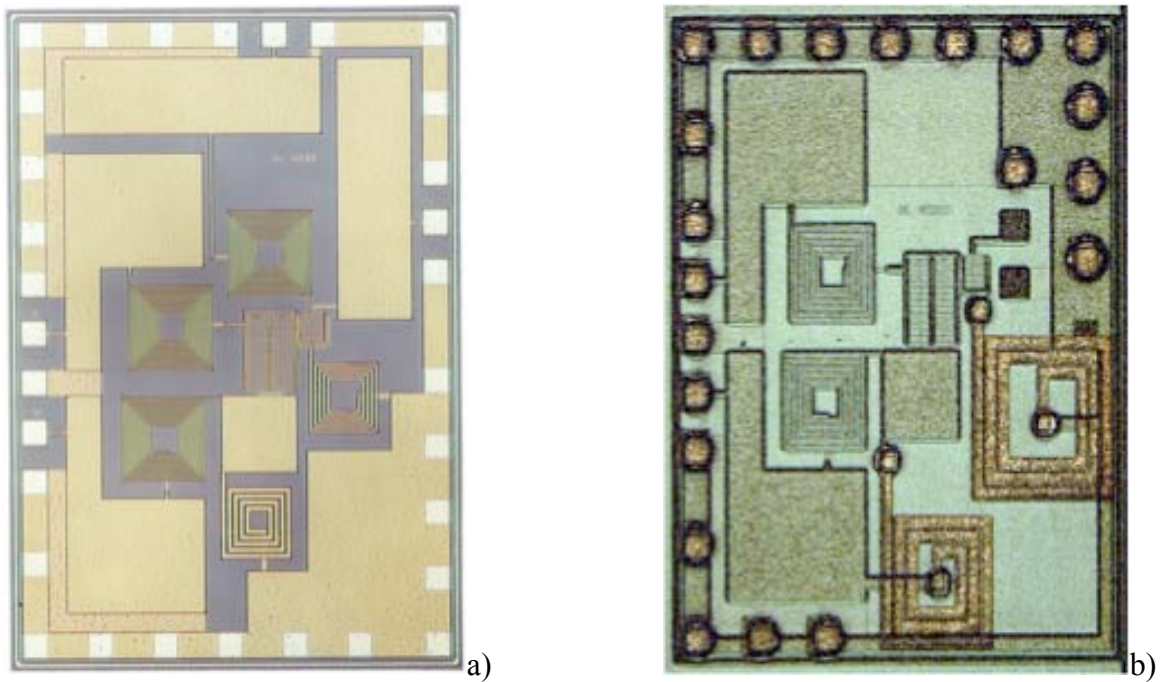
Le facteur de qualité d'inductances directement fabriquées avec un VCO était en effet réduit à une valeur maximale de 10, ce qui limitait grandement le bruit de phase. En éloignant les inductances du substrat Si à pertes par une couche polymère (cf. Figure 27), il est alors possible de s'affranchir d'une partie des pertes diélectriques. Cela permet d'accéder à des facteurs de qualité bien supérieurs à 20 pour les inductances et donc d'augmenter les performances en bruit du circuit.

J'ai ensuite continué à étudier l'intégration de structures passives avec circuits actifs dans le cadre du projet européen ARTEMIS (2002-2005). Ce projet visait à élaborer un module de communication ultra-compact à 24GHz, pour les applications radars (radars anti-collision, borne de télé-péages, détection de disfonctionnement sur des cathéters de trains...). Le module comprenait d'un côté une partie active réalisée en technologie conventionnelle SiGe par le fondeur ATMEL, et de l'autre côté une partie passive avec l'antenne de réception et d'émission, des inductances post-processées et autres éléments passifs nécessaires. Afin de rendre ce module ultra compact, il a été choisi d'utiliser le même substrat silicium pour les éléments passifs et les circuits intégrés SiGe, dont la résistivité est proche de 20  $\Omega$ .cm. Une telle valeur de résistivité implique des pertes considérables à ces fréquences d'utilisation.

Après nos diverses études de minimisation des pertes, nous avons choisi de réaliser les éléments 'post-processés' sur une couche organique épaisse et d'y associer un micro-usinage de volume du silicium étant donné le très faible niveau de pertes obtenu par cette technologie. Or

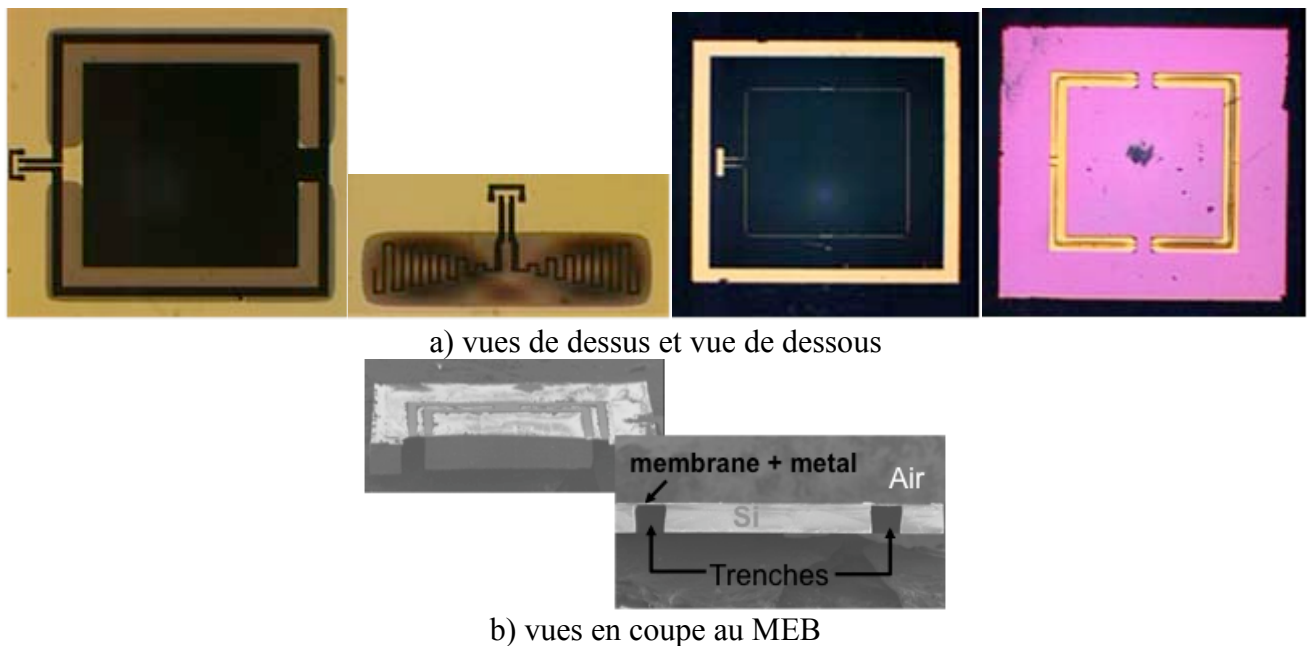


jusqu'ici, la membrane support du circuit était minérale et donc requièrait un budget thermique très élevé (750°C pour le dépôt de SiN et 1000°C pour le SiO<sub>2</sub>) incompatible avec les circuits SiGe. Nous avons donc avec Fouad Bouchriha remplacer cette membrane minérale par une couche organique épaisse en BCB, dont la température de polymérisation reste inférieure à 350°C.



**Figure 27.** VCO à 1,6 GHz avec inductances a) intégrées et b) post-traitées [45]

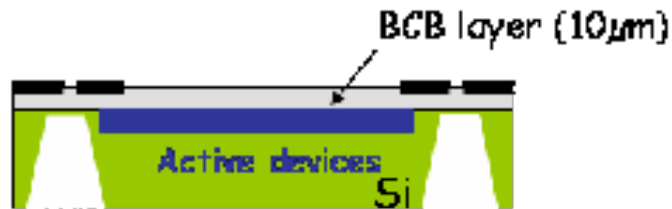
Outre le changement de composition de la membrane diélectrique dans la nouvelle filière technologique, l'utilisation de la gravure profonde du silicium par plasma a également permis d'obtenir des flancs d'attaque droits et donc d'optimiser la compacité des structures réalisées, contrairement aux flancs obliques incontournables par gravure humide. Ainsi, interconnexions, filtres coplanaires mais aussi antennes centrées à 24 GHz totalement suspendues ou partiellement micro-usinées sous les fentes coplanaires ont été fabriquées sur membrane polymère (cf. Figure 28).



**Figure 28.** Exemples d'antennes sur membrane polymère avec micro-usinage de volume complet ou partiel (localisé sous les fentes coplanaires) [33]

A ainsi été démontré que le micro-usinage du silicium appliqué à des antennes réduit significativement les effets de couplage avec le substrat silicium. Ceci est d'autant plus important que notre étude imposait l'utilisation de silicium basse résistivité, dont les pertes sont considérables. Une amélioration de leur efficacité de 70% a été obtenue [15] [20].

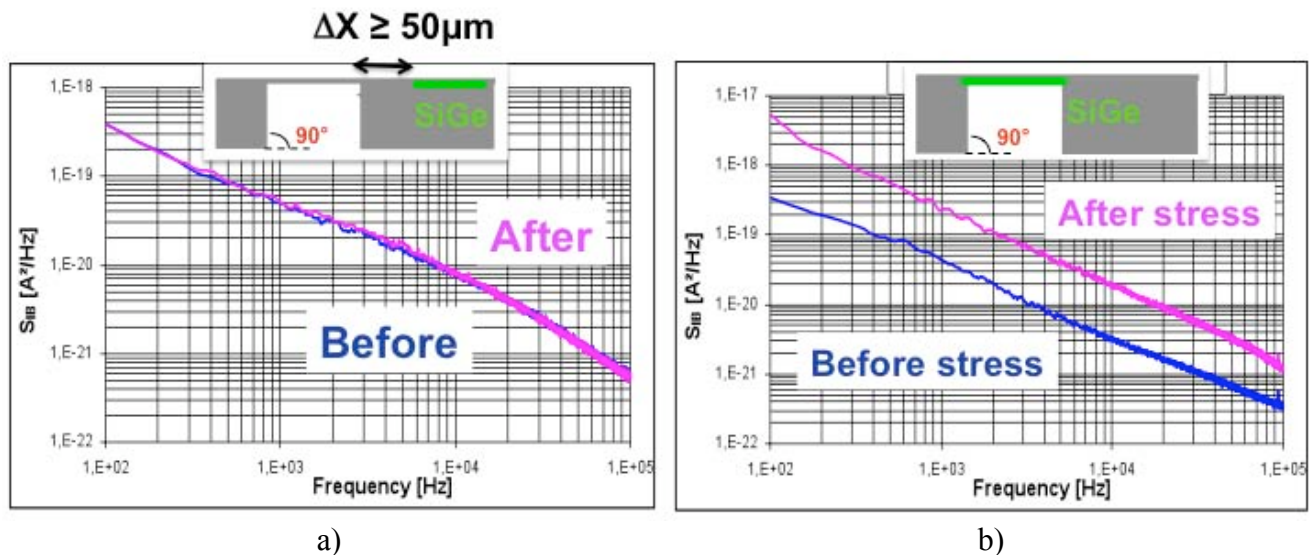
Au final, le module de communication devait comprendre une antenne localement micro-usinée dans les fentes et placée autour des circuits actifs SiGe, comme indiqué sur la Figure 29.



**Figure 29.** Schéma en coupe du module de communication envisagé [33]

La filière technologique développée intégrait une membrane polymère en BCB comme support pour l'antenne et le micro-usinage de tranchées par Deep Reactive Ion Etching (DRIE), avec raccord métallique entre antenne et circuits actifs.

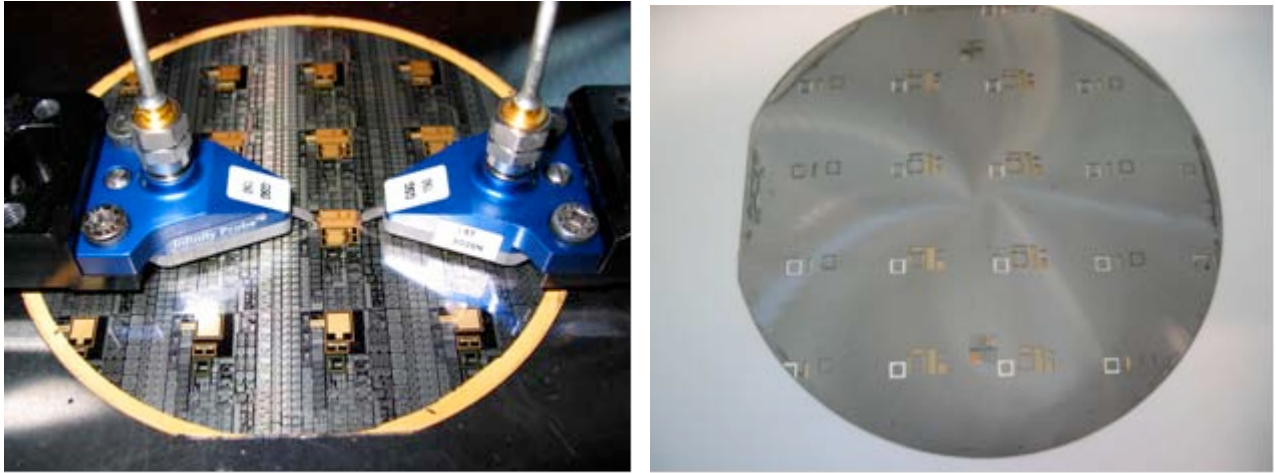
La compatibilité de chaque étape de la filière technologique a été vérifiée et validée. Le résultat majeur de cette étude concerne la compatibilité du micro-usinage du silicium par DRIE, comme l'indique la Figure 30. Pour cela, un micro-usinage a été effectué sur une même plaquette mais à des distances paramétrées de différents transistors test SiGe identiques.



**Figure 30.** Mesures de bruit basse fréquence avec micro-usinage de volume localisé  
a) à 50µm d'un transistor test et b) sous un transistor test [34]

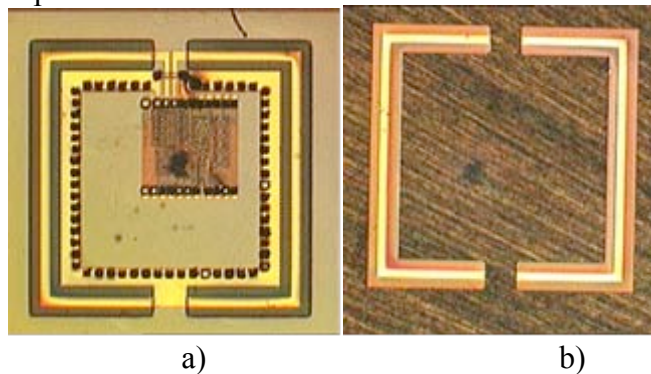
Seule une dégradation des performances a été obtenue lorsque la gravure du silicium est effectuée juste sous le transistor test alors qu'une distance de 50µm entre la zone gravée et le circuit actif évite toute modification du bruit basse fréquence et donc de l'hétérostructure SiGe. Il s'agit donc d'un résultat capital pour l'utilisation du micro-usinage de volume du silicium avec des circuits SiGe. Ce résultat a été publié lors d'un papier invité à la conférence IEDM en 2004 [34].

Une première évaluation de la compatibilité technologique de la filière de ‘post-processing’ a été réalisée à l’aide de composants passifs, tels que des antennes, filtres passe-bandes et interconnexions micro-usinées, fabriqués à côté de structures actives en SiGe. La Figure 31 présente les photographies des faces avant et arrière de l’une des plaquettes processées. Aucune dégradation des transistors test n’a été décelée et les performances attendues des différents composants post-processés ont été obtenues.



**Figure 31.** Photographies des faces avant et arrière d’une plaquette post-processée [89]

Pour clore ce projet, l’intégration monolithique des structures finales a été faite avec succès. La Figure 32 présente un exemple de structure obtenue.

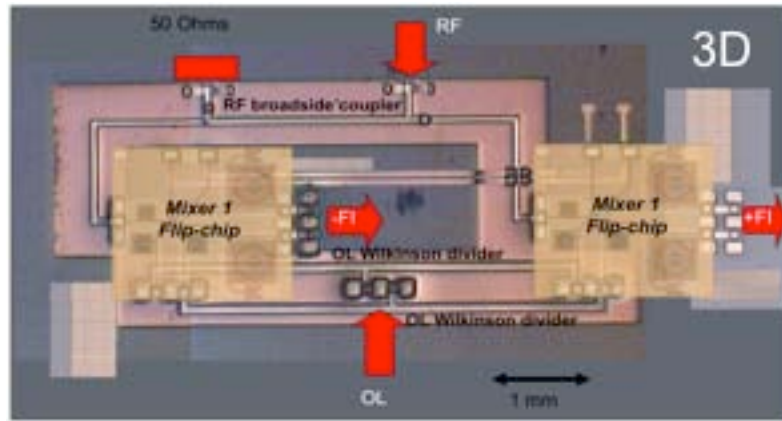


**Figure 32.** Module de communication centré à 24GHz avec une antenne micro-usinée:  
a). vue de dessus et b) vue de dessous [33] [45] [89]

L’antenne placée autour du circuit actif a été réalisée sur membrane BCB et interconnectée par vias métalliques. Le module complet obtenu et centré à 24 GHz présentait un encombrement ultra compact avec une surface de 3mmx3mm seulement.

Une telle intégration monolithique fut possible en raison des faibles dimensions de l’antenne post-processée. Ce n’est pas toujours envisageable lorsque les circuits passifs accaparent un encombrement important, comme c’est le cas pour les filtres, coupleurs, diviseurs... Le coût du mm<sup>2</sup> de substrat avec circuits actifs devient alors rédhibitoire. Une autre approche microsysteme par flip chip cette fois-ci est alors préférable. Ce fut le cas dans le cadre du projet région CIAM2, du projet Nano2008 avec ST Microelectronics et de la thèse de Nhut Do pour la réalisation d’un circuit réjecteur de fréquence image (cf. Figure 33), qui intégrait coupleur et diviseurs Wilkinson en couches polymère 3D avec des mélangeurs réalisés par ST Micro. en technologie SiGe (circuits actifs). Une telle structure assurait une très forte intégration avec l’accès à des conceptions de circuits novatrices et donc des performances améliorées grâce à la technologie 3D polymère.





**Figure 33.** Intégration par flip chip de circuits actifs à des coupleurs passifs 3D pour réaliser un circuit réjecteur de fréquence image

Une telle technologie est totalement compatible avec la montée en fréquence des ICs (60GHz et au-delà) et des circuits passifs associés [Begueret 2009].

Pour conclure cette partie, les micro et nanotechnologies présentent de nombreux attraits pour l'élaboration de microsystèmes hyperfréquences. L'exploitation de matériaux polymères aux propriétés adaptées aux hyperfréquences, ainsi que l'utilisation des techniques classiques des microtechnologies telles que usinage de surface ou volume localisé ou encore élaboration de nouveaux composites (comme celui étudié avec une matrice en BCB et des nanotubes de carbone), ouvre de nouvelles possibilités de conception et réalisation de circuits et microsystèmes hyperfréquences.

Là n'est pas la seule démarche possible pour repousser les limites d'utilisation des technologies conventionnelles hyperfréquences. Pour aller encore plus loin, les micro et nanotechnologies peuvent également être associées à d'autre discipline, comme celle de la mécanique par exemple. Grâce à l'actionnement de parties mobiles, la reconfigurabilité des microsystèmes HF avec le développement de systèmes microélectromécaniques - MEMS RF - est envisageable. C'est le sujet de la partie suivante.

## II. Comment apporter de l'intelligence aux microsystèmes hyperfréquences ?

Encadrement de:

*Thèse de Jean-Pierre Busquère, 2002-2005*

*Thèse de Chloé Bordas, 2004-2007*

*DEA de Romain Leinekugel, 2005*

*Thèse de Sébastien Pacchini, 2005-2008*

*Post-doctorat de Erwan Fourn, 2005-2006*

Participation active aux travaux de:

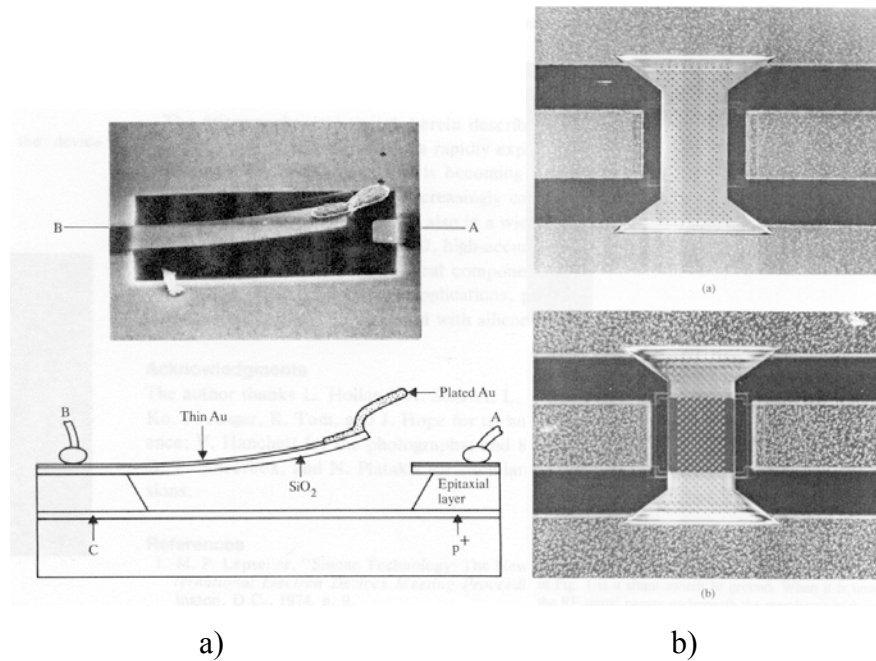
*Thèse de Benoît Ducarouge, 2002-2005*

*Thèse de Samuel Mellé, 2002-2005*

*Thèse de Thibaut Ricart, 2005-2008*

L'essor des fonctions microélectromécaniques (MEMS) grâce à l'avènement du micro-usinage du silicium a été spectaculaire depuis des décennies avec des applications telles que les injecteurs des imprimantes à jet d'encre, les micro-miroirs dans les vidéoprojecteurs ou encore les accéléromètres pour les airbags de voiture. Ces nouveaux composants n'ont pas laissé la communauté des "hyperfréquences" indifférente. En 1979, Petersen a publié le premier commutateur RF [Petersen 1979]. Cette première structure fonctionnait aux alentours de 200 kHz avec une membrane bi-couche (cf. Figure 34), qui pouvait s'actionner lors du chauffage de la poutre.



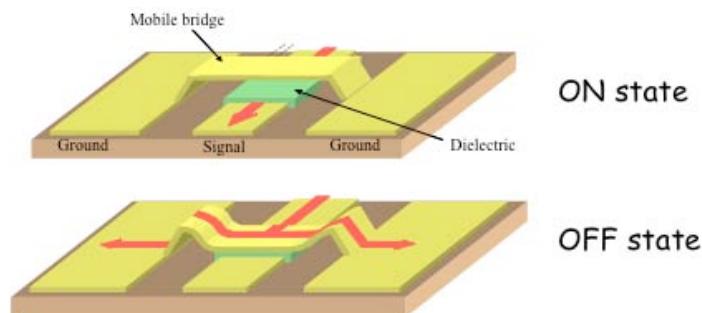


**Figure 34.** Commutateur RF de a) Petersen et b) de Goldsmith

Il a fallu 15 années pour que l'idée émerge, reprise par Goldsmith en 1999 [Yao 1999] et l'Univ. du Michigan avec Rebeiz en 1998 [Barker 1998, Rebeiz 2003] puis massivement par la communauté des hyperfréquences.

Il s'agit de composants à membrane mobile, qui font généralement office d'interrupteur en laissant passer ou en bloquant les signaux hautes fréquences suivant la position de la membrane, comme illustré par la Figure 35. Ils permettent ainsi de reconfigurer des circuits ultra compacts de façon simple et sans dégrader les performances globales, comme peuvent le faire des transistors ou diodes, notamment en terme de non linéarité, distortion, problèmes d'intermodulation et de consommation. Le développement de ces structures MEMS RF a constitué un volet important de mes recherches. L'étude de MEMS mobiles a commencé au LAAS lors de ma thèse. Les approches étudiées sont fonction de la maturité progressive dans ce domaine:

- du simple **composant**, qui peut répondre à des contraintes d'utilisation difficile telle que la puissance, la fiabilité,
- jusque l'étape de réalisation de **circuits** puis de **microsystème** reconfigurable.



**Figure 35.** Principe de fonctionnement d'un composant MEMS RF capacitif

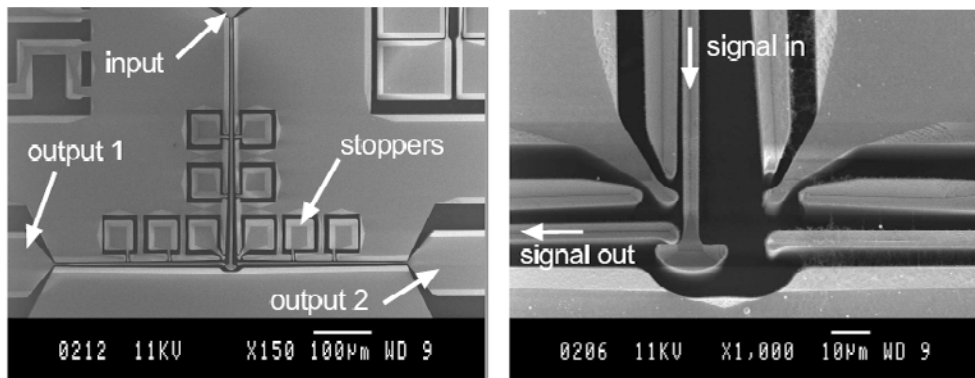
L'utilisation d'éléments électromécaniques actionnables a nécessité de très lourds développements technologiques pour les rendre compatibles non seulement en terme de fréquence aux

gamme micro-ondes et millimétriques, mais aussi dans une approche d'intégration microsysteme avec des technologies de circuits intégrés.

## 1. MEMS RF : Approche composants

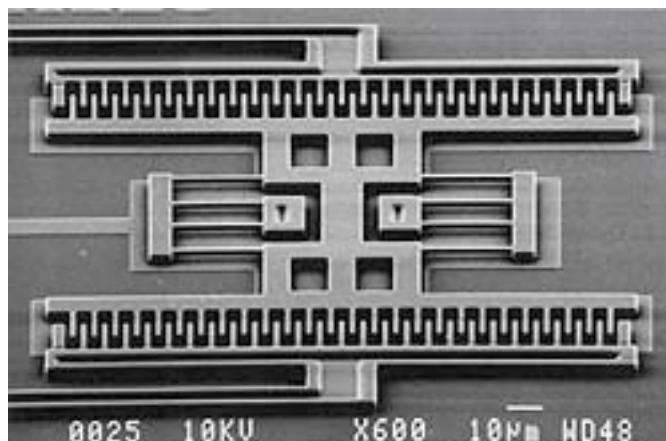
Enormément de MEMS RF ont été développés depuis plus de 10 ans. D'un point de vue technologique, deux grandes classes de MEMS RF se distinguent:

- ceux à actionnement vertical, comme les exemples donnés sur les Figure 34 et Figure 35, et qui constituent la plus grande majorité des MEMS RF développés,
- ceux, plus rares, à actionnement latéral, comme par exemple sur la Figure 36 avec les travaux de J Oberhammer [Oberhammer 2006] et son système de "crochets".



**Figure 36.** Single Pole Double Thru à actionnement latéral [Oberhammer 2006]

La technologie correspondant aux MEMS à mouvement latéral se rapproche énormément de celles employées lors de la fabrication de micro-miroirs actionnés latéralement par force électrostatique avec des peignes micro-usinés dans le silicium (cf. exemple donné sur la Figure 37). Elle reste néanmoins difficilement compatible avec une vision à terme microsysteme, intégrable avec des circuits actifs HF, avec des temps de commutation limités.

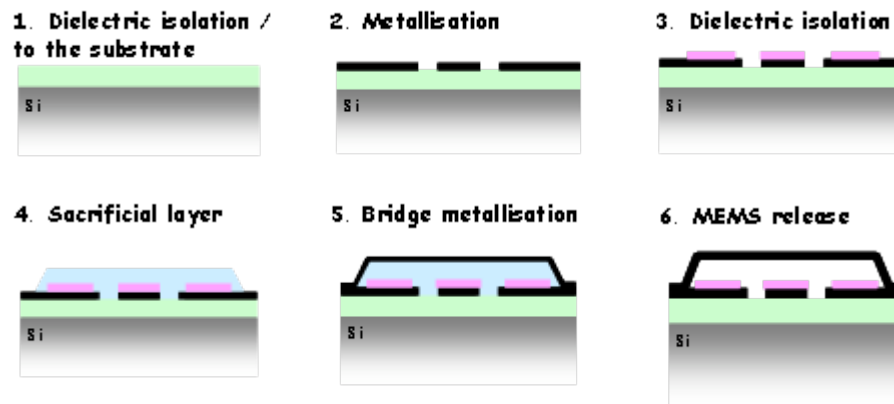


**Figure 37.** Vue MEB d'un peigne en silicium micro-usiné - [www.eetasia.com](http://www.eetasia.com)

Etant donné que l'objectif à terme résidait dans l'élaboration de microsystemes hyperfréquences, les MEMS RF développés au LAAS ont été choisis avec actionnement vertical. Cette configuration permet également plus de flexibilité puisqu'elle peut être appliquée quelque soit le substrat envisagé.

Pour bien appréhender un MEMS RF du point de vue 'microtechnologie', il est important de rappeler les six étapes principales de la filière technologique, décrite dans la Figure 38 : la réalisation

de la couche d'isolation entre le circuit MEMS et le substrat (avec une couche en BCB si l'on se place sur un substrat en silicium), la métallisation de la ligne de transmission (coplanaire dans notre cas), puis le dépôt du diélectrique de protection pour le contact capacitif, la photolithographie de la couche sacrificielle, la métallisation du pont MEMS et enfin la libération de la structure.



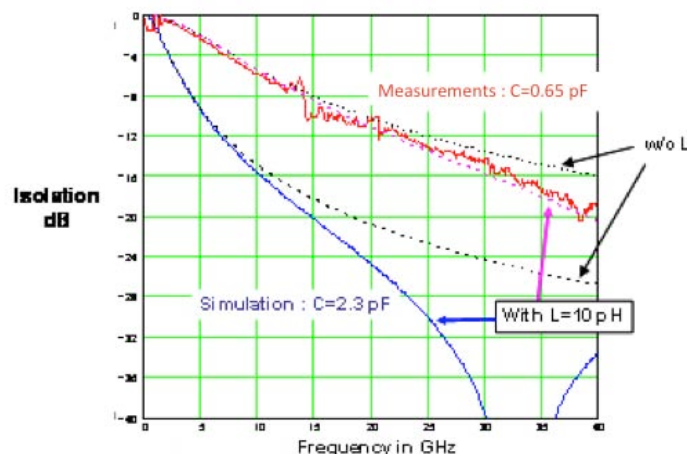
**Figure 38.** Procédé technologique de structures MEMS

Les étapes technologiques présentées en Figure 38 ne seront pas détaillées dans ce manuscrit. Seules seront présentées des étapes clés avec des résultats majeurs en terme de qualité du contact capacitif, de fiabilité, tenue thermique... Pour plus de détails, je vous invite à lire la thèse de Chloé Bordas.

#### *i. Optimisation du contact capacitif*

Un premier point important dans la réalisation de MEMS fut d'optimiser le contact. En effet, celui-ci définit le niveau d'isolation du micro-commutateur à l'état bloqué. Lors des premières publications sur les MEMS RF, beaucoup les fabriquaient à l'état bas pour des questions de facilité d'élaboration, tout en permettant une validation rapide du concept même de MEMS RF. Les niveaux d'isolation obtenus étaient donc particulièrement élevés.

Or vers 2002, nous nous sommes rendus compte que l'isolation mesurée de nos commutateurs ne correspondait jamais aux simulations, comme l'indique la Figure 39.



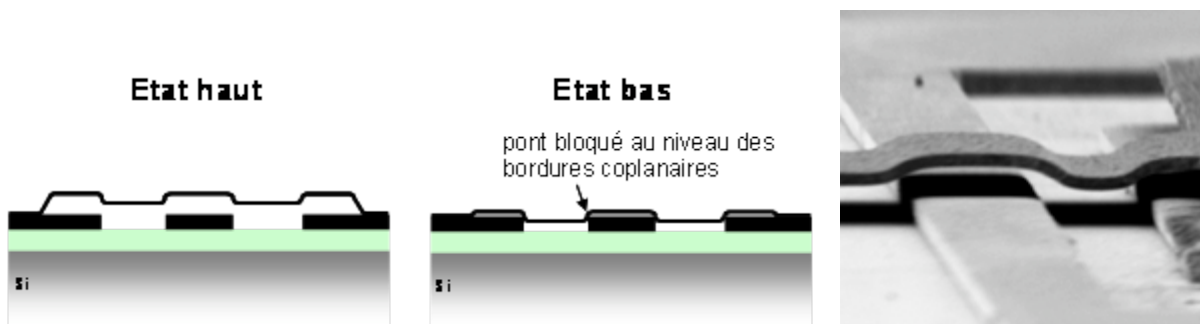
**Figure 39.** Impact de la valeur de capacité du commutateur MEM sur l'isolation

En fait, la valeur de capacité de fermeture de l'interrupteur était fortement réduite par rapport à celle prévue par simulation (0,65pF mesuré dans cet exemple au lieu de 2,3pF par simulation). Ceci s'explique par le fait que la simulation prend en compte un contact parfait entre le métal du pont MEM et le diélectrique (atteignable lors d'une fabrication à l'état bas), tandis que la réalité est tout

autre. Différentes solutions ont été développées pour optimiser ce contact capacitif: minimisation de la rugosité, amélioration de la qualité du diélectrique, ou encore travaux sur la planéité du pont MEM. Ce dernier point, lié à l'étape de fabrication de la couche sacrificielle (étape 4 de la Figure 38) a longuement été investigué, car rédhibitoire pour l'élaboration de larges ponts MEMS à forte tenue en puissance. Au niveau de la littérature, la solution la plus largement utilisée correspondait à amincir la ligne de transmission située sous le pont MEM de façon à minimiser les irrégularités de couche sacrificielle (comme par exemple le MEMS de Raytheon en Figure 34.b).

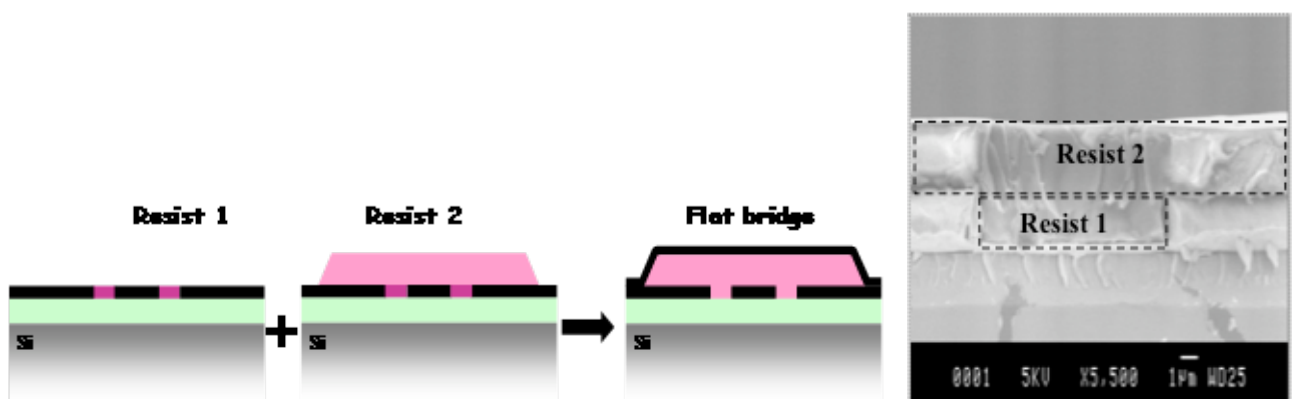
Dans notre cas, nous avons opté pour une technologie générique adaptée à de multiples applications et à divers niveaux de puissance des signaux HF. Nous avons donc conservé une ligne de transmission épaisse sur l'ensemble des circuits et notamment sous les ponts MEMS. La fabrication du pont MEM comporte le dépôt d'une résine sacrificielle puis celui du métal (or dans notre cas). Or la résine sacrificielle employée n'avait pas de pouvoir de planarisation. Le pont métallique suivait en conséquence le relief inférieur imposé par la résine (cf. Figure 40), elle-même non uniformément plate du fait de la métallisation des lignes coplanaires.

Un tel problème n'est habituellement pas rencontré car les autres équipes mondiales travaillant sur ce thème préfèrent ne pas épaissir les lignes RF sous les ponts MEMS. Etant donné que nous souhaitons utiliser cette filière technologique aussi bien pour des modules de communication en réception mais aussi en émission de signaux, nous avons volontairement opté pour une épaisseur des lignes minimale de  $2\mu\text{m}$ . Ceci permet d'éviter les problèmes liés à l'électromigration lors de l'application de fortes puissances RF.



**Figure 40.** Dégradation du contact du pont suivant les irrégularités du pont MEM

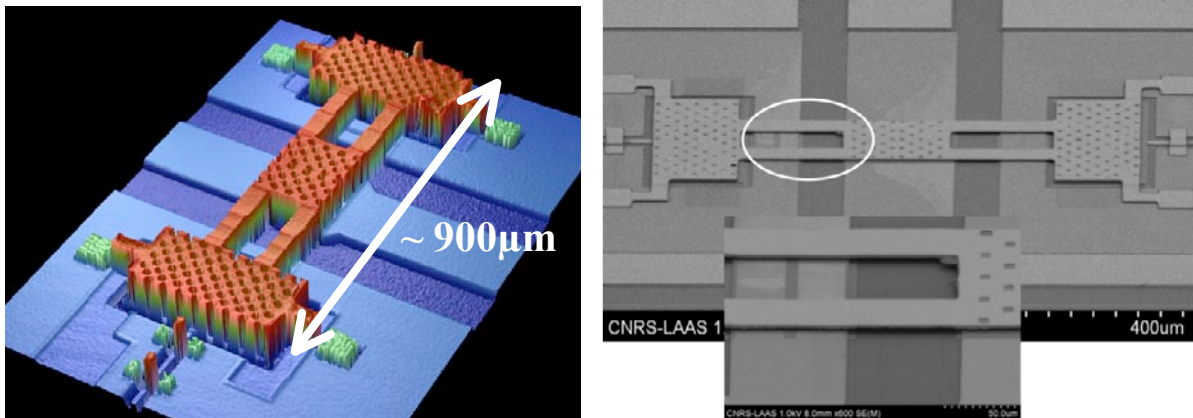
La conséquence directe de cette non-uniformité du pont correspond à une dégradation du contact capacitif, puisque le pont se retrouve bloqué prématurément au niveau des bordures métalliques de la ligne coplanaire. Ce phénomène peut être évité en utilisant non pas une mais deux résines sacrificielles. La première est délimitée dans les gaps coplanaires pour combler le relief des lignes, tandis que la seconde réalise le support du pont MEM, comme le montre la **Figure 41**.



**Figure 41.** Procédé de résine sacrificielle afin d'obtenir des ponts plats et photographie de la superposition des résines au niveau d'un gap coplanaire

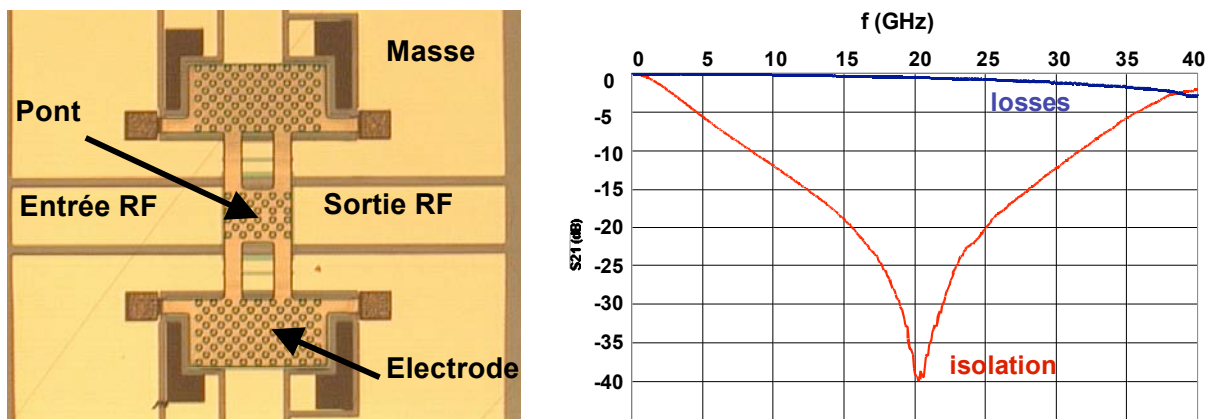


La Figure 42 présente en conséquence une structure MEMS fabriquée avec ce procédé et un profil plat, sachant que la hauteur du pont correspond à  $3\mu\text{m}$ .



**Figure 42.** Profil optique et vue MEB du pont MEM libéré et plat de très grande dimension [77]

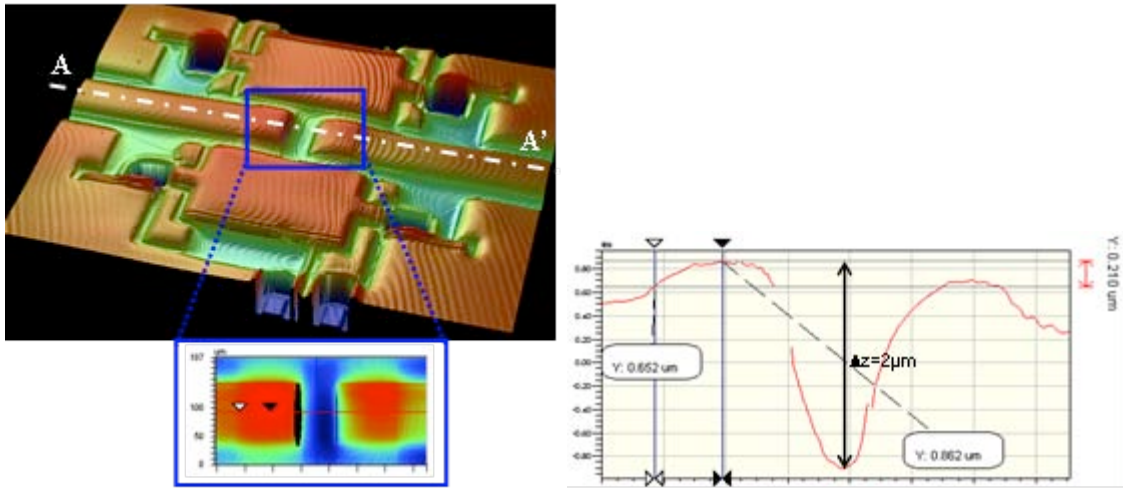
Une très bonne planéité est obtenue avec seulement une variation de  $0,4\mu\text{m}$  sur la hauteur du MEMS sur une longueur de pont de  $860\mu\text{m}$  (i.e  $0.05\%$ ). Le rapport de capacité a ainsi pu être augmenté d’une valeur de 10 à 30. La Figure 43 montre la photographie d’un commutateur optimisé en terme de contact et ses performances fréquentielles mesurées au niveau des lignes d’accès. Des pertes d’insertion de  $0,15\text{dB}$  à  $10\text{GHz}$  sont obtenues à l’état haut, ce qui correspond à des pertes totales de seulement  $0,08\text{dB}$  (les pertes en réflexion sont de  $0,07\text{dB}$ ). L’isolation est de  $12\text{dB}$  à  $10\text{GHz}$  et atteint  $40\text{dB}$  à la fréquence de résonance ( $20\text{GHz}$ ).



**Figure 43.** Photographie d’un commutateur MEM optimisé et ses performances mesurées [77]

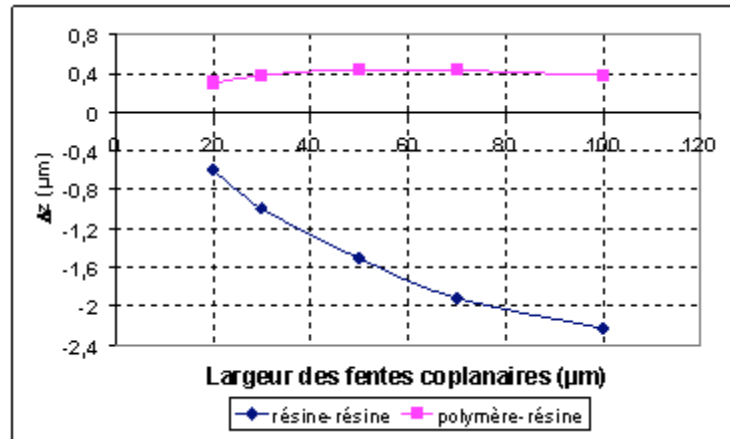
### Cas particulier de commutateur MEMS série

Des commutateurs série à forte tenue en puissance ont été développés dans le cadre d’un projet DGA nommé PAMIR. Il s’agit d’une structure très semblable à un MEMS parallèle avec une coupure supplémentaire du conducteur central sous la membrane métallique. Cette structure semblait donc simple à fabriquer, avec la technologie précédemment développée. Or cette coupure a occasionné un fluage très important de la couche sacrificielle sous le pont MEM et détériorait ainsi les performances du MEMS série. Ce fluage non négligeable (de l’ordre de  $2\mu\text{m}$ ) est visible sur la Figure 44.



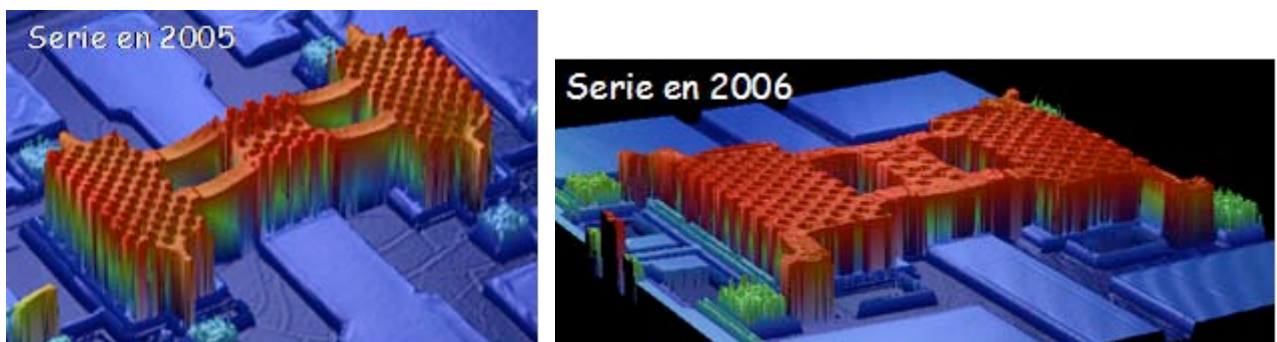
**Figure 44.** Profil optique d'un commutateur série utilisant une couche sacrificielle non optimisée

Pour palier à cet inconvénient, diverses couches sacrificielles ont été étudiées. Quelques résultats de fluage en fonction du type de couche sacrificielle et de la largeur de fente métallique comblée sont indiqués sur la Figure 45 (thèse de Chloé Bordas).



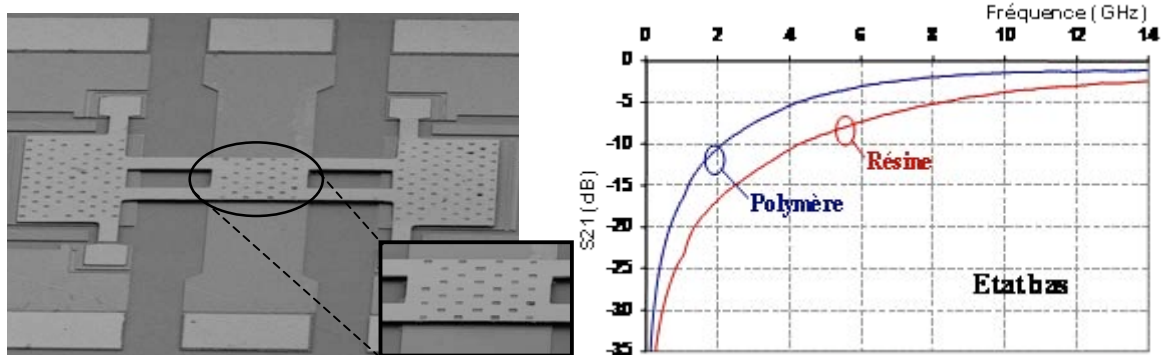
**Figure 45.** Fluage suivant la couche sacrificielle

Ces courbes corroborent parfaitement la limitation de la solution qui utilise le même type de résine aussi bien pour le comblement des gaps coplanaires que pour la couche sacrificielle du pont. Par contre, la solution « polymère-résine », basée sur l'exploitation d'une température de recuit de la couche polymère en PMGI bien supérieure à celle de la couche sacrificielle en résine, présente une grande stabilité avec quasiment aucun fluage sous stress thermique. Ceci nous a permis d'obtenir non plus des ponts série complètement déformés comme auparavant, mais des membranes parfaitement planes (cf. Figure 46 et Figure 47).



**Figure 46.** Profil de MEMS série a) non planarisé et b) planarisé

En conséquence, le paramètre de transmission du commutateur MEMS série optimisé a été fortement amélioré, comme l'indique la Figure 47, avec une capacité à l'état bas de 0,24pF au lieu de 0,16pF.



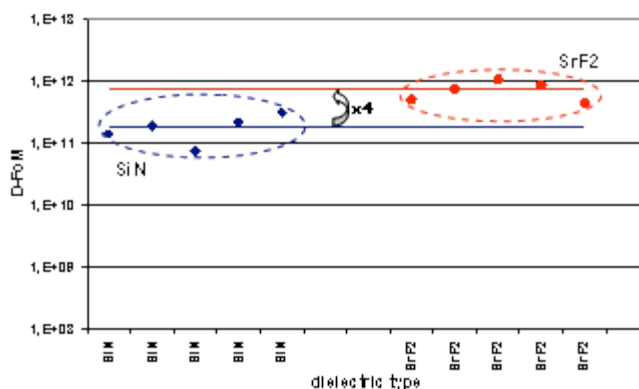
**Figure 47.** Photographie et transmission d'un commutateur MEMS série à l'état bas en fonction de la couche sacrificielle utilisée pour les fabriquer

*ii. Optimisations liées à la fiabilité des MEMS RF*

Concernant la fiabilité des MEMS RF, l'un des plus importants phénomènes de défaillance pour les MEMS RF capacitifs correspond au chargement du diélectrique avec le collage de la membrane métallique sur le diélectrique de protection. Pour y remédier, certains essayent d'éliminer le diélectrique, mais les performances s'en trouvent fortement dégradés. D'autres ont augmenté la concentration en silicium du diélectrique pour le rendre plus conducteur. Ici, nous avons étudié deux nouveaux diélectriques encore jamais utilisés pour les MEMS RF. Ceci a été rendu possible grâce à la mise en place de toute une méthodologie de caractérisation en terme de fiabilité de MEMS RF capacitifs par David Dubuc et Samuel Méllé en thèse avec lui. J'avais alors fourni de nombreux démonstrateurs MEMS pour la mise en place de cet outil formidable, qui a donné lieu à de nombreuses publications. Cet outil a été utilisé ensuite pour les deux études indiquées ci-dessous lors de la thèse de Chloé Bordas.

**1 Test du SrF2 comme diélectrique pour MEMS RF**

Le premier diélectrique autre que le SiN que nous avons testé correspond au SrF2. Il présente l'avantage de se déposer à température ambiante tout en présentant une permittivité relative supérieure à 7. Le procédé technologique pour localement le déposer a été développé en conséquence. Des mesures de fiabilité (cf. Figure 48) ont ensuite montré que ce diélectrique permet d'améliorer le facteur de mérite des MEMS RF par un facteur 4.



**Figure 48.** Figure de mérite de différents composants à base de diélectrique SiN ou SrF2

C'est aussi avec ce nouveau diélectrique que nous avons obtenu la plus forte isolation de nos MEMS,

comme l'indique la Figure 49 avec une isolation de l'ordre de 55dB à 27GHz.

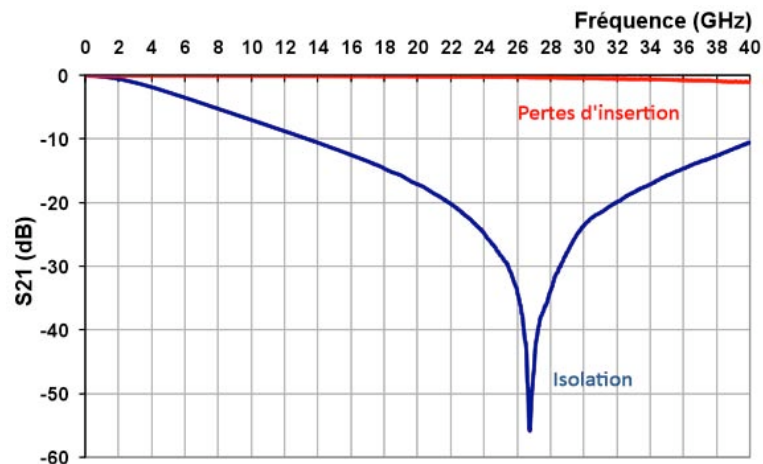


Figure 49. Performances d'un MEMS RF capacitif avec SrF2 comme diélectrique

② **Dopage du diélectrique SiN à l'aide de nanotubes de carbone (CNT) [71]**

Un autre type de diélectrique totalement original a été étudié. Il s'agit d'un nitrure de silicium classiquement utilisé pour les MEMS RF et dopé par des nanotubes de carbone. Nous avons pu montrer que la concentration de CNT améliore très fortement (deux ordres de magnitude !) le facteur de mérite de MEMS capacitifs, comme l'indique la Figure 50.

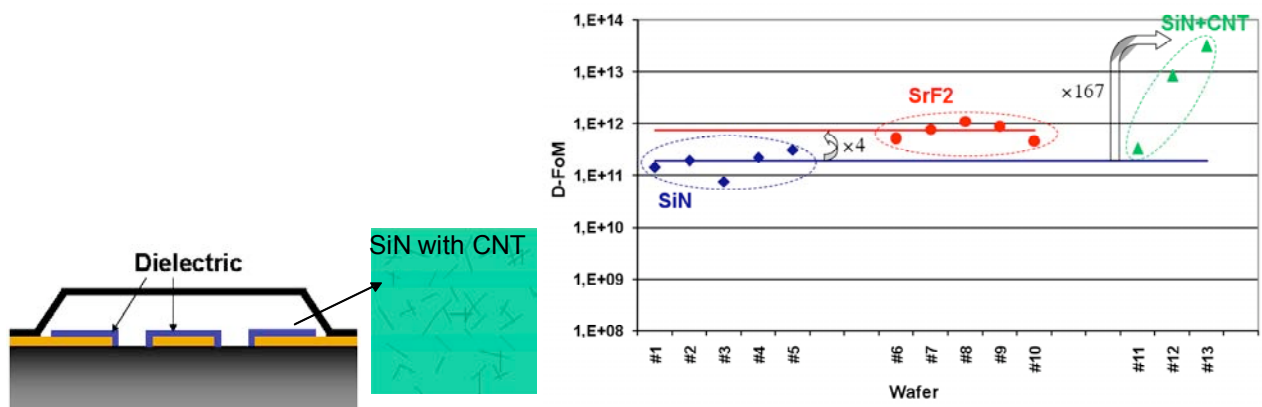


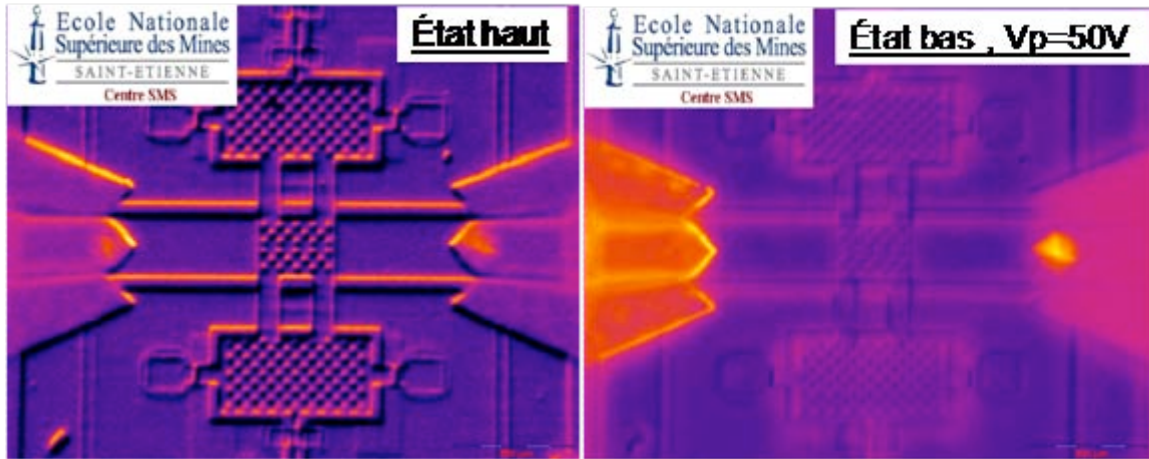
Figure 50. Facteur de mérite de MEMS RF en fonction de la concentration de CNT dans le diélectrique [71]

iii. *Modifications liées à la tenue en puissance des MEMS*

Les développements précédents ont été réalisés de façon à assurer une forte tenue en puissance des MEMS. En effet l'application visée nécessitait d'utiliser les MEMS RF dans les chaînes d'émission de signaux. Or, avec le passage de fortes puissances RF, les MEMS ont l'inconvénient de s'auto-actionner et de 'claquer'. Pour palier à ces inconvénients, nous avons développé de nouvelles topologies de commutateurs MEMS (ponts MEMS à larges dimensions en configuration parallèle et série comme précédemment indiqué) via les thèses de Benoît Ducarouge et Chloé Bordas.

Lors de nos tests en puissance, nous avons décelé une décroissance de la tension d'actionnement au delà de 1W appliqué. Cette modification est en fait due à l'échauffement induit par la puissance qui engendre alors à une déformation résiduelle du pont. Ceci a été confirmé dans le cadre d'une collaboration avec René Fillit de l'Ecole des Mines de Saint Etienne (NoE AMICOM), lors de l'observation d'un MEMS sous puissance à l'aide d'une caméra thermique adaptée au banc de mesure en puissance (cf. la Figure 51.).

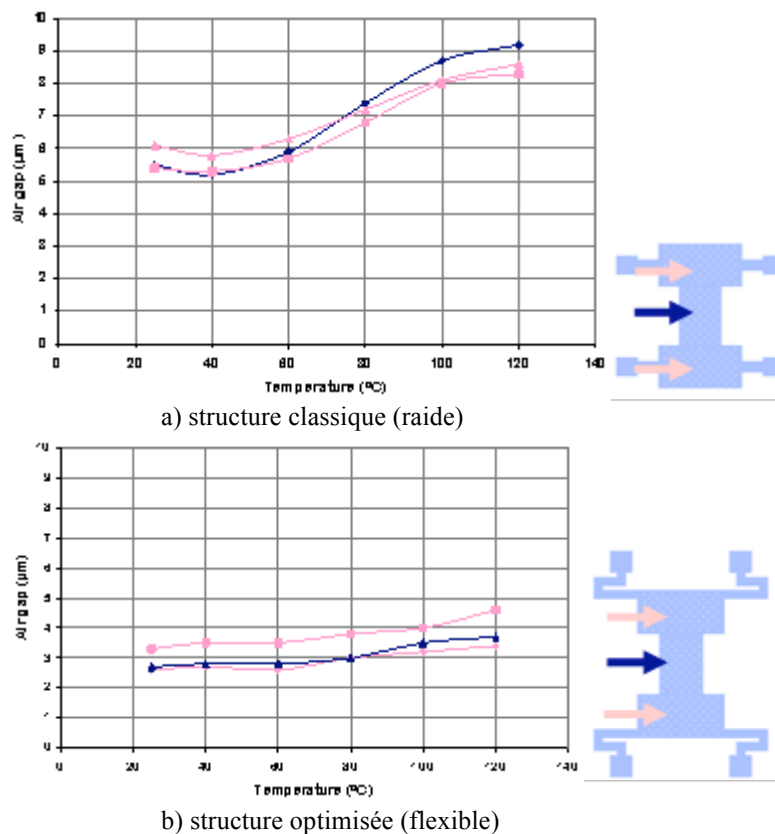




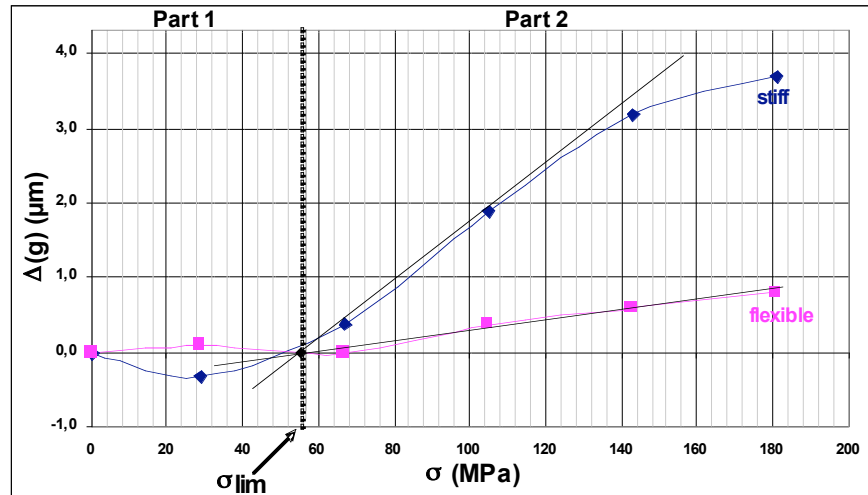
**Figure 51.** Vues Infra-Rouge de MEMS RF soumis à une puissance de 1W

Le MEMS ne présentait aucun point chaud mais subissait une augmentation en température de l'ordre de 60 à 80°C.

La démarche suivie a donc été d'effectuer une étude en tenue thermique pour différentes architectures de pont MEMS. Il s'agit d'une étude importante. Non seulement les MEMS doivent pouvoir subir des échauffements localisés impliqués pour des puissances élevées de signaux RF véhiculés, mais aussi pour tous les aspects de mise en boîtier et environnements difficiles. Afin d'une part de définir une température critique d'utilisation des MEMS, mais aussi de pouvoir étendre leur domaine d'utilisation en terme de température, des mesures thermiques ont donc été réalisées sur différents types de MEMS : des MEMS dits à ancrages raides et d'autres à ancrages flexibles. Les résultats correspondants sont indiqués sur les Figure 52 et Figure 53.



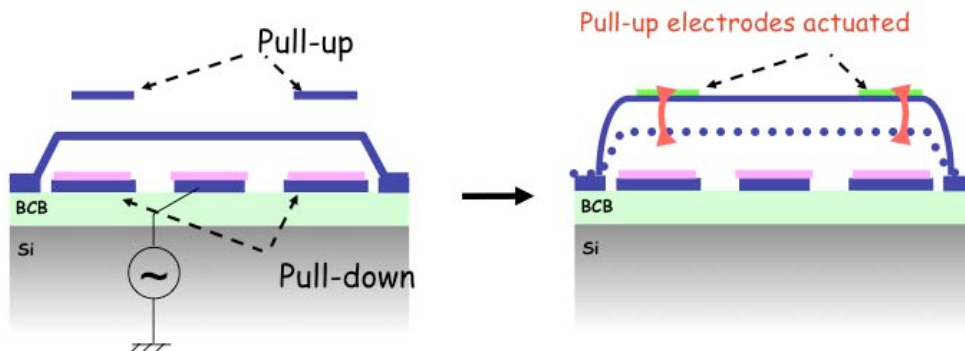
**Figure 52.** Déflexion de ponts MEMS en fonction de la raideur de leurs ancrages



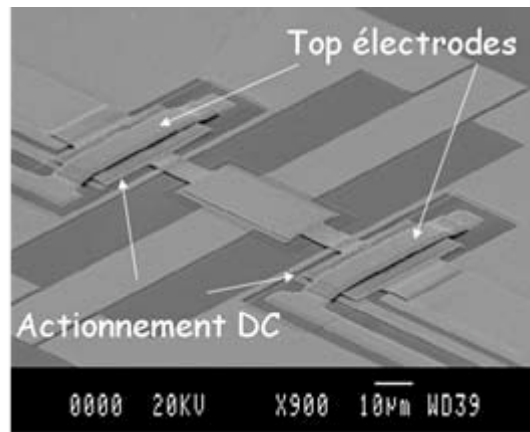
**Figure 53.** Variation de la hauteur résiduelle du pont MEM en fonction du stress thermique [75]

Cette étude a montré que la raideur du pont MEM est directement impliquée dans la réaction et donc tenue en température de pont MEMS, qui peut flamber de façon irréversible à partir d'un stress thermique limite de l'ordre de 60°C, température corroborée par les mesures infra-rouge. Les performances micro-ondes en température ne sont en revanche pas trop dégradées en fonction de la température, mais la tension d'actionnement peut fortement varier. Pour assurer une bonne tenue thermique de composants MEMS, des ancrages dits flexibles sont donc préconisés. Outre le développement d'architectures MEMS adaptées par conception, des solutions technologiques pour rendre le pont moins sujet à des modifications en température sont possibles: certains utilisent par exemple du nickel comme matériau pour les ponts MEMS avec des étapes de recuit de stabilisation lors de la filière technologique.

Enfin, pour éviter les problèmes d'auto-actionnement sous l'effet de la puissance et de diminuer les temps de montée du MEMS, nous avons testé la réalisation d'un deuxième niveau de pont fixe cette fois au dessus des électrodes déportées, comme l'indique les Figure 54 et Figure 55.



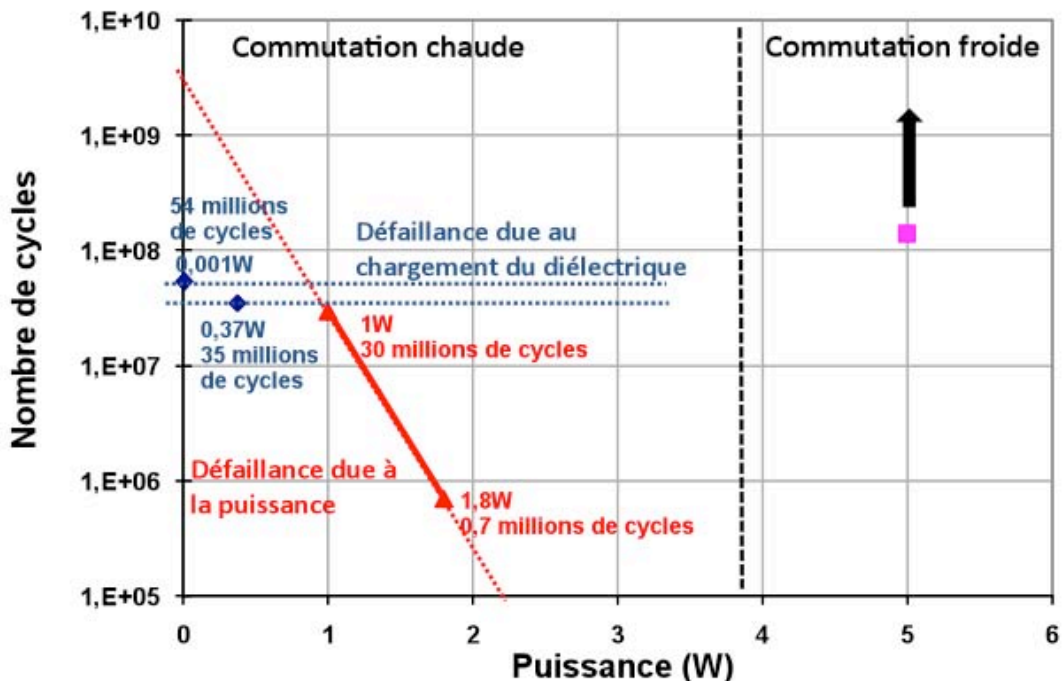
**Figure 54.** Principe de fonctionnement des électrodes supérieures pour éviter l'auto-actionnement [96]



**Figure 55.** Photographie d'une structure MEM à deux niveaux de ponts [96]

Ce nouveau niveau de pont a nécessité le développement d'une nouvelle filière technologique avec notamment l'emploi de nouvelles couches sacrificielles telles que des polymères qui résistent à de plus fortes températures. La suppression de la couche sacrificielle et le séchage final des structures MEMS constituent des étapes clés.

Pour conclure sur cet aspect puissance de MEMS RF, un bilan des niveaux de puissance atteints pour nos MEMS en lien avec le nombre de cycles de commutations est donné sur la Figure 56.



**Figure 56.** Bilan des nombres de cycles atteint en commutation chaude pour plusieurs puissances et en commutation froide

En commutation froide, le commutateur ne présente aucune défaillance sous 5W à 10GHz pour un nombre équivalent de cycles égal à 140 millions (test stoppé). En commutation chaude, la défaillance est due soit au chargement du diélectrique soit à l'échauffement induit par la puissance. Pour des puissances inférieures à 1W, le chargement du diélectrique limite le nombre de cycles atteint par les interrupteurs. Sous un stress de 1mW, le commutateur a une durée de vie de 54 millions de cycles. Elle est sensiblement réduite à 35 millions à 0,37W (écart imputé aux dispersions entre composants). Dès que la puissance de stress est égale ou supérieure à 1W, l'échauffement de la structure est non-négligeable et devient le principal mode de défaillance. Sous commutation chaude, le

nombre de cycles atteint à 1W et 1,8W est égal respectivement à 30 millions et 0,7 millions.

*iv. Implémentations à la technologie MEMS et bilan de l'évolution des démonstrateurs fabriqués*

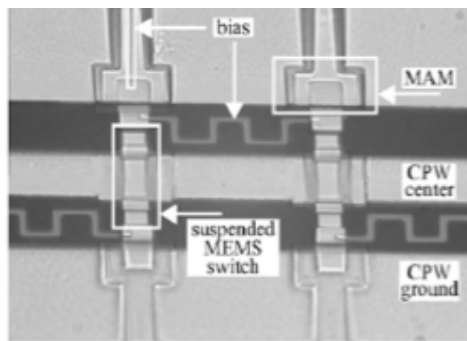
Pour donner plus de flexibilité à la conception de circuits à base de MEMS, quelques ajouts ont été apportés à la filière technologique de MEMS RF. Des résistances intégrées aux structures MEMS ont été développées notamment pour l'élaboration de commutateur 'série' ou encore pour l'intégration de MEMS avec des ICs.

Un compromis concernant la valeur de cette résistance doit être fait. En effet, pour que la résistance soit vue comme un circuit ouvert, il faut une forte valeur de résistance mais en contre partie le temps de réponse du commutateur MEMS risque d'être allongé. Généralement, le temps de commutation d'un MEMS est de l'ordre de 10 $\mu$ s, et sachant que les valeurs maximales de capacité tournent autour de quelques pF, les résistances pourront présenter des valeurs supérieures à quelques M $\Omega$ . Différents matériaux sont utilisés comme lignes de commandes résistives en microélectronique (cf. Tableau 2).

**Tableau 2.** Résistivités de matériaux utilisés pour réaliser des résistances

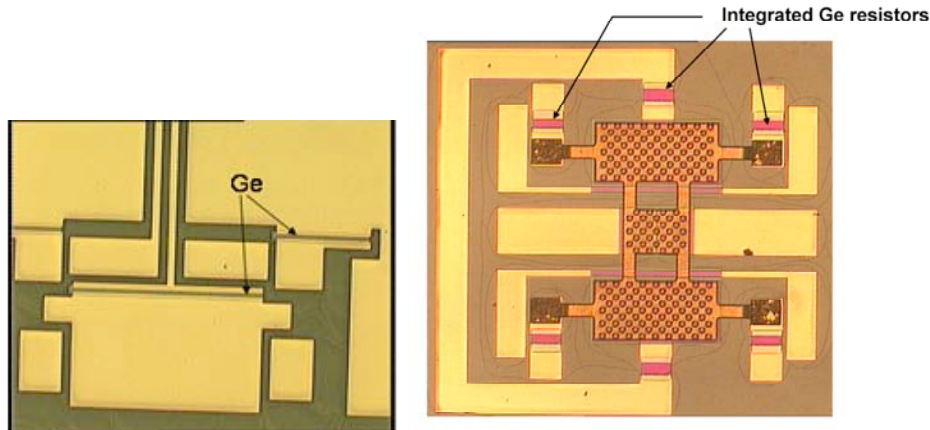
Materials	NiCr [Shen 2003, Kola 1997]	TaN [Shen 2003]	NiV [Shen 2003]	SiCr [Hayden 2003] Weller 2006]	Ge
Resistivity ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	$\sim 100$	$\sim 150\text{-}200$	60	$\sim 20 \cdot 10^3$	$\sim 46 \cdot 10^6$

Seuls le Silicium Chrome et le Germanium présentent une résistivité suffisante pour atteindre des valeurs supérieures à plusieurs dizaines de k $\Omega$ . Le SiCr est habituellement utilisé dans la littérature des MEMS. Cependant pour obtenir les valeurs adéquates, ces résistances deviennent des lignes très longues (cf. Figure 57), ce qui limite la miniaturisation des circuits.



**Figure 57.** Structures MEMS avec lignes résistives en SiCr [Hayden 2003]

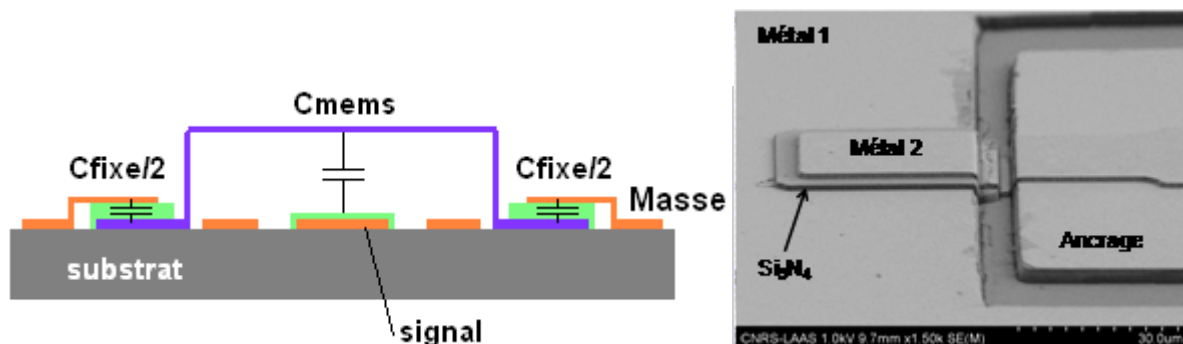
Le germanium de résistivité supérieure au SiCr présente donc un intérêt considérable dans l'élaboration de microsystèmes RF compacts puisque sa forte valeur permet d'utiliser des tailles de résistances réduites. Pour cela, nous avons ajouté et adapté au procédé MEMS une couche résistive en germanium, comme le montre la Figure 58.



**Figure 58.** Photographie de la couche resistive Ge sans et avec pont MEMS [11]

Ceci donne accès à l'élaboration de nouveaux circuits et rend également la technologie compatible avec des circuits intégrés.

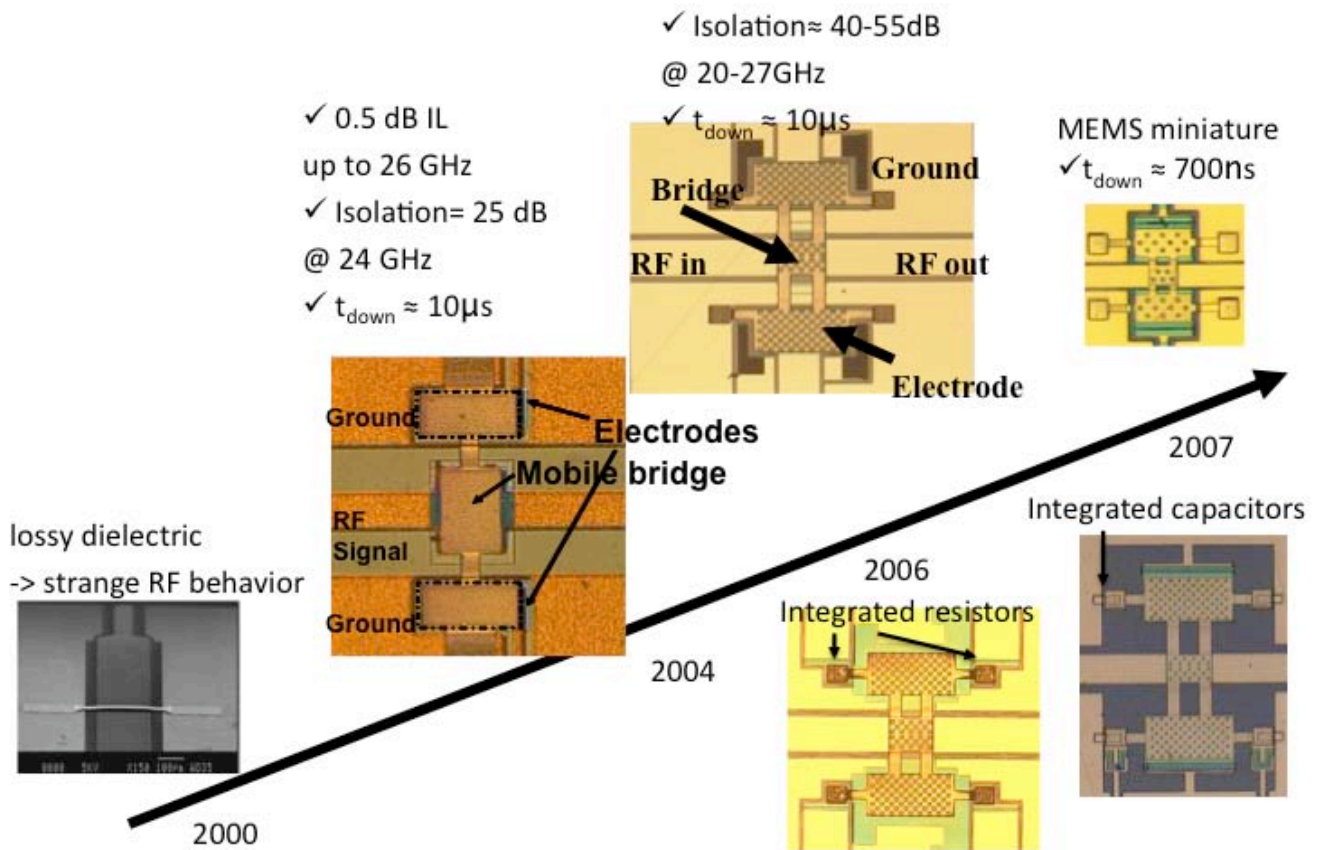
D'un point de vue circuit, notamment pour l'adaptateur d'impédance présenté dans un prochain paragraphe, des capacités MIM ajoutées au niveau des ancrages d'un commutateur MEMS (cf. Figure 59) ont également été nécessaires et ont été développées par Chloé Bordas durant sa thèse. La filière technologique des MEMS RF a été modifiée en conséquence. La photographie d'une telle capacité indiquée en Figure 59 montre sa validation technologique.



**Figure 59.** Vue en coupe d'un MEMS série associé une capacité fixe. Photographie d'une capacité [1]

Pour conclure sur le développement de MEMS RF, la **Figure 60** donne l'évolution des démonstrateurs MEMS RF développés depuis 2000. De nombreuses modifications ont été apportées au cours de ces années. En bref, l'utilisation d'un nitrure de silicium obtenu par PECVD à 300°C plutôt que d'une fine couche de BCB non totalement polymérisée et très "fuiteuse" fut un premier grand pas technologique. Liés aux importants travaux de conception dirigé par David Dubuc avec des MEMS à largeur non uniforme, les tous premiers travaux pour réaliser des ponts plats amenèrent ensuite une nouvelle avancée pour nos MEMS avec un premier niveau d'isolation de l'ordre de 25dB à 24GHz. L'étape suivante a consisté à encore améliorer les performances et assurer la tenue en puissance des composants. La métallisation des lignes coplanaires a ainsi été rendue bien moins rugueuse, avec un grand travail sur les couches sacrificielles et métallurgiques des ponts pour assurer une bonne planéité et libération de ponts MEMS aux dimensions très larges. Enfin dernièrement, des MEMS miniatures ont été réalisés pour pouvoir monter en fréquence et aussi diminuer les temps de commutation.





**Figure 60.** Evolution des MEMS RF développés

*v. Apport des nanotubes de carbone en tant que membrane mécanique pour NEMS*

Nous avons vu précédemment la limitation en température de membrane métallique en or pour les MEMS RF. Il existe donc un intérêt fort à exploiter de nouveaux matériaux aux propriétés remarquables. Les nanotubes de carbone représente un sujet d'investigation nouveau. Avec David Dubuc, nous nous sommes intéressés aux apports des CNTs pour la reconfiguration de microsystèmes hyperfréquences. Au niveau mondial, quelques études se sont axées sur l'obtention de transistors à base de nanotubes de carbone [Happy 2006], [Campbell 2004]. Au LAAS, nous nous sommes intéressés à **exploiter des CNTs fonctionnels (mobiles) dans des composants hyperfréquences** pour l'élaboration de nano-interrupteurs.

Comme pour le concept des MEMS, il paraît intéressant d'accéder à une échelle encore plus petite, nanométrique, avec l'élaboration de NEMS. Ceux-ci, de part leur taille, pourraient encore favoriser la miniaturisation des futurs systèmes de communication, tout en ajoutant un degré de reconfigurabilité élevé.

Nous avons donc étudié le **développement de nano-commutateurs à base de CNT mobiles** dans le cadre du projet ANR NATURE (NAnoTUBE de carbone pour les Radio-communications millimétriques) avec le LPICM.

Différentes topologies de NEMS ont été envisagées : avec CNT verticaux ou horizontaux. Après de nombreux tests technologiques de faisabilité, la structure retenue est présentée sur la Figure 61. Cette topologie implique la fabrication de toute la partie « micrométrique » avant la fabrication des nanotubes de carbone. En conséquence, toutes les couches métalliques et diélectriques impliquées doivent tenir une température de 600°C nécessaire aux CNTs. La plupart des briques technologiques

nécessaires à l'élaboration d'une telle structure ont été étudiées lors de la thèse de Sébastien Pacchini et quelques exemples en sont donnés sur la Figure 61.

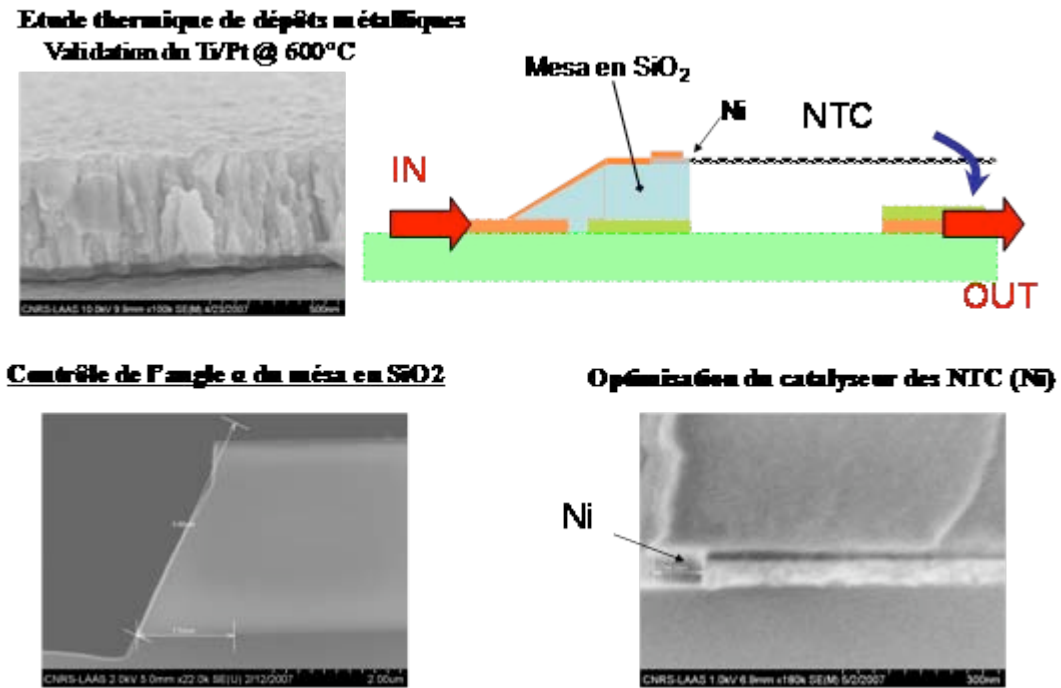


Figure 61. Structure NEM retenue avec quelques exemples d'études technologiques spécifiques

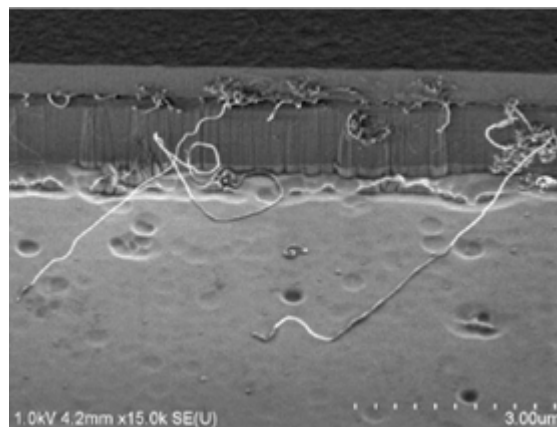
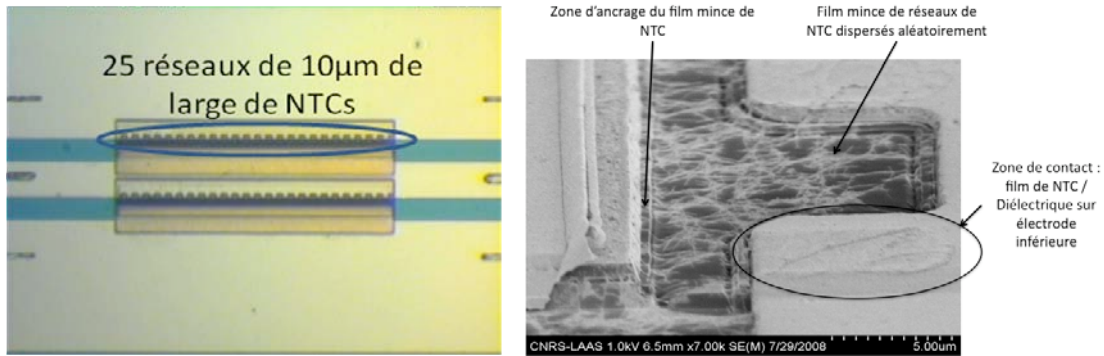


Figure 62. Vue MEB de CNT horizontaux [66]

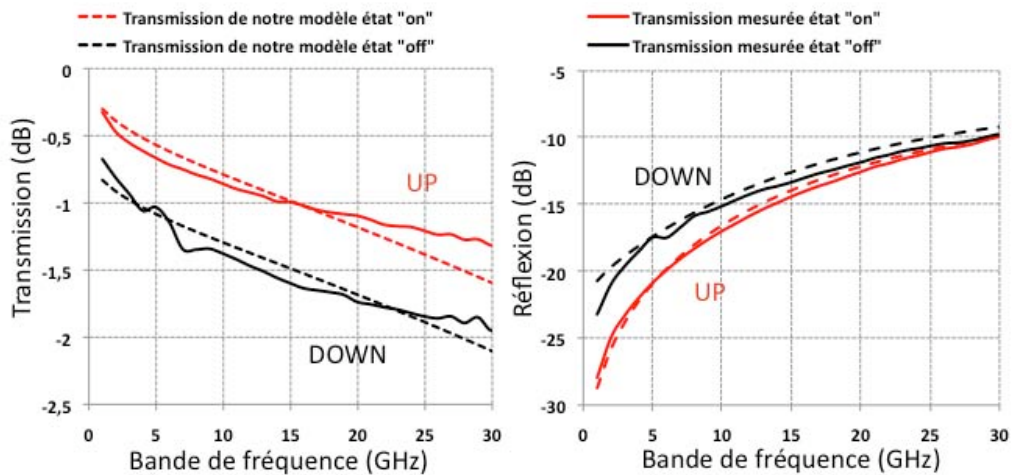
Le LPICM a eu en charge la croissance localisée des CNTs (présentée dans ce rapport) et la Figure 62 montre un résultat de croissance prometteur mais ne permettant pas, au moment du projet (2006-2009), la réalisation de composants fonctionnels.

Parallèlement aux travaux de développement technologique de la croissance localisée et dirigée des CNTs, nous avons souhaité développer un démonstrateur technologique du concept de NEMS RF. Nous avons ainsi envisagé la réalisation de fonctions *capacités variables* par actionnement électrostatique pour laquelle la membrane mobile est réalisée à partir d'un film mince de CNT dispersées aléatoirement et déposé par spray. L'objectif à long terme étant de proposer un tel composant à base de CNT obtenus par croissance et donc organisés en réseaux. Cette solution alternative à la croissance permet de relâcher les contraintes thermiques de la filière technologique et s'appuie sur le savoir-faire déjà acquis pour la fabrication de MEMS RF avec couche sacrificielle. Quelques photographies de démonstrateurs sont indiquées dans la Figure 63.



**Figure 63.** Zoom d'une vue MEB d'une capacité variable NEMS à base d'un film mince de CNTs déposés aléatoirement par spray

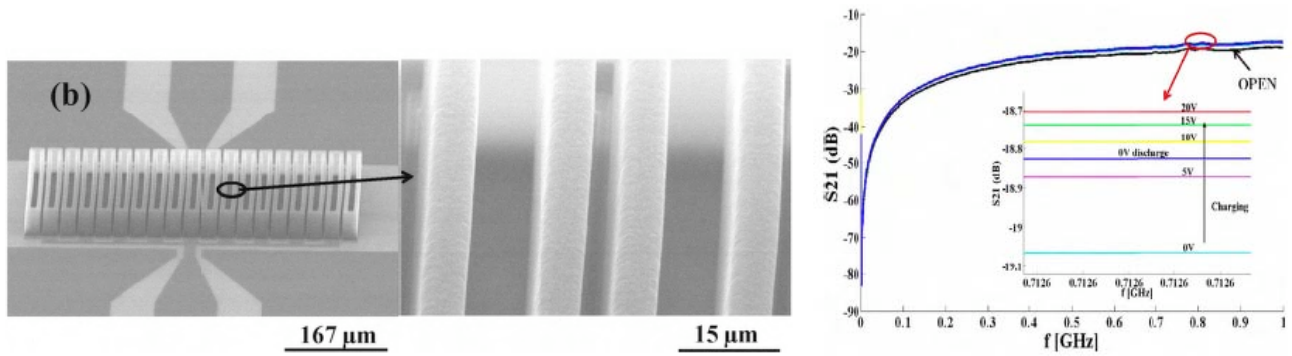
Les mesures (cf. Figure 64) ont démontré un comportement de capacités variables lorsqu'une tension de polarisation est appliquée. A notre connaissance, il s'agissait en 2008 du premier commutateur MEMS RF réalisé base de CNTs.



**Figure 64.** Performances d'une capacité variable à base d'un film mince de CNT

Ce résultat montre qu'*il est possible d'envisager des composants sub-millimétriques à base de CNTs, dont les performances pourront dépasser celles des MEMS RF, notamment en termes de miniaturisation et de rapidité de commutation.* De lourds développements technologiques sont encore à poursuivre avant de pouvoir intégrer ce type de composants dans des microsystèmes hyperfréquences. Néanmoins, des résultats prometteurs issus de projets, tels que le projet européen NANO RF, commencent à émerger avec croissance in situ de CNT. La capacité MEM à base de réseaux de CNT verticaux (cf. Figure 65) présente une reconfigurabilité de 19% pour une plage de capacité de 50 à 200fF et des tensions d'actionnement raisonnables.



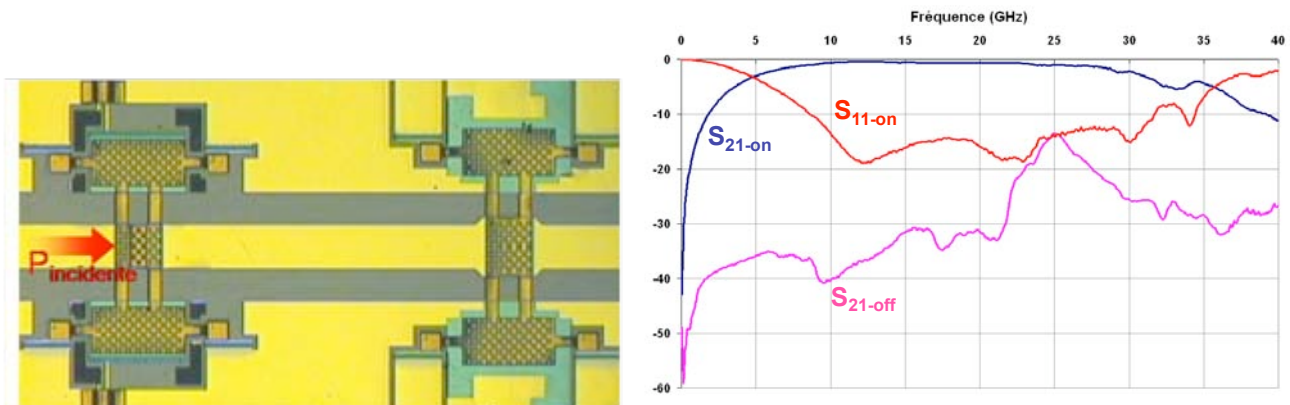


**Figure 65.** MEM capacitor based vertical CNT arrays [Ionescu 2009]

Etant donné tous ces développements au niveau composant MEMS / NEMS, la suite logique a été de réaliser des circuits plus complexes à base de plusieurs MEMS.

## 2. MEMS RF - Approche circuits : reproductibilité technologique de composants MEMS

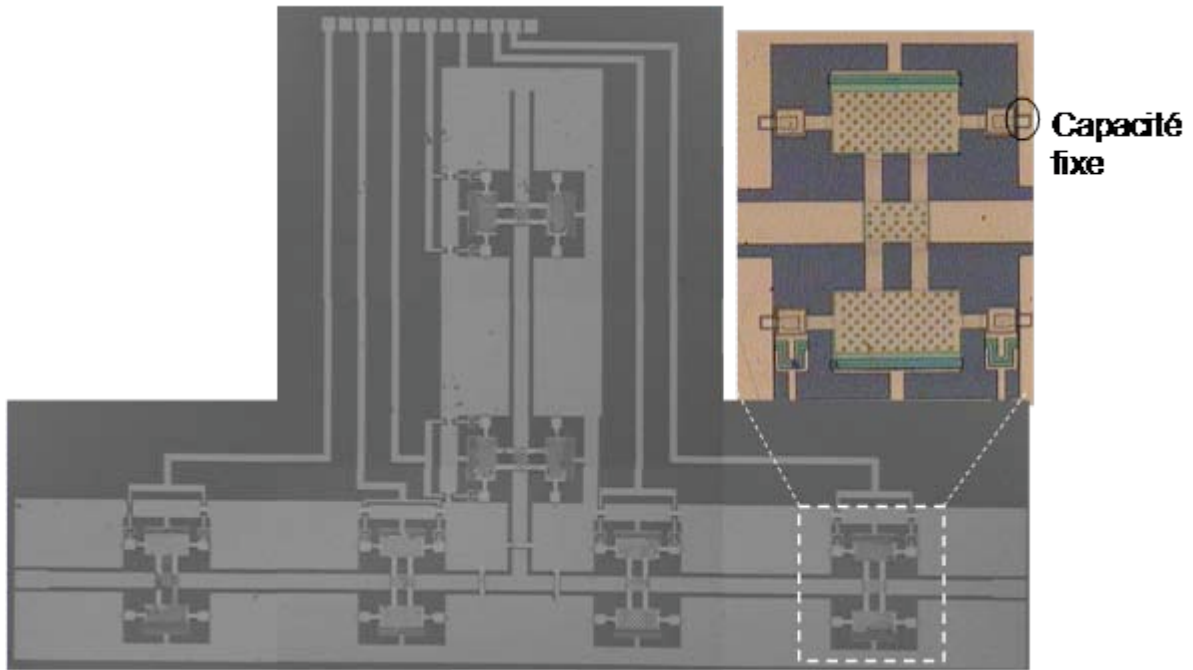
L'élaboration de circuits à partir de plusieurs MEMS a commencé dans le cadre du projet DGA nommé PAMIR. Pour satisfaire une topologie de commutation large bande avec forte tenue en puissance, une configuration utilisant un MEMS série et un MEMS parallèle a été choisie. Les résultats mesurés sont indiqués sur la Figure 66. Cette structure présente des pertes d'insertion inférieures à 1dB de 9 à 24GHz et une isolation supérieure à 30dB de 0 à 22GHz, ce qui répondait au cahier des charges.



**Figure 66.** Photographie et résultats de mesure du circuit large bande à MEMS série et parallèle

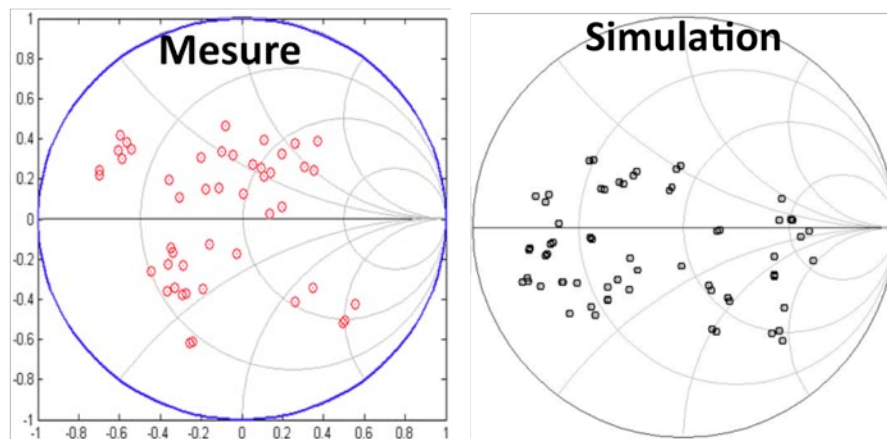
Comme nous le verrons dans la partie suivante, des réseaux à base de 4 MEMS ont également été étudiés lors de la thèse CIFRE de Jean-Pierre Busquère. La nouvelle couche sacrificielle pour MEMS n'avait pas encore été développée à l'époque, ce qui rendait la fabrication de MEMS uniformément reproductibles très difficile. Le meilleur démonstrateur final obtenu présentait d'ailleurs un MEMS collé sur les quatre à réaliser.

Ensuite dans le cadre de la thèse de Chloé Bordas, un adaptateur d'impédance avec 6 MEMS a été conçu et élaboré avec succès, comme le montre la Figure 67.

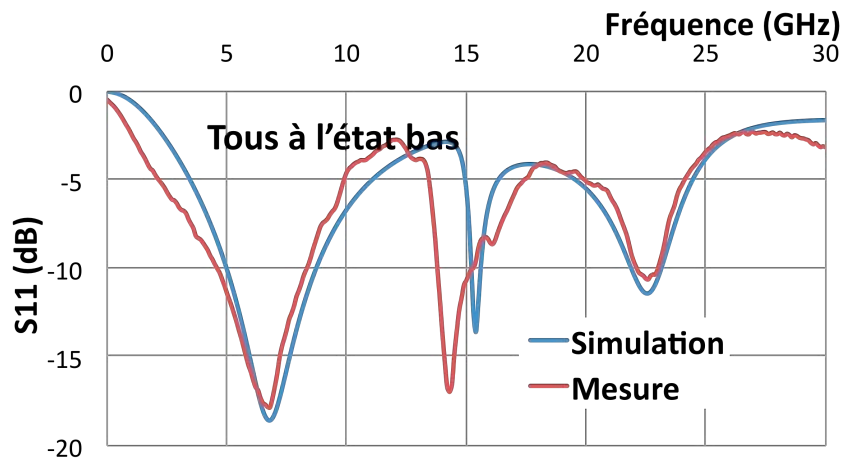


**Figure 67.** Photographie d'un tuner complet et d'un MEMS avec capacité MIM intégrée [1]

Ce circuit a représenté technologiquement un grand gap à franchir. En effet, réaliser un MEMS qui fonctionne est une chose, en fabriquer 6 côte à côte et tous libérés avec des hauteurs similaires en est une autre. Cela demande une très grande reproductibilité et fiabilité de la technologie. Ceci a été obtenu après un très long et fastidieux travail sur les couches sacrificielles. La caractérisation d'une telle structure présente un nombre de configurations possibles pour les MEMS ( $2^6 = 64$ ) très important. Le banc de test avait donc été adapté en conséquence. Un exemple de résultat est indiqué sur la Figure 68 et la Figure 69.



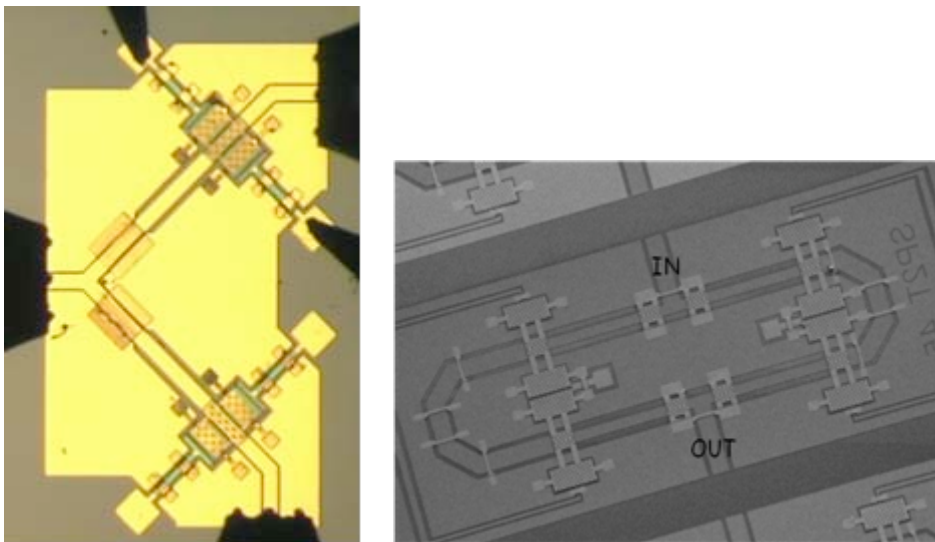
**Figure 68.** Résultats de mesures et simulations d'un tuner à 12,4 GHz [1]



**Figure 69.** Performances d'un tuner avec les 6 MEMS actionnés à l'état bas

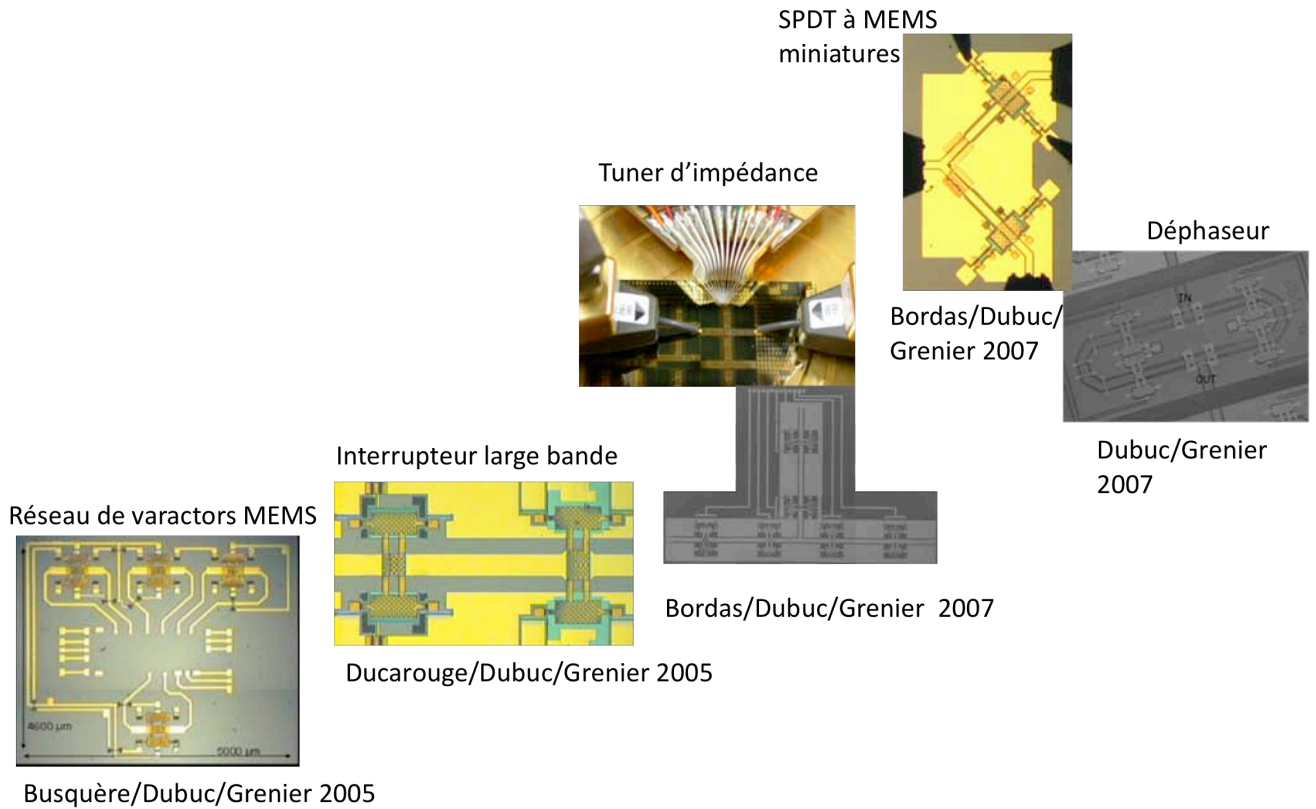
Vis à vis de la littérature, cette réalisation était particulièrement remarquable car réalisée sur silicium.

Une fois la technologie adaptée à un rendement de fabrication élevé (supérieur à 70-80%) de MEMS, la fabrication de circuits à plusieurs MEMS devient possible assez aisément. En 2007, des Single Pole Double Thru à base de MEMS miniatures de même que divers déphaseurs ont été élaborés et fabriqués, comme l'indique la Figure 70 avec des exemples de photographies de circuits. Les structures ont été réussies dès la première plaquette fabriquée, ce qui prouve à présent la grande maturité de notre technologie MEMS. Celle-ci a néanmoins requis 6 à 7 ans de lourds développements en parallèle à des travaux de conception et caractérisation intensifs réalisés par mon collègue David Dubuc.



**Figure 70.** Photographies d'un SPDT à base de MEMS miniature et d'un déphaseur

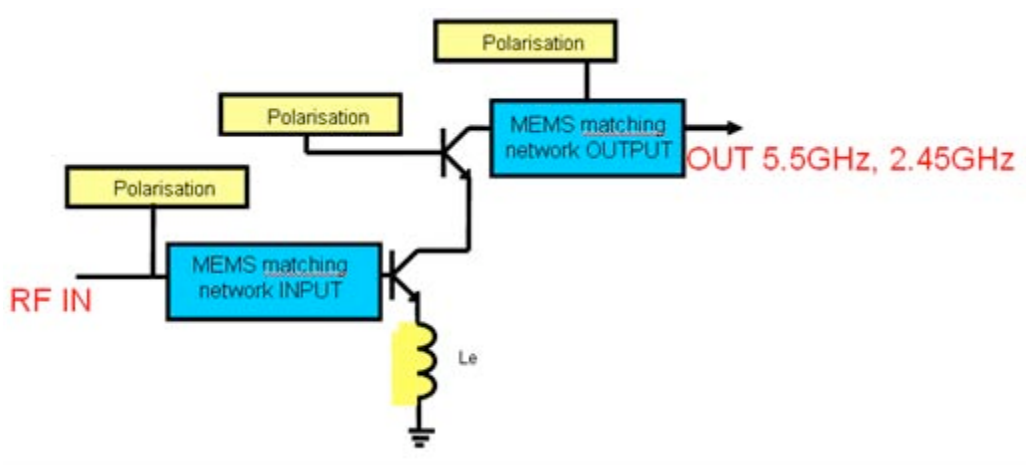
En résumé, la Figure 71 présente l'évolution des circuits réalisés au cours du temps. Le réseau de 4 varactors de JP Busquère fut notre premier essai, assez mitigé à l'époque, puisqu'un MEM était resté collé. Les modifications technologiques apportées ensuite en termes de couche sacrificielle, contrainte métallique des ponts et séchage ont permis l'élaboration de multiples circuits à plusieurs MEMS avec à partir de 2007 des rendements supérieurs à 70% (et même au-delà) dans une salle blanche académique.



**Figure 71.** Evolution des circuits à MEMS RF développés

### 3. MEMS RF - Approche microsysteme

Enfin, dans le cadre de la thèse CIFRE de Jean-Pierre Busquère avec ST Microelectronics (2002-2005), l'aspect intégration microsystèmes a été étudié via l'élaboration d'un amplificateur faible bruit (Low Noise Amplifier - LNA) reconfigurable en fréquence à l'aide de MEMS. Les éléments MEMS étaient utilisés en tant que capacités variables et se situaient dans les réseaux d'adaptation en bruit et en puissance à l'entrée et sortie du LNA (cf. Figure 72).

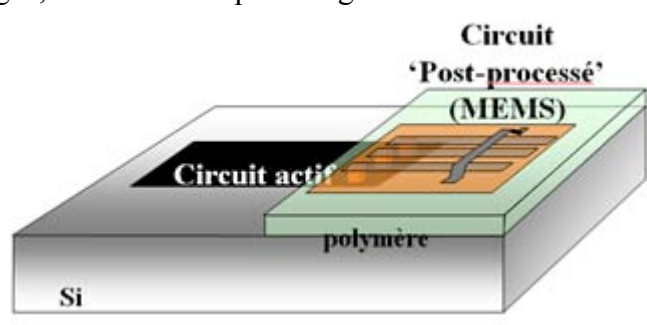


**Figure 72.** Schéma du LNA reconfigurable en fréquence et localisation des structures MEMS

L'amplificateur peut ainsi fonctionner aux fréquences 2,45 GHz et 5,5GHz. Une méthodologie de conception d'éléments MEMS paramétrables avec toute une bibliothèque de capacités a été mise en

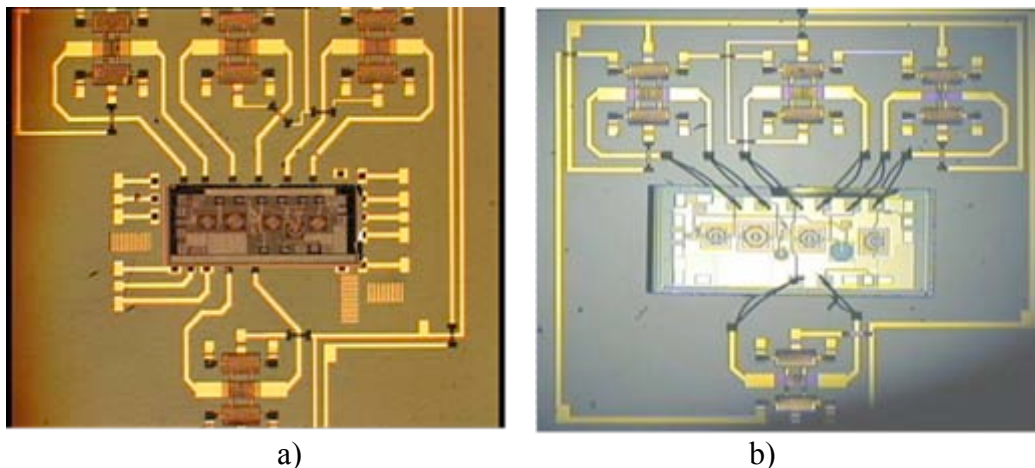


place. La filière technologique dédiée a été étudiée de façon à être compatible avec celle des circuits intégrés SiGe BiCMOS de ST Microelectronics. Quatre capacités MEMS étaient ainsi nécessaires, de même que l’emploi de résistances intégrées aux MEMS. Côté assemblage, une intégration monolithique était envisagée, comme l’indique la Figure 73.



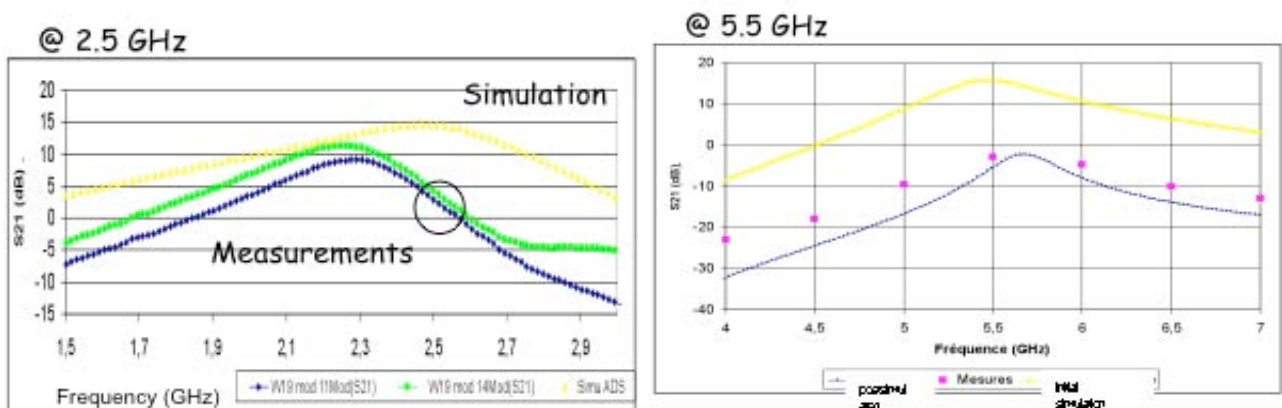
**Figure 73.** Schéma de l’intégration monolithique des MEMS avec le LNA

Néanmoins, face à l’impossibilité d’obtenir les substrats SiGe complet de ST Microelectronics, nous avons opté pour des intégrations par flip chip et par fils de bonding, comme le montre la Figure 74.



**Figure 74.** Assemblages des capacités MEMS avec le LNA prévus a) par flip-chip et b) par ‘bonding’ [83]

Etant donné le temps imparti pour les travaux, seules les structures avec report par fils de bonding ont été finalisées et mesurées. Le gain mesuré et simulé pour chaque fréquence du LNA est présenté sur la Figure 75.



**Figure 75.** Gain du LNA à 2,4GHz et 5,5GHz



Le LNA a fonctionné comme attendu à 2,4GHz avec un gain mesuré de 11dB et un noise figure de 2,5dB. En revanche, le gain attendu à 5,5GHz n'a pas été obtenu en raison d'une capacité MEMS collée. La rétro-simulation du circuit avec ce MEMS collé a corroboré la mesure obtenue. Même si les performances attendues aux deux fréquences n'ont pas toutes été atteintes du fait de la technologie MEMS non encore stabilisée, le concept d'un LNA reconfigurable en fréquence à l'aide de MEMS a pu être validé. Il s'agissait à l'époque de l'une des toutes premières validations de technologies MEMS (mobiles) au sein d'un microsystème hyperfréquence sur silicium. Des publications plus récentes [Jajoo 2009], [Okazaki 2010] corroborent l'intérêt d'utiliser des MEMS pour la reconfigurabilité de LNA.

## Conclusion

En conclusion de cette synthèse des activités réalisées de 2001 à 2008, ma démarche globale a été de développer de nouvelles solutions technologiques pour les microsystèmes hyperfréquences:

- en allant au delà des limites imposées par les technologies conventionnelles des circuits intégrés hyperfréquences sur silicium. En capitalisant les développements phénoménaux réalisés par le passé en micro-nanotechnologies pour les actionneurs et capteurs (exemples des têtes d'impression jet d'encre, des accéléromètres...), l'exploitation de micro-usinages, d'empilement de couches polymères, de nouveaux matériaux tels que les nanotubes de carbone, permet d'élaborer de nouveaux circuits à fort coefficient de qualité particulièrement miniatures et compatibles avec les technologies des circuits intégrés.
- en intégrant des fonctionnalités nouvelles, telles que les MEMS, issues de domaines disciplinaires différents de l'électronique haute fréquence mais qui peuvent néanmoins se rejoindre via les microtechnologies. En associant les technologies des systèmes hyperfréquences classiques à celles des composants microélectromécaniques, les microsystèmes HF ont pu se doter de nouvelles fonctionnalités accordables compactes qui leur confèrent une plus grande reconfigurabilité avec des performances toujours meilleures.

Mon projet de recherche poursuit cette démarche en ouvrant les microsystèmes hyperfréquences aux mondes de la fluide, de la biologie et de la médecine.

## **Partie 2 : Projet et perspectives de recherche - Au delà des disciplines: que peut apporter la microfluidique aux systèmes hyperfréquences ? Ouverture à de nouveaux domaines applicatifs tels que la biologie et la médecine.**

Nous avons vu jusqu'ici l'apport de microtechnologies jugées à l'époque de leur développement non conventionnelles, telles que l'ajout de polymères pour l'intégration tri-dimensionnelle de circuits, l'utilisation de parties mécaniques mobiles pour accéder à plus de reconfigurabilité des microsystèmes HF avec les MEMS RF. Les microtechnologies peuvent apporter bien plus: elles ont trait à des disciplines totalement diverses.

A l'image de la construction des grandes agglomérations, l'élaboration de routes, de bâtiments et canalisation de rivières... constituent les bases mêmes de nos villes. Mais suivant les régions du monde, matériaux, moyens et méthode de construction diffèrent. A Tokyo par exemple (cf. Figure 76), la sismologie de la région impose des règles de construction antisismiques importantes, qui n'ont pas cours forcément ailleurs.



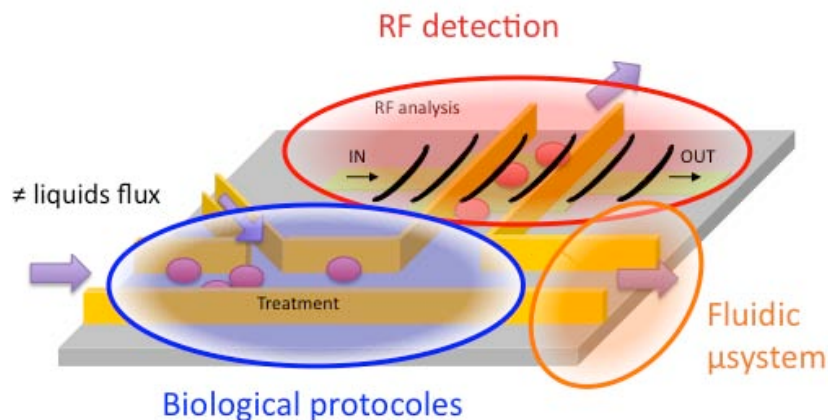
**Figure 76.** Vue de Tokyo

Les goûts esthétiques et architectures sont également très différents entre orient et occident, et même entre pays d'une même région du globe.

De la même manière, les microtechnologies sont utilisées pour de multiples applications, mais toujours avec des matériaux et techniques spécifiques aux domaines d'utilisation. En tirant partie de cette richesse et en osant associer des techniques très variées, il est alors possible d'ouvrir de nouveaux horizons.

Dans cette démarche située "au delà des conventions", j'ai eu envie d'étudier ce que pourraient apporter les liquides aux microsystèmes hyperfréquences. Certes, cette idée n'est pas neuve. L'interaction des ondes électromagnétiques hautes fréquences avec divers fluides, surtout des milieux biologiques comme des tissus, du sang, a déjà fait l'objet de travaux importants par le passé [Schwan 1996]. L'originalité réside dans l'approche micrométrique envisagée, qui offre des ouvertures non encore exploitées.

Ce projet de recherche consiste donc à **associer la microfluidique aux microsystèmes hyperfréquences pour offrir de nouvelles perspectives, que ce soit pour de l'analyse et du diagnostic en biologie et médecine, ou encore pour établir de nouveaux concepts de reconfigurabilité des systèmes électroniques hautes fréquences.** La Figure 78 donne une illustration de ce concept dans le cas de la biologie avec une vision laboratoire sur puce.



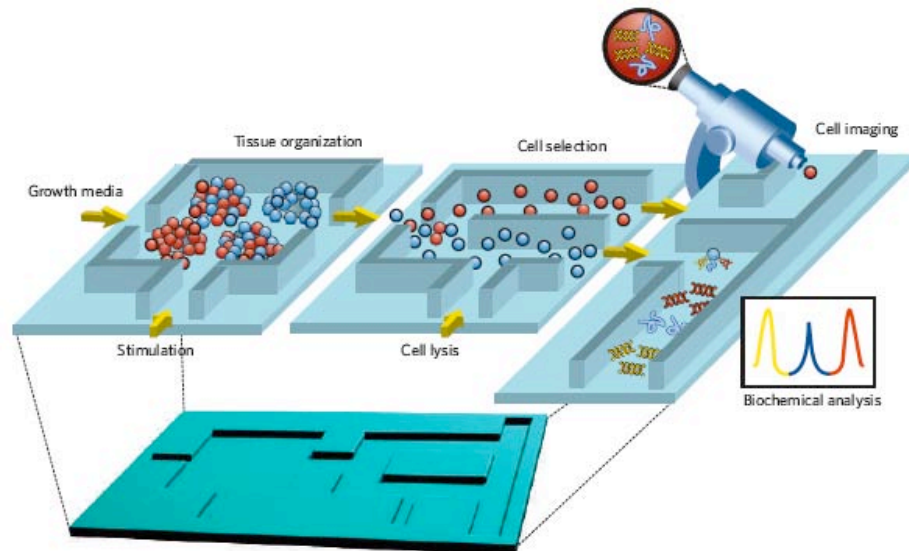
**Figure 77.** Microsystème HF/Fluidique pour la santé, l'environnement...

## I. Positionnement des travaux

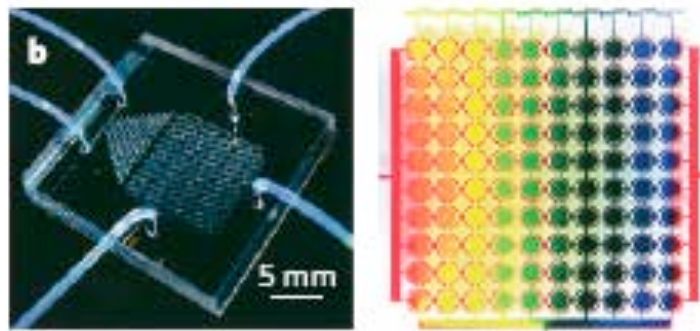
Les domaines de la biologie et du médical subissent depuis quelques années des changements radicaux liés à l'émergence et aux potentialités offertes par les microtechnologies et notamment la **microfluidique**, qui permet de façon précise de multiples actions (cf. Figure 78 et Figure 79):

- manipulation précise et contrôlée de faible volume de liquides de manière rapide et reproductible [Ali 2006]
- gestion de réactions dans des « chambres » (prolifération de cellules, amenée de médicaments, de nutriments, ...)
- culture, séparation, tri, localisation précise de cellules ou biomolécules [Lu 2004, Voldman 2003, Grimmes 2008].

La rupture apportée par les microtechnologies permet d'adresser toutes ces fonctions de manière massivement parallélisable et à faible coût [Hung 2005].



**Figure 78.** Microsystèmes pour organisation de tissu, culture et analyses cellulaires [Ali 2006]



**Figure 79.** Réseau microfluidique de culture cellulaire [Hung 2005]

Dans ce contexte d'intégration *micrométrique* de multiples fonctionnalités sur puce [Verpoorte 2003], un verrou concerne la miniaturisation de systèmes d'analyse appropriés. La problématique majeure est de **proposer de manière intégrée des techniques de caractérisation sensibles capables d'opérer en milieu liquide**. D'intenses travaux de recherche sont donc en cours depuis une dizaine d'années afin de proposer des techniques d'analyse compactes : intégration de systèmes optiques, développement de systèmes de détection électriques - basses fréquences (<MHz) ou très hautes fréquences (THz) [Liu 2007, Treizebré 2009] - , mécaniques [Bao 2008, Wang 2008, Han 2005] en milieu fluide [Bashir 2004]... Une bonne illustration (donnée Figure 80), qui résume la plupart des principes de détection cités précédemment, est donnée par Bashir [Bashir 2004]. Chaque technique présente avantages et inconvénients.



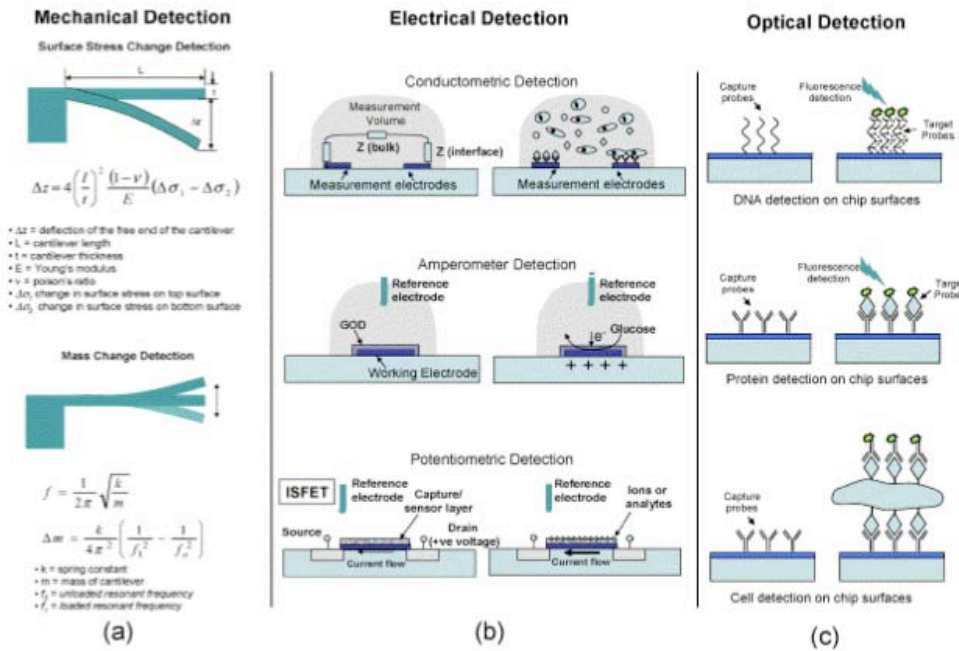


Figure 80. Exemples de fonctionnement de capteurs biologiques [Bashir 2004]

Une autre solution très peu explorée jusqu'ici à l'échelle micrométrique consiste à utiliser les ondes électromagnétiques dans la gamme des HyperFréquences - HF (~1-100 GHz). Or cette gamme de fréquence permet une totale pénétration des ondes dans les substances biologiques envisagées (notamment les cellules), sans nécessité de marqueur, ou de contact avec des électrodes.

Historiquement, le Prof. Schwan a longuement étudié l'interaction des ondes électromagnétiques avec le vivant dans les années 50s à 80s et a démontré que les tissus présentent des propriétés diélectriques bien distinctes suivant la gamme de fréquence appliquée avec des sauts de valeurs appelés "dispersions"  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  pour les plus connues, comme indiquées dans la Figure 81.

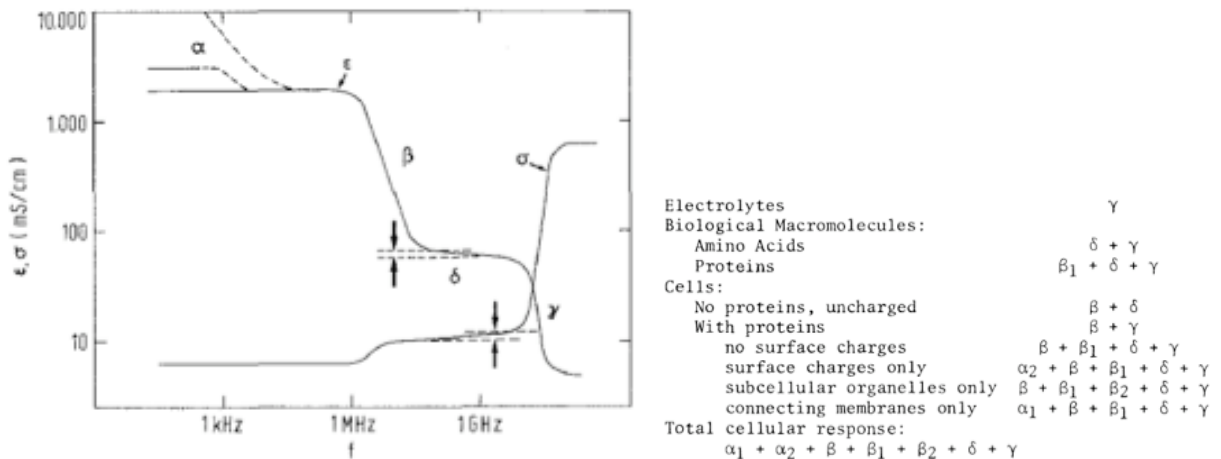
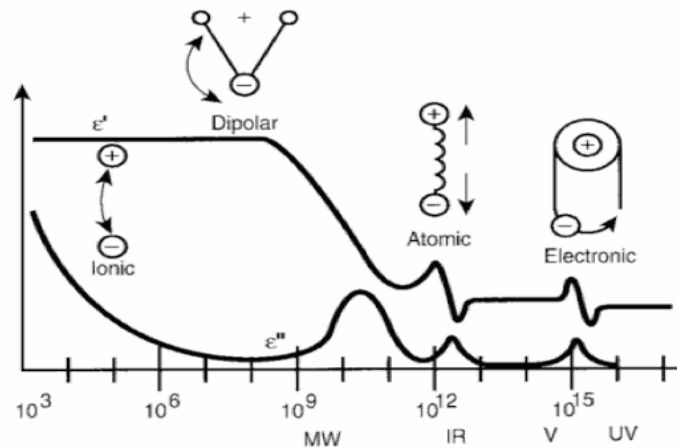


Figure 81. Propriétés électriques de tissu en fonction de la fréquence [Schwan 1985]

Ces sauts sont directement liés aux effets de polarisation de la matière soumise au champ électromagnétique, comme rappelés dans la Figure 82.



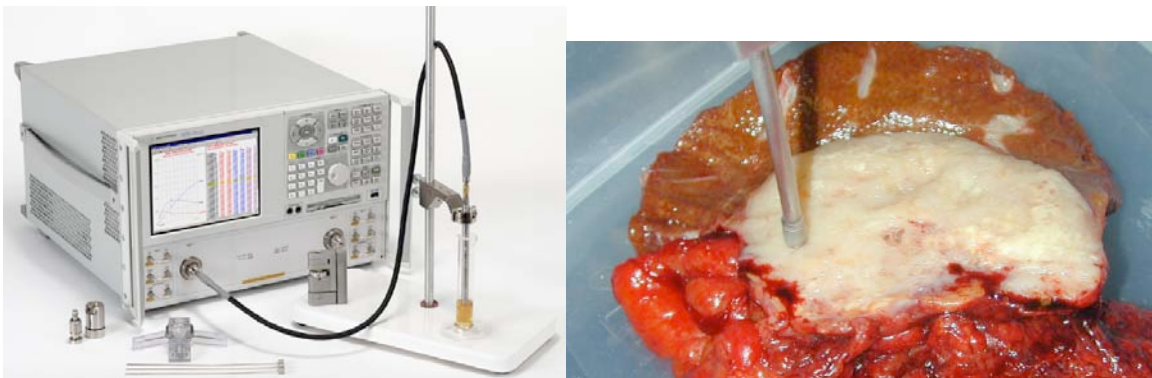


**Figure 82.** Effet des ondes sur la matière

De façon simplifiée, la dispersion  $\alpha$  est associée aux diffusions ioniques qui se déroulent au niveau de la membrane des cellules, la  $\beta$  est due principalement à la polarisation de la membrane cellulaire, tandis que la  $\gamma$  est attribuée à l'effet de polarisation des molécules d'eau, principal élément constitutif des cellules.

Les gammes de fréquence micro-ondes et millimétriques présentent donc de multiples intérêts. Tout d'abord, elles incluent la dispersion  $\gamma$ , ce qui implique de large variation de la permittivité et de la conductivité. Les longueurs d'ondes associées sont compatibles avec la taille de cellules et de tumeurs et l'atténuation des signaux par la présence d'eau n'est pas rédhibitoire. Enfin, elles permettent une analyse non ionisante, sans forcément besoin de contact avec la matière, de marqueurs fluorescents et potentiellement compatibles avec des mesures en temps réel.

Au niveau de ces gammes de fréquence, des études essentiellement à une échelle macroscopique ont été menées. La Figure 83 montre l'exemple d'une sonde coaxiale (résolution de quelques millimètres d'un organe).

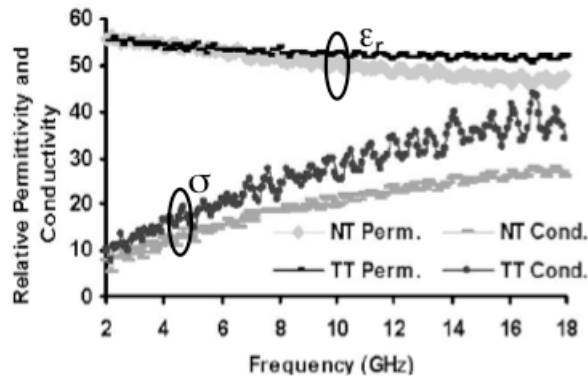


**Figure 83.** Sonde coaxiale et analyseur vectoriel de réseau permettant l'analyse à l'échelle de quelques mm de tissus/organes [Agilent], [Rourke 2007]

Diverses autres techniques toujours volumineuses ont été investiguées, utilisant différents types de guides d'onde [Khan 2007-1, Khan 2007-2, Sebastian 2004, Duhamel 1997].

Ces études à large échelle n'en sont pas moins très précieuses. En effet, une très large variété de tissus, d'os, de liquides biologiques variés ont été mesurés et présentent tous des signatures électriques distinctes. Les travaux de Gabriel [Gabriel 1996] font référence en la matière.

Un autre fait marquant a également été démontré. Il existe un contraste important des paramètres diélectriques entre tissus sains et tissus cancéreux sur une large gamme de fréquence au-delà du GHz, comme illustré à la Figure 84.

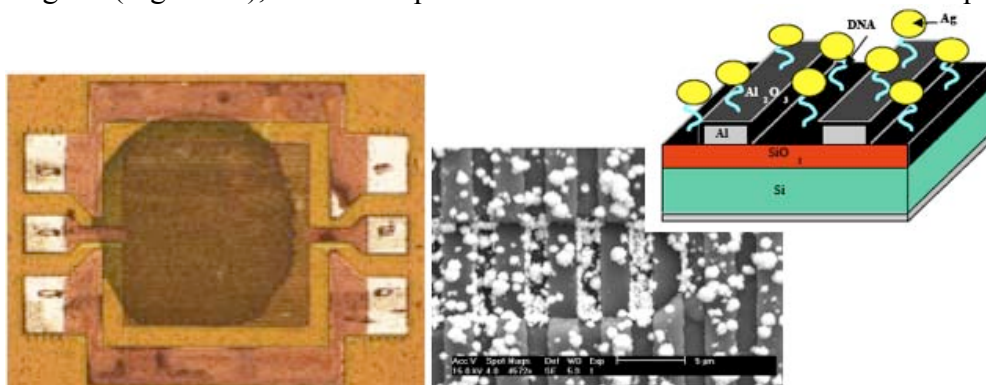


**Figure 84.** Paramètres électriques de tissus mammaires sains et pathogènes (NT : Non-Tumorous Tissue and TT : Tumorous Tissue) [Khan 2007-1]

Le récent passage au-delà de la dizaine de GHz permet d'accéder à des contrastes de plus en plus importants (la Figure 84 démontre un contraste grandissant lorsque la fréquence augmente). D'importants travaux aux Univ. de Calgary (Canada) et Wisconsin (USA) visent en conséquence à développer des systèmes d'imagerie radar notamment pour la détection du cancer du sein [Lazebnik 2007] [Khan 2007] [Kurrant 2008] [Davis 2008] ou encore sur le cancer du foie [O'Rourke 2007].

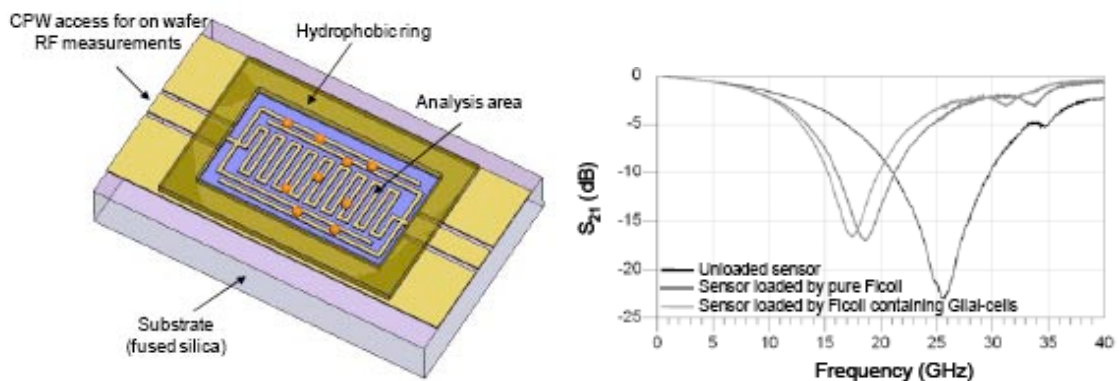
Du point de vue micrométrique, quelques travaux tels que ceux de Facer [Facer 2001], Deneff [Deneff 2004], Dalmy [Dalmy 2008] ou encore Pavlidis [Pavlidis 2008] ont été publiés.

Certaines publications mettent en avant des mesures en milieu sec. Deneff [Deneff 2004] par exemple présente la fonctionnalisation de brins d'ADN avec des particules d'argent, placés sur une capacité interdigitée (Figure 85), dont la fréquence de résonance est modifiée en conséquence.



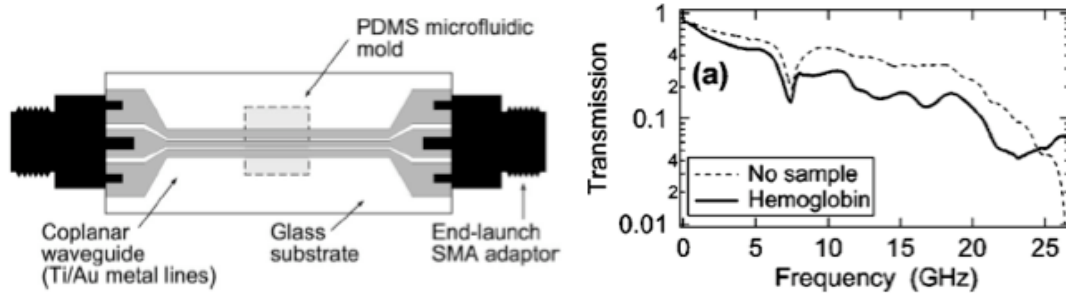
**Figure 85.** Capacité interdigitée chargée fonctionnalisée par des brins d'ADN-Ag [Deneff 2004]

Dalmy [Dalmy 2008] a mesuré à l'aide d'un circuit résonant des cellules mortes dans un gel (Figure 86).

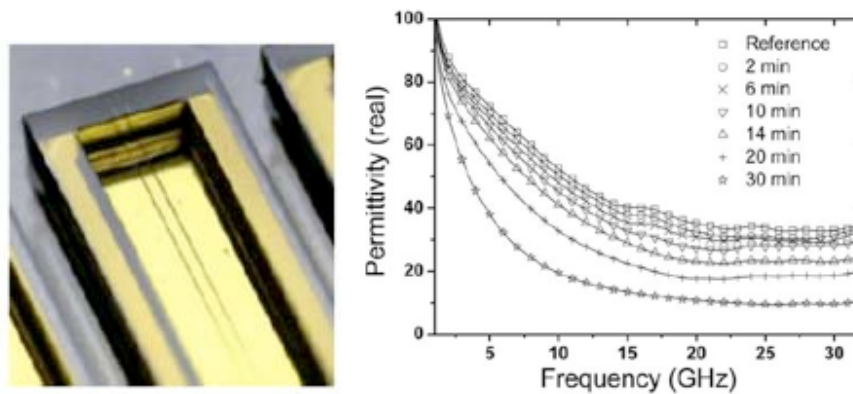


**Figure 86.** Résonateur [Dalmy 2008]

Enfin, quelques publications mettent en œuvre des micro-réservoirs dans lesquels sont placés matériaux biologiques à analyser, inoculés par seringue [Facer 2001, Pavlidis 2008]. Hémoglobine, ADN- $\lambda$ , E-coli [Facer 2001], et cellules en suspension [Pavlidis 2008] ont ainsi été mesurés sur une large gamme de fréquence (cf. Figure 87 et Figure 88).



**Figure 87.** Ligne coplanaire à micro-puit, testée avec de l'hémoglobine [Facer 2001]



**Figure 88.** Ligne coplanaire à micro-réservoir testé avec des cellules HEK-293 et 10% de DMSO [Pavlidis 2008]

Cette dernière publication est particulièrement intéressante car elle montre également la compatibilité de la mesure hyperfréquence avec une détection en temps réel. En effet, les auteurs ont été capables d'extraire la permittivité du fluide analysé durant la mort progressive des cellules durant une trentaine de minutes.

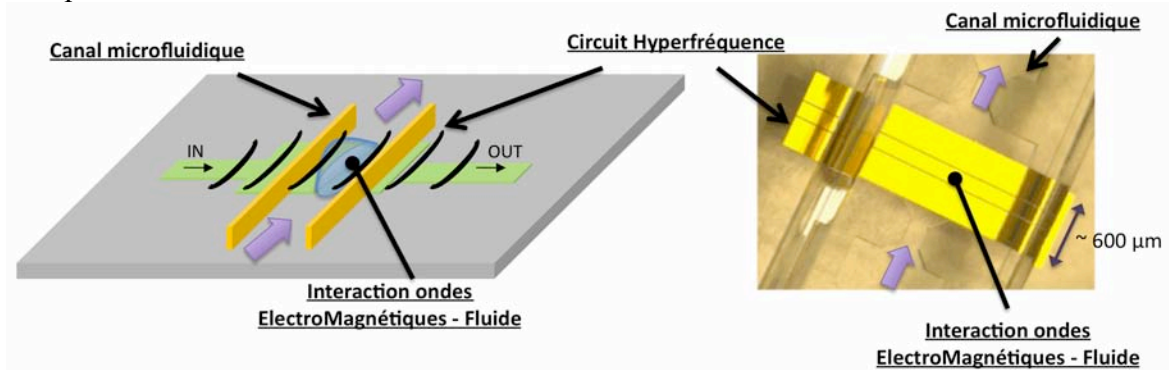
L'utilisation des ondes électromagnétiques dans la gamme des hyperfréquences pour effectuer des analyses biologiques est donc particulièrement attractive. Ajouter au fait qu'il est maintenant possible d'énormément miniaturiser les systèmes hyperfréquences (confère la partie 1 de ce manuscrit) et fluidiques, **ce projet de recherche vise à associer les micro et nanotechnologies hyperfréquences et fluidiques pour développer de nouveaux systèmes d'analyse et de diagnostic biologique et médical.**

## II. Travaux initiés

Ce projet de recherche a été initié dès 2007 par une collaboration avec le professeur japonais H. Fujita, expert en BioMEMS via le LIMMS-CNRS, afin dans un premier temps d'en faire la preuve de concept et ensuite d'en établir les fondements. Une *démarche d'intégration microfluidique* associée à une détection miniaturisée HF de substances biologiques a d'emblée été choisie pour différentes raisons.

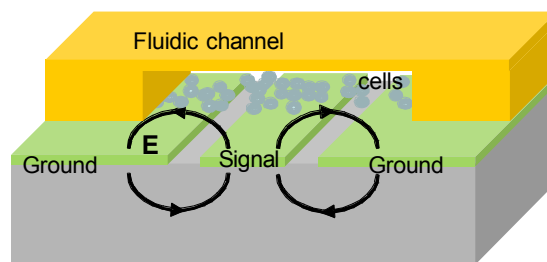
- D'une part cela permet d'éviter tout problème d'évaporation et contamination éventuelle, comme dans le cas d'un environnement ouvert tel que pour les micro-réservoirs.
- Les éléments biologiques peuvent être analysés quelque soit leur état physiologique: vivant ou mort.
- Enfin cela permet une totale compatibilité avec les développements réalisés pour les laboratoires sur puce.

Un premier démonstrateur a donc été fabriqué (cf. Figure 89) puis évalué avec différents milieux liquides.



**Figure 89.** Vision du concept et photographie du premier démonstrateur intégré [9]

Il s'agit d'une ligne coplanaire avec un canal fluide placé à sa perpendiculaire. Ce dernier permet de localiser précisément le fluide et de le mettre en interaction avec les lignes de champ électrique propagées sur le guide d'onde, comme indiqué sur la Figure 90.



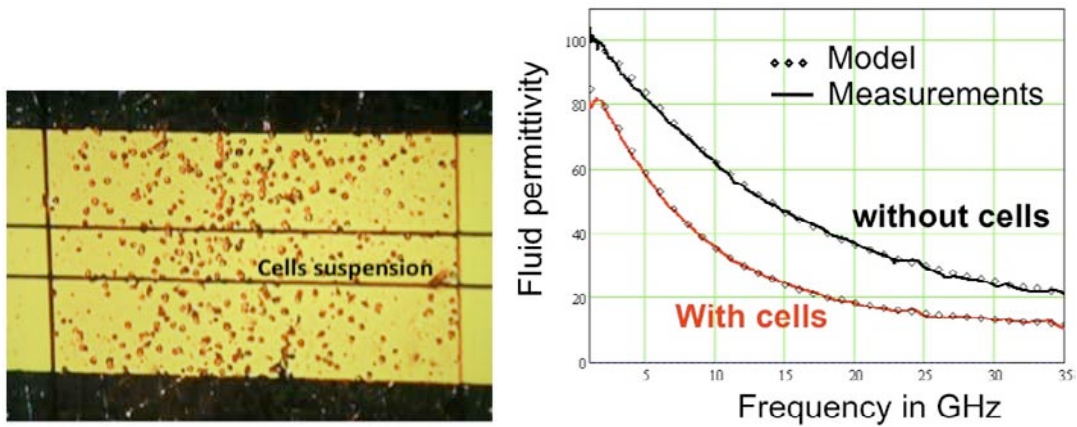
**Figure 90.** Schéma de principe de biocapteur à détection électromagnétique [9]

L'amplitude et phase du signal électromagnétique sont modifiées par les caractéristiques diélectriques de la substance biologique. Différents milieux ont été caractérisés :

- ✓ des solutions de référence telles que de l'eau dé-ionisée, de l'éthanol,
- ✓ des solutions de  $\lambda$ -ADN [Grenier 2009],
- ✓ puis des suspensions de cellules humaines cultivées préalablement in vitro et mesurées dans divers états : vivantes, mortes, cancéreuses,
- ✓ les médiums associés.

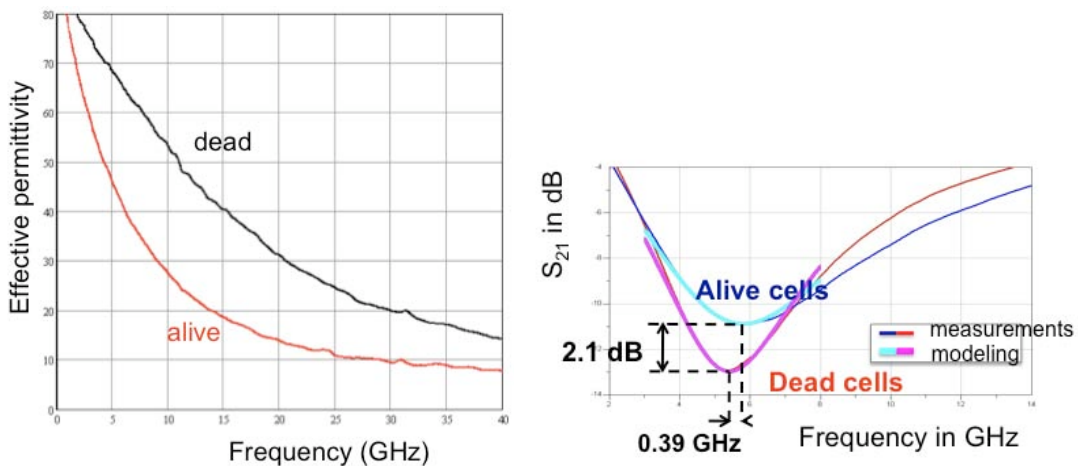
La Figure 91 présente un exemple de caractérisation pour une suspension de cellules vivantes de type HUVECs.





**Figure 91.** Photographie de cellules en suspension dans le biocapteur RF et détection associée [Grenier 2009]

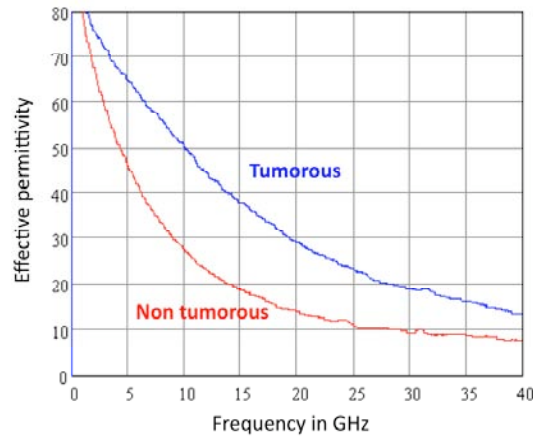
Un très fort contraste sur la permittivité relative du liquide a été mesuré entre les 2 solutions : avec et sans cellules, ce qui montre la possibilité de détecter des cellules par la technique HF en milieu liquide. D'autres mesures ont également permis de quantifier [Grenier 2009] et même d'identifier des cellules suivant leur état ; vivante, morte, cancéreuse, d'une famille ou d'une autre. C'est ce qui est indiqué sur la Figure 92, que ce soit par des mesures en transmission ou encore à l'aide d'un circuit résonant [Grenier 2010].



**Figure 92.** Permittivité effective du fluide suivant l'état physiologique de cellules en suspension: vivantes ou mortes [Grenier 2010]

Et comme obtenu à l'échelle macrométrique lors de travaux d'imagerie radar, la mesure de suspensions de cellules tumorales et non tumorales de même origine endothéliale implique des signatures électriques bien distinctes à l'échelle micrométrique (cf. Figure 93).

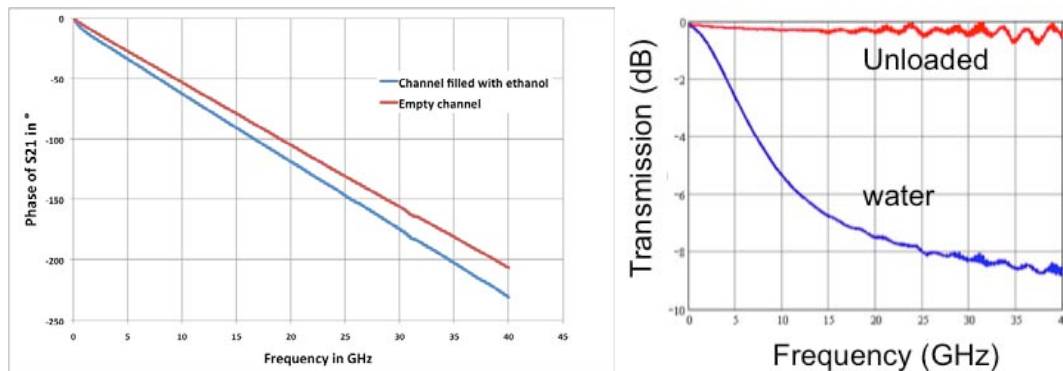




**Figure 93.** Signature électrique de cellules vivantes HUVEC (non tumorales) et SK-HEP-1 (tumorales)

Ces premiers travaux ont permis de mettre en avant les différents atouts de la technique d'analyse hyperfréquence. Les ruptures offertes par rapport aux techniques actuellement utilisées en biologie sont les suivantes: non-invasif, sans contact, compatible avec des mesures en temps réel, fortement miniaturisable et donc intégrable, et enfin potentiellement compatible pour des études in vivo.

Au delà des applications biologiques et médicales et dans une démarche similaire, l'ajout de microfluidique peut également être exploitée pour reconfigurer des composants hyperfréquences. Pour démontrer cette possibilité, le même dispositif que précédemment peut être utilisé. Les mesures en transmission (phase ou amplitude) de la structure à vide puis chargée soit par de l'éthanol, soit par de l'eau sont présentées sur la Figure 94.



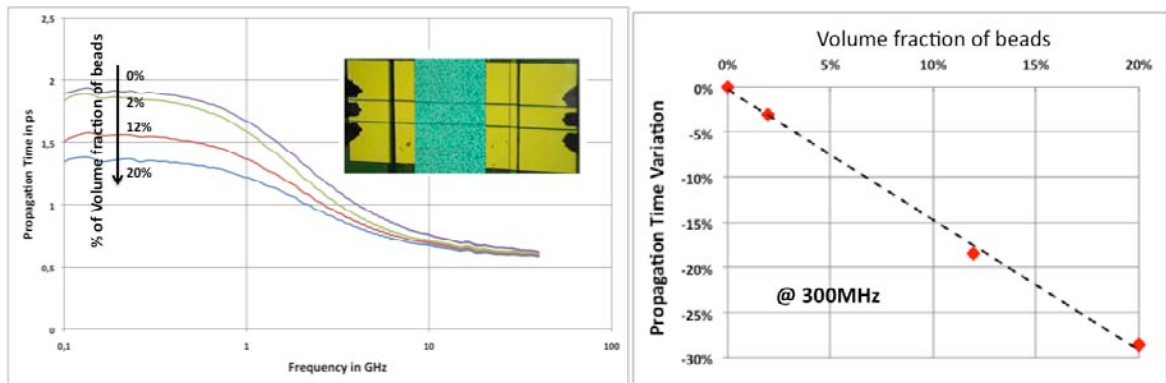
**Figure 94.** Déphaseur HF et interrupteur HF actionnable par microfluidique

Les deux états ON et OFF d'un interrupteur actionnable par la microfluidique sont facilement accessibles en tirant partie de la forte atténuation de l'eau. L'éthanol présente quant à lui de faibles pertes en transmission mais une permittivité différente de l'air, ce qui convient parfaitement pour réaliser un déphaseur. Ces simples tests montrent ici le fort potentiel offert par l'exploitation de la microfluidique pour des applications en "électronique haute fréquence".

En outre, la reconfiguration de fonctions électroniques peut non seulement être envisagée par des changements de fluides homogènes (exemples précédents) mais aussi hétérogènes, ce qui, si cette hétérogénéité est contrôlée, permet une plus grande accordabilité.

Ainsi, à l'aide de microsphères de polystyrène dispersées dans de l'éthanol et avec un contrôle de leur

fraction volumique, un accord de 30% sur le déphasage a été obtenu (cf. Figure 95).



**Figure 95.** Accordabilité par solutions colloïdales [Dubuc 2010]

Il est donc clair vis à vis de ces premiers travaux que la microfluidique allier aux microsystèmes hyperfréquences apportent des perspectives totalement nouvelles aussi bien pour le bio-médicale mais aussi pour l'électronique haute fréquence reconfigurable.

### III. Prospectives de recherche

La combinaison des microsystèmes HF et de la microfluidique peut donc être regroupée en une seule et même thématique scientifique portant sur le *développement de Micro nanosystèmes HyperFréquences Fluidiques*, avec deux axes de recherche applicatifs distincts :

- \* la biologie, le médical et l'environnement...
- \* l'électronique haute fréquence (instrumentation, aéronautique, communications...).

Les développements correspondants se font au sein d'une nouvelle équipe de recherche au LAAS, avec mon collègue et ami David Dubuc, depuis octobre 2009 un doctorant, Tong Chen, et en octobre 2010 avec un second doctorant, Thomas Chrétiennot.

La thématique vise ainsi à proposer de nouvelles approches, de nouveaux systèmes intégrés (1) d'analyse RF pour la santé et l'environnement, (2) alliant RF et Microfluidique pour l'électronique haute fréquence.

Plus précisément, concernant le premier point, de nouvelles fonctions d'analyse, de manipulation, grâce au champ EM seront développées, fournissant aux chercheurs en biologie, en médecine et dans l'environnement, de nouveaux outils, de nouvelles informations et de nouveaux paramètres inaccessibles par les techniques traditionnelles existantes. Ces fonctions présentent des ruptures par rapport à l'existant de non-invasivité, d'être sans contact, en temps réel, miniaturisable et intégrable à forte densité et potentiellement compatible in vivo.

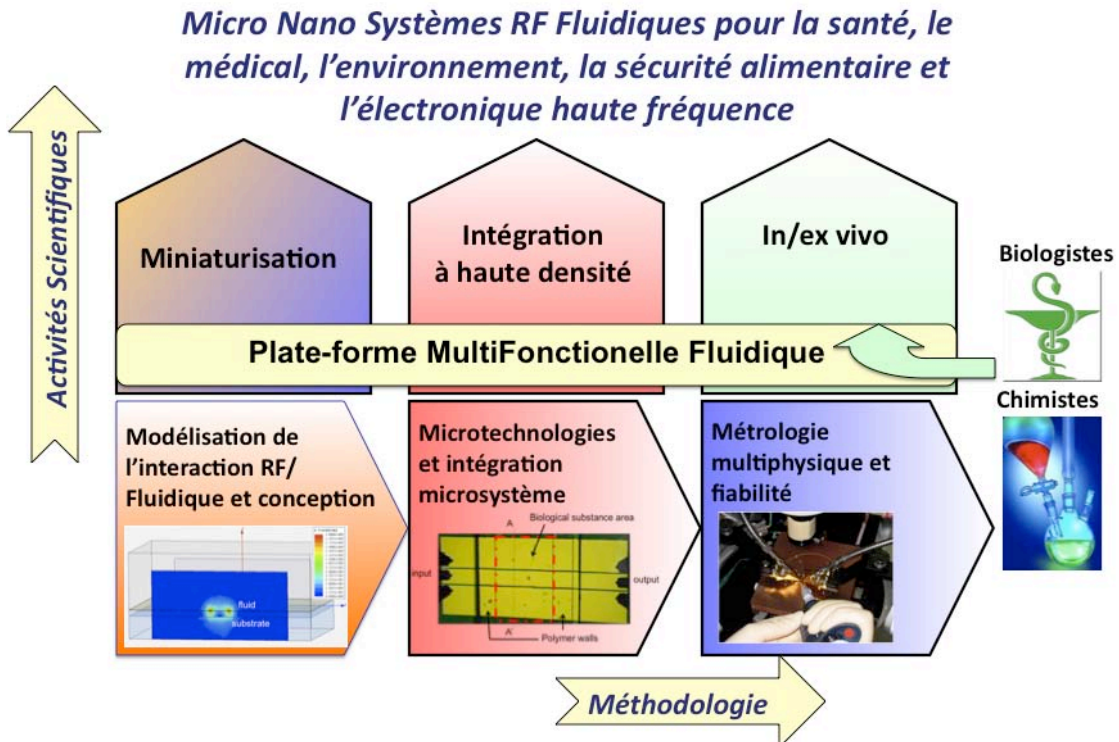
Concernant les applications en électronique, de nouvelles connaissances sur les composants à l'état liquide pour l'électronique hyperfréquences seront développées : la physique associée et les potentialités/limitations d'une telle approche. Nous traiterons de plus l'ingénierie de tels composants par les microtechnologies avec les problématiques d'intégration associée et les problématiques d'industrialisation sous-jacentes.

Les travaux correspondants, bien que pluri-applicatifs, nécessitent la mise en place de moyens communs, qui représentent trois problématiques phares :

- l'interaction électromagnétisme/fluidique,
- le développement de microtechnologies associées et leur intégration hétérogène,

- et enfin la métrologie multiphysique associée et la fiabilité.

Leur association constituera une plate-forme multifonctionnelle HF/fluidique, comme indiquée sur la Figure 96, qui permettra de traiter quatre orientations majeures de recherche.



**Figure 96.** Organisation de la thématique ‘Micro nanoystèmes HF fluidiques’

## Problématiques scientifiques

### **Interaction Electromagnétisme/Fluidique**

Il s’agit de développer nos connaissances sur l’interaction :

- des ondes EM sur les fluides, notamment pour comprendre (et donc mettre en œuvre de façon optimale) la *manipulation par champ EM*, soit directement, soit indirectement par couplage électrothermique.
- des fluides sur les ondes EM, pour comprendre, modéliser et optimiser la détection électrique de milieux biologiques ainsi que l’accordabilité fluidique de composants électroniques haute fréquence.

Outre la **modélisation** fine de la signature électrique de fluides hétérogènes divers, permettant une prédiction comportementale, un point capital concernera l’extraction des propriétés électriques des différents constituants de fluides hétérogènes à partir de la signature électrique globale. Cette problématique inverse sera déterminante pour assurer la **sélectivité** (aptitude à identifier finement un élément parmi d’autres) de la technique d’analyse hyperfréquence proposée.

**L’étude des mécanismes de l’interaction HF/Fluidique** couvrira un large spectre des capacités de l’approche proposée en termes de puissance des signaux HF, de leur fréquence, mais aussi en termes de pluralité des espèces biologiques, de leur caractère aléatoire (cellules en suspension), de leur caractère hétérogène ainsi que de la pluralité des dimensions des composants microfluidiques.

Associées à la modélisation, des méthodologies de conception et architectures spécifiques seront enfin à développer. L’originalité réside dans le fait que l’on tente d’être sensible aux variations environnementales a contrario des systèmes de communications qui tentent de s’en affranchir.

### **Microtechnologies et intégration hétérogène**

L'objectif consiste à exploiter les potentialités des microtechnologies (d'ores et déjà optimisées de façon séparée par thématique : HF, fluïdique...) et développer de nouveaux matériaux, procédés / filières technologiques (conjointement optimisés pour la HF, la fluïdique, la biologique...) pour aboutir à des architectures d'intégration microsystèmes HF-Fluïdique :

- ✓ **multifonctionnelles** permettant l'analyse HF, le contrôle fluïdique et la régulation environnementale requise pour les composés biologiques (température, pH, ...) avec des architectures adaptées (3D par exemple),
- ✓ **multi-échelles**, notamment afin de permettre l'analyse de différentes situations biologiques : sur la cellule unique, sur une population de cellules, in vitro, in vivo, ... Deux problématiques sous-jacentes font l'objet d'un développement: miniaturisation vers la cellule/molécule unique et haute densité pour des caractérisations massives et parallèles,
- ✓ **multi-contraintes** issues de compatibilités multiples (biocompatibilité, HF, fluïdique...).

### **Méetrologie et Fiabilité**

Cette activité scientifique regroupera les problématiques liées à la méetrologie multi-fonctionnelle (impliquant échantillons biologiques, systémes fluïdiques et caractérisation hyperfréquence), celles liées à l'interprétation des signatures HF et leur transcription en paramètres utiles et exploitables pour les biologistes, ainsi que celle liées à l'intégration de liquides dans les systémes électronique.

Les objectifs sont, pour l'axe bio-médical, de développer les méthodologies adéquates, au travers d'un partenariat étroit avec des collègues biologistes, afin d'assurer des mesures fiables pour proposer de nouveaux dispositifs de diagnostique et pronostique. Le degré de confiance doit être maximal.

Quant à l'axe applicatif lié à l'électronique reconfigurable, l'intégration de nouveaux matériaux et a fortiori liquides dans les systémes électronique est toujours de longue haleine. Les aspects de fiabilité devront donc être considérés dès le début en partenariat avec les industriels.

### Orientations majeures de recherche

Trois orientations majeures de recherche liées à l'application bio-médicale ont été identifiées, motivées par les ruptures apportées par la technique de détection HF par rapport à celles couramment utilisées et en concordance avec les besoins affichés des biologistes en terme de nouveaux outils et nouvelles technologies.

La quatrième orientation est dédiée à l'ingénierie de la microfluïdique pour réaliser des composants et circuits haute fréquence reconfigurables.

#### **Miniaturisation jusqu'à la cellule unique**

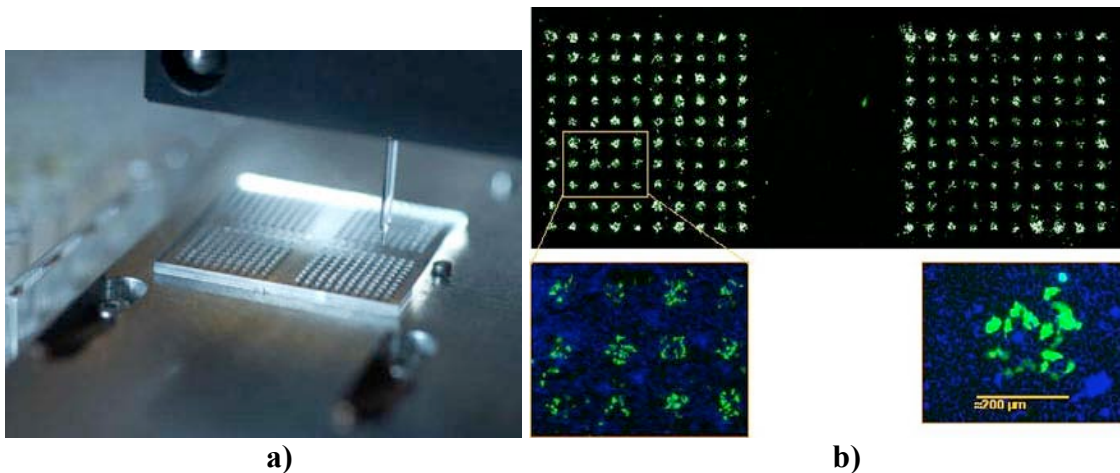
Une part importante des travaux (modélisation, fabrication et méetrologie dédiées) sera dédiée à la miniaturisation des composants HF/Fluïdiques. La motivation consiste à se rapprocher au plus proche des dimensions du vivant : de la cellule, voire même de la molécule afin de gagner en sensibilité, et de mieux comprendre en amont les mécanismes d'interaction HF-biologie, c'est-à-dire de trouver les paramètres biologiques à la source de la réponse électromagnétique spécifique. Fiabilité et sélectivité représenteront également des leitmotivs importants.

Nous avons commencé cette orientation via les travaux de thèse de Tong Chen, sur l' « Etude de l'interaction des ondes électromagnétiques hyperfréquences et de liquides hétérogènes : application en cancérologie ».

#### **Haute densité**

Un autre enjeu crucial identifié pour les biotechnologies est de proposer des microsystèmes d'analyse massivement parallèle pour du criblage intégré [Di Carlo 2006]. Ces dernières années ont vu l'apparition et l'utilité des puces à ADN pour l'étude du génome. Il en est de même maintenant avec le besoin de tests massifs de cellules (cf. Figure 97) pour des analyses systématiques de

diagnostic, de criblage à haut débit notamment pour évaluer de nouveaux médicaments.



**Figure 97.** Photographie de puces à cellules a) <http://www.cnrs.fr/> et b) <http://www-dsv.cea.fr/>

Or l'intégrabilité d'une analyse HF permet naturellement d'adresser cet enjeu. D'autre part, la coexistence de plusieurs fonctions fluidiques au sein d'un même système sera un atout pour passer du composant au circuit au système quelque soit le champ applicatif. Les travaux correspondants débiteront à compter d'octobre 2010 via la thèse de Thomas Chrétiennot sur la mise en réseau de détecteurs hyperfréquences biologiques.

#### ***In / ex vivo*** [Gojo 2009]

Les approches discutées jusqu'à présent sont essentiellement *in vitro* (le produit biologique est amené sur une puce). Une des ruptures que peut apporter l'utilisation des signaux HF avec les microtechnologies sur de nouveaux substrats (substrats flexibles) correspond à la compatibilité *in vivo* de l'analyse hyperfréquence (la « puce » sera amenée/implantée au plus près du composant biologique à étudier).

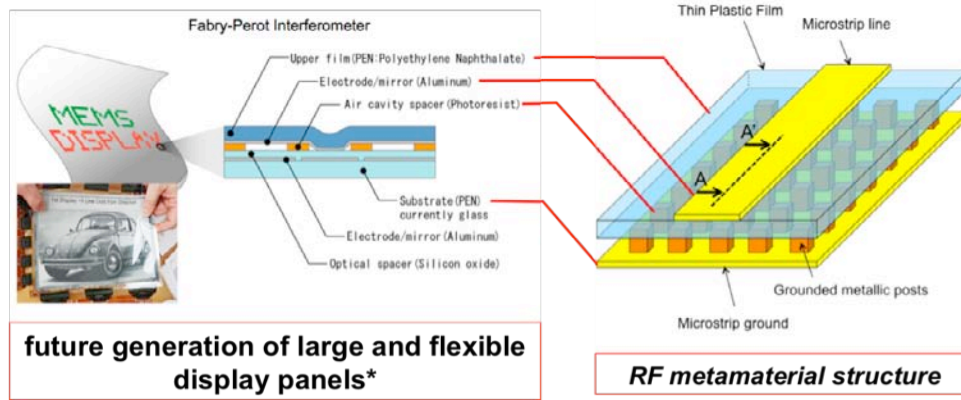
Afin de pouvoir se conformer aux éléments à analyser, tels que des tumeurs ou des vaisseaux sanguins, des technologies à matériaux souples (notamment des polymères) seront à développer, comme cet exemple de ligne coplanaire placé autour d'un tube fluidique sur la Figure 98.



**Figure 98.** Capteur HF flexible placé autour d'un tube fluidique en plastique

De tels développements technologiques ont été initiés avec David Dubuc lors de notre séjour de deux ans au LIMMS-CNRS, en collaboration avec les professeurs H. Toshiyoshi et H. Fujita de l'Univ. de Tokyo, en alliant des technologies souples issues et de l'optique pour écran nouvelle génération et de la microfluidique utilisée pour l'élaboration de BioMEMS.





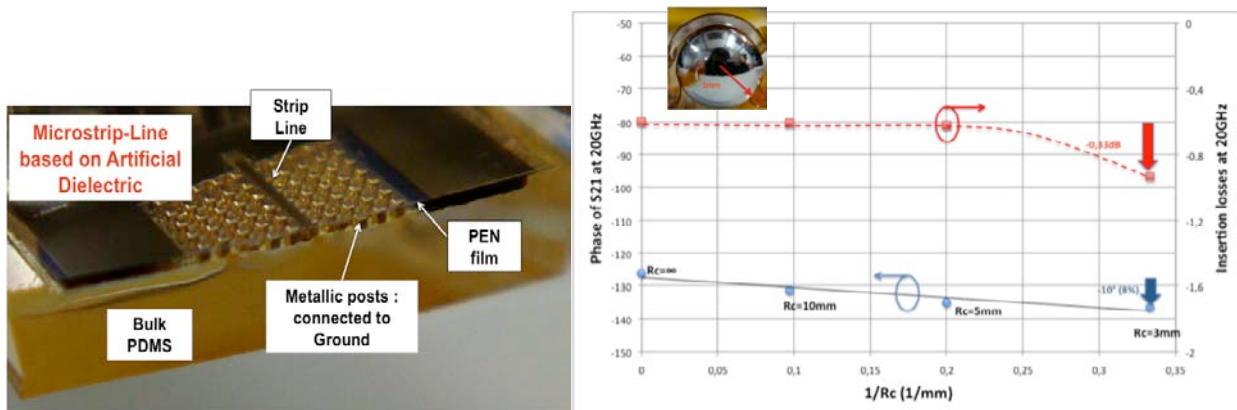
**Figure 99.** Ligne à substrat métamatériau et à technologie souple [10]

Nous avons en effet utilisé :

- comme substrat, du PDMS (polydiméthylsiloxane: polymère siliconé), façonnable et flexible, et couramment utilisé pour des réalisations fluidiques
- et comme support de la ligne de transmission, du PET (polyéthylène téréphtalate), film employé dans le développement industriel d’écran plat souple.

La technologie a été évaluée avec une ligne de transmission (schéma donné sur la Figure 99), dont la photographie avec coupe transversale est indiquée à la Figure 100.

Le choix des matériaux employés assure la flexibilité mécanique de la structure complète. La Figure 100 présente les caractéristiques en transmission (module et phase à 20 GHz) en fonction du rayon de courbure du substrat (en insert en haut à gauche la figure). Cette figure démontre que l’on peut courber le circuit, avec un rayon de courbure supérieur à 5 mm, sans présenter de dégradations électriques, ce qui est suffisant pour bon nombre d’applications.



**Figure 100.** Photographie de la structure et performances en transmission en fonction du rayon de courbure du substrat

Enfin la dernière orientation majeure des travaux porte sur la reconfigurabilité de fonctions électroniques haute fréquence par la fluïdique.

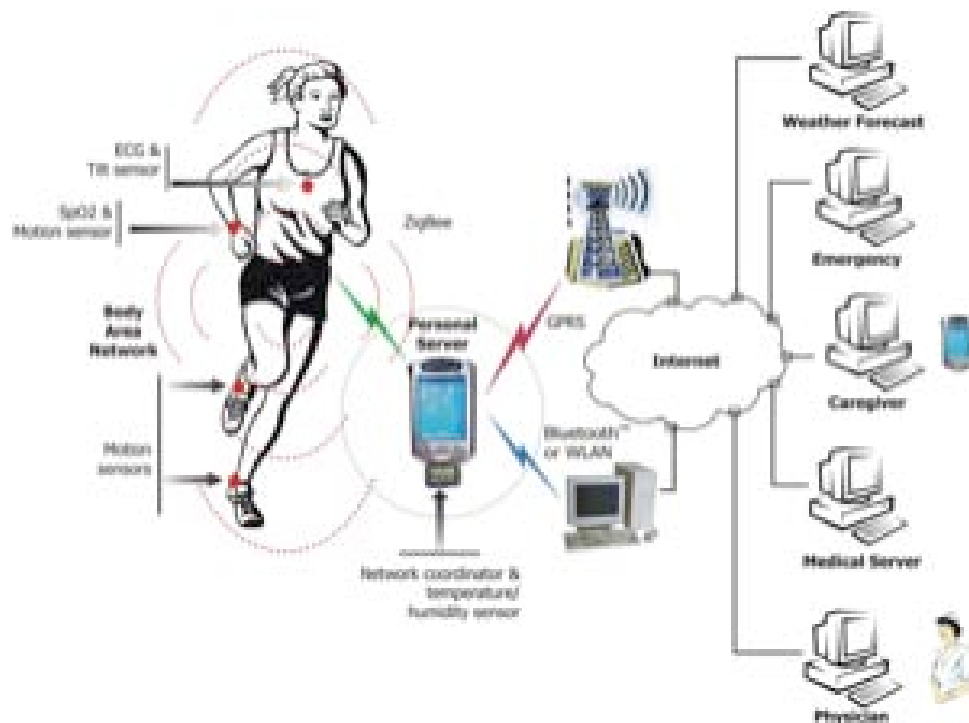
**Reconfigurabilité microfluidique pour l’électronique haute fréquence**

Bien que les fortes potentialités des liquides dans des fonctions optiques aient déjà été amplement démontrées (lentilles reconfigurables), la combinaison de liquides dans des systèmes

électroniques n'a que sporadiquement été étudiée jusqu'ici. Essentiellement l'Univ. De Purdue aux USA développe actuellement cette nouvelle thématique.

La principale motivation de cette orientation consiste à développer de nouveaux composants à état liquide, qui présentent de très haut degré de reconfigurabilité et/ou de nouvelles possibilités.

A long terme, il s'agira d'avancer chaque orientation majeure présentée précédemment vers une approche globale de microsystèmes intégrés, de laboratoires sur puce complet, qui pourra comprendre les fonctions de capteur/actionneur, de manipulation des fluides, de traitement des informations et leur transmission dans une vision de mise en réseau préventive des données médicales (cf. Figure 101).



**Figure 101.** Réseau d'information pour la prévention sanitaire [Khono 2009]

Le but de tel dispositif consiste à pouvoir mieux répondre aux besoins de la société en terme de surveillance de la santé de chacun et de prévention médicale, à accéder à des diagnostics suffisamment en amont à tout problème de santé grave (tel que le cancer) mais aussi à permettre de réagir très rapidement en cas de problème de santé sérieux et pouvoir potentiellement sauver des vies.

## ***Conclusions***

Pour conclure brièvement, ma démarche scientifique consiste à établir, grâce aux microtechnologies, de nouvelles perspectives d'exploitation des microsystèmes hyperfréquences. Cela sous-entend le développement de nouvelles technologies non conventionnelles, depuis l'élaboration de circuits passifs à fort coefficient de qualité, leur intégration tridimensionnelle pour toujours plus de miniaturisation et accéder à des fréquences plus élevées, de nouveaux matériaux (notamment à base de nanotubes de carbone) qui apportent de nouvelles possibilités aux concepteurs HF, de nouveaux concepts de composants à forte reconfigurabilité, que ce soit par une approche mécanique avec les MEMS RF, ou encore avec des liquides, jusque de nouvelles applications avec notamment tout le secteur bio-médical, environnement et même agro-alimentaire.

Ce survol très rapide indique bien toute la richesse d'une démarche d'ouverture et d'interdisciplinarité, que ce soit avec d'autres chercheurs du domaine hyperfréquence, ou de disciplines plus éloignées - chimistes, biologistes, et même médecins... dont l'interaction assure de nouveaux horizons aux futurs microsystèmes hyperfréquence.

Outre cette vision très scientifique de la démarche suivie et du projet de recherche commencé, comme vous lisez un manuscrit d'habilitation à diriger des recherches, il me semble important de ne pas à omettre le caractère humain de ce travail. Je n'ai pas réalisé ce travail seule, bien au contraire. Il s'agissait d'un complet travail d'équipe collaborative. Je remercie donc tous ceux avec qui j'ai eu et/ou ai le plaisir de travailler. Cela comprend bien entendu mes collègues chercheurs avec qui je travaille et tous les étudiants que j'ai pu encadrer ou même cotoyer.

Pour finir, ce qui me tient à coeur dans ce métier de chercheur/trouveur correspond aux maîtres mots suivants:

**REVES, SCIENCES, DECOUVERTES et enfin PLAISIR.**

## Références

- [Agilent] From Agilent datasheet, "Agilent 85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz"
- [Ali 2006] J. El-Ali, P.K. Sorger, K.F. Jensen, "Cells on Chip", *Nature* **442**, 403-411, 2006
- [Bao 2008] N. Bao, et. al. "Recent advances in Electric Analysis of Cells in Microfluidic systems", *Anal. Bioanal. Chem.* **391**, 933-942, 2008
- [Barker 1998] N.S. Barker, G.M. Rebeiz, 'Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches', *IEEE MTT*, Vol. 46, n° 11, pp. 1881-1889, Novembre 1998
- [Bashir 2004] R. Bashir, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 56, Issue 11, pp. 1565, 2004
- [Begueret 2009] T. Taris, Y. Deval, R.R. Severino, C. Ameziane, D. Belot, J.-B. Begueret, 'Millimeter-waves building block design methodology in BiCMOS technology', 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, 2009, ICECS 2009, pp. 968-971, 2009
- [Campbell 2004] S.W. Lee, D.S. Lee, R.E. Morjan, S.H.Jhang, M. Sveningsson, O.A. Nerushev, Y.W. Park, E.E.B. Campbell, 'A Three-Terminal Carbon Nanorelay', *Nano Letters*, Vol. 4, n°10, pp. 2027-2030, 2004
- [Chen 2007] C.-H. Chen, D. Peroulis, "Liquid RF MEMS Wideband Reflective and Absorptive Switches", 2008 IEEE Trans. MTT, Vol. 55, n° 12, Dec 2007 Page(s): 2919 – 2929
- [Chen 2008-1] C.-H. Chen, D. Peroulis, "A Ka-band waveguide water-based absorptive switch with an integrated micropump", 2008 IEEE MTT-Symposium International, 15-20 June 2008 Page(s):185 – 188
- [Chen 2008-2] C.-H. Chen, D.J. Chung, S. Bhattacharya, J. Papapolymerou, D. Peroulis, "Low-Cost 3-D Integration of RF and Micro-Cooling Systems", *EuMW*, 2008
- [Choi 2004] S. Choi, Y. Yoon, M.G. Allen, "A Tunable capacitor using an immiscible bifluidic dielectric", *MTT-S*, 2004, pp. 873-876
- [Dalmay 2008] C. Dalmay, A.Pothier, P. Blondy, F. Lalloue, M.-O. Jauberteau, « Label Free Biosensors for Human Cell Characterization using Radio and Microwave Frequencies », *IEEE MTT-S* 2008
- [Davis 2008] S. K. Davis, et. al., "Breast tumor characterization based on ultrawideband microwave backscatter", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, n°1, 2008, pp. 237-246
- [Denef 2004] N. Denef , L. Moreno-Hagelsieb , G. Laurent , R. Pampina, B. Foutierb, J. Remacle , D. Flandre , J-P. Raskin, « RF detection of DNA based on CMOS inductive and capacitive sensors », *EuMW* 2004
- [De Raedt 2001] G. Carchon, W. De Raedt, B. Nauwelaers, « Integration of CPW quadrature couplers in multilayer thin-film MCM-D », *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 49, n° 10, Oct. 2001
- [De Raedt 2008] G. P. Quijano, G. Carchon, B. Nauwelaers, W. De Raedt, « Horizontal integration of cavity filters on high-resistivity silicon thin-film technology », *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, n° 12, Dec. 2008
- [Di Carlo 2006] D. Di Carlo, L.P. Lee, « Dynamic single-cell analysis for quantitative biology », *Analytical Chemistry*, Dec. 2006, pp. 7918-7925
- [Dubuc 2009-1] D. Dubuc, K. Grenier, « RF MEMS based tuner for microwave and millimeterwave applications», Book Chapter in *Microwave and millimeterwave Technology*, ISBN 978-953-7619-x-x, in press, 2009
- [Dubuc 2009-2] D. Dubuc, K. Grenier, et. al. , « Microfabricated tunable Artificial Dielectric for Reconfigurable Microwave Circuits», *EuMW*, October 2009
- [Duhamel 1997] Fabienne Duhamel, Isabelle Huynen, André Vander Vorst, « Measurements of complex permittivity of biological and organic liquids up to 110 GHz », *IEEE-MTT-S* 1997
- [Facer 2001] G. R. Facer, D. A. Notterman, L. L. Sohn, « Dielectric spectroscopy for bioanalysis: From 40 Hz to 26.5 GHz in a microfabricated wave guide », *APL* 78, N° 7, 12 Feb. 2001
- [Gabriel 1996] C. Gabriel, et. al., « The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz », *Phys. Med. Biol.* 41, 1996, pp. 2251-2269
- [Gojo 2009] R. Gojo, et. al., « A flexible regeneration microelectrode with cell-growth guidance », *IEEE MEMS* 2009
- [Grenier 2004] K. Grenier, D.Dubuc, et. al. , 'Polymer based technologies for microwave and millimeterwave applications', invited paper at 50<sup>th</sup> IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, USA, December 13-15, 2004
- [Grenier 2009-1] K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, T. Fujii, H. Toshiyoshi, H. Fujita, 'New broadband and contact less RF / microfluidic sensor dedicated to bioengineering', *IEEE International Microwave Symposium* 2009, Boston, USA, June 2009
- [Grenier 2009-2] K. Grenier, D. Dubuc, M. Kumemura, H. Toshiyoshi, H. Fujita, 'Contact less radio-frequencies biosensor for biological parameters analysis', *International Conference on Biomedical Electronics and Devices, Biodevices 2009*, Porto, Portugal, January 14-17, 2009
- [Grenier 2009-3] K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, H. Toshiyoshi, T. Fujii, H. Fujita, "Integrated Broadband Microwave and Microfluidic Sensor dedicated to Bioengineering", submitted at *IEEE T-MTT*, 2009
- [Grenier 2009-4] K. Grenier, D. Dubuc, Invited paper on "RF-based bio-engineering", *Symposium on ICT for Life Sciences*, Parma, Italy, June 24, 2009

- [Grenier 2010] K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, T. Fujii, H. Toshiyoshi, H. Fujita, “Resonant based microwave biosensor for biological cells discrimination”, Radio Wireless Symposium, New Orleans, USA, Jan. 2010
- [Grimmes 2008] S. Grimmes, O. G. Martinsen, “Bioimpedance and bioelectricity basics”, 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, 2008
- [Han 2005] A. Han, et. al., “Whole Cell Electrical Impedance Spectroscopy For Studying Ion Channel Activity”, 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid-State Sensor, Actuators and Microsystems, Seoul, Korea, June 5-9, 2005
- [Happy 2000] H. Happy, et. al., “Ultra low loss transmission lines on low resistivity silicon substrate”, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Vol. 3, pp. 1809-1812, 2000
- [Happy 2006] J.-M. Berthou, H. Happy, A. Siligaris, G. Dambrine, J. Borghetti, V. Derycke, J.-P. Bourgoin, “Active Properties of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors Deduced From S Parameters Measurements”, IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 5, n° 4, pp. 335-342, July 2006
- [Hayden 2003] J. Hayden, G. Rebeiz, “Very low-loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal-air-metal capacitors”, IEEE Trans. Microwav. Theory and Tech., Vol. 51, n° 1, Jan. 2003, pp. 309-314
- [Hung 2005] P.J. Hung et. al., “Continuous perfusion microfluidic cell culture array for high-throughput cell-based assays”, Biotechnol. Bioeng. **89**, 1-8, 2005
- [Ionescu 2009] A. Arun, D. Acquaviva, M. Fernandez-Bolanos, P. Salet, H. Le-Poche, T. Idda, R. Smajda, A. Magrez, L. Forro, A.M. Ionescu, “Micro-Electro-Mechanical Capacitors Based on Vertical Carbon Nanotubes Arrays”, Solid State Device Research Conference 2009, ESSDERC'09, 2009, pp. 335-338
- [Jajoo 2009] A. Jajoo, L. Wang, T. Mukherjee, “MEMS varactor enabled frequency-reconfigurable LNA and PA in the upper UHF band”, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 2009, pp. 1121-1124
- [Katehi 1998] K.J. Herrick, T.A. Schwarz, L.P.B. Katehi, “Si-Micromachined Coplanar Waveguides for Use in High-Frequency Circuits”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, n°6, June 1998.
- [Khan 2007-1] U. Khan, N.Al-Moayed, N. Nguyen, M. Obol, K. Korolev, M. Afsar, S. Naber, « High Frequency Dielectric Characteristics of Tumorous and Nontumorous Breast Tissues », IEEE International Microwave Symposium, IMS2007, 3-8 June 2007 Page(s):1341 – 1344
- [Khan 2007-2] U. Khan, N.Al-Moayed, N. Nguyen, K. Korolev, M. Afsar, S. Naber, “Broadband Dielectric Characterization of Tumorous and Nontumorous Breast Tissues”, IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, n°12, dec. 2007.
- [Khono 2009] Khono, Workshop dédié au biomédical RF, IEEE MTT-S, International Microwave Symposium 2009, Boston, USA, June 2009.
- [Kim 2006] Y.I. Kim, T.S. Park, J.H. Kang, M.C. Lee, J.T. Kim, J.H. Park, H.K. Baik, “Biosensors for label free detection based on TF and MEMS technology”, Sens. and act. B-Chemical **119** (2006) pp. 592-599.
- [Kola 1997] R. Kola, M. Lau, S. Duenas, H. Kumagai, P. Smith, R. Frye, K. Tai, P. Sullivan, ‘Thin film resistors and capacitors for advanced packaging’, 1997 International Symposium on Advanced Packaging Materials, pp. 71-74
- [Kurrant 2008] D.J. Kurrant, et. al., “Tumor response estimation in radar-based microwave breast cancer detection”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 55, n° 12, 2008, pp. 2801-2811
- [Kwon 2001] Y. Kwon, et. al., “A new micromachined overlay CPW structure with low attenuation over wide impedance ranges and its application to low-pass filters”, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, n° 9, Sept. 2001, pp. 1634-1639
- [Lazebnik 2007] M. Lazebnik, et. al., “A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries”, Physics in Medicine and Biology, **52**, 2007, pp. 6093-6115
- [Le Cloirec 2004] L. Le Cloirec, A. Benlarbi-Delai, B. Bocquet, “3 bit 90° millimeter phase shifter using microfluidic technology”, EuMC, 2004, pp. 1161-1164
- [Li 2008] Feng Li, David P. Klemer, John K. Kimani, Shun Mao, Junhong Chen and Douglas A. Steeber, « Fabrication and Characterization of Microwave Immunosensors Based on Organic Semiconductors with Nanogold-Labeled Antibody », IEEE EMBS Conference, Vancouver, Canada, August 20-24, 2008
- [Liu 2007] H-B. Liu et. al., « Sensing minute changes in biological cell monolayers with THz differential time-domain spectroscopy », Biosensors and Bioelectronics, Vol. 22, 2007, pp. 1075-1080
- [Lo 2005] Y. Lo, D. Zhang, « Fluidic adaptative lens », Patent pct/us2005/010948
- [Lu 2004] X. Lu et. al. “Recent developments in single-cell analysis”, Anal. Chim Acta **510**, 127-138, 2004
- [Oberhammer 2006] J. Oberhammer, M. Tang, A.Q. Liu, G. Stemme, “Mechanically tri-stable in-line single-pole-double-throw all metal switch”, IEEE MEMS 2006, Istanbul, 2006, pp. 898-901
- [Okazaki 2010] JH. Okazaki, K. Kawai, A. Fukuda, T. Furuta, S. Narahashi, “Reconfigurable Amplifier Towards Enhanced Selectivity of Future Multi-band Mobile Terminals”, IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS), 2010, pp. 898-901
- [Pacchini 2008] S. Pacchini, T. Idda, D. Dubuc, E. Flahaut, K. Grenier, ‘Carbon nanotube-based polymer composites for microwave applications’, International Microwave Symposium, IMS’08, Atlanta, USA, June 2008
- [Pavlidis 2008] S. Anghyun, T. Stintzing, I. Block, D. Pavlidis, M. Rieke, P. G. Layer, “High frequency wideband permittivity measurements of biological substances using coplanar waveguides and application to cell suspensions”, 2008 IEEE MTT-Symposium International, 15-20 June 2008 Page(s):915 – 918
- [Ponchack 1998] G. Ponchack and L. Katehi, “Measured attenuation of coplanar waveguide on CMOS grade Si substrates



- with a polyimide interface layer,” *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 13, pp. 1327–1329, June 1998
- [Ponchack 2001] G. Ponchak, A. Margomenos, and L. Katehi, “Low loss CPW on low resistivity Si substrates with a micromachined polyimide interface layer for RFIC interconnects,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, pp. 866–870, May 2001
- [Rebeiz 2003] G. Rebeiz, “RF MEMS Theory, design, and technology”, *Wiley Inter-science*, 2003, ISBN: 0-471-20169-3
- [Ricart 2008] T. Ricart, S. Pacchini, C. Cojocaru, D. Pribat, K. Grenier, D. Dubuc, ‘Carbon nanotubes based microwave varactor : modeling, simulation and design’, SPIE Carbon Nanotubes and associated devices, NanoScience+Engineering, San Diego, USA, August 2008
- [Rourke 2007] Ann P O’Rourke, Mariya Lazebnik, John M Bertram, Mark C Converse, Susan C Hagness, John G Webster and David M Mahvi, “Dielectric properties of human normal, malignant and cirrhotic liver tissue: *in vivo* and *ex vivo* measurements from 0.5 to 20 GHz using a precision open-ended coaxial probe”, *Phys. Med. Biol.* 52 (2007) 4707–4719
- [Pal 2005] R. Pal et. al. , “An integrated microfluidic device for influenza and other genetic analyses”, *Lab on a Chip* 5 (2005) 1024–1032
- [Schwan 1983] H.P. Schwan, “Electrical Properties of Blood and its Constituents: Alternating Current Spectroscopy” *Annals of Hematology* 46, 185-197, 1983
- [Schwan 1985] H.P. Schwan, "Analysis of dielectric data: experience gained with biological materials", *IEEE Trans. Electrical Insulation* Vol. EI-20' No.6, Dec. 1985
- [Schwan 1994] H.P. Schwan “Electrical Properties of Tissues and Cell Suspensions: Mechanism and Models”, *Proc. 16th Annual IEEE Int. Conf.* , 1, A70-A71, 1994
- [Schwan 1996] K. R. Foster, H.P. Schwan, “Biological Effects of ElectroMagnetic field”, CRC Press, Chap. 1
- [Sebastian 2004] J. L. Sebastian, S. Mufioz, J. M. Miranda and B. Ribas, « A Simple Experimental Set-up for the Determination of the Complex Dielectric Permittivity of Biological Tissues at Microwave Frequencies », *EuMW* 2004
- [Shen 2003] H. Shen, J. Arreaga, R. Ramanathan, H. Knoedler, J. Sawyer, S. Tiku, 'Fabrication and characterization of thin film resistors for GaAs-baed power amplifiers', International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS ManTech, 2003
- [Stuchly 1998] S.S. Stuchly, C.E. Bassegy, “Microwave coplanar sensors for dielectric measurements”, *Meas. Sci. Technol.*, 1998, vol. 9, pp. 1324-1329
- [Treizebré 2009] A. Treizebré et. al., “THz microscopic investigation on living cells”, 5th International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, April 2009, Quebec, Canada
- [Verdeyme 2010] W.G. El Dine, H. Ezzedine, S. Bila, S. Verdeyme, “Three approaches for the realization of a Chebyshev cross-coupled UWB filter”, *IEEE MTT-S 2010, International Microwave Symposium*, 2010, pp. 1360-1363
- [Verpoorte 2003] E. Verpoorte et. al., “Microfluidics meets MEMS”, *Proc. IEEE* 91, 930-953, 2003
- [Voldman 2003] J. Voldman, “Building with cells”, *Nature materials*, vol.2, July 2003, pp433-434
- [Wang 2008] Y.-B. Wang et. al., “A novel dual mode capacitor biosensor for real-time, label-free DNA detection”, *Int. Electron Devices Meeting*, 2006. IEDM '06, 11-13 Dec. 2006
- [Weller 2006] B. Lakshminarayanan, T. Weller, “Design and modeling of 4-bit slow-wave MEMS phase shifters”, *IEEE Trans. on MTT*, Vol. 54, n° 1, Jan. 2006, pp. 120-127
- [Yao 1999] Z.J. Yao, S. Eshelman, D. Denniston, C. Goldsmith, ‘Micromachined low-loss microwave switches’, *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 8, n° 2, pp. 129-134, Juin 1999
- [Zhang 2004] D. Zhang, N. Justis, Y. Lo, “Fluidic zoom-lens-on-a-chip with wide field-of-view tuning range”, *IEEE Photo. Tech. Letters*, Vol. 16, n°10, Oct. 2004

## Partie 3 : CV détaillé et production scientifique

### I. Curriculum vitae détaillé

#### Katia GRENIER

Née le 28 août 1974 à Poissy (Yvelines 78)

✉ (Prof.) LAAS-CNRS  
Opération MH2F  
7. Av. du Colonel Roche  
31 077 Toulouse, cedex 4, FR  
☎ +33 (0) 5 6133 6291  
✉ +33 (0) 5 6133 6969  
✉ grenier@laas.fr



### CHERCHEUR SPECIALISE DANS LE DEVELOPPEMENT DE MICRO ET NANOTECHNOLOGIES HYPERFREQUENCES

#### Parcours professionnel

---

Sept. 2009 – ... **Chargée de recherche** de grade 1 au CNRS, au sein de l'institut INSIS, au LAAS à Toulouse, responsable de l'opération *Micro nanosystèmes HyperFréquences Fluidiques* - MH2F, nouvelle thématique de recherche créée avec David Dubuc au LAAS en Sept 2009. Elle comporte 2 axes applicatifs:

- *la biologie, la bio-ingénierie, la médecine, l'environnement...*
- *l'électronique haute fréquence (pour l'instrumentation, l'aéronautique, le spatial, les communications...)*

\* Etablissement de collaborations avec des biologistes et chimistes toulousains

Déc. 2007 – Août 2009

**Chargée de recherche** de grade 1 au CNRS, au sein du département ST2I, au LIMMS, UMI 2820, à Tokyo, Japon, avec le Host professor Hiroyuki FUJITA de l'Univ. de Tokyo

- Thème de recherche: *Micro et nanosystèmes pour applications hyperfréquences : extension de l'utilisation d'ondes électromagnétiques à des applications biologiques et médicales*

Août 2007 - Octobre 2001

**Chargée de recherche** de grade 2 puis 1 au CNRS, au sein du département ST2I, dans le groupe Composants et Intégrations de Systèmes Hyperfréquences pour Télécommunications (CISHT) puis dans le groupe Micro et Nanosystèmes pour Communications (MINC) du LAAS-CNRS de Toulouse

Thème de recherche global: *Micro et nanosystèmes pour applications hyperfréquences*, qui peut être divisé en 3 grandes activités:

- Nanotechnologies et NEMS RF: *lancement de cette activité au LAAS avec David Dubuc à partir de 2005*

-> Etudes des potentialités des nanotubes de carbone (CNT) pour applications hyperfréquences: développement de matériau composite polymère dopé par des nanotubes de carbone, étude de CNT en transmission, élaboration de nano-commutateur à CNT

\* Etudes menées au cours d'un projet européen « NANO RF » ([www.nano-rf.org](http://www.nano-rf.org)) (2006-2009), d'un projet ANR nommé NATURE, d'une étude R&T CNES (2005-2008)

Direction d'un mastère et d'une thèse (2005-2008)

- **MEMS RF**

-> Développement et optimisation de technologies MEMS RF de type capacitif avec diverses orientations:

- hautes performances RF (optimisation de la qualité de contact -> fort rapport de capacités aussi bien pour des commutateurs parallèles et séries: travaux sur différentes couches sacrificielles et métallisations de pont MEM),
- forte tenue en puissance (larges dimensions et ajout d'un second niveau de pont MEM),
- amélioration de la fiabilité avec et sans forte puissance RF, tests de nouveaux diélectriques, notamment à base de nanotubes de carbone,
- optimisation thermique
- optimisation de la reproductibilité des structures MEMS, obligatoire pour la fabrication de circuits à plusieurs MEMS
- miniaturisation pour montée aux fréquences millimétriques

-> Elaboration de différents circuits: commutateurs, banque de capacités digitales, tuners d'impédance, aiguilleur de signaux (SPDTs)

-> Intégration de MEMS RF avec des ICs: élaboration d'un LNA (Low Noise Amplifier) reconfigurable en fréquence par l'utilisation de capacités MEMS dans les réseaux d'adaptation

\* Etudes menées au cours d'un projet DGA nommé "PAMIR", d'une collaboration avec ST Microelectronics et d'un Network of Excellence sur les MEMS RF, "AMICOM".

Direction de 2 thèses, une CIFRE avec ST Microelectronics (2002-2005), une autre avec Thales Alenia Space (2004-2007) et 2 stages

- **Développement de technologies polymère multicouches compatibles avec les circuits intégrés (ICs)**

-> Développement de technologies à simple ou multicouches polymère, appliquées à des antennes, filtres, coupleurs tridimensionnels par proximité ou en échelle, des inductances ...

-> Approche microsystèmes avec l'intégration d'un mélangeur avec des coupleurs 3D ou encore post-processing d'antennes sur des composants actifs SiGe du fondeur ATMEL

\* Etudes menées au cours de 3 projets, un européen (ARTEMIS), une collaboration avec ST Microelectronics (nano 2008) et un projet région nommé CIAM.

Direction d'un mastère puis une thèse sur le développement de technologies polymère adaptées à l'intégration de microsystèmes millimétriques (2002-2005) et formation d'un ingénieur d'étude à ces technologies

2001 **Post-doctorante** au sein du groupe 'RF MEMS' de Lucent Technologies / Agere Systems (Bell Labs) à Murray Hill, New Jersey, aux USA

**Thème : Intégration de composants micro-ondes MEMs avec des dispositifs actifs hautes fréquences**

2000 – 2001 **Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 ATER)**, Univ. Paul Sabatier, Toulouse

1997 - 2000 **Doctorante** au sein des Groupes Composants et Circuits Micro-ondes (CCM) et Technologies, Micro et Nanostructures (TMN) du LAAS-CNRS, Toulouse

Thèse obtenue avec mention très honorable avec félicitations du jury (le 24 nov. 2000)

- **Thème : Conception, réalisation et caractérisation de structures micro-ondes micro-usinées sur silicium : applications aux micro-systèmes millimétriques**

- Conception, réalisation sur membrane et caractérisation de :

- ☞ *Filtres coplanaires sur membrane* centrés à 35, 50 et 60 GHz, en technologie silicium. Résultats à l'état de l'art

- ☞ *Interrupteurs microélectromécaniques (MEMs) et filtre-interrupteurs accordables* par force électrostatique pour fréquences millimétriques

- Publications et conférences nationales et internationales (DTIP of MEMS/MOEMS, EuMC...)

- Contrats avec **ALCATEL SPACE INDUSTRIES** et le **CNES de Toulouse**

1997 **Stagiaire de DEA** au LAAS-CNRS

- 'Etude de l'influence de l'éclairement sur les paramètres S et en bruit du transistor PHEMT'

- Publication des résultats dans la revue internationale IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques

1996 **Stagiaire** d'été au laboratoire de mécanique des fluides DAMPT de *l'Université de Cambridge - Grande Bretagne (UK)* : Elaboration d'un contrôleur de vitesse intégré pour une expérience de mécanique des fluides

## Formation

---

2000 **Doctorat** en électronique, spécialisé dans les domaines des hyperfréquences et de la micro-technologie. Obtenu le 24 Nov. 2000, mention très honorable avec félicitations du jury, Université P. Sabatier – Toulouse

1997 **D.E.A.** Conception de Circuits Microélectroniques et Microsystèmes (CCMM) option micro-ondes, mention Bien, Université P. Sabatier – Toulouse

1996 **Maîtrise** de Physique, option électronique, mention AB, Université P. Sabatier – Toulouse

1995 **Licence** de Physique, Université P. Sabatier – Toulouse

1993-1994 **D.E.U.G. A**, section “ Préparation aux concours ”, option physique-chimie, Université P. Sabatier – Toulouse

**Autres** : Langues étrangères:

Anglais courant

Notions importantes de la langue allemande

Notions de la langue japonaise: "Yon Kyu" obtenu en décembre 2008

## Activités d'enseignement

---

2002 – 2007 **Vacataire** à l'IUT A et INSA de Toulouse. (~ 50 heures/an) de physique, microtechnologies et simulation physique de diode et CMOS, 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> cycle

2000 – 2001 **Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 ATER)**, Univ. Paul Sabatier, Toulouse (niveau DEUG, maîtrise et DEA)

1997 – 2000 **Monitrice** à l'UPS de Toulouse. (96 heures/an équivalent TD), TD et TP en électricité, électronique, électromagnétisme (niveau DEUG), fabrication de MOS en salle blanche (niveau maîtrise et DEA)

## II. Activités d'encadrement

*Sont inscrits ci-dessous les nombres de publications réalisées par le chercheur et pour lesquelles j'ai participé et suis indiquée en tant qu'auteur.*

*Nomenclature: RI - Revue Internationale, CI - Conférence Internationale et CN - Conférence Nationale*

**Encadrement de chercheurs :**

✓ en *post-doc* :

- Erwan Fourn, 2005-2006 (un an), sur l'étude d'interconnexions entre Circuits Intégrés et des circuits passifs post-processés. Ses travaux ont porté essentiellement sur la simulation et optimisation de ces interconnexions à l'aide d'un simulateur électromagnétique 3D HFSS. Il a également participé au début du lancement de la thématique sur les potentialités de nanotubes de carbone (CNT) pour hyperfréquences via des simulations de lignes coplanaires chargées par des CNT. Erwan est maintenant Maître de Conférence à l'IETR de Rennes.  
2RI, 5CI

## ✓ en thèse : 4 + 1

- Thomas Chrétiennot (co-direction avec David Dubuc), 2010-2013, en thèse co-financée CNRS-Région Midi-Pyrénées. Ses travaux portent sur l' 'Elaboration d'une plate-forme de détection hyperfréquences pour criblage biologique à haut débit'.
- Sébastien Pacchini (encadrement à 100%), 2005-2008 en thèse du Ministère, sur l' 'Etude des potentialités des nanotubes de carbones (CNT) aux fréquences micro-ondes et millimétriques'. Ses travaux entraînent dans le cadre de deux projets : le projet ANR Nature dont le but vise l'élaboration de nano-interrupteurs à base de CNT et le projet R&T CNES sur le dopage du polymère BCB à l'aide de CNT. *Ces travaux ont permis de démontrer qu'il est possible de réaliser des matériaux absorbants HF compatibles avec les microtechnologies.* Sébastien travaille à présent en tant de post-doctorant au LAAS dans le groupe MINC.

2RI, 6CI, 4CN

- Chloé Bordas (encadrement à 100%), 2004-2007 en thèse BDI CNRS cofinancée par Alcatel Space Industry, sur la 'Contribution aux Systèmes MicroElectroMécaniques (MEMS) de puissance: conception, modélisation et optimisation technologique – Application à l'élaboration d'un tuner MEMS aux fréquences millimétriques'. Ce sujet était dédié à la problématique de la tenue en puissance dans les commutateurs MEMS, tenue absolument nécessaire dans les chaînes d'émission des systèmes de communication. Il s'agissait d'une thématique mondialement forte des MEMS, dont l'étude au LAAS a commencée depuis 2002 avec un projet DGA nommé PAMIR. Il s'agissait pour Chloé de finaliser la filière technologique correspondante très complexe, de démontrer la tenue thermique des MEMS réalisés et d'appliquer ensuite cette filière à un circuit de type tuner (adaptateur d'impédances). *Ses travaux ont ainsi permis de passer un cap important vers l'élaboration de circuits à plusieurs MEMS à forte tenue en température et puissance.* Chloé travaille maintenant à Thales Alenia Space à Toulouse (CDI).

2RI, 9CI, 2CN

- Fouad Bouchriha (co-encadrement), 2002-2005 via le projet européen ARTEMIS sur le 'Développement de briques technologiques pour l'intégration de microsystèmes millimétriques'. Il s'agissait de développer une nouvelle technologie polymère de composants hyperfréquences passifs 3D et de pouvoir les intégrer avec des composants actifs de technologie SiGe. *Ses travaux ont permis de poser les bases d'une nouvelle technologie 3D polymère, optimisée par la suite avec l'élaboration de circuits passifs plus évolués (thèse de Nhut Do) et qui continue à être exploitée (thèse de Mai Vu - avril 2010).* Fouad travaille à présent à Thales Alenia Space à Toulouse (CDI).

3RI, 22CI, 7CN

- Jean-Pierre Busquère, 2002-2005, en thèse CIFRE avec ST Microelectronics sur le 'Développement de systèmes paramétrables à base de MEMS en vue de la réalisation d'un amplificateur faible bruit reconfigurable'. L'innovation portait sur l'intégration de MEMS RF avec des composants actifs. *Ses travaux ont permis d'élaborer le premier démonstrateur MEMS RF et circuit actif fonctionnel.* Jean-Pierre travaille à présent dans la société ARTUS à Toulouse (CDI).

3RI, 9CI, 3CN

## ✓ avec une participation active au suivi des thèses de : 5

- Tong Chen, 2009-2012. Ses travaux portent sur l' 'Etude de l'interaction des ondes électromagnétiques hyperfréquences et de liquides hétérogènes : application en cancérologie'.
- Thibaut Ricart, 2005-2008. *Ses travaux ont initié l'exploitation des nanotubes de carbone pour l'élaboration de composants NEMS RF.* Thibaut travaille maintenant en tant que post-doctorant au CEA-LETI à Grenoble. 3CI, 2CN



- Ming Nhut Do, 2003-2007. *Ses travaux ont permis de valoriser la technologie 3D polymère pour l'élaboration de microsystemes miniaturisés avec composants passifs à fort facteur de qualité.* Nhut travaille maintenant à Thales Alenia Space à Toulouse (CDI). 1RI, 9CI
  - Benoît Ducarouge, 2002-2005. *Ses travaux ont permis de développer les premiers composants puis circuits MEMS RF de puissance au LAAS.* Benoît travaille à présent dans la société ARTUS à Toulouse (CDI). 15CI, 7CN
  - Samuel Mellé, 2002-2005. *Ses travaux ont permis de développer un banc d'analyse de fiabilité de MEMS RF au LAAS, transféré ensuite à Thales Alenia Space, ainsi que l'analyse des mécanismes de défaillance de MEMS capacitifs.* Samuel travaille à présent au CNES à Toulouse (CDI). 4RI, 13CI, 3CN
- ✓ en master recherche (DEA) : 2
- Fouad Bouchriha, 2002  
'Développement et caractérisation d'interconnexions sur polymère pour applications hyperfréquences'
  - Romain Leinekugel, 2005  
'Etude des potentialités des nanotubes de carbone pour applications hautes fréquences'
- ✓ en stage : 2
- Florent Ravaux, stage ISEN, été 2006, sur l'étude de la tenue thermique de MEMS RF. Ce stage a permis d'avoir des données thermiques sur les MEMS RF aussi bien du point de vue comportement physique qu'au niveau micro-ondes. Une modélisation des phénomènes thermiques dans les MEMS RF a ainsi pu être définie et publiée.
  - Amadeu Cassany, en stage Erasmus, au printemps 2004, sur la caractérisation technologique de la filière MEMS sur BCB.
- ✓ autre :
- Laurent Mazenq, technicien, a été formé aux technologies à base de polymère pour applications hyperfréquences, et a participé aux travaux du projet européen ARTEMIS et dans le cadre du Network of Excellence AMICOM. Laurent a ensuite réussi un concours AI au CNRS et est maintenant un membre incontournable du service TEAM du LAAS.

### III. Responsabilités scientifiques et rayonnement

#### Contrats de recherche :

##### 1. **Projet européen STREP intitulé « NANO RF » - responsable LAAS**

Démarrage en janvier 2006, durée 3 ans avec prolongation d'un an

Titre : « Hybrid Carbon Nanotube – CMOS RF Microsystems »

Rôle : Montage du projet avec les autres partenaires, responsable du projet pour le LAAS CNRS, WP leader de la caractérisation électrique, coordination des travaux faits par le LAAS pour ce projet. A mon départ au Japon (sept 2007), Anthony Coustou et Tonio Idda du LAAS ont pris en charge la suite des travaux.

Partenaires : EPFL, CEA (LETI, LITEN, LEM), Chalmers, Univ de Göteborg, Univ de Cambridge

Montants : coût total 467 373 € pour le LAAS, budget demandé à la EC de 252 000 € pour le LAAS, montant total du projet pour la CE : 3,2M€

Contenu des travaux: conception de véhicules de tests appropriés pour évaluer des NEMS aux fréquences micro-ondes, développement d'outils de caractérisation adaptés aux NEMS, conception et caractérisation d'un VCO à capacité variable à base de NEMS.

**2. Projet ANR intitulé « NATURE »**

Démarrage en décembre 2005, durée 3 ans

Titre : « NAnoTUBE de carbone pour les Radio-communications millimétriques »

Rôle : participation au montage du projet, responsable des développements technologiques des interconnexions entre les échelles micro et nanométriques, encadrement d'un doctorant sur ce projet

Partenaires : LPICM

Montant : 230 000 € pour le LAAS

Contenu des travaux: élaboration de NEMS à base de nanotubes de carbone pour applications hyperfréquences.

**3. Projet R&T CNES, convention CNES n° 60358/00 - coordinatrice**

Démarrage en janvier 2007, durée 2 ans

Titre : « Etude des potentialités des nanotubes de carbone pour les technologies hyperfréquences »

Rôle : Montage et coordination du projet

Partenaires : UPS-CIRIMAT (UMR CNRS), LPICM

Montant : 50 000 € au total, 20 000 € pour le LAAS

Contenu des travaux: Deux axes sont étudiés pour implémenter des nanotubes de carbone dans des technologies hyperfréquences : (1) étude d'un matériau composite HF à base de nanotubes de carbone, (2) utilisation de CNTs fonctionnels dans des composants hyperfréquences

**4. Projet DGA « PAMIR », marché n° 01 34 032**

Démarrage en 2003, durée 3 ans, étendue jusque ...

Titre : « Etude et réalisation d'un commutateur hyperfréquence en technologie MEMS »

Rôle : responsable des développements technologiques de MEMS de puissance et de la fabrication des démonstrateurs jusque sept 2007

Partenaires : IEMN, XLIM, MEMSCAP, MBDA France

Montant : 191 445 € pour le LAAS (rq : total de 930 600 €)

Contenu des travaux : étude de commutateur de puissance hyperfréquence en technologie MEMS

**5. Réseau d'excellence européen NoE du 6eme PCRD « AMICOM », n° 507352**

Démarrage mi 2003, durée 3 ans, étendue jusque décembre 2007

Titre : « Advanced MEMS for RF and millimeter wave communications »

Rôle : participation scientifique dans différents workpackages

Partenaires : cf. <http://www.amicom.info/>

Contenu des travaux: étude de MEMS RF à l'échelle européenne

**6. Projet nano2008 MINEFI avec ST Microelectronics, intitulé « 3D POLY » - responsable LAAS**

Démarrage en 2005, durée 2 ans

Titre : « Intégration 3D sur polymère pour applications millimétriques »

Rôle : montage, gestion et responsable du projet + gestion de COFIBAW

Partenaires : ST Microelectronics

Montant : 45 000 € (3D POLY) + 20 000 € (COFIBAW) pour le LAAS

Contenu des travaux : Conception, fabrication et caractérisation de circuits silicium pour applications millimétriques : coupleurs 3D, diviseurs de puissance... ; mélangeurs 20-1GHz en technologie SiGe

**7. Projets région intitulés « CIAM » puis CIAM 2**

Démarrage en 2004, durée 2 ans, puis 2006-2008

Titre : « Intégration 3D sur polymère pour applications millimétriques »

Rôle : Responsable de la filière technologique polymère multicouches

Partenaires : Supaéro, ENSEEIHT

Montant : 130 488 € pour le LAAS

Contenu des travaux : Conception, fabrication et caractérisation de circuits silicium pour applications millimétriques : coupleurs 3D, diviseurs de puissance... ; mélangeurs 20-1GHz en technologie SiGe

#### **8. Equipe projet CNRS avec le LEST – Brest, 2002-2004**

Rôle : Responsable des développements technologiques et de la fabrication des démonstrateurs

Partenaire : LEST Brest

Contenu des travaux : Elaboration de filtres 3D avec un technologie polymère adaptée

#### **9. Projet européen ARTEMIS – IST-2000-31065 du 5eme PCRD, 2002-2005**

Rôle : Responsable des développements technologiques

Partenaire : Uppsala Univ., Ulm Univ., ATMEL, VTT...

Contenu des travaux : Elaboration d'un microsysteme de communication à 24 GHz ultra compact

#### ***Relations industrielles :***

- ✓ Encadrement d'une thèse BDI cofinancée par Alcatel Space Industries et participation à d'autres thèses financées par Alcatel
- ✓ Collaboration avec ST Microelectronics dans le cadre du projet Nano2008 MINEFI, entreprise qui fait également partie de l'Industrial Advisory Board du projet européen NANO RF, et dans le cadre d'une thèse CIFRE (JP. Busquère)
- ✓ Travaux effectués en collaboration avec ATMEL (Allemagne) et VTT (Finlande) dans le cadre du projet européen ARTEMIS
- ✓ Travaux effectués en collaboration avec MEMSCAP (France) et MBDA (France) dans le cadre du projet DGA PAMIR
- ✓ Collaboration avec le CNES

#### ***Participation à des instances collectives***

- membre du comité d'experts Micro et Nanosystèmes pour le département STIC du CNRS de juin 2005 à août 2007
- membre du bureau du GDR Micro et Nanosystèmes

#### ***Membre IEEE et SPIE***

#### ***Participation à des comités de lecture de revues nationales ou internationales (reviewer)***

- IEEE Electron Devices
- IEEE Microwave and Components letters
- Sensors and Actuators B. Chemical
- Electronic Letters
- IOP: Journal of Micromechanics and Microengineering

**Reviewer de projets ANR PNANO en 2008, 2009, 2010 et NANO-INNOV en 2009**

#### ***Participation à des comités de lecture de colloques nationaux ou internationaux***

- Membre du comité de programme de la conférence SPIE Microtechnologies for the New Millenium, 'Smart Sensors, Actuators, and MEMS' depuis 2003

- (« chair » de sessions aux conférences de 2005 et 2007)
- Membre du comité de programme de la conférence SPIE Micro- and Nanotechnology : Materials, Processes, Packaging and Systems II de 2003 jusque 2006
- de la conférence MEMSWAVE en 2005, 2006, 2007
- de la European Microwave Conference (EuMC) 2005-2010
- Membre du comité scientifique des Journées Nationales Micro-ondes (JNM) de 2007

#### ***Participation à la direction d'équipe ou de laboratoire***

- Création et responsable de l'opération de recherche MH2F depuis sept 2009
- Membre du conseil de direction du LAAS depuis sept 2009
- Membre du conseil scientifique du pôle MINAS du LAAS depuis sept 2009
- Nommée au conseil du laboratoire de 2004 à avril 2007
- Montage et responsabilité de la thématique « Exploration des potentialités RF et micro-ondes des nanotubes de carbone » dans le groupe de recherche MINC du LAAS jusque sept 2007

#### ***Participation à des jurys***

- **au concours externe IGR**, BAP C pour un poste d'ingénieur électronicien en conception et développement à l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), sept. 2003
- **de thèses :**
  - Thibaut Ricart, au LAAS, le 18 décembre 2008 sur l' 'Etude de nano-systèmes électromécaniques (NEMS) à base de nanotubes de carbone pour applications hyperfréquences'
  - Ming Nhut Do, au LAAS, le 16 juillet 2007, sur la 'Co-conception et caractérisation de circuits actifs et passifs tri-dimensionnels en bande K pour l'intégration de microsystèmes sur silicium aux fréquences millimétriques'
  - Benoît Ducarouge, au LAAS, 13 décembre 2005, sur la 'Conception et caractérisation de micro-commutateurs électromécaniques hyperfréquences de puissance : application à un circuit de commutation d'émission/réception large bande'
  - Samuel Mellé, au LAAS, 14 décembre 2005, sur l' 'Analyse et modélisation des phénomènes de chargement de diélectriques dans les MEMS RF : application à la fiabilité prédictive de micro-commutateurs électromécaniques micro-ondes'
  - Michel Fryziel, à l'IEMN, le 19 décembre 2004 sur la « conception et réalisation technologique de commutateurs micro-électromécaniques en bande K pour antennes à réseaux déphasés »
- **de thèses 'CNAM' :**
  - David De Conto (Alcatel Space Industrie) : 'Caractérisation et modélisation des phénomènes de dégradation des composants MEMS RF capacitifs, Juillet 2005
  - Béatrice Espana (Alcatel Space Industrie) : 'Conception d'un filtre passe-bande accordable à base MEMS sur technologie Silicium pour des applications de télécommunications spatiales 40-50 GHz', Juin 2004

## **IV. Production scientifique**

### **1. Brevet**

Patent BF 04 10484 on 05/10/2004 << Résonateur diélectrique pouvant être accordé en fréquence >>, (Frequency tunable dielectric resonator) deposited by CNES, with IRCOM and LAAS CNRS, France

### **2. Publications**

Présentation par ordre chronologique

## Participation à des ouvrages

### 2010

- [1]. D. Dubuc, K. Grenier  
Book chapter entitled: 'RF-MEMS based tuner for microwaver and millimeterwave applications', in 'Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies: Semiconductor Devices, Circuits and Systems', In-Tech, n° ISBN 978-953-307-031-5, 2010

### 2005

- [2]. J.P. Busquère, K. Grenier, G. Bouche, D. Dubuc, P. Pons, R.Plana, P. Ancey  
'Development of a reconfigurable in frequency LNA through RF MEMS', Advanced MEMS for RF and millimeter wave communications, Series in Micro and Nanoengineering, n°7, Editura Academiei Romane, n° ISBN 973-27-1196-5, 2005
- [3]. K. Grenier, D.Dubuc, J.P. Busquère, F. Bouchriha, A. rennane, P. Pons, R.Plana,  
'Interests of polymers in RF MEMS applications', Advanced MEMS for RF and millimeter wave communications, Series in Micro and Nanoengineering, n°7, Editura Academiei Romane, n° ISBN 973-27-1196-5, 2005

### 2004

- [4]. D. Dubuc, K. Grenier, M.N. Do, J.P. Busquère, A. Coustou, B. Ducarouge, S. Melle, L. Mazenq, F. Bouchriha, P.Pons, R.Plana  
'3D microsystem integration for microwave and millimeterwave applications', Romanian Journal of Information Science and Technology, Vol.17, N°3-4, 2004
- [5]. M. Saadaoui, A. Muller, P. Pons, L. Bary, D. Neculoiu, F. Giacomozzi, D.Dubuc, K. Grenier, L. Rabbia, D. Vasilache, R.Plana,  
'Fabrication of silicon based micromachined antennas for millimeter-wave applications', MEMS technologies for millimeter wave devices and circuits, Series in Micro and Nanoengineering, n°5, Editura Academiei Romane, n° ISBN 973-27-1087-X, June 2004

### 2003

- [6]. L. Rabbia, P. Pons, K. Grenier, R.Plana, X. Chauffleur, L. dantas  
'Effect of membrane shape on mechanical behaviour of RF switches', MEMS technologies for millimetre wave devices and circuits, Series in Micro and Nanoengineering, n°4, Editura Academiei Romane, n° ISBN 973-27-0979-0, June 2003

### 2002

- [7]. K.Grenier, L.Rabbia, D.Dubuc, A.Takacs, P.Pons, P.Caudrillier, O.Pascal, P.Combes, H.Aubert, J.Graffeuil, H.Baudrand, R.Plana,  
'Microsystem concept for RF and millimeterwave communications', Micromachined Microwave Devices and Circuits, Editura Academiei Romane, n° ISBN 973-27-0908-1, November 2002, pp. 45-65

## Journaux internationaux

### 2010

- [8]. S. Pacchini, D. Dubuc, E. Flahaut, K. Grenier  
'Double-wall carbon nanotube-based polymer composites for microwave applications', accepted at the International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2010

### 2009

- [9]. K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, H. Toshiyoshi, T. Fujii, H. Fujita  
'Integrated Broadband Microwave and Microfluidic Sensor dedicated to Bioengineering', IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 57, n°12, Dec. 2009, pp. 3246-3253
- [10]. D. Dubuc, K. Grenier, H. Toshiyoshi, H. Fujita  
'Plastic-based microfabrication of artificial dielectric for miniaturized microwave integrated circuits', Metamaterials, 2009, Vol. 3, pp. 165-173, doi:10.1016/j.metmat.2009.09.002



**2008**

- [11]. K. Grenier, C. Bordas, S. Pinaud, L. Salvagnac, D. Dubuc  
'Germanium resistors for RF MEMS based microsystems', *Microsystem Technologies Journal*, Springer, (published on line Oct. 30, 2007), Vol 14, n°4-5, April 2008, pp. 601-606
- [12]. M. Dragoman, D. Neculoiu, A. Cismaru, D. Dragoman, K. Grenier, S. Pacchini, L. Mazonq, R. Plana  
'High quality nanoelectromechanical microwave resonator based on a carbon nanotube array', *Applied Physics Letters*, vol. 92, 063118, Feb. 14, 2008

**2007**

- [13]. M. Dragoman, K. Grenier, D. Dubuc, L. Bary, R. Plana, E. Fourn, E. Flahaut  
'Millimeterwave carbon nanotube gas sensor', *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, n°10, 106103, May 2007
- [14]. M. Dragoman, A. Takacs, A.A. Muller, H. Hartnagel, R. Plana, K. Grenier, D. Dubuc  
'Nanoelectromechanical switches based on carbon nanotubes for microwave and millimeterwaves', *Applied Physics Letters*, Vol. 90, n°11, 113102p. , March 2007

**2006**

- [15]. E. Ojefors, H. Kratz, K. Grenier, R. Plana, A. Rydberg,  
'Micromachined loop antennas on low resistivity silicon substrates', *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 54, n° 12, Dec 2006, pp. 3593-3601
- [16]. M. Dragoman, A. Muller, K. Grenier, D. Dubuc, R. Plana, E. Flahaut  
'High performance thin film bulk acoustic resonator covered with carbon nanotubes', *Applied Physics Letters*, Vol. 89, n°14, 143122, October 2006
- [17]. M. Dragoman, K. Grenier, D. Dubuc, L. Bary, E. Fourn, R. Plana, E. Flahaut  
'Experimental determination of microwave attenuation and electrical permittivity of double-walled carbon nanotubes', *Applied Physics Letters*, Vol. 88, n° 15, pp. 153108, 10 April 2006

**2005**

- [18]. S. Melle, D. De Conto, D. Dubuc, K. Grenier, O. Vendier, J-L. Muraro, J-L. Cazaux, R. Plana,  
'Reliability modeling of capacitive RF MEMS', *Special Issue IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, n° 11, November 2005, pp. 3482-3488
- [19]. S. Melle, D. De Conto, L. Mazonq, D. Dubuc, B. Poussard, C. Bordas, K. Grenier, L. Bary, O. Vendier, J-L. Muraro, J-L. Cazaux, R. Plana,  
'Failure predictive model of capacitive RF-MEMS', *Microelectronics and Reliability*, Vol. 45, Issues 9-11, September-November 2005, pp. 1170-1175
- [20]. E. Ojefors, K. Grenier, L. Mazonq, F. Bouchriha, A. Rydberg, R. Plana,  
'Micromachined Inverted F Antenna For Integration on Low Resistivity Silicon Substrates', *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, Issue 10, Oct. 2005, pp. 627-629

**2004**

- [21]. D. Neculoiu, P. Pons, L. Bary, M. Saadaoui, D. Vasilache, K. Grenier, D. Dubuc, A. Müller and R. Plana  
'Membrane Supported Yagi-Uda Antennae for Millimeter-Wave Applications', *IEE Microwave, Antennas and Propagation*, vol 151, Issue 4, August 2004, p311-314
- [22]. D. Dubuc, M. Saadaoui, S. Melle, F. Flourens, L. Rabbia, B. Ducarouge, K. Grenier, P. Pons, A. Boukabache, L. Bary, A. Takacs, H. Aubert, O. Vendier, J.L. Roux, R. Plana,  
'Smart MEMS concept for high secure RF and millimeterwave communications', *Microelectronics Reliability Journal*, Issue 6, Vol. 44, 2004, pp. 899-907, June 2004
- [23]. X. Chauffleur, L. Rabbia, P. Pons, K. Grenier, R. Plana, L; Dantas  
'Effect of membrane shape on mechanical behaviour of RF switches', *Sensors and Actuators A*, Issue 1, Vol. 112, pp. 148-154, April 2004

**2002**

- [24]. B. Guillon, K. Grenier, T. Parra, P. Pons, D. Cros, P. Blondy, J. Graffeuil, J.L. Cazaux, R. Plana,  
'Silicon micromachining for high performance passive structures at W band', *Active and Passive Electronic Components*, Vol. 25, n°1, pp. 123-129, March 2002

**2000**

- [25]. B.Guillon, K.Grenier, P.Pons, J-L.Cazaux, J-C.Lalaurie, D.Cros, R.Plana, 'Silicon micromachining for millimeter-wave applications', Journal of Vacuum Science and Technology, part A 18(2), March/April 2000, pp 743-745
- [26]. B.Guillon, K.Grenier, T.Parra, P.Pons, D.Cros, P.Blondy, J.Graffeuil, J-L.Cazaux, R.Plana 'High performances silicon micromachining based structures for millimeter-wave applications', Romanian journal of Information Science and Technology, vol 3, n°1, pp 39-48, 2000

**1999**

- [27]. J.A.Reynoso-Hernandez, C.F.Estrada-Maldonado, T.Parra, K.Grenier, J.Graffeuil 'An improved method for the wave propagation constant  $\gamma$  estimation in broadband uniform millimeter-wave transmission line', Microwave and optical technology letters, vol. 22, n° 4, August 99, pp. 268-271

**1998**

- [28]. L.Escotte, K.Grenier, J.G.Tartarin, J.Graffeuil 'Microwave noise parameters of pseudomorphic GaInAs HEMT's under optical illumination', IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (MTT), Vol. 46, n° 11, Nov. 98, pp. 1788-1789

**Journal national**

- [29]. B.Guillon, K.Grenier, T.Parra, P.Pons, D.Cros, P.Blondy, J.Graffeuil, J-L.Cazaux, R.Plana 'Silicon micromachining for high performance passive structures at W band', Annales des telecommunications, 2000

**Conférences internationales****Papiers invités****2009**

- [30]. K. Grenier, D. Dubuc 'Toward RF-based Microsystems for Bio-Engineering', invited paper at Colloquia on ICT for Life Sciences, CNIT General Assembly, Parma, Italy, June 2009

**2005**

- [31]. K. Grenier, D. Dubuc, F. Cocetti, A. Coustou, D. Dragomirescu, R. Plana 'MEMS IC for RF Millimeterwave Communications', invited paper at Asian Pacific Microwave Conference (APMC'05), Suzhou, China, Vol. 1, 4-7 December 2005, pp. 57-58
- [32]. J.P. Busquère, B. Ducarouge, K. Grenier, D. Dubuc, R. Plana, P. Ancey 'Above IC MEMS capacitors for integrated reconfigurable circuits', invited paper at Asian Pacific Microwave Conference (APMC'05), Suzhou, China, Vol. 1, 4-7 December 2005, pp. 63-66
- [33]. K. Grenier, L. Mazonq, D. Dubuc, E. Ojefors, P. Lindberg, A. Rydberg, J. Berntgen, W.J. Rabe, E. Sonmez, P. Abele, H. Schumacher, R.Plana 'MEMS above IC Technology applied to a compact RF module', invited paper at SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2005, Sevilla, Spain, May 9-11, 2005

**2004**

- [34]. K. Grenier, D.Dubuc, L. Mazonq, J-P. Busquère, B. Ducarouge, F.Bouchriha, A. Rennane, V. Lubecke, P.Pons, P. Ancey, R.Plana 'Polymer based technologies for microwave and millimeterwave applications', invited paper at 50<sup>th</sup> IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, USA, December 13-15, 2004
- [35]. J.P.Busquère, N.Do, F.Bouchriha, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, A.Boukabache, H.Schumacher, P.Abele, A.Rydberg, E.Ojefors, P.Ancey, G.Bouche and R.Plana "MEMS SiGe Technologies for RF and Millimeterwave Communications" Invited Paper at MRS Fall Meeting, December 2004, Boston
- [36]. D.Dubuc, K. Grenier, M.N. Do, J-P. Busquère, A. Coustou, B. Ducarouge, S. Melle, L. Mazonq, F.Bouchriha, P.Pons, R.Plana

- ‘3D MEMS circuits integration for RF and millimeterwave communications’, invited paper at CAS International Semiconductor Conference, Sinaia, Roumania, October 4-6, 2004
- [37]. K. Yacine, M. Saadaoui, L. Dantas, D. Leray, M. Sartor, H. Achkar, A. Ferrand, P. Pons, A. Boukabache, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana, J.M. Desmarres, F. Pressecq  
‘Mechanical characterization of silicon nitride thin films deposited on silicon wafers using nanoindentation techniques’, Eurosensors XVIII, Roma, Italy, September 12-15, 2004
- [38]. D. Dubuc, K. Grenier, M. Saadaoui, A. Takacs, P. Pons, H. Aubert, R. Plana  
‘Low losses and compact membrane suspended filters’, invited paper at International Workshop on Microwave Filters, Toulouse, France, September 13-15, 2004
- [39]. K. Grenier, D. Dubuc, J-P. Busquère, F. Bouchriha, A. Rennane, P. Pons, R. Plana  
‘Interests of polymers in RF MEMS applications’, invited paper at 5<sup>th</sup> Workshop on MEMS for Millimeter Wave communications, Memswave 2004, Uppsala, Sweden, June 30 - July 2, 2004, G2 – G5
- [40]. J-P. Busquère, N. Do, F. Bouchriha, P. Pons, K. Grenier, D. Dubuc, A. Boukabache, H. Schumacher, P. Abele, A. Rydberg, E. Ojefors, P. Ancey, G. Bouche, R. Plana  
‘MEMS SiGe technologies for advanced wireless communications’, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS'2004), Workshop, Fort Worth, USA, June 6-11, 2004, pp. 247-250
- [41]. B. Ducarouge, D. Dubuc, F. Flourens, S. Melle, E. Ongareau, K. Grenier, A. Boukabache, V. Conedera, P. Pons, E. Perret, H. Aubert and R. Plana\*  
“Power capabilities of RF MEMS” Invited paper at MIEL Conference, Nis, Serbie, May 16-19, 2004, pp. 65-70

## 2003

- [42]. D. Dubuc, A. Coustou, B. Ducarouge, K. Grenier, P. Pons, T. Parra, J. Graffeuil, R. Plana  
‘Smart MEMS concept for RF and millimeterwave communications’, invited paper at 2003 IEEE Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC'03), Kowloon (Hong-Kong), December 16-18, 2003, pp. 319-322
- [43]. K. Grenier, F. Bouchriha, V. Lubecke, D. Dubuc, P. Pons, R. Plana  
‘Polymers for high frequency electronics’, papier invité à la session 'Devices and applications' au 12<sup>th</sup> European Workshop on Heterostructure Technology (heTech'03), San Rafael, Segovia, Spain, October 12-15, 2003
- [44]. S. Melle, F. Flourens, D. Dubuc, K. Grenier, P. Pons, F. Pressecq, J. Kuchenbecker, J.L. Muraro, L. Bary, R. Plana  
‘Reliability behavior of RF MEMS’, 26th International Semiconductor Conference (CAS'2003), Sinaia, Roumania, Sept 28 - Oct 2, 2003, pp. 21-26
- [45]. K. Grenier, V. Lubecke, F. Bouchriha, L. Rabbia, D. Dubuc, P. Pons, R. Plana  
‘Polymers in RF and millimeterwave applications’, 1<sup>st</sup> Symposium on Microtechnologies for the New Millennium 2003, Proceedings of SPIE 'Smart Sensors, Actuators, and MEMS', Vol. 5116, ISBN 0-8194-4976-8, Maspalomas, Canary Islands, Spain, May 19-21, 2003, pp. 502-513
- [46]. D. Dubuc, B. Ducarouge, L. Rabbia, A. Coustou, F. Flourens, M. Saadaoui, F. Bouchriha, A. Takacs, H. Aubert, C. Boulanger, O. Vendier, K. Grenier, P. Pons, R. Plana  
‘MEMS concept for millimeter wave space communications’, 3<sup>rd</sup> ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Applications : Circuits, Systems and Measurement Techniques, Espoo, Finland, May 21-23, 2003, pp. 361-366

## 2002

- [47]. D. Dubuc, L. Rabbia, M. Saadaoui, F. Flourens, B. Ducarouge, M. Aissi, F. Bouchriha, K. Grenier, P. Pons, J. Graffeuil, R. Plana  
‘Modelling and design of MEMS for RF and millimeterwave applications’, 25<sup>th</sup> edition of CAS (International Semiconductor Conference), Sinaia, Roumania, October 8-12, 2002, pp. 13-18
- [48]. L. Rabbia, M. Saadaoui, D. Dubuc, K. Grenier, P. Pons, L. bary, R. Plana  
‘RF MEMS : status and prospects’, 13<sup>ème</sup> MicroMechanics Europe workshop (MME), Sinaia, Roumania, octobre 6-8, 2002, pp. 243-246
- [49]. D. Dubuc, K. Grenier, L. Rabbia, A. Takacs, M. Saadaoui, P. Pons, P. Caudriller, O. Pascal, H. Aubert, H. Baudrand, J. Tao, P. Combes, J. Graffeuil, R. Plana  
‘MEMS and NEMS technologies for wireless communications’, invited paper at 23rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002), Nis, Yougoslavie, May 12-15, 2002, pp. 91-98

- [50]. K.Grenier, D.Dubuc, L.Rabbia, A.Takacs, P.Pons, T.Parra, P.Caudriller, H.Aubert, J.Graffeuil, O.Pascal, P.Combes, H.Baudrand, R.Plana  
‘MEMS devices for the future wireless applications’, 4<sup>th</sup> IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems ICCDCS, Oranjestad, Aruba, April 17-19, 2002, pp. D031.1-D031.8

## 2001

- [51]. K.Grenier  
‘RF MEMS and their applications’, invited presentation at MEMS ALLIANCE workshop, USA, Baltimore, Nov. 16, 2001
- [52]. K.Grenier, L.Rabbia, A.Takacs, P.Pons, T.Parra, P.Caudrillier, O.Pascal, H.Aubert, J.Graffeuil, R.Plana  
‘MEMS technology as a contender for the future wireless applications’, 2001 International Semiconductor Conference (CAS'2001), Sinaia (Roumania), October 9-13, 2001, pp.101-110
- [53]. K.Grenier, L.Rabbia, A.Takacs, P.Pons, T.Parra, H.Aubert, J.Graffeuil, P.Combes, P.Caudrillier, R.Plana  
‘MEMS and silicon micromachined components for communications systems’, 8th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES'2001), Zakopane (Poland), June 21-23, 2001, pp.23-29
- [54]. K.Grenier, B.P.Barber, V.Lubecke, M.Zierdt, H.Safar, P.Pons, P.L.Gammel  
‘Integrated RF MEMS for Single Chip Radio’, Symposium international Transducers'01, Munich, Germany, June 10-14, 2001
- [55]. L.Bary, K.Grenier, G.Cibiel, J.Ibarran P.Pons, L.Rabbia, O.Llopis, J.Graffeuil, G.Niu, J.D.Cressler, Z.Jin, S.Zhand, A.J.Joseph, R.Plana  
‘Advanced silicon technologies for wireless applications’, Workshop on RF Circuit Technology (RF'2001), Cambridge (GB), April 2, 2001, pp.197-201

## Papiers non invités

### 2010

- [56]. D. Dubuc, K. Grenier  
‘Microfluidic-based tunable RF true-time delay line’, IEEE European Microwave Week 2010, Paris, France, Sept. - Oct 2010
- [57]. K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, T. Fujii, H. Toshiyoshi, H. Fujita  
‘Resonant based microwave biosensor for biological cells discrimination’, IEEE Radio and Wireless Symposium 2010, New Orleans, USA, Jan. 2010

### 2009

- [58]. D. Dubuc, K. Grenier, H. Fujita, H. Toshiyoshi  
‘Micro-Fabricated Tunable Artificial Dielectric for Reconfigurable Microwave Circuits’, IEEE EuMW 2009, Rome, Italy, Sept. - Oct 2009, pp. 520-523
- [59]. K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, T. Fujii, H. Toshiyoshi, H. Fujita  
‘New broadband and contact less RF / microfluidic sensor dedicated to bioengineering’, IEEE MTT-S, International Microwave Symposium 2009, Boston, USA, June 2009, pp. 1329-1332
- [60]. K. Grenier, D. Dubuc, M. Kumemura, H. Toshiyoshi, H. Fujita  
‘Contact less radio-frequencies biosensor for biological parameters analysis’, International Conference on Biomedical Electronics and Devices, Biodevices 2009, Porto, Portugal, January 14-17, 2009

### 2008

- [61]. M. Dragoman, D. Dragoman, D. Neculoiu, A. Cismaru, K. Grenier, S. Pacchini, R. Plana  
‘High-Q microwave resonator based on millions of nanotube cantilevers’, IEEE European Microwave Week, Amsterdam, Netherlands, October 2008
- [62]. D. Dubuc, C. Bordas, K. Grenier  
‘Efficient design methodology of RF-MEMS based tuner’, IEEE European Microwave Week, Amsterdam, Netherlands, October 2008
- [63]. T. Ricart, S. Pacchini, D. Dubuc, K. Grenier  
‘Multiphysic modeling and design of carbon nanotubes based variable capacitors for microwave applications’, IEEE European Microwave Week, Amsterdam, Netherlands, October 2008

- [64]. D. Dubuc, D. Yamane, Z. Rui, Y. Yi, K. Grenier, H. Fujita, H. Toshiyoshi  
‘Modelling and design guidelines of metamaterial-based artificial dielectric for the miniaturization of microwave passive circuits’, 2<sup>nd</sup> International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials’2008, Pamplona, Spain, September 21-26, 2008
- [65]. T. Ricart, S. Pacchini, C. Cojocar, D. Pribat, K. Grenier, D. Dubuc  
‘Carbon nanotubes based microwave varactor : modeling, simulation and design’, SPIE Carbon Nanotubes and associated devices, NanoScience+Engineering, San Diego, USA, August 2008
- [66]. S. Pacchini, T. Ricart, M. Dilhan, D. Dubuc, C. Cojocar, D. Pribat, K. Grenier  
‘Micro-interconnection technology suitable for RF-NEMS varactors elaboration’, SPIE Carbon Nanotubes and associated devices, NanoScience+Engineering, San Diego, USA, August 2008
- [67]. S. Pacchini, T. Idda, D. Dubuc, E. Flahaut, K. Grenier  
‘Carbon nanotube-based polymer composites for microwave applications’, International Microwave Symposium, IMS’08, Atlanta, USA, June 2008

## 2007

- [68]. V. Puyal, D. Dubuc, K. Grenier, C. Bordas, O. Vendier, J-L. Cazaux  
‘Which architecture to choose for robust RF-MEMS phase shifters ?’, International Semiconductor Conference, CAS’07, Sinaia, Roumania, 15-17 Oct. 2007
- [69]. M. Dragoman, A. Muller, D. Neculoiu, G. Konstantinidis, K. Grenier, D. Dubuc, L. Bary, R. Plana, H. Hartnagel, E. Fourn, E. Flahaut,  
‘Carbon nanotubes-based microwave and millimetre wave sensors’, European Microwave Week, Munich, Germany, 8-12 Oct. 2007
- [70]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, M. Paillard, J-L. Cazaux  
‘High quality medium power RF-MEMS based impedance tuner for smart microsystem integration’, IEEE 3rd Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Bordeaux, France, July 2-5, 2007
- [71]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, E. Flahaut, S. Pacchini, M. Paillard, J-L. Cazaux  
‘Carbon nanotube based dielectric for enhanced RF MEMS reliability’, IEEE International Microwave Symposium, Honolulu, Hawaii, June 3-8, 2007
- [72]. N. Do, K. Grenier, D. Dubuc, R. Plana  
‘Low insertion losses broadside coupler in a multilayer above IC technology for K-band applications’, IEEE International Microwave Symposium, Honolulu, Hawaii, June 3-8, 2007
- [73]. M. Dragoman, K. Grenier, D. Dubuc, L. Bary, R. Plana, G. Konstantinidis, E. Fourn, E. Flahaut  
‘Electromagnetic propagation of millimeterwaves in micromachined coplanar waveguides filled with carbon nanotubes’, European Microwave Material Conference, Strasbourg, France, May 28 – June 1<sup>st</sup> 2007
- [74]. K. Grenier, C. Bordas, S. Pinaud, L. Salvagnac, D. Dubuc  
‘Germanium as an integrated resistor material in RF MEMS switches’, SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2007, “Smart Sensors, Actuators and MEMS”, 6589-29, session 8, Gran Canaria, Spain, May, 2007
- [75]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, M. Paillard, J-L. Cazaux, R. Plana  
‘Temperature stress impact on power RF MEMS switches’, SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2007, “Smart Sensors, Actuators and MEMS”, 6589-27, session 8, Gran Canaria, Spain, May, 2007
- [76]. S. Mellé, C. Bordas, D. Dubuc, K. Grenier, O. Vendier, J.L. Muraro, J.L. Cazaux, R. Plana  
‘Investigation of stiction effect in electrostatic actuated RF MEMS devices’, 7th Topical meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF systems (SiRF’07), Long Beach, USA, January 10-12, 2007, pp. 173-176

## 2006

- [77]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, M. Paillard, J-L. Cazaux, R. Plana  
‘Performances optimization of capacitive parallel MEMS switches’, Asian Pacific Microwave Conference, APMC’06, Dec. 12-15, 2006
- [78]. N. Do, D. Dubuc, K. Grenier, L. Bary, L. Mazenq, R. Plana  
‘High compactness / high isolation 3D-broadside couplers design methodology’, Asian Pacific Microwave Conference, APMC’06, Dec. 12-15, 2006
- [79]. K. Grenier, F. Bouchriha, D. Dubuc, R. Plana  
‘Above IC BCB-polymer technology for millimeter-wave circuits and systems’, International workshop on microwave filters, October 16-18, 2006



- [80]. N. Do, D. Dubuc, K. Grenier, L. Bary, L. Mazonq, R. Plana  
'In IC and above IC MEMS for millimeterwave communcations', Electronics 2006, Sozopol, Bulgaria, September 20-22, 2006
- [81]. N. Do, D. Dubuc, K. Grenier, L. Bary, L. Mazonq, R. Plana  
'3D-BCB based branchline coupler for K-band integrated microsystem', 36<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK, September 10-15, 2006
- [82]. F. Bouchriha, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'IC-compatible low loss passive circuits for millimeter-wave applications', 36<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK, September 10-15, 2006
- [83]. J-P. Busquère, K. Grenier, D. Dubuc, E. Fourn, P. Ancey, R. Plana  
'MEMS IC concept for reconfigurable low noise amplifier', 36<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK, September 10-15, 2006
- [84]. A. Coustou, D. Dubuc, K. Grenier, E. Fourn, O. Llopis, R. Plana  
'Capabilities of a 10 GHz MEMS based VCO', 36<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK, September 10-15, 2006
- [85]. A. Lecointre, D. Dragomirescu, D. Dubuc, K. Grenier, P. Pons, H. Aubert, A. Muller, P. Berthou, T. Gayraud, R. Plana  
'Miniaturized wireless sensor networks', International Semiconductor Conference (CAS'2006), Vol. 1, Sinaia, Roumania, Sept. 27-29, 2006, pp. 13-17
- [86]. M. Dragoman, E. Flahaut, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'Microwave and millimeter-wave devices based on carbon nanotubes', 4th ESA Workshop on Millimetre-wave Applications, Espoo, Finland, Feb. 15-17, 2006

## 2005

- [87]. S. Mellé, D. De Conto, L. Mazonq, D. Dubuc, B. Poussard, C. Bordas, K. Grenier, L. Bary, O. Vendier, J.L Muraro, J.L. Cazaux, R. Plana  
'Failure Predictive Model of Capacitive RF-MEMS', 16<sup>th</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Ananalysis, ESREF 2005, Arcachon, France, Oct. 10-14, 2005
- [88]. F. Coccetti, B. Ducarouge, E. Scheid, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'Thermal analysis of RF-MEMS switches for power handling front-end', 13th Gallium Arsenide and other Compound Semiconductors Application Symposium (GaAs'2005), Paris, France, Oct. 3-4, 2005, pp. 513-516
- [89]. K. Grenier, L. Mazonq, D. Dubuc, F. Bouchriha, F. Cocetti, E. Ojefors, P. Lindberg, A. Rydberg, J. Berntgen, W.J. Rabe, E. Sonmez, P. Abele, H. Schumacher, R. Plana  
'IC compatible MEMS technologies', 35<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, October 3-7, 2005
- [90]. D. Dubuc, W. De Raedt, G. Carchon, M.N. Do, E. Fourn, K. Grenier, R. Plana  
'MEMS-IC integration for RF and millimeterwave applications', 35<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, October 3-7, 2005
- [91]. F. Bouchriha, D. Dubuc, D. Bourrier, L. Baray, R. Plana, K. Grenier,  
'High Q factor of coplanar waveguide on low K polymer layer', 35<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, October 3-7, 2005
- [92]. F. Coccetti, B. Ducarouge, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'Power handling RF-MEMS switches optimization through a multiphysic numerical environment', 2005 MEMSWAVE workshop, Lausanne, Switzerland, June 23-24, 2005
- [93]. S. Melle, D. De Conto, L. Mazonq, D. Dubuc, K. Grenier, L. Bary, O. Vendier, J-L. Muraro, J-L. Cazaux, R. Plana,  
'Modeling of the Dielectric Charging Kinetic for Capacitive RF-MEMS, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS'2005), Long Beach, USA, June 12-17, 2005, WE3B-4
- [94]. B. Ducarouge, D. Dubuc, S. Melle, K. Grenier, L. Mazonq, L. Bary, R. Plana  
'Efficient topology and design methodology for RF MEMS switches', SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2005, Sevilla, Spain, May 9-11, 2005
- [95]. A. Müller, M Saadaoui, P. Pons, D. Neculoiu, L. Bary, D. Dubuc, K. Grenier, D. Vasilache, C. Buiculescu, I. Petrini and R. Plana  
'"Membrane supported endfire antennas manufactured using silicon micromachining"', IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, Singapore, March 2005, pp. 113-116

- [96]. K. Grenier, D.Dubuc, B. Ducarouge, V. Condera, D. Bourrier, E. Ongareau, P. Derderian, R. Plana  
‘High power handling RF MEMS design and technology’, 18<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro  
Electro Mechanical Systems, MEMS05, Miami, USA, Jan. 30 - 3 Feb. 3, 2005

## 2004

- [97]. J-P. Busquère, N. Do, F; Bouchriha, P. Pons, K. Grenier, D. Dubuc, A. Boukabache, H. Schumacher, P. Abele, A. Rydberg, E. Ojefors, P. Ancey, G. Bouche, R. Plana  
‘Smart MEMS concept for advanced RF communications’, European Micro and Nanosystems (EMN04), Noisy le Grand - Paris, France, October 20-21, 2004
- [98]. K. Grenier  
‘Technology description of power RF MEMS’, EuMC06 AMICOM Workshop, 34<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Amsterdam, Netherlands, October 11-15, 2004
- [99]. D.Dubuc, M. Van Spengen, S. Melle, I. De Wolf, R. Mertens, P.Pons, K. Grenier, R.Plana  
‘Methodology to assess the reliability behaviour of RF-MEMS’, 34<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Amsterdam, Netherlands, October 11-15, 2004
- [100]. E. Ojefors, F; Bouchriha, K. Grenier, A; Rydberg, R.Plana  
‘Compact micromachined dipole antenna for 24GHz differential SiGe integrated circuits’, 34<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC), Amsterdam, Netherlands, October 11-15, 2004
- [101]. K. Grenier, L. Bary, F. Bouchriha, D.Dubuc, C. Quendo, E. Rius, Y. Clavet, C. Person  
‘Multilayer Si-BCB technology for millimeterwave circuits : application to miniature bandpass filters’, International Workshop on Microwave Filters, Toulouse, France, September 13-15, 2004
- [102]. B. Ducarouge, D. Dubuc, S. Melle, K. Grenier, L. Bary, P. Pons, R. Plana  
‘Efficient design methodology of polymer based RF MEMS switches’, 5<sup>th</sup> Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits, SiRF04, Atlanta, USA, September 8-10, 2004
- [103]. F.Flourens, D.Peyrou, K.Yacine, S.Melle, K.Grenier, D.Dubuc, A.Boukabache, P.Pons and R.Plana  
“Reliability Properties of Fully Suspended Redundancy Ring”, 5th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits, SiRF04, Atlanta, USA, September 8-10, 2004, pp. 163-166
- [104]. J-P. Busquère, K. Grenier, G. Bouche, D.Dubuc, P.Pons, R.Plana, P. Ancey  
‘Development of a reconfigurable in frequency LNA through RF MEMS’, 5<sup>th</sup> Workshop on MEMS for Millimeter Wave communications, Memswave 2004, Uppsala, Sweden, June 30 – July 2, 2004, B7 – B10
- [105]. M. Saadaoui, P.Pons, A; Boukabache, D.Dubuc, K. Grenier, R.Plana, L. Bary, P. Dubreuil, A. Muller, D. Neculoiu  
‘Dry plus wet etching for micromachined in plane radiation antennas’, 5<sup>th</sup> Workshop on MEMS for Millimeter Wave communications, Memswave 2004, Uppsala, Sweden, June 30 – July 2, 2004, E1 – E5
- [106]. L. Le Garrec, M. Himdi, R. Sauleau, L. Mazonq, K. Grenier, R. Plana  
‘CPW-fed slot microstrip reconfigurable array’, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APS 2004), Monterey, USA, June 20-26, 2004
- [107]. C. Quendo, E. Rius, Y. Clavet, C. Person, F. Bouchriha, L. Bary, K.Grenier  
‘Miniaturized and Out-of-Band Bandpass Filter in Si-BCB Technology’, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS'2004), Fort Worth, USA, June 6-11, 2004, pp. 1475-1478, TH1B
- [108]. P. Pons, K. Grenier, D. Dubuc, A. Boukabache, F. Flourens, B; Ducarouge, S. Melle, H. Aubert, L. Bary, J. Graffeuil, R. Plana  
‘MEMS technologies for millimeterwave space applications’, WSK Reconfigurable MEMS for Optimum RF/Microwave Circuits, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS'2004), Workshop, Fort Worth, USA, June 6-11, 2004
- [109]. P.Pons, D. Dubuc, F. Flourens, M. Saadaoui, S. Melle, A. Takacs, J. Tao, H. Aubert, A. Boukabache, T. Paillet, P. Blondy, O; Vendier, K. Grenier, R. Plana  
‘MEMS-based redundancy ring for low noise millimeter-wave front-end’, Photonics Europe, Strasbourg, France, April 26-30, 2004, Proceedings of SPIE, Vol; 5455, MEMS, MOEMS, and Micromachining, 2004, ISBN 0-8194-5378-1, pp. 181-192
- [110]. S. Melle, F. Flourens, D; Dubuc, K. Grenier, P. Pons, J.L. Muraro, Y. Ségui, R. Plana  
‘Investigation of dielectric degradation of microwave capacitive microswitches’, 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'04), Maastricht, Netherlands, Jan. 25-29, 2004, pp. 141-144

**2003**

- [111]. M. Abdel-Aziz, H. Gali, H. Ragaie, H. Haddara, P. Pons, K. Grenier, R. Plana  
‘Design of Si-based micromachined slot antenna’, 46<sup>th</sup> IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS’03), Cairo, Egypt, December 27-30, 2003
- [112]. F.Bouchriha, K.Grenier, D.Dubuc, P.Pons, R.Plana, J.Graffeuil  
‘Coplanar passive circuits on silicon surface micromachined and thick polymer layers for millimeterwave applications’, 33rd European Microwave Conference (EuMC), Munich, Germany, October 6-10, 2003, pp. 49-52
- [113]. E.Ojefors, F.Bouchriha, K.Grenier, A.Rydberg  
‘24GHz ISM-band antennas on surface micromachined substrates for integration with a commercial SiGe process’, 6<sup>th</sup> European Conference on Wireless Technology (ECWT’03), Munich, Germany, October 6-10, 2003, pp. 101-104
- [114]. D.Dubuc, L.Rabbia, K.Grenier, P.Pons, O.Vendier, J.Graffeuil, R.Plana  
‘Original MEMS based Single Pole Double Throw Topology for millimeter wave space communications’, 33rd European Microwave Conference (EuMC), Munich, Germany, October 6-10, 2003, pp. 979-982
- [115]. S.Melle, F.Flourens, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, F.Pressecq, J.Kuchenbecker, J.L.Muraro, L.Bary, R.Plana  
‘Reliability overview of RF MEMS devices and circuits’, 33rd European Microwave Conference (EuMC), Munich, Germany, October 6-10, 2003, pp. 37-40
- [116]. J.Kuchenbecker, L.Bary, X.Lafontan, F.Flourens, A.Takacs, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, H.Aubert, F.Pressecq, R.Plana  
‘Microwave and physical behavior of micromachined structures on membrane for space applications’, 26th International Semiconductor Conference (CAS’2003), Sinaia, Roumania, Sept 28 - Oct 2, 2003, pp. 105-108
- [117]. B.Ducarouge, E.Perret, F.Flourens, H.Aubert, J.Tao, X.Chauffleur, J.P.Fradin, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, R.Plana  
‘Design of MEMS-based microwave and millimeterwave switches for high power applications’, 26th International Semiconductor Conference (CAS’2003), Sinaia, Roumania, Sept 28 - Oct 2, 2003, pp. 61-64
- [118]. D.Niculoiu, A.Muller, P.Pons, L.Bary, M.Saadaoui, C.Buiculescu, O.Andrei, R.Enachescu, D.Dubuc, K.Grenier, D.Vasilache, I.Petrini, R.Plana  
‘The design of membrane-supported millimeterwave antennas’, 26th International Semiconductor Conference (CAS’2003), Sinaia, Roumania, Sept 28 - Oct 2, 2003, pp. 61-64
- [119]. F.Bouchriha, K.Grenier, D.Dubuc, P.Pons, R.Plana, J.Graffeuil  
‘Improved Q-factor CPW transmission lines on thick polymer layer’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003
- [120]. D.Dubuc, L.Rabbia, K.Grenier, P.Pons, L.Bary, O.Vendier, R.Plana  
‘MEMS-Based Redundant circuits for Millimeter-wave Space Applications’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. A19-A22
- [121]. M.Saadaoui, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, R.Plana, X.Lafontan, H.Aubert, J.W.Tao, A.Takacs, O.Pascal, P.Caudrillier  
‘Low losses Microsystems for mm wave applications’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. F29-F32
- [122]. S.Melle, F.Flourens, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, J.L.Muraro, O.Vendier, R.Plana  
‘Early degradation behavior in parallel MEMS switches’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. F33-F36
- [123]. J.Kuchenbecker, L.Bary, X.Lafontan, F.Flourens, A.Takacs, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, H.Aubert, F.Pressecq, R.Plana  
‘Reliability of Micro-machined Structures on Membrane for Space Applications’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003
- [124]. B.Ducarouge, E.Perret, F.Flourens, H.Aubert, J.W.Tao, X.Chauffleur, J.P.Fradin, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, R.Plana  
‘Design methodology for High Power MEMS-Based RF Switches’, 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. B29-B32
- [125]. K.Yacine, F.Flourens, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, R.Plana, M.Sartor, L.Dantas  
‘Mechanical characterization of metallic bridges used in RF MEMS’,  
\* 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-

- 4, 2003, pp. B33-B36  
 \* 14th MicroMechanics Europe Workshop (MME'03), Delft, Netherlands, Nov. 2-4, 2003, pp. 25-28
- [126]. M.Saadaoui, A.Muller, P.Pons, L.Bary, D.Neculoiu, F.Giacomozzi, D.Dubuc, K.Grenier, L.Rabbia, D.Vasilache, R.Plana  
 'Fabrication of silicon based micromachined antennas for millimeter-wave applications', 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. D15-D18
- [127]. L.Rabbia, F.Flourens, P.Pons, K.Grenier, D.Dubuc, R.Plana, Y.Segui  
 'Technological process for suspended millimeter wave switches',  
 \* 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. H17-H21  
 \* 14th MicroMechanics Europe Workshop (MME'03), Delft, Netherlands, Nov. 2-4, 2003, pp. 111-114
- [128]. X.Lafontan, P.Schmitt, F.Pressecq, Q.H.Duong, D.Veyrie, P.Pons, J.Kuchenbecker, L.Rabbia, F.Flourens, K.Grenier, R.Plana  
 'Sensitivity of RF MEMS to environmental stresses', 4th Workshop on Mems for Millimeterwave Communication (MEMSWAVE), Toulouse, France, July 2-4, 2003, pp. A15-A18
- [129]. F.Bouchriha, K.Grenier, D.Dubuc, P.Pons, R.Plana, J.Graffeuil  
 'Minimization of passive circuits losses realized on low resistivity silicon using micromachining techniques and thick polymer layers', IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS'2003), Philadelphia, USA, June 8-13, 2003, pp. 959-962
- [130]. F.Bouchriha, K.Grenier, D.Dubuc, P.Pons, J.Graffeuil, R.Plana  
 'Novel technological solution to improve both Q factor and losses of passive circuits on low resistivity silicon', IV Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, Grainau-Garmisch, Germany, April 9-11, 2003, pp. 115-117

## 2002

- [131]. V.Lubecke, K.Grenier, J.Lin  
 'Production oriented post-processed 3-D inductors for RFIC's', Asia-Pacific Microwave Conference APMC, Kyoto, Japan, November 19-22, 2002, pp. 967-970
- [132]. X.Chauffleur, L.Rabbia, P.Pons, K.Grenier, R.Plana, L.Dantas  
 'Effect of membrane shape on mechanical behavior of RF switches', Eurosensors 16<sup>th</sup> European Conference on Solid-State Transducers, Prague, Czech Republic, September 15-18, 2002, pp. 92-95
- [133]. L.Rabbia, P.Pons, K.Grenier, R.Plana, X.Chauffleur, L.Dantas  
 'Effect of membrane shape on mechanical behavior of RF switches', 3rd workshop on MEMS for millimeter WAVE communications, Heraklion, Greece, June 26-28, 2002

## 2001

- [134]. K.Grenier, P.Pons, R.Plana, J.Graffeuil  
 'Bulk Silicon Micro-machined MEMS Switches for Millimeter-Wave Applications', European Microwave Conference, London, UK, September 24-28, 2001
- [135]. P.Pons, K.Grenier, L.Rabbia, T.Parra, R.Plana, P.Caudrillier, P.Combes, O.Pascal, H.Aubert, A.Takacs, M.Salez, G.Gol'tsman  
 'Membrane supported circuits for millimetric and sub-millimetric waves-length', 26th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW'2001), Toulouse (France), September 10-14, 2001
- [136]. K.Grenier, L.Rabbia, P.Pons, A.Takacs, T.Parra, J.Graffeuil, H.Aubert, R.Plana  
 'Advanced analysis and design methods for RF and millimeter wave MEMS', 15th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD'01), Helsinki (Finland), August 28-31, 2001
- [137]. K.Grenier, P.Pons, T.Parra, R.Plana, J.Graffeuil  
 'Silicon MEM Technology for millimeter-wave applications', Symposium international Microelectronic and MEMS Technologies, Edinburgh, Scotland, UK, May 30 – June 1, 2001
- [138]. L. Bary, K.Grenier, G. Cibiel, J. Ibarra, P.Pons, L. Rabbia, O. Llopis, J.Graffeuil, G. Niu, J.D. Cressler, Z. Jin, S. Zhang, A.J. Joseph, R.Plana,  
 'Advanced silicon technologies for wireless applications', Workshop on RF Circuit Technology (RF'2001), Cambridge (GB), April 2, 2001, pp. 197-201

**2000**

- [139]. K.Grenier, P.Pons, T.Parra, J.Graffeuil, R.Plana  
‘Silicon Based Micromachining Technology for Advanced Microwave and Millimeter wave applications’, IEEE International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania, Oct 2000, pp 433-436
- [140]. K.Grenier, P.Pons, R.Plana, J-L.Cazaux, C.Boulanger, T.Parra, J.Graffeuil  
‘Highly compact micromachined coplanar bandpass filter’, 30<sup>ième</sup> European Microwave Conference 2000, Paris, France, October 6-8, 2000, pp. 129-132
- [141]. K.Grenier, P.Pons, T.Parra, R.Plana, J.Graffeuil  
‘Silicon microelectromechanical systems for millimeter-wave applications’, Proc. of DTIP of MEMS/MOEMS, Proc. of SPIE, Vol. 4019, Paris, France, May 2000, pp. 354-361

**1999**

- [142]. B.Guillon, K.Grenier, T.Parra, P.Pons, D.Cros, P.Blondy, J.Graffeuil, J-L.Cazaux, R.Plana  
‘High performances silicon micromachining based structures for millimeter-wave applications’, Workshop on Micromachined Circuits for Microwave and Millimeter-wave Applications “MEMSWAVES”, Sinaia, Roumania, Oct. 99
- [143]. B.Guillon, K.Grenier, P.Pons, J-L.Cazaux, J-C.Lalaurie, D.Cros, R.Plana  
‘Silicon micromachining for millimeter-wave applications’, Proc. of 9<sup>th</sup> Canadian Semi-conductor Conference, Ottawa, August 99
- [144]. B.Guillon, K.Grenier, P.Pons, D.Cros, T.Parra, J-L.Cazaux, J-C.Lalaurie, J.Graffeuil, R.Plana  
‘Design and realization of high Q millimeter-wave structures through micromachining techniques’, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, USA, June 99, pp. 1519-1522

**1998**

- [145]. B.Guillon, K.Grenier, E.Saint Etienne, P.Pons, T.Parra, J-C.Lalaurie, J.Graffeuil, R.Plana  
‘Design and technological trends for Si micromachined millimeter-wave circuits’, 2<sup>nd</sup> ESA Workshop on Millimeter-wave Technology and Applications : Antennas, Circuits and Systems, Espoo, Finland, May 98, pp. 74-79

**Conférences nationales****2008**

- [146]. K. Grenier  
‘Intégration de microsystèmes RF pour applications en bio-ingénierie’, Journée Francophone de la Recherche (JFR'2008), Tokyo (Japon), Nov. 27, 2008
- [147]. S. Pacchini, K. Grenier, D. Dubuc, T. Ricart, C. Cojoracu, D. Pribat, E. Flahaut  
‘Possibles utilisations de nanotubes de carbone pour des applications micro-ondes’, 11<sup>èmes</sup> Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique (JNRDM'2008), Bordeaux (France), May 14-16, 2008
- [148]. S. Pacchini, D. Dubuc, E. Flahaut, K. Grenier  
‘Etude du polymère BenzoCycloButène dopé à l’aide de nanotubes de carbone pour applications micro-ondes’, 10<sup>èmes</sup> Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM'2008), Limoges (France), April 2-4, 2008

**2007**

- [149]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, M. Paillard, J.L. Cazaux  
‘Tuner d’impédance à base de commutateurs MEMS en bande K’, XV<sup>e</sup> Journées Nationales Microondes (JNM'2007), Toulouse (France), May 23-25, 2007
- [150]. S. Pacchini, D. Dubuc, E. Flahaut, K. Grenier  
‘Etude d’un matériau composite polymère à base de nanotubes de carbone aux fréquences micro-ondes’, XV<sup>e</sup> Journées Nationales Microondes (JNM'2007), Toulouse (France), May 23-25, 2007
- [151]. T. Ricart, S. Pacchini, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
‘Modélisation électromécanique d’un nano-interrupteur à base de nanotubes de carbone pour applications hyperfréquences’, XV<sup>e</sup> Journées Nationales Microondes (JNM'2007), Toulouse (France), May 23-25, 2007
- [152]. C. Bordas, K. Grenier, D. Dubuc, M. Paillard, J.L. Cazaux  
‘Optimisation du procédé de fabrication de micro-commutateurs MEM capacitifs: application à un tuner



d'impédance 20GHz', 10<sup>èmes</sup> Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique (JNRDM'2007), Lille (France), May 14-16, 2007

## 2005

- [153]. B. Ducarouge, F. Coccetti, L. Mazonq, L. Bary, J. Rayssac, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'Conception et caractérisation de MEMS-RF de puissance', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005
- [154]. S. Melle, D. De Conto, L. Mazonq, D. Dubuc, K. Grenier, L. Bary, O. Vendier, J.L. Muraro, J.L. Cazaux, R. Plana  
'Modélisation du phénomène de chargement du diélectrique des MEMS-RF capacitifs', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005
- [155]. D. De Conto, S. Melle, D. Dubuc, S. Assie-Souleille, N. Mauran, K. Grenier, R. Plana  
'Prédiction de la fiabilité des MEMS-RF capacitifs par caractérisation de diélectriques', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005
- [156]. J.P. Busquère, K. Grenier, D. Dubuc, R. Plana, P. Ancey  
'Conception d'un amplificateur faible bruit reconfigurable en fréquence à base de micro-commutateurs MEMS RF', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005
- [157]. F. Bouchriha, D. Dubuc, D. Bourrier, P. Dubreuil, R. Plana, K. Grenier  
'Amélioration du facteur de qualité de circuits passifs sur silicium basse résistivité pour applications millimétriques', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005
- [158]. F. Coccetti, B. Ducarouge, E. Scheid, D. Dubuc, K. Grenier, R. Plana  
'Analyse thermique expérimentale de MEMS-RF de puissance', XIVe Journées Nationales Microondes (JNM'2005), Nantes (France), May 11-13, 2005

## 2004

- [159]. K.Grenier, D.Dubuc, F.Bouchriha, P.Pons, R.Plana,  
'Etude des potentialités de technologies à base de polymères pour applications millimétriques', *papier invité* aux 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004
- [160]. B. Ducarouge, E. Perret, H. Aubert, E. Ongareau, X. Chauffleur, J.P. Fradin, D. Dubuc, P.Pons, K.Grenier, F.Bouchriha, R.Plana,  
'Méthodologie de conception pour commutateurs MEMS de puissance', 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004
- [161]. F.Bouchriha, A. Rennane, P.Pons, R.Plana, D. Dubuc, K.Grenier  
'Compatibilité de procédés technologiques liés à la fabrication de dispositifs passifs micro-ondes suspendus sur circuits actifs SiGe', 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004
- [162]. J.P. Busquère, K.Grenier, G. Bouche, D. Dubuc, R. Plana, P. Ancey  
'Développement d'un amplificateur faible bruit reconfigurable en fréquence à base de micro-commutateurs MEMS', 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004
- [163]. S. Melle, F. Flourens, D.Dubuc, K. Grenier, P.Pons, J.L. Muraro, O. Vendier, R.Plana,  
'Etude de la dégradation du diélectrique des MEMS RF capacitifs', 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004
- [164]. B. Espana, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, R.Plana,  
'Conception d'un filtre accordable à base de MEMS en technologie Si/BCB microruban', 7<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Feb. 25, 2004

## 2003

- [165]. F.Bouchriha, D.Dubuc, M.Saadaoui, P.Pons, R.Plana, K.Grenier  
'Développement et caractérisation d'une technologie 3D sur polymère pour applications hyperfréquences', 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Lille, France, May 21-23, 2003
- [166]. S.Mellé, B.Ducarouge, D.Dubuc, T.Paillot, L.Rabbia, K.Grenier, P.Pons, P.Blondy, L.Bary, P.Calmon, R.Plana, J-C.Cayrou  
'Conception d'un Single Pole Double Throw à base de commutateurs MEM', accepté aux 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Lille, France, May 21-23, 2003

- [167]. B.Ducarouge, D.Dubuc, L.Rabbia, P.Pons, K.Grenier, R.Plana  
‘Structures optimisées de commutateurs MEM RF’, accepté aux 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Lille, France, May 21-23, 2003
- [168]. J.Kuchenbecker, L.Bary, F.Flourens, L.Rabbia, D.Dubuc, K.Grenier, P.Pons, , R.Plana, J-L.Roux, H.Aubert, A.Takacs  
‘Comportement thermique de structures micro-usinées pour applications micro-ondes’, soumis aux 13<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Lille, France, May 21-23, 2003
- [169]. F.Bouchriha, D.Dubuc, M.Saadaoui, P.Pons, R.Plana, K.Grenier  
‘Minimisation des pertes pour circuits passifs sur silicium basse résistivité’, Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Jan. 29, 2003
- [170]. F.Bouchriha, D.Dubuc, P.Pons, J-P.Busquère, R.Plana, K.Grenier  
‘Interconnexions 3D pour applications aux fréquences millimétriques’, Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Jan. 29, 2003
- [171]. B.Ducarouge, D.Dubuc, S.Mellé, M.Saadaoui, L.Rabbia, K.Grenier, P.Pons, L.Bary, P.Calmon, R.Plana, J-C.Cayrou  
‘Conception d'un Single Pole Double Throw à base de commutateurs MEM’, 3<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Jan. 29, 2003
- [172]. B.Ducarouge, D.Dubuc, L.Rabbia, P.Pons, K.Grenier, R.Plana  
‘Structures optimisées de commutateurs MEM RF’, 3<sup>èmes</sup> Journées Micro-ondes et Electromagnétisme de Toulouse (JMET), Toulouse, France, Jan. 29, 2003

## 2001

- [173]. K. Grenier, L. Rabbia, P. Pons, T.Parra, R.Plana, J. Graffeuil  
‘Technologie micro-usinée pour commutateurs électro-mécaniques sur silicium à forte isolation pour applications millimétriques’, 12<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Poitiers, France, May 2001
- [174]. R.Plana, P. Pons, J. Graffeuil, K. Grenier, A. Tacaks, T.Parra, H. Baudrand, H. Aubert  
‘Nouvelle topologie de filtre micro-usiné coplanaire pour les communications en bande Ka’, 12<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Poitiers, France, May 2001
- [175]. H.Baudrand, H.Aubert, P.Caudrillier, J.C.Cayrou, P.Combes, J.Graffeuil, K.Grenier, O.Pascal, T.Parra, R.Plana, P.Pons, L.Rabbia, A.Sarremejean, A.Takacs  
‘Module de réception multimédia micro-usinée sur silicium’, Journées d'Electronique 2001 "Electronique Aéronautique et Spatiale", Toulouse (France), March 15-16, 2001
- [176]. K. Grenier, L. Rabbia, P. Pons, R.Plana, J. Graffeuil  
‘Composants électromécaniques pour applications millimétriques’, 4<sup>ième</sup> Journée d'Electromagnétisme et Micro-ondes de Toulouse (JMET), Jan. 30, 2001

## 2000

- [177]. K. Grenier, P. Pons, L. Rabbia, T. Parra, R. Plana, J. Graffeuil  
‘Micro-commutateurs silicium à haute isolation pour applications millimétriques’, Journées Micro et Nanotechnologies, Paris, November 7-8, 2000
- [178]. K.Grenier  
‘Conception de circuits coplanaires micro-ondes micro-usinés sur silicium’, Séminaire annuel de l'Ecole doctorale de Génie Electrique, Electronique, Télécommunications (GEET), Toulouse, March 2000
- [179]. K.Grenier, P.Pons, R.Plana, J-L.Cazaux, J.Graffeuil  
‘Conception de circuits coplanaires micro-usinés sur silicium’, 3<sup>ième</sup> Journée d'Electromagnétisme et Micro-ondes de Toulouse, Jan. 13, 2000

## 1999

- [180]. K.Grenier, B.Guillon, G.Blasquez, R.Plana, J-L.Cazaux, C.Boulanger, J.Graffeuil  
‘Technologie faibles pertes et faible coût pour circuits coplanaires hyperfréquences’, Forum ADEMIS, Paris, Nov. 99
- [181]. K.Grenier, B.Guillon, P.Pons, R.Plana, J-C.Lalaurie, J-L.Cazaux, J.Graffeuil  
‘Etude d'une discontinuité coplanaire micro-usinée sur silicium’, 11<sup>èmes</sup> Journées Nationales Micro-ondes (JNM), Arcachon, France, May 99, pp. 1B6

- [182]. B.Guillon, K.Grenier, P.Pons, D.Cros, J-C.Lalaurie, J-L.Cazaux, T.Parra, R.Plana, J.Graffeuil  
‘Cavité résonante micro-usinée utilisant les modes de galerie des résonateurs diélectriques’, 11<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Arcachon, France, May 99, pp. 1B4
- [183]. J.A.Reynoso-Hernandez, C.F.Estrada-Maldonado, T.Parra, K.Grenier, J.Graffeuil  
‘Détermination de la constante de propagation  $\gamma$  des lignes de transmission d’impédance uniforme aux fréquences millimétriques’, 11<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Micro-ondes (JNM), Arcachon, France, May 99, pp. 5A3
- [184]. K.Grenier, P.Pons, R.Plana, T.Parra, J.Graffeuil  
‘Etude d’une discontinuité coplanaire micro-usinée sur silicium’, Journées Nationales du Réseau doctoral de Microélectronique, Bordeaux, May 99

### **1997**

- [185]. B. Guillon, E.Saint Etienne, K. Grenier, P.Blondy, P. Pons, G.Blasquez, T.Parra, J. Graffeuil, J-C. Lalaurie, R.Plana  
‘Le micro-usinage pour le développement des micro-systèmes micro-ondes’, Forum ADEMIS, Paris, Nov. 97

## **Workshops et séminaires**

### **2010**

- [186]. K.Grenier, D. Dubuc  
‘Les ondes hyperfréquences comme outil d'analyse biologique’, Seminar on "Diagnostic et thérapie du cancer de la peau", Toulouse, France, July 9, 2010, <http://www.laas.fr/Club-Affilies/manifestations.html>
- [187]. K.Grenier, D. Dubuc  
‘Les ondes hyperfréquences comme outil d'analyse biologique’, Rencontre ICR-LAAS, Toulouse, France, Feb. 11, 2010

### **2009**

- [188]. K.Grenier, D. Dubuc  
‘Microsystèmes Radio-fréquences pour la bio-ingénierie’, Seminar on "Des Sciences et Technologies des Systèmes vers la Santé", Toulouse, France, March 3, 2009, <http://www.laas.fr/Club-Affilies/manifestations.html>

### **2002**

- [189]. K.Grenier  
‘MEMS RF et leurs applications’, GREMO workshop, Toulouse, France, Feb. 14, 2002

### 3. Publications significatives

1. K. Grenier, D. Dubuc, P-E. Poleni, M. Kumemura, H. Toshiyoshi, T. Fujii, H. Fujita, 'Integrated Broadband Microwave and Microfluidic Sensor dedicated to Bioengineering', *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, n°12, Dec. 2009, pp. 3246-325
2. K. Grenier, C. Bordas, S. Pinaud, L. Salvagnac, D. Dubuc, 'Germanium resistors for RF MEMS based microsystems', *Microsystem Technologies Journal*, Springer, Vol 14, n°4-5, April 2008, pp. 601-606
3. M. Dragoman, K. Grenier, D. Dubuc, L. Bary, R. Plana, E. Fourn, E. Flahaut, 'Millimeterwave carbon nanotube gas sensor', *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, n°10, 106103, May 2007
4. E. Ojefors, K. Grenier, L. Mazonq, F. Bouchriha, A. Rydberg, R. Plana, 'Micromachined Inverted F Antenna For Integration on Low Resistivity Silicon Substrates', *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, Issue 10, Oct. 2005, pp. 627-629
5. K. Grenier, D. Dubuc, L. Mazonq, J-P. Busquère, B. Ducarouge, F. Bouchriha, A. Rennane, V. Lubecke, P. Pons, P. Ancey, R. Plana, 'Polymer based technologies for microwave and millimeterwave applications', *invited paper at the 50<sup>th</sup> IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, USA, December 13-15, 2004
6. D. Dubuc, K. Grenier, **Book chapter** entitled: 'RF-MEMS based tuner for microwave and millimeterwave applications', in 'Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies: Semiconductor Devices, Circuits and Systems', In-Tech, n° ISBN 978-953-307-031-5, 2010