

## Compte rendu du Conseil Scientifique MINAS du 27 Mai 2009

Présents : M. Bafleur, F. Cristiano, D. Dragomirescu, C. Fontaine, J.Y. Fourniols, O. Gauthier-Lafaye, J. Graffeuil, A.M. Gué, B. Rousset

### Ordre du jour :

- proposition de profils EC

Le CS fait un tour de table informel sur les discussions engagées avec le LATTIS. Ce point-là sera traité de façon formelle après la réunion du 4 Juin.

### Profils EC :

A l'issu de dernier conseil de pôle 8 propositions de profil avait été identifiées :

1 Poste MC 28 (N2IS)

2 postes de prof 63 : M2D et Photonique

5 postes de MC 63 : 1 MINC, 1 MOST, 2 ISGE, 1 N2IS

Suite aux discussions inter-groupes :

- Le groupe M2D retire ses 2 propositions de profil
- Le groupe ISGE met en priorité le profil « énergie » et retire l'autre
- Les groupes ISGE et N2IS fusionne leurs deux profils « énergie » dans un profil plus large sur cette thématique

Il est décidé de traiter indépendamment d'une part les sections différentes et d'autre part les profils MC et prof puis d'arbitrer l'interclassement.

Comme l'année précédente, le CS souhaite que le besoin en 28° soit réaffiché de manière à réaffirmer notre présence au sein de cette communauté et notre besoin dans le domaine.

Le CS souhaite souligner la pertinence de tous les profils proposés vis-à-vis des orientations scientifiques et stratégiques du laboratoire.

En 63°, les profils MC sont classés comme suit :

- 1- « Ingénierie de l'énergie électromagnétique : application au développement de composants millimétriques et THz avancés » (Groupe MINC). Le CS a reconnu de façon unanime le nombre sous-critique de permanents dans le groupe et l'absence de recrutement depuis sa création

- 2- Ex aequo : « Sources de fréquence basées sur des approches hybrides optique & micro-ondes pour la métrologie, les capteurs et la génération THz » (MOST) et « Energie » (N2IS-ISGE) : le CS n'a pas souhaité différencier les 2 profils afin de ne pas créer d'effet mémoire, les perspectives pour ces 2 postes étant très lointaines (2012 dans le meilleur des cas).

Les 2 profils MC (MINC) et prof (Photonique) correspondent tous les deux à des priorités fortes. L'interclassement doit donc prendre soigneusement en compte les chances respectives de création de ces 2 profils. Le CS demande à la direction de s'assurer de ce point de façon que le classement définitif garantisse le maximum de chance de succès. Toutefois, dans le cas où les chances de création d'un profil prof seraient avérées, le CS préconise de favoriser cette option.

Les différents profils sont donnés en annexe.

**UFR PCA**

**Campagne 2010-2011**

Priorité du laboratoire :

Profil Professeur :

**Systemes photoniques sur puce**

## **I. Domaine scientifique**

### *1.1. Fondements théoriques sous jacents*

La photonique est définie comme la science qui génère, manipule et utilise les photons au sein de matériaux, composants, instruments et systèmes .C'est un domaine de recherche en plein essor, bénéficiant d'une fertilisation croisée entre les avancées fondamentales en optique quantique, optique non linéaire, optique atomique, plasmonique, ... et les progrès technologiques qui permettent désormais la réalisation de matériaux et structures à l'échelle nanométrique et sub-longueur d'onde. De plus, par son caractère diffusif, la photonique joue un rôle clé dans une grande diversité de domaines – transport et traitement de l'information, métrologie, analyse chimique ou biologique etc..., et suscite ainsi de nombreux enjeux de recherche sur les matériaux, les fonctionnalités optiques et l'architecture des systèmes photoniques pour faire face au foisonnement d'applications et de domaines pluridisciplinaires.

Le grand défi de la photonique est donc d'explorer des voies nouvelles, qui élargissent le champ traditionnel de l'optique, en allant bien au-delà de l'assemblage de composants optiques « sur étagère ». La photonique doit surmonter plusieurs défis :

- 1) la conception et le développement de composants photoniques spécifiques de l'application concernée (gamme spectrale d'utilisation, fonctionnalité concernant l'émission, la détection, la modulation, le filtrage, etc..), avec un objectif de recherche de performances ultimes et de technologies génériques pour réduire le coût et favoriser un développement à grande échelle. Les principales filières technologiques ont été développées sur des semiconducteurs composés III-V (GaAs, InP, ..) pour répondre à l'origine aux besoins des télécommunications par fibre optique, car le silicium, le verre ou les polymères offrent des fonctionnalités limitées (notamment absence de source de lumière en silicium).
  
- 2) La photonique doit faire face à l'extrême diversité des structures de composants, des filières technologiques, et des principes d'utilisation de l'optique au sein des systèmes. C'est un obstacle majeur pour répondre à des besoins de miniaturisation et/ou de multifonctionnalité photonique

exprimés dans tous les systèmes actuels (réseaux tout optique, instrumentation optique embarquée, interconnexions optiques dans les processeurs, etc). Des recherches portent sur l'exploration de voies alternatives pour faire émerger de nouvelles technologies à partir d'architectures innovantes, de nouveaux concepts de composants et de nouveaux types de matériaux. L'apport des nano-matériaux (îlots et fils quantiques, nanocristaux), des nanotechnologies, et des concepts issus de la nanophotonique sont à l'origine de ruptures, qui permettent l'émergence de fonctionnalités optiques « extraordinaires » (ultra-réflexion, lentille « parfaite », cape d'invisibilité, etc..) et de nouvelles perspectives d'intégration photonique (par l'exploitation de concepts de confinements optiques ultimes, et d'approches technologiques génériques comme les cristaux photoniques).

- 3) Le dernier grand défi concerne l'intégration de l'optique dans un système quelconque. Ceci implique la mise en œuvre de méthodologies de conception et des approches technologiques pour intégrer l'optique par voie hétérogène avec des fonctionnalités électroniques, mécaniques, thermiques, acoustiques, chimiques, ou fluidiques.

Dans ce contexte très évolutif de la photonique, **la problématique de l'intégration photonique est un verrou majeur**, concernant toutes les filières de matériaux. Le thème central de ce profil concerne l'étude des concepts d'intégration de fonctions photoniques sur puce, pour répondre de façon la plus générique possible aux demandes croissantes en systèmes photoniques compacts et fonctionnels, et pour favoriser leur intégration au sein de systèmes multifonctionnels.

L'intégration concerne tout d'abord l'intégration sur composés III-V, avec la problématique de l'intégration de la source laser sur une puce. L'intégration de la source constitue, à l'heure actuelle, un défi essentiel, qu'il est indispensable de surmonter pour accéder à des systèmes laser sur puce et des circuits photoniques intégrés actifs. L'objectif est d'intégrer sur la même puce la source avec une fonctionnalité optique (par exemple une conversion de fréquence), d'améliorer le couplage optique des lasers à semiconducteur avec le monde extérieur, par exemple en intégrant des microoptiques polymère pour améliorer les caractéristiques spatiales du faisceau.

De façon plus générale, l'ambition est de développer des systèmes photoniques sur puce, pour lever le verrou de l'intégration photonique dans les systèmes. Il s'agit d'une approche pluridisciplinaire, au carrefour de plusieurs technologies. Elle concerne l'exploitation des alliages III-V et du silicium, des matériaux et circuits de la microélectronique ou des nouveaux matériaux à base d'îlots quantiques, nanocristaux, nanofils, etc pouvant être hybridés ou intégrés afin de développer :

- des sources optiques hybrides originales, des nouvelles fonctions optiques intégrables ou hybridées, ultra-compactes, et hautement performantes, permettant de manipuler la lumière à des échelles de la longueur d'onde, dans la perspective de laboratoires optiques sur puce
- des fonctions opto-électroniques pour systèmes optiques « intelligents » incorporant des fonctions de traitement du signal et/ou de commande pour l'analyse, l'instrumentation, les capteurs communicants, ...
- des fonctions opto-fluidiques répondant aux besoins de l'analyse biologique ou en milieu liquide, ou le développement de fonctions originales pour la biologie et la chimie
- de nouvelles architectures de systèmes intégrant l'optique, dans des capteurs et instruments miniaturisés, des systèmes nomades, des systèmes de diagnostic et de traitement médicaux, ...

### 1.2. Domaines d'application potentiels

La « convergence » entre l'électronique et la photonique est considérée à l'heure actuelle comme une des étapes clé pour faire évoluer la photonique de l'ère de la transmission de l'information (télécommunications) à celle du traitement de l'information (capteurs, images, processeurs, ..). Elle requiert de nouveaux concepts de composants, des architectures de systèmes innovantes et des

approches génériques compatibles avec un développement en fonderies et un faible coût. Son importance a suscité, dès 2005, l'élaboration d'une « feuille de route » spécifique au MIT, établissant les grandes lignes prospectives de la « microphotonique Silicium » et montrant ainsi son intérêt économique stratégique. La photonique sur silicium est notamment considérée comme l'élément clé du développement des futures générations de processeurs (levée du verrou des interconnexions par l'optique, introduction de fonctions optiques). L'hybridation – ou mieux encore l'intégration- de fonctions optiques sur silicium accroîtra la fonctionnalité des capteurs tant pour apporter des fonctions de détection ou d'instrumentation, que pour constituer une voie alternative (ou complémentaire) à la communication RF dans le cadre de capteurs communicants, ou même d'apporter un complément d'énergie (photovoltaïque) pour des capteurs autonomes.

Plus récemment, en 2006, une nouvelle Plateforme européenne « Photonics21 » a été constituée, regroupant tous les acteurs européens industriels de la photonique. Elle souligne le rôle diffusant de la photonique dans différents domaines : information et communication, fabrication industrielle, biologie et santé, éclairage et visualisation, sécurité, métrologie, capteurs, ... Les besoins en composants et systèmes photoniques ont été précisés, ainsi que les avantages attendus grâce aux avancées de la nanophotonique (feuille de route MONA).

Ces « roadmaps » ont identifié plusieurs axes d'étude, mettant en évidence le foisonnement des recherches dans le domaine :

- matériaux à faible dimensionnalité, filières III-V et nouvelles filières semiconductrices ou organiques pour la photonique, matériaux auto-organisés, méta-matériaux pour l'optique, matériaux sub-longueur d'onde en particulier cristaux photoniques, nano-cristaux hybrides, colloïdes, etc
- nouveaux phénomènes issus de l'optique quantique et de l'optique non linéaire pour la cryptographie, le calcul quantique, les horloges atomiques, etc
- sources optiques hautes performances ou intégrables, sources pour l'éclairage et la visualisation, nouveaux composants pour l'imagerie, la métrologie, les réseaux optiques, les sciences de la vie, l'intelligence ambiante, ...
- architectures d'intégration 3D, micro-optiques, exploitation préférentielle des technologies compatibles avec celles du CMOS (« silicon photonics ») pour des développements à grande échelle de fonctions compactes, ou pour utilisation du silicium comme support d'intégration hétérogène
- exploitation de nouvelles approches en nano-optique (champ proche, plasmonique,...), en architectures optiques (réseaux tout optique, circuits logiques optiques, ...).

Encore très exploratoires, la nanophotonique et les nanotechnologies commencent à peine à être exploités au niveau industriel, mais de véritables « révolutions » sont attendues dans la décennie qui vient, à la fois sur des composants individuels et sur des systèmes photoniques sur puce pour des applications clé de l'optique ( traitement de l'information, communication, métrologie, environnement, santé, multimedia, etc...

### 1.3. Thème émergent/activité déjà reconnue

Le verrou de l'intégration photonique est très clairement identifié dans diverses « feuilles de route » aux USA, en Europe, en Asie. Les recherches en « silicon photonics » sont particulièrement actives aux USA, dans la perspective de développement des futurs processeurs, en Asie pour répondre à la demande croissante en équipements multimedia (en particulier nomades) ou à l'installation des réseaux optiques métropolitains (au Japon).

Il s'agit d'un domaine encore émergent, car les recherches en photonique étaient jusqu'à récemment impulsées par les besoins des télécommunications optiques, centrées sur des filières de semi-conducteurs III-V. L'intégration sur silicium est actuellement limitée à des fonctions passives ou de traitement de signal, car le silicium a une structure de bande défavorable pour l'émission de lumière. Les solutions les plus avancées consistent à reporter des composants III-V sur des substrats silicium. Par ailleurs, il n'existe à ce jour aucun concept générique d'intégration monolithique : l'intégration photonique se limite à l'intégration de peu de composants, généralement passifs, l'intégration des sources étant encore un obstacle majeur.

#### 1.4. Sélection de revues, congrès et manifestations traitant du sujet

Revues :

IEEE Photonics Technology Letters

IEEE Journal of Quantum Electronics

IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics

IEEE Sensors Journal

Electronics Letters

Optics Express

Optics Letters

Nature Photonics

Advances in Optical Technologies

Applied Physics Letters

Journal of Applied Physics

IEEE Journal of Lightwave Technology

Congrès/Manifestations:

Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Europe & USA)

Photonics West, Etats-Unis

IEEE Conference on Semiconductor Lasers

Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering

Silicon photonics Conference, Etats-Unis

Integrated Photonics Research and Applications Topical Meeting

ECIO – European Conference on Integrated Optics

ECOC- European Conference on Optical Communications

JSAP-MicroOptics Conference

### 1.5. Publications de référence

- European MONA (Merging Optics and Nanotechnologies) project, *A European roadmap for photonics and nanotechnologies*, [http://www.ist-mona.org/pdf/MONA\\_v15\\_190308.pdf](http://www.ist-mona.org/pdf/MONA_v15_190308.pdf)
- S. Noda and T. Baba, *Roadmap on photonic crystals*, Springer, ISBN 1402074646, Jul 2008
- C. Genet and T. W. Ebbesen, *Light in tiny holes*, Nature, 4 January 2007
- S. Boutami, B. Ben Bakir, L. J.L., X. Letartre, C. Seassal, P. Rojo-Romeo, P. Regreny, M. Garrigues, and P. Viktorovitch, *Photonic crystal-based MOEMS devices*, IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 13, pp. 244-252, 2007
- R. Soref, *The past, present, and future of Silicon photonics*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.12 (6), November/December 2006
- B. Jalali and S. Fathpour, *Silicon photonics*, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 24, pp. 4600-4615, 2006
- Ming C. Wu, O. Solgaard and Joseph E. Ford, *Optical MEMS for lightwave communication*, Journal of Lightwave Technology, vol.24(12), December 2006
- D. Psaltis, S. R. Quake and C. Yang, *Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics*, Nature, 27 July 2006
- Yu. A. Vlasov, M.O'Boyle, H. Hamann and S. J. McNab, *Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides*, Nature, 3 November 2005
- E. Yablonovitch, *Photonic crystals*, Journal of modern optics, vol. 41, pp. 173-194, 1994.

## II. Positionnement du sujet dans la communauté scientifique et dans le laboratoire

Au sein du laboratoire, cette thématique de recherche est au cœur des besoins pour l'intelligence ambiante et les systèmes embarqués. Elle concerne les nouveaux composants pour les réseaux optiques (systèmes laser, filtrage, multiplexage, ..), les composants miniatures et fonctionnels pour les applications nomades, les systèmes photoniques hautement fonctionnels et compacts pour l'instrumentation embarquée et le diagnostic sur puce... L'optique apporte une approche complémentaire pour l'étude et le développement de micro-nano systèmes dédiés à la biologie et à des applications fluidiques, et son intégration avec des systèmes fluidiques ouvre la voie à des laboratoires sur puce opto-fluidiques ou à des voies d'analyse à l'échelle moléculaire. La levée des verrous associés à l'intégration photonique permettrait au laboratoire de couvrir un large spectre de fonctionnalités sur puce, en complément avec celles déjà étudiées (fonctions RF, chimiques, intégration de sources d'énergie, etc). Elle s'inscrit ainsi dans le cadre de collaborations déjà en

cours, en particulier avec les groupes M2D et N2IS pour les aspects technologiques, MOST et MINC pour les études électromagnétiques et des concepts de dispositifs innovants.

La thématique implique le développement de méthodologies de conception, procédés de réalisation technologique et méthodologies de caractérisation qui bénéficient des savoir-faire antérieurs et enrichissent la compétence générale du LAAS à travers la mise au point et l'exploitation d'outils communs sur les différentes plate-formes du laboratoire.

Au niveau du site toulousain, les collaborations de longue date autour des composants III-V seront renforcées par l'intérêt porté actuellement sur les nouvelles structures comportant des îlots quantiques ou à base de métamatériaux (cristaux photoniques, plasmonique). Un BQR a été récemment proposé conjointement avec le CEMES et le LPCNO sur les spectroscopies optiques assistées par nanostructures plasmoniques de molécules uniques pour capteurs et bio-puces.

Le projet MAISOE a été retenu dans le cadre du RTRA, un des objectifs étant d'étudier des voies d'analyse optique en milieu aqueux, et dans des conditions extrêmes, avec des équipes de chimistes (ENSIACET) et de géologues (LEGOS) (développement d'un capteur de méthane pour la recherche de sources hydrothermales au fond des mers).

Cet axe intéresse très vivement le CNES qui a le besoin de composants optiques ultra performants et de systèmes compacts et miniatures. Le CNES a ainsi soutenu récemment nos travaux sur la démonstration de nouvelles filières de filtres optiques ultra sélectifs à partir de technologies de la microélectronique. Ce travail a permis d'atteindre des performances supérieures à l'état de l'art. Un nouveau projet dans une gamme spectrale en moyen infra-rouge a débuté en 2009.

De façon plus générale, les systèmes photoniques sur puce devraient intéresser toutes les applications embarquées dès les premières démonstrations de faisabilité, en particulier pour des fonctions de communication ou d'analyse. De même, le couplage de l'optique, avec la biologie, la chimie et la fluidique devrait ouvrir la voie à de nouvelles générations de capteurs pour l'analyse. La thématique de ce profil est en adéquation avec les priorités locales, en particulier du RTRA et des pôles de compétitivité.

Au niveau national, cette thématique est encore peu développée dans les laboratoires académiques. Les laboratoires les plus impliqués sont :

l'IEF à Orsay qui étudie notamment les filières SiGe pour les interconnexions optiques, en collaboration étroite avec ST Microelectronics,



l'INL à Lyon qui étudie les interconnexions optiques et de façon générale la faisabilité de circuits de traitement optiques par une approche hybride de report de puces III-V sur circuits silicium, en collaboration avec le LETI

le LPN est focalisé sur les composants photoniques III-V et étudie des approches d'épitaxie autorisant une croissance directe de matériaux III-V sur silicium

Le développement technologique a une part essentielle dans cette activité de recherche. La centrale technologique du LAAS qui fait partie du réseau RENATECH des grandes plateformes technologiques permet non seulement le développement de travaux internes, mais aussi de nombreuses collaborations fructueuses avec des équipes ne disposant pas de tels moyens, ou dont l'équipement ne permet pas la réalisation complète des dispositifs. La réalisation de démonstrateurs nous a ainsi conduit à tisser un réseau de collaborations avec de nombreuses équipes de la photonique (LPN, IEF, FEMTO, IES, Institut Fresnel, LPMC Nice, ...).

Nous participons au GDR « Ondes » qui traite des concepts de dispositifs associés aux développements les plus récents de la photonique, en particulier le groupe de travail GT2 qui est consacré aux structures de bandes interdites photoniques ou soniques, microcavités, milieux complexes et biologiques (<http://gdr-ondes.lss.supelec.fr/index.htm>). Il n'existe pas, à ce jour, un GDR particulièrement concerné par la problématique des composants photoniques et de leur intégration dans les micro-nano systèmes, cependant une réflexion est entreprise à l'échelle nationale pour fédérer les efforts dans le domaine. Différents membres du LAAS sont impliqués dans l'animation nationale de la photonique et les groupes de réflexion : département ST2I du CNRS, conseil scientifique du programme interdisciplinaire OPV, groupe de réflexion photonique du ministère de la Recherche et de l'enseignement Supérieur, réflexion prospective de l'OMNT (composants optiques), animation la SFO, groupes de réflexion prospective du CNES (participations à plusieurs CCT), ...

Au niveau international, la photonique est reconnue un enjeu économique important comme décrit précédemment.

Plateforme Photonics21 : <http://www.photonics21.org/>

Feuille de route MONA: <http://www.ist-mona.org/home.asp>

Feuille de route MIT : [http://mph-roadmap.mit.edu/about\\_ctr/report2005/](http://mph-roadmap.mit.edu/about_ctr/report2005/)

L'intégration photonique est traitée par le réseau Européen ePIXnet (<http://www.epixnet.org/>) lancé lors du FP6 qui offre le partage d'un ensemble de plateformes technologiques dédiées à des opérations technologiques spécifiques.

### III. Positionnement du laboratoire dans la thématique du poste

#### Sélection de publications rattachées à cette thématique issues du laboratoire :

##### **Brevets**

**[B1]** P.Arguel , F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, O.Bouchard, *Dispositif de détection d'interférences monolithique intégré*, Brevet n° PCT/FR2007/001914, déposé le 21 novembre 2007, n° de publication internationale : WO2008074939 (A1), juin 2008.

**[B2]** G.Almuneau, A.Munoz-Yague, T.Camps, C.Fontaine, V.Bardinal, [\*Procédé d'oxydation planaire pour réaliser un isolant enterré localisé\*](#), Brevet CNRS FR2881876, n° de publication internationale : WO2006082322, 10 Août 2006.

##### **Revue scientifique internationale avec comité de lecture**

**[R1]** A.Larrue, O.Bouchard, A.Monmayrant, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, A.Arnoult, P.Dubreuil, F.Lozes-Dupuy, [\*Precise frequency spacing in photonic crystal DFB laser arrays\*](#), IEEE Photonics Technology Letters, Vol.20, N°24, pp.2120-2122, Décembre 2008

**[R2]** S.Hernandez, O.Gauthier-Lafaye, A.L.Fehrembach, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, A.Sentenac, *High performance 2D resonant grating filter at 850nm under high oblique incidence of ~ 60°*, Applied Physics Letters, vol. 92, pp. 131112, 2008.

**[R3]** K.Koukos, E.Bedel-Pereira, O.Gauthier-Lafaye, E.Scheid, L.Bouscayrol, B.Franc, P.Arguel, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, *Effect of annealing conditions on photoluminescence properties of low-pressure chemical vapour deposition-grown silicon nanocrystals*, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, N°1, pp.130-132, Janvier 2008.

**[R4]** P.Arguel, J.Valentin, O.Bouchard, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, *Diffraction grating for an integrated CMOS-compatible optical phase-shift sensor*, IEEE Sensors Journal, Vol.7, N°12, pp.1757-1758, Décembre 2007.

**[R5]** M.Boutillier, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, L.Lombeze, D.Lagarde, X.Marie, F.J.Vermersch, M.Calligaro, M.Lecomte, O.Parillaud, M.Krakowski, O.Gilard, [\*Electron irradiation effects on Al-free laser diodes emitting at 852 nm\*](#), IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.54, N°4, pp.1110-1114, Août 2007

**[R6]** C.Amat, G.Almuneau, P.Gallo, L.Jalabert, S.Moumdji, P.Dubreuil, T.Camps, J.B.Doucet, E.Havard, V.Bardinal, C.Fontaine, A.Munoz-Yague, [\*Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures\*](#), Electronics Letters, Vol.43, N°13, pp.730-732, Juin 2007

- [R7] V.Bardinal, E.Daran, T.Leichle, C.Vergnenegre, C.Levallois, T.Camps, V.Conedera, J.B.Doucet, F.Carcenac, H.Ottevaere, H.Thienpont, [Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter](#), Optics Express, Vol.15, N°11, pp.6900-6907, Mai 2007
- [R8] S.Hernandez, O.Bouchard, E.Scheid, E.Daran, L.Jalabert, P.Arguel, S.Bonnefont, O.Gauthier-Lafaye, F.Lozes-Dupuy, *850 nm wavelength range nanoscale resonant optical filter fabrication using standard microelectronics techniques*, Microelectronic Engineering, Vol.84 (4), pp.673-677, Avril 2007.
- [R9] S.Bonnefont, B.Messant, M.Boutillier, O.Gauthier-Lafaye, F.Lozes-Dupuy, A.Martinez, V.Sallet, K.Merghem, L.Ferlazzo, J.C.Harmand, A.Ramdane, J.G.Provost, B.Dagens, J.Landreau, O.Le Gouezigou, X.Marie, [Optimization and characterization of InGaAsN/GaAs quantum-well ridge laser diodes for high frequency operation](#), Optical and Quantum Electronics, Vol.38, N°4-6, pp.313-324, Mars 2006
- [R10] R.Muller, D.Cristea, C.Tibeica, P.Arguel, P.Pons, F.Rossel, D.Syrydis and M.Kusko, *Tunable Fabry-Perot surface micromachined interferometer – experiments and modelling*, Microsystem Technologies, Vol.12 (1-2), pp.91-97, Décembre 2005.
- [R11] T.Camps, C.Bringer, V.Bardinal, G.Almuneau, C.Amat, E.Daran, J.B.Doucet, P.Dubreuil, C.Fontaine, [High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs](#), Electronics Letters, Issue 3, Vol.41, pp.129-131, Février 2005
- [R12] P.Arguel, J.Valentin, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, Y.Jourlin, S.Reynaud, N.Destouches, A.Tishchenko, J.Jay, *A Monolithic Optical Phase-Shift Detector on Silicon*, IEEE Sensors Journal, Vol.5 (6), pp.1305-1309, Décembre 2005.
- [R13] S.Fourment, P.Arguel, J.L.Noullet, F.Lozes-Dupuy, S.Bonnefont, G.Sarrabayrouse, Y.Jourlin, J.Jay, O.Parriaux, *A silicon integrated opto-electro-mechanical displacement sensor*, Sensors & Actuators A, Issues 1-3, Vol.A110, pp.294-300, Février 2004.

### Conférences internationales à comité de sélection et actes

- [C1] S.Hernandez, O.Gauthier-Lafaye, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, [Normal incidence optical filters for space applications using nanophotonics](#), Nano South-West European Conference (NanoSWEC), Bordeaux (France), 3-5 Novembre 2008
- [C2] P.H.Merrer, O.Llopis, S.Bonnefont, L.Ghisa, Y.Dumeige, P.Feron, G.Cibiel, [Microwave filtering using High Q optical resonators](#), European Microwave Week (EuMW 2008), Amsterdam (Pays Bas), 27-31 Octobre 2008
- [C3] O.Bouchard, A.Larrue, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, F.Pommereau, F.Poingt, L.Le Gouezigou, O.Le Gouezigou, O.Drisse, E.Derouin, G.H.Duan, [CW electrical operation of single-mode all photonic crystal DFB-like laser](#), 14th European Conference on Integrated Optics (ECIO'08), Eindhoven (Pays Bas), 11-13 Juin 2008
- [C4] S.Hernandez, O.Gauthier-Lafaye, A.L.Fehrembach, A.Sentenac, S.Bonnefont, P.Arguel, F.Lozes-Dupuy, *2D resonant grating optical filters for 850 nm wavelength, in normal and oblique incidence*, CLEO USA / Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, USA, May 2008.
- [C5] C.Levallois, V.Bardinal, T.Camps, T.Leichle, E.Daran, J.B.Doucet, C.Vergnenegre, [VCSEL collimation using self-aligned integrated polymer microlenses](#), SPIE Photonics Europe, Strasbourg (France), 7-11 Avril 2008

- [C6] A.Larrue, O.Bouchard, A.Monmayrant, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, [Affine deformation of photonic crystal to fine control the emission wavelength of DFB like laser](#), EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2007, Barcelone (Espagne), 21-23 Novembre 2007
- [C7] C.Levallois, T.Leichle, V.Bardinal, T.Camps, J.B.Doucet, E.Daran, C.Vergnenegre, [Self-aligned polymer microlenses fabrication for VCSEL beam shaping](#), Optical Microsystems (OMS'07), Capri (Italie), 30 Septembre - 3 Octobre 2007
- [C8] M.Boutillier, C.Barquin, X.Dollat, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, V.Ligeret, M.Calligaro, M.Lecomte, O.Parillaud, M.Krakowski, O.Gilard, [Proton irradiations effects on Al-free laser diodes emitting at 852 nm for caesium atomic clocks applications](#), 44th Annual International Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC 2007), Honolulu (USA), 23-27 Juillet 2007
- [C9] K.Koukos, E.Bedel-Pereira, L.Bouscayrol, E.Scheid, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, G.Sarrabayrouse, F.Lozes-Dupuy, [Light emission from LPCVD silicon nanocrystals: the effect of composition and annealing](#), Conference on Lasers and Electro-Optics. International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - IQEC 2007), Munich (Allemagne), 17-22 Juin 2007
- [C10] M.Boutillier, O.Gauthier-Lafaye, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, F.J.Vermersch, M.Krakowski, O.Gilard, [Strong electron irradiation hardness of 852 nm Al-free laser diodes](#), 17th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF'2006), Wuppertal (Allemagne), 3-6 Octobre 2006
- [C11] V.Bardinal, E.Daran, C.Vergnenegre, T.Leichle, Y.Segui, T.Camps, J.B.Pourciel, V.Conedera, L.Gavin-Djiddal, M.Guirardel, [Design and fabrication of polymer microlenses arrays for VCSELs using a cantilever-based microsystem](#), Photonics Europe, Strasbourg (France), 3-7 Avril 2006
- [C12] C.Vergnenegre, T.Camps, V.Bardinal, C.Bringer, C.Fontaine, A.Munoz Yague, [Integrated optical detection subsystem for functional genomic analysis biosensor](#), Photonics North 2005, Toronto (Canada), 12-14 Septembre 2005
- [C13] V.Bardinal, C.Bringer, T.Camps, E.Daran, G.Almuneau, C.Amat, C.Fontaine, [Integrated photodetection in VCSELs](#), Invited paper. 7th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON'2005), Barcelone (Espagne), 3-7 Juillet 2005
- [C14] D.Cristea, R.Muller, P.Arguel, P.Pons, M.Kusko, C.Tibeica, D.Syvridis, *Micromachined tunable optical microfilters design and experimental processing*, Photonics Europe, Strasbourg (France), 26-30 Avril 2004.
- [C15] P.Arguel, S.Bonnefont, F.Lozes-Dupuy, O.Dellea, M.de Labachellerie, C.Chappaz, *A frequency stabilized semiconductor laser microsource based on MOEMS technology*, Invited paper, 26<sup>th</sup> International Semiconductor Conference (CAS 2003) Sponsorisée par IEEE, Sinaia (Romania), 28 Sept / 2 Oct 2003.
- [C16] P.Arguel, J.Valentin, S.Fourment, F.Lozes-Dupuy, G.Sarrabayrouse, S.Bonnefont, Y.Jourlin, S.Reynaud, N.Destouches, A.Tishchenko, J.Jay, *A monolithic phase measurement photodetector*, IEEE International Conference on Sensors (IEEE SENSORS 2003), Toronto (Canada), 21-24 Oct 2003.

#### **Soutiens déjà obtenus :**

- PAI Brancusi : *Intégration de photodétecteurs et de composants photoniques dans les microsystèmes (2005-2006)*
- PAI Picasso : \*\*\*\*\*

PAI Orchid : *Surface plasma enhanced photoemission from crystalline silicon quantum dots embedded in silicon nitride matrix*

- 
- Projet IST OPTONANOGEN : *Integrated Opto-Mechanical Biosensor for Genomic Analysis (2002-2005)*
- Projet IST FUNFACS : \*\*\*\*\*
- Projet ANR CRISPI : *Lasers à cristaux photoniques pour spectroscopie infrarouge (2007-2010)*
- Projet ANR-NANO FOREAC : *Filtres optiques à réseaux accordables (2006-2008)*
- Projet RNRT précompétitif AHTOS : *Accès haut débit par transmetteur optique simplifié (2002-2006)*
- Projet RNRT exploratoire CRISTEL : *Cristaux photoniques pour la réalisation d'une source d'émission laser à longueur d'onde sélectionnable (2002-2006)*
- Projet ACI-NANO SpinLEDs : *Réalisation de diodes luminescentes à puits et boîtes quantiques à électrons polarisés en spin, nanostructuration de la surface de GaAs pour l'épitaxie de boîtes quantiques à organisation dirigée (2003-2005)*
- Projet RTRA-STAE MAISOE : *Microlaboratoires d'analyses in situ pour des observatoires environnementaux (2009-2013)*
- Convention de recherches CNES n° 92XXX/00 : *Etude et réalisation de filtres spectraux de nouvelle génération, très sélectifs en longueur d'onde, travaillant dans le moyen infrarouge (fév.2009- fév.2012)*
- Convention de recherches CNES n° 4800000258 (ref CNRS n° 050068) : *Etude et réalisation de filtres optiques nanostructurés (sept 2005-sept 2007)*
- BQR LAAS / CEMES / LPCNO : *Spectroscopies optiques assistées par nanostructures plasmoniques de molécules uniques pour capteurs et bio-puces (2007)*

#### **IV. Impact du recrutement**

Equipe bénéficiaire

Ce profil correspond à la thématique centrale du Groupe Photonique qui est constitué par 8 membres permanents (2 DR CNRS, 5CR CNRS, 1 MC), et 8 doctorants.

Liste des membres permanents :

G Almuneau (CR)

P Arguel (MC)

V Bardinal (CR)

S Bonnefont (CR)

C Fontaine (DR)

O Gauthier Lafaye (CR)

F Lozes (DR)

A Monmayrant (CR)

Le groupe s'appuie sur la Centrale Technologique du LAAS et les services du laboratoire.

Le groupe est parmi les plus petits groupes du LAAS. Les permanents sont principalement des chercheurs CNRS et le recrutement d'un professeur contribuerait à apporter un meilleur équilibre enseignant/chercheur, indispensable pour parvenir à une vision cohérente et concertée des orientations scientifiques et de leurs retombées dans la formation et la diffusion des connaissances. Nous souhaitons consolider au sein du groupe et du LAAS une meilleure dynamique de la thématique « système photonique sur puce », en raison de son intérêt stratégique et pluridisciplinaire. En effet, les travaux antérieurs menés dans le groupe ont montré que nous avons pu prendre des risques avec succès dans ce domaine émergent. La présence d'un professeur permettrait de créer un axe de recherche bien identifié, et de fédérer les actions en cours non seulement au sein du groupe mais aussi (et surtout) avec les autres groupes du LAAS et les différents partenaires cités précédemment. Etant donné le caractère pluridisciplinaire de cette activité, le rôle d'un professeur sera essentiel pour couvrir un large champ disciplinaire ( chimie, biologie, espace, télécommunications, etc..) et favoriser une meilleure insertion de nos activités au plan international.

Comme décrit plus haut, le thème s'inscrit totalement dans la politique scientifique du groupe et du laboratoire. Il contribuera notamment à amplifier les synergies autour de futurs microsystèmes complexes faisant appel à des fonctions optiques. Ce renforcement des axes stratégiques du laboratoire permettrait de plus un positionnement original et particulièrement pertinent dans les axes stratégiques du LAAS, à la fois pour le développement des projets autour de la plateforme ADREAM, que pour des approches innovantes en biologie.

## Fiche de définition de poste d'enseignant chercheur

UFR PCA

Campagne 2009-2010

Priorité du laboratoire :

Profil souhaité : Ingénierie de l'énergie électromagnétique : application au développement de composants millimétriques et THz avancés

### Thématique scientifique du poste

#### 1. *Domaine scientifique (3 pages)*

##### 1.1. Fondements théoriques sous jacents

Il est admis que la maîtrise et la structuration de l'énergie électromagnétique permet de développer des composants micro-ondes de traitement de d'information (filtres, résonateurs, antennes, coupleurs, matrices de routages, synthétiseurs d'impédances..). Différentes approches peuvent être utilisées pour réaliser cette ingénierie de l'énergie électromagnétique et concernent soit des modifications de l'équation de dispersion, soit des modifications des dimensions des dispositifs dans lesquels va se propager, se modifier l'énergie électromagnétique à partir de la relation suivante :

$\Delta\phi = \beta L$  où L est la longueur du dispositif et  $\beta$  la constante de propagation liée à l'équation de dispersion des champs électromagnétiques. A partir de cette relation simple, il apparaît que la modification de l'énergie électromagnétique pourra se faire en faisant varier de façon permanente ou temporaire ces deux paramètres. Cela peut se faire soit en utilisant des matériaux spécifiques, soit des périodicités dans la structuration de l'énergie électromagnétique, soit en utilisant des couplages multi-physiques qui permettent de modifier cette répartition de l'énergie.

Le profil aborde ces diverses approches d'ingénierie de l'énergie électromagnétique et nous allons dans la suite les spécifier.

La première approche visant à exploiter les couplages multi-physiques afin de venir modifier localement les impédances caractéristiques des dispositifs et donc du confinement de l'énergie électromagnétique. Cette approche est illustrée sur la figure 1 où l'on voit une membrane qui va être actionnée sous l'effet d'un champ électrostatique et qui va venir se mettre en contact avec le dispositif. Il s'agit d'une catégorie de composants micro-ondes à couplage électromécanique dont les performances sont extrêmement attractives en termes de pertes d'insertion, d'isolation et de linéarités.

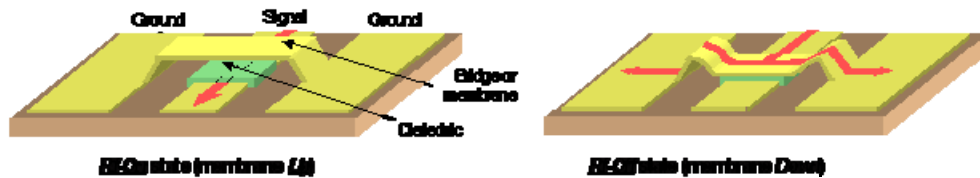


Figure 1 : Exemple d'un composant micro-onde à couplage électromécanique

Ce type de composant souffre aujourd'hui de problèmes de fiabilité dus à des mécanismes de dégradation intrinsèques qui occupent pas mal d'équipes de recherche de part le monde dont le LAAS. Un autre aspect concerne la montée en fréquence de ce type de composant vers les fréquences millimétriques jusqu'aux THz ce qui va se traduire par des besoins de recherches au niveau des filières technologiques mais également au niveau des architectures.

La deuxième approche d'ingénierie de l'énergie électromagnétique consiste à utiliser des matériaux dits « intelligents » et en particulier des matériaux ferroélectriques ou multi-ferroïques qui vont permettre de modifier les constantes de permittivité diélectriques et/ou perméabilité magnétiques. Dans notre cas, nous envisageons d'explorer la voie « ferroélectrique » qui nous semble plus simple à mettre en œuvre et qui permet des potentialités de montée en fréquence supérieures. Nous avons choisi pour cela l'exploration des matériaux de type BST que nous étudions depuis deux ans en collaboration avec un laboratoire de l'université de Bordeaux et du CNRS (ICMCB) et pour lequel, nous avons obtenu des résultats au niveau de l'état de l'art mondial avec des accords fréquentiels supérieurs à 60% et des coefficients de qualité supérieurs à 50 à 30 GHz. Des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les non linéarités inhérentes à ces matériaux ainsi que leurs potentialités pour la montée en fréquence. Il faut également souligner que le couplage entre les matériaux ferroélectriques et l'approche multi-physiques est possible et sera envisagée car elle permettrait d'avoir simultanément des modifications analogiques et digitales ce qui donnera une grande flexibilité dans les architectures futures de composants millimétriques et THz. La figure 2 illustre un exemple d'un résonateur accordable à base de matériaux BST.



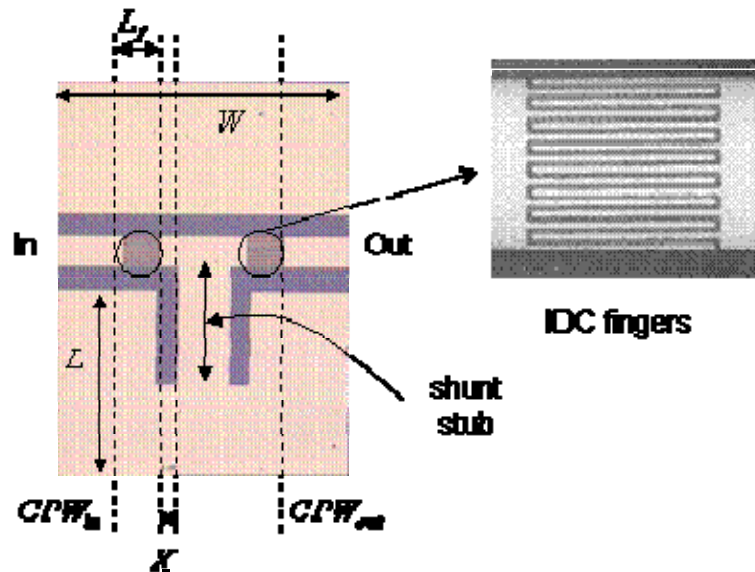


Figure 2 : exemple d'un résonateur millimétrique à base de BST

La troisième voie que nous envisageons consiste à une ingénierie permanente de l'énergie électromagnétique et ceci par l'intermédiaire de structuration surfacique et/ou volumique de substrats et/ou métallisation qui vont permettre d'avoir une modification de la constante de propagation, ce qui aura pour effet de pouvoir miniaturiser les futurs dispositifs et de pouvoir introduire le concept de composant multi-fonctionnel. Deux exemples peuvent être donnés. Le premier concerne le développement de résonateur micro-ruban dont on a structuré le plan de masse de façon à modifier l'équation de propagation et ce qui a permis sans dégrader les pertes de miniaturiser à plus de 75% le dispositif. Le second exemple consiste en une structuration volumique du substrat qui permet de pouvoir intégrer en 3 dimensions plusieurs composants et de pouvoir envisager de reporter en surface les dispositifs actifs qui permettront de réaliser des modules millimétriques ou THz ultra miniaturisés. La figure 3 donne un exemple de l'approche décrite qui se dénomme « SIRW » pour Substrate Integrated rectangular waveguide et qui consiste à introduire dans le volume d'un substrat des réseaux métalliques qui vont structurer l'énergie électromagnétique.

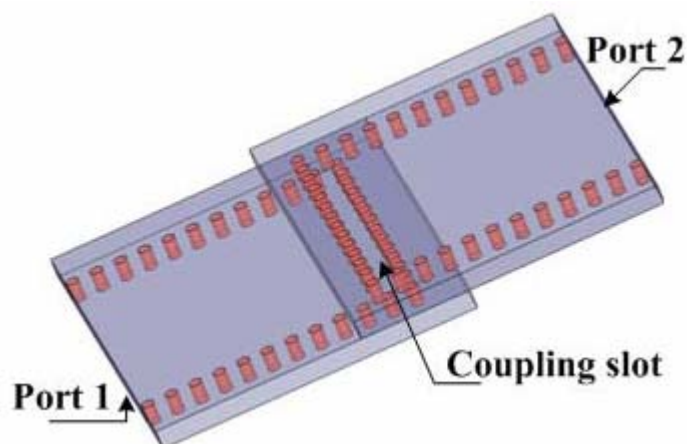


Figure 3 : Exemple d'une voie de structuration de l'énergie électromagnétique dans le volume des substrats.

Cette approche de structuration peut également se faire en 2 dimensions et une voie consiste à obtenir des permittivités et des perméabilités effectives négatives ce qui se traduit par une propagation d'énergie. Ce concept est appelé métamatériaux et ouvre des perspectives très intéressantes en terme d'architectures de dispositifs millimétriques et THz.

Il faut souligner que de façon analogue à précédemment, ce concept de métamatériaux sera élargi en y introduisant soit des matériaux ferroélectriques soit un couplage électromécanique, ce qui permettrait d'avoir des composants ultra miniaturisés mais dotés de fonctionnalités nouvelles comme la reconfiguration en puissance, en fréquence, voire la réparation de composants où le test embarqué (nous reviendrons sur ces points plus loin dans le document).

Les fondements théoriques dont nous venons de parler vont se traduire par des besoins en termes de modélisation électromagnétique et multi-physique qui aujourd'hui ne sont pas traités dans de bonnes conditions par les logiciels commerciaux. En effet, si nous prenons un exemple d'un réseau de déphaseurs à base de composants électromécaniques, nous avons à traiter un problème de grande dimension (dimension du réseau plusieurs centimètres) avec des facteurs d'échelles et des facteurs de dimensions très différents (une membrane électromécanique présente des dimensions de l'ordre de la centaine de microns) et cela se traduit par des matrices mal conditionnées et des problèmes de convergence et de temps de calcul rédhibitoires. Ils sont d'autant plus rédhibitoires que si on réduit les dimensions et que l'on veut « manipuler » l'énergie, il est important de pouvoir réaliser de l'optimisation électromagnétique ce qui aujourd'hui n'est pas possible avec les logiciels commerciaux ou très difficiles. L'approche que nous proposons est basée sur le développement de techniques de modélisation 2D et 3D obtenue en couplant des méthodes et en déployant ces méthodes sur des grilles de calcul (en utilisant le programme GRID5000) qui permettent de traiter ces problèmes complexes à grand nombre d'états de fonctionnement.

## 1.2. Domaines d'application potentiels

Les domaines d'applications potentiels que nous voyons sont de deux types. Tout d'abord, les concepts théoriques développés vont permettre d'envisager le développement de nouvelles générations de composants qui seront des briques indispensables aux futures générations d'architectures de communication sans fils qui devront présenter des fonctionnalités d'intelligence dans le domaine analogique. Un exemple concerne les amplificateurs de puissance dont on pourra adapter le rendement en puissance ajoutée en fonction de la puissance d'entrée ce qui aujourd'hui n'est pas possible et ce traduit par des pertes de puissance par effet joule qui impose d'introduire des dispositifs de contrôle de la température particulièrement lourds et onéreux. Avec la montée en fréquence au-delà de 100 GHz jusqu'au THz, il sera de plus en plus important de ne pas « dilapider » la puissance active et l'introduction de nouvelles générations de composants qui vont introduire de l'intelligence seront des atouts majeurs. Un autre exemple concerne les antennes intelligentes dont on pourra exploiter la diversité de phase et/ou d'amplitude et qui se traduira par des architectures simplifiées multifonctionnelles avec des performances énergétiques améliorées, ce qui constitue un enjeu très important pour le futur. Le dernier exemple d'application, vise à exploiter ces concepts d'ingénierie électromagnétique pour le développement de capteurs et/ou de

dispositifs de tests embarqués. En effet, en exploitant les couplages électromécaniques, nous avons pu démontrer la faisabilité de capteurs de pression très sensible à 30GHz et la montée en fréquence se traduira par des capteurs encore plus sensibles. Nous avons pu également exploiter le couplage multi-physique pour le développement de sonde de puissance très sensible au travers du couplage entre l'énergie électromagnétique, les effets thermiques et leurs impacts sur le tenseur des déformations. Il s'agit là d'approches très originales pas du tout traitées et pour lesquelles, nous voyons beaucoup de potentiel d'innovation pour le futur.

Le second type d'application concerne les applications industrielles. Elles sont de trois types. Le premier type vise des applications faible volume et forte valeur ajoutée et concerne le domaine de l'aéronautique, du spatial et de la défense où les besoins en circuits reconfigurables et en circuits aux fréquences millimétriques sont très importants. Par exemple, les capteurs THz sont une alternative très intéressante pour la détection de matière explosive et de nombreuses équipes sont en train de mener des recherches dans ce domaine. De même, les composants électromécaniques (MEMS RF) sont des composants prioritaires pour le spatial et l'aéronautique où il est détecté de fortes potentialités d'innovations. Il faut enfin souligner que ces composants vont amener de véritables ruptures dans les réseaux de capteurs sans fils dont on connaît l'importance pour l'aéronautique et le spatial où la concurrence pour le développement de nouveaux avions ou satellites ou leurs maintenance seront des avantages différenciateurs significatifs. Le second type d'application où les volumes sont plus importants concerne le secteur de l'automobile et de la santé où les MEMS RF pourront être mis à profit pour des radars anti-collisions à faible coût et miniaturisé ainsi que pour des réseaux de capteurs sans fils pour applications médicales où aujourd'hui les approches utilisées sont relativement anciennes et où nous détectons de fortes potentialités. Le dernier type concerne les applications à fort volumes qui concerne les communications mobiles avec la reconfiguration fréquentielle et en puissance et les réseaux de capteurs sans fils pour la surveillance de l'environnement qui est un enjeu de société très important et pour lequel il est important d'avoir des recherches au meilleur niveau.

Pour résumer les impacts industriels de ce type de profil, nous avons reporter sur la figure 4 une analyse réalisée par WTC en Allemagne dans le cadre d'un projet européen dont nous étions partenaire (ARRRO) qui montre l'intérêt qu'il peut y avoir pour ce type de recherche sur les nouvelles générations de composants micro-ondes intelligents.

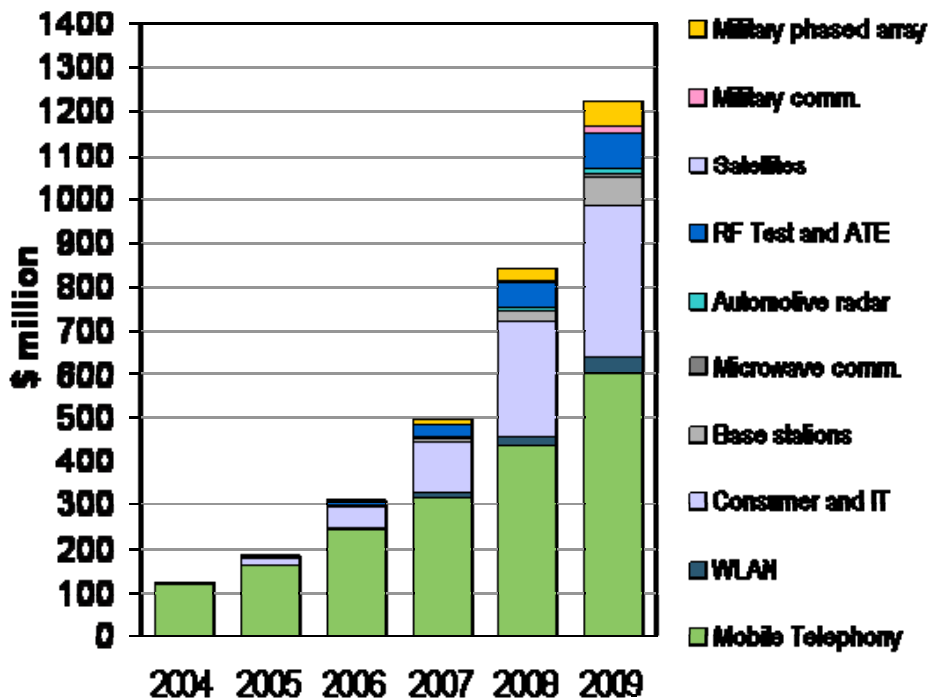


Figure 4 : Impact industriel des MEMS RF

### 1.3. Thème émergent/ activité déjà reconnue

Ce thème de recherche sur l'ingénierie de l'énergie électromagnétique en utilisant la structuration de la matière existe dans la communauté de l'électromagnétique depuis de nombreuses années. L'utilisation des couplages électromécaniques existent depuis 1991 (date de la première publication aux Etats-Unis) et le couplage entre la structuration et les couplages multi-physiques sont beaucoup plus jeunes (années 2000). Le LAAS a initié des activités de recherche dans le domaine de l'exploration du couplage électromécanique pour application micro-onde en 1995 (démarrage de l'activité de Patrick Pons et Robert Plana) et cette activité n'a cessé de monter en puissance depuis ces années avec de nombreux résultats et surtout une reconnaissance internationale forte qui a été concrétisé par le montage et la coordination d'un réseau d'excellence dans le domaine lors du 6<sup>e</sup> PCRD (AMICOM : European Network of excellence for RF and millimeter wave microsystems [www.amicom.info](http://www.amicom.info)) qui regroupait 22 acteurs majeurs du domaine et pour lequel, la commission européenne a souligné l'importance et l'excellence des résultats. Il faut souligner que ces concepts d'introduction de l'intelligence dans les architectures sans fils sont des priorités dans les agendas stratégiques des plateformes européennes (ENIAC : European Nanotechnology Initiative advisory council [www.eniac.eu](http://www.eniac.eu) et EPOSS :European Platform on Smart Systems [www.smart-systems-integration.org](http://www.smart-systems-integration.org)). Aujourd'hui, l'explosion des applications de communications sans fils (RFID, réseaux de capteurs sans fils) impose d'avoir des recherches importantes sur la modélisation, la conception de nouvelles approches qui permettront de développer des architectures en rupture et de pouvoir introduire beaucoup d'innovation. Il faut enfin souligner que les besoins en ingénieurs compétents dans ces disciplines seront en forte augmentation et il s'agit d'un secteur où les pays

asiatiques ne sont pas au niveau de l'Europe et pour lequel, il y a une course importante à ne pas perdre pour l'Europe et la France.

#### 1.4. Liste des journaux, des congrès et des manifestations traitant du sujet

Les journaux internationaux traitant du sujet :

Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, IEEE electron device letters, IEEE Transactions on electron device, Electronics Letters, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, IEEE transactions on antennas and propagation, Journal of Micromechanics and Microengineering, Microelectronics and reliability, IEEE transactions on reliability, Microwave and Optical technology letters, IEE proceedings, sensors and actuators, IEEE transaction on instrumentation and measurement.

Les conférences internationales

IEEE IMS : international microwave symposium, European Microwave conference, Transducers conference, MEMS conference, Eurosime Conference, MME conference, IEEE SIRF conference, IEEE antenna and propagation symposium. MRS conferences (Fall in Boston, Spring San Francisco), European MRS conference, SPIE conference micro and nanosystems.

#### 1.5. Publications de références sur le sujet (une dizaine au plus)

Lucyszyn, S.; "Review of radio frequency microelectromechanical systems technology" Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -

Volume 151, Issue 2, 3 March 2004 Page(s):93 - 103

Lubecke, V.M.; Mizuno, K.; Rebeiz, G.M.; Micromachining for terahertz applications

Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 46, Issue 11, Part 2, Nov. 1998 Page(s):1821 - 1831

Muldavin, J.B.; Rebeiz, G.M.; High-isolation CPW MEMS shunt switches. 2. Design

Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 48, Issue 6, June 2000 Page(s):1053 - 1056

Muldavin, J.B.; Rebeiz, G.M.; High-isolation CPW MEMS shunt switches. 1. Modeling

Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 48, Issue 6, June 2000 Page(s):1045 - 1052

.Nguyen, C.T.-C.; Katehi, L.P.B.; Rebeiz, G.M.; Micromachined devices for wireless communications Proceedings of the IEEE Volume 86, Issue 8, Aug. 1998 Page(s):1756 - 1768.

Zedler, M.; Caloz, C.; Russer A 3-D Isotropic Left-Handed Metamaterial Based on the Rotated Transmission-Line Matrix (TLM) Scheme, P.; Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 55, Issue 12, Part 2, Dec. 2007 Page(s):2930 – 2941

Ourir, A.; Burokur, S.N.; de Lustrac, A.; Electronically reconfigurable metamaterial for compact directive cavity antennas Electronics Letters, Volume 43, Issue 13, June 21 2007 Page(s):698 – 700.

Lorenz, P.; Vital, J.V.; Biscontin, B.; Russer, P.; TLM-G-a grid-enabled time-domain transmission-line-matrix system for the analysis of complex electromagnetic structures Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 53, Issue 11, Nov. 2005 Page(s):3631 – 3637.

Melle, S.; De Conto, D.; Dubuc, D.; Grenier, K.; Vendier, O.; Muraro, J.-L.; Cazaux, J.-L.; Plana, R.; Reliability modeling of capacitive RF MEMS Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Volume 53, Issue 11, Nov. 2005 Page(s):3482 – 3488.

Neculoiu D, Pons P, Saadaoui M, A.Muller and R.Plana "Membrane supported Yagi-Uda antennae for millimetre-wave applications" IEE PROCEEDINGS-MICROWAVES ANTENNAS AND PROPAGATION Volume: 151 Issue: 4 Pages: 311-314, AUG 2004

## **2. Positionnement du projet dans la communauté scientifique (3 pages)**

2.1. Sur le site du grand Toulouse : intégration dans la politique de site (réseaux thématiques de recherche, pôle de compétitivité), collaborations actuelles et futures d'équipes du site

Sur le site du grand Toulouse, cette thématique trouve un écho très important dans le réseau thématique de recherche avec d'ores et déjà un projet initié concernant des architectures millimétriques intelligentes (projet SYMIAE) ainsi que dans le pôle de compétitivité AESE avec deux projets majeurs. Le projet SACER qui vise à développer des réseaux de capteurs pour l'aéronautique et le spatial et où nous proposons des approches très originales pour la réalisation de nouvelles architectures de capteurs, antennes et dispositifs de transport de l'énergie électromagnétique et le projet DIAGNOSTAT qui vise à exploiter ces réseaux de capteurs sans fils pour le diagnostic des pièces avions en fin de vie.

D'un point de vue académiques, des collaborations très fortes sont développées avec le CIRIMAT sur l'exploitation des potentialités des nanotubes de carbone pour les futures générations de composants micro-ondes et pour le développement d'actionneurs piezoélectriques pour les MEMS RF. Avec le LAPLACE des collaborations existent de longue date sur la fiabilité des MEMS RF avec des thèses en co-tutelles et de nombreuses publications communes ainsi que des projets à la région midi-pyrénées. Des collaborations existent avec l'équipe AD2M sur des antennes bi fréquences et avec l'ISAE sur le développement de méthodologies de modélisation pour des structures 3D complexes, ces deux collaborations sous la forme de thèse en cotutelles.

Des collaborations sont en train d'être mises en place avec l'ONERA sur le développement de nouvelles approches pour la lecture des informations sur les réseaux de capteurs sans fils basées sur la signature électromagnétique des objets à étudier.

Avec le CNES de nombreuses collaborations sont menées dans le domaine des antennes miniaturisées et multi-bandes en utilisant le concept d'ingénierie électromagnétique.

Enfin une collaboration avec le LGMT sur l'étude des propriétés mécaniques des matériaux films minces qui sont utilisés dans les MEMS RF dont les connaissances sont indispensables pour le développement de micro-dispositifs intelligents à base de couplages électromécanique. Cette collaboration prend la forme de projets région Midi Pyrénées et de thèses en co-tutelle.

Au niveau industriel, des collaborations existent avec Thales Alenia Space, AIRBUS, INTESPACE, Freescale sur les MEMS RF. Il faut souligner des collaborations avec CONTINENTAL dans le domaine de la simulation électromagnétique de structures de grandes dimensions avec application à l'automobile. Enfin, ce thème donne lieu à une activité de R&D avec des PME (Epsilon, CRIL, DATUS, DELTA, NOVAMEMS, RECIF). Nous sommes actuellement en discussion pour la mise en place d'un laboratoire commun avec NovaMEMS sur la fiabilité des MEMS RF et sur la caractérisation des matériaux films minces pour les futures générations de composants millimétriques et THz.

## 2.2. Nationalement : positionnement de la thématique en regard des GDR et des groupes de travail nationaux

Au niveau national, nous sommes impliqués dans quatre GDR, le GDR ondes, le GDR Micro et Nanosystèmes, le GDR international NAMIS et le GDR SOC/SIP où les problèmes d'architectures et de simulation de systèmes complexes sont en train d'émerger en raison d'une miniaturisation et une complexité augmentée des modules de traitement de l'information et de la communication. Il faut souligner également que le test des modules sans fil est un enjeu majeur pour le futur et les approches très originales que nous proposons (basée sur des sondes de puissance enfouies) vont certainement intéresser beaucoup de personnes.

Nous avons des collaborations nationales avec l'IEMN, XLIM, le LEST sur ces thèmes au travers de projets de recherche et de thèses en co-tutelles.

## 2.3. Internationalement : intégration dans des réseaux d'excellence, des collaborations formalisées, principales équipes investissant dans cette thématique (nom du laboratoire, site Internet du labo, nom du leader de cette thématique dans ce laboratoire).

Au niveau international, nous avons monté un réseau d'excellence dans le cadre du FP6 (AMICOM, [www.amicom.info](http://www.amicom.info)) et nous l'avons coordonné scientifiquement deux ans (Robert PLANA) puis nous avons assuré uniquement la coordination administrative pour les deux autres années.

Ce réseau comprenait les acteurs majeurs européens du domaine, 13 pays et a reçu 5,5 M€ de la commission européenne (IMEC, FHG, VTT, IMEC, LAAS, LETI, IMT, EPFL, Uppsala, UlmUniv, Perugia Univ, TUM, IESL, NKUA, ITME, Leuven Univ, DELFT Univ, IEMN, XLIM, MINES ST Etienne).

Nous avons été également membre d'un autre réseau d'excellence coordonné par l'université de Lancaster (Andrew Richardsson) (PATENT) sur la fiabilité et le test des MEMS. Enfin, nous avons été membre d'un autre réseau d'excellence sur les Micro et nanosystèmes (MINOS) visant à introduire ce concept de système intelligent dans les pays émergents.

Nous avons également été impliqué dans de nombreux projet européens du 5° PCRD et 6°PCRD (Projet ARTEMIS MEMS RF pour radar à 24 GHz, ARRRO : roadmap MEMS RF, NanoRF : potentialités des nanotubes de carbone pour applications RF, MIMOSA : projet intégré sur MEMS pour l'intelligence ambiante).

Actuellement, nous avons un projet entre FREESCALE aux Etats-Unis et le LETI sur des MEMS RF à faible tension d'actionnement et nous avons un projet avec l'UPC à Barcelone soutenue par la coopération transpyrénéenne.

D'autres projets européens avec l'ESA ont été menés et pour certains sont encore en cours ainsi qu'un projet avec l'agence européenne de la défense.

Enfin d'un point de vue plus stratégique, nous avons monté un laboratoire européen associé avec l'IESL en Crète, l'IMT en Roumanie et le LAAS sur les nouvelles générations de microsystemes millimétriques et THZ qui a été accepté par le CNRS et dont la signature officielle va intervenir à l'été 2009.

---

## Structure effectuant la demande

---

### **3. Positionnement du laboratoire dans la thématique du poste (2 pages)**

#### 3.1. Liste des publications rattachées à cette thématique issues du laboratoire

Le tableau suivant présente les publications dans le domaine uniquement dans les revues et pour les trois dernières années qui correspondent à la date où a été crée le groupe de recherche « Micro et nanosystème pour les communications sans fils » au LAAS.

R.PLANA, What's hot in the field of RF components and systems. Invited paper. Microwave Journal, Vol.49, N°2, Février 2006

M.DRAGOMAN , A.CISMARU , H.HARTNAGEL , R.PLANA, Reversible metal-semiconductor transitions for



microwave switching applications. *Applied Physics Letters*, Vol.88, N°7, pp.073503-1-073503-3, 13 Février 2006

D.DRAGOMAN , M.DRAGOMAN, Voltage-controlled high-frequency oscillations based on suspended semiconducting carbon nanotubes. *Physical Review B*, Vol.73, N°12, Mars 2006

D.DRAGOMAN , M.DRAGOMAN, Electromagnetic wave propagation in dense carbon nanotube arrays. *Journal of Applied Physics*, Vol.99, N°7, Avril 2006

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, 10 Avril 2006

M.EXARCHOS , E.PAPANDREOU , P.PONS , M.LAMHAMDI , G.J.PAPAIIOANNOU , R.PLANA, Charging of radiation induced defects in RF MEMS dielectric films. *Microelectronics Reliability*, Vol.46, N°9-11 , pp.1695-1699, Septembre-Novembre 2006

M.LAMHAMDI , J.GUASTAVINO , L.BOUDOU , Y.SEGUI , P.PONS , L.BOUSCAYROL , R.PLANA, Charging-effects in RF capacitive switches influence of insulating layers composition. *Microelectronics Reliability*, Vol.46, N°9-11, pp.1700-1704, Septembre-Novembre 2006

E.PERRET , H.AUBERT , H.LEGAY, Scale changing technique for the electromagnetic modelling of MEMS-controlled planar phase-shifters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.54, N°9, pp.3594-3601, Septembre 2006

N.RAVEU , H.AUBERT , H.LEGAY, Are Cantor arrays effective for designing thinned arrays?. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol.48, N°10, pp.2041-2043, Octobre 2006

M.DRAGOMAN , A.MULLER , D.NECULOIU , D.VASILACHE , G.KONSTANTINIDIS , K.GRENIER , D.DUBUC , L.BARY , R.PLANA , E.FLAHAUT, High performance thin film bulk acoustic resonator covered with carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, Vol.89, N°14, 2 Octobre 2006

D.VOYER , H.AUBERT , J.DAVID, Scale changing technique for the electromagnetic modeling of planar self-similar structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.54, N°10, pp.2783-2789, 10 Octobre 2006

S.HEBIB , N.RAVEU , H.AUBERT, Cantor spiral array for the design of thinned arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.5, N°1, pp.104-106, 2006

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°2, pp.3593-3601, Décembre 2006

M.DRAGOMAN , A.TAKACS , A.MULLER , H.HARTNAGEL , R.PLANA , K.GRENIER , D.DUBUC, Nanoelectromechanical switches based on carbon nanotubes for microwave and millimeter waves. *Applied Physics Letters*, Vol.90, N°11, 113102p., Mars 2007

M.DRAGOMAN , K.GRENIER , D.DUBUC , L.BARY , R.PLANA , E.FOURN , E.FLAHAUT, Millimeter wave carbon nanotube gas sensor. *Journal of Applied Physics*, Vol.101, N°10, pp.106103-1-106103-2, Mai 2007

G.J.PAPAIOANNOU , J.PAPAPOLYMEROU , P.PONS , R.PLANA, Dielectric charging in radio frequency microelectromechanical system capacitive switches : a study of material properties and device performance. Applied Physics Letters, Vol.90, pp.233507-1-233507-3, Juin 2007

A.TAKACS , D.NECULOIU , D.VASILACHE , A.MULLER , P.PONS , L.BARY , P.F.CALMON , H.AUBERT , R.PLANA, Tunable bandstop MEMS filter for millimetre-wave applications. Electronics Letters, Vol.43, N°12, pp.675-677, Juin 2007

M.DRAGOMAN , D.DRAGOMAN , R.PLANA, Modelling of RF energy sensing and harvesting using the giant thermoelectric effect in carbon nanotubes. Applied Physics Letters, Vol.91, N°17, pp.173117-1-173117-3, Octobre 2007

E.PAPANDREOU , M.LAMHAMDI , C.M.SKOULIKIDOU , P.PONS , G.J.PAPAIOANNOU , R.PLANA, Structure dependent charging process in RF MEMS capacitive switches Microelectronics Reliability, Vol.47, N°9-11, pp.1812-1817, Octobre 2007

J.RUAN , N.NOLHIER , M.BAFLEUR , L.BARY , F.COCCETTI , T.LISEC , R.PLANA, Electrostatic discharge failure analysis of capacitive RF MEMS switches. Microelectronics Reliability, Vol.47, N°9-11, pp.1818-1822, Novembre 2007

M.AL AHMAD , M.BRUNET , S.PAYAN , D.MICHAU , M.MAGLIONE , R.PLANA, Wide-tunable low-field interdigitated barium strontium titanate capacitors. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.17, N°11, pp.769-771, Novembre 2007

M.DRAGOMAN , D.NECULOIU , A.CISMARU , D.DRAGOMAN , K.GRENIER , S.PACCHINI , L.MAZENQ , R.PLANA, High quality nanoelectromechanical microwave resonator based on a carbon nanotube array . Applied Physics Letters, Vol.92, N°06, pp.063118-1-063118-3, Mars 2008

K.GRENIER , C.BORDAS , S.PINAUD , L.SALVAGNAC , D.DUBUC, Germanium resistors for RF MEMS based microsystems. Microsystem Technologies, Vol.14, N°4-5, pp.601-606, Avril 2008

E.PAPANDREOU , M.LAMHAMDI , C.M.SKOULIKIDOU , P.PONS , G.J.PAPAIOANNOU , R.PLANA, Structure dependent charging process in RF MEMS capacitive switches .Microelectronics Reliability, Vol.47, N°9-11, pp.1812-1817, Octobre 2007.

M.AL AHMAD , L.SALVAGNAC , D.MICHAU , M.MAGLIONE , R.PLANA, Investigations of Indium Tin Oxide-Barium Strontium Titanate-Indium Tin Oxide heterostructure for tunability, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.18, N°6, pp.398-400, Juin 2008

N.RAVEU , E.PERRET , H.AUBERT , H.LEGAY, Scale changing technique: a design tool for reflectarray active cells. Proceedings of the European Microwave Association. Journal of the European Microwave Association, Vol.4, N°2, pp.163-168, Septembre 2008

H.BADR EL DIN EL SHAARAWY , F.COCCETTI , R.PLANA , M.EL-SAID , E.AHASHISH, Compact bandpass ring resonator filter with enhanced wide-band rejection characteristics using defected ground structures. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.18, N°8, pp.500-502, Septembre 2008

H.BADR EL DIN EL SHAARAWY , F.COCCETTI , R.PLANA , M.EL-SAID , E.AHASHISH, Defected

ground structures (DGS) and uniplanar compact-photonic band gap (UC-PBG) structures for reducing the size and enhancing the out-of-band rejection of microstrip bandpass ring resonator filters. WSEAS Transactions on Communications, Vol.11, N°7, pp.1112-1121, Septembre 2008

F.COCSETTI , D.PEYROU , M.AL AHMAD , V.PUYAL , P.PONS , H.AUBERT , R.PLANA, RF MEMS: status and perspectives. Physica Status Solidi C, Vol.5, N°12, pp.3822-3827, Novembre 2008.

J.RUAN , G.J.PAPAIOANNOU , N.NOLHIER , N.MAURAN , M.BAFLEUR , F.COCSETTI , R.PLANA, ESD failure signature in capacitive RF MEMS switches. Rapport LAAS N°08457, Microelectronics Reliability, Vol.48, N°8-9, pp.1237-1240, Novembre 2008

F.COCSETTI , R.PLANA, Simultaneous electro-thermal experimental analysis of RF-MEMS switches for high microwave power handling, Physica Status Solidi (a). Applications and Material Science, Vol.205, N°11, pp.2647-2650, Décembre 2008

H.ACHKAR , D.PEYROU , F.PENNEC , M.AL AHMAD , P.PONS , R.PLANA, Design to improve the capacitive contact quality in piezoelectric actuation, Physica Status Solidi (C), Vol.5, N°12, pp.3858-3861, Décembre 2008

V.PUYAL , D.DRAGOMIRESCU , R.PLANA, A new approach to RF MEMS shunt switch modeling from K-band up to W-band. Rapport LAAS N°08366, International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2008), Constanta (Roumanie), 28-31 Août 2008, 4p, Proceedings of SPIE. Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IV , Vol.7297, 729720p., Janvier 2009

S.HEBIB , H.AUBERT , O.PASCAL , N.FONSECA , L.RIES , J-M.E.LOPEZ, Multi-band pyramidal antenna loaded by a cut-off open-ended waveguide, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.57, N°1, pp.266-270, Janvier 2009

J.RUAN , E.PAPANDREOU , M.LAMHAMDI , M.KOUTSOURELI , F.COCSETTI , P.PONS , G.J.PAPAIOANNOU , R.PLANA, Alpha particle radiation effects in RF MEMS capacitive switches. Microelectronics Reliability, Vol.48, N°8-9, pp.1241-1244, Janvier 2009

### 3.2. Liste des soutiens déjà obtenus (contrats, projets ANR, BQR...)

De nombreux contrats et projets sont en cours et sont résumés ci-dessous.

- Projets régions
  - Fiabilité MEMS RF,
  - Réseaux réflecteurs
- Projets ANR
  - Programme blanc
    - Nature (nanotube pour applications RF)
    - Jeunes chercheurs : impact des MEMS RF sur réseaux de capteurs sans fils
    - ABSYS : composants accordables à base de matériaux ferroélectriques
  - Telecom
    - Velo : MEMS RF pour Radar anti-collision
    - R3MEMS : réseaux réflecteurs MEMS
  - PNANO
    - Fame : fiabilité MEMS RF

- Nanoterra : Composants TeraHertz utilisant l'effet Ratchet
  - Intercarnot
    - Melusine : MEMS RF à base de matériau piézoélectrique
  - RTRA
    - Projet SYMIAE : Systèmes Miniaturisés Intelligents pour l'Aéronautique et l'Espace
- Projets CNES
  - Exploration des technologies SIRW pour antennes miniaturisées
  - Antennes multibandes
- Projets Thales
  - Couplage méthode électromagnétiques 3D et 2D
- Pole de compétitivité
  - Projet SACER (collaboration avec cinq groupes du LAAS)
  - Projet Diagnostat (porteur N2IS)

### 3.3. Compétences pour traiter/évoluer vers cette thématique

Pour cette thématique, il est important d'avoir des compétences dans le domaine de la simulation électromagnétique et des techniques de simulation numérique afin d'aborder les simulations de circuits complexes. Il sera également nécessaire d'avoir des connaissances dans le domaine des technologies et architectures émergentes. Il faut enfin souligner que ce profil aura des impacts sur les recherches d'autres groupes du LAAS. En particulier, avec les groupes menant des recherches dans le domaine de la photonique et du développement de capteurs pourront bénéficier des compétences acquises en terme de simulation et modélisation pour créer des bras de levier scientifique dont l'ensemble du laboratoire et la communauté toulousaine pourront tirer bénéfice.

## 4. Impact du recrutement sur l'équipe au sein du laboratoire (1 pages)

### 4.1. Taille de l'équipe bénéficiaire (liste des membres intégrant le personnel technique)

Ce profil est présenté par le LAAS avec une insertion dans le groupe MINC « Micro et Nanosystèmes pour les communications sans fils » qui a été créé il y a deux ans et qui regroupait initialement :

5,5 membres permanents dont 1,5 provenant du CNRS mais depuis septembre 2 personnes sont parties au LIMMS au Japon et le groupe ne regroupe plus que 3,5 membres permanents, 10 CDD et 26 doctorants ce qui montre :

- La dynamique de la thématique de recherche
- La fragilité de la structure

### 4.2. Taille relative de l'équipe par rapport au laboratoire

Le LAAS est organisé suivant 18 groupes de recherche et ce groupe figure parmi les plus petits groupes du laboratoire surtout en nombre de permanents. En effet au niveau des permanents un seul groupe est plus petit que MINC. La taille des groupes du LAAS est comprise entre 3 permanents et une quarantaine de permanents. Au niveau du Ne, le groupe MINC est dans la moyenne des autres groupes (9° Sur 18 groupes de recherche) car il a un grand nombre de CDD et de doctorants

### 4.3. Adossement à la politique scientifique du laboratoire

La thématique défendue est parfaitement intégrée dans la dynamique scientifique du laboratoire avec une implication forte sur le domaine stratégique des micro et nanosystèmes pour les communications et des implications futures dans le cadre du CPER ADREAM où de nombreux projets sont inclus dans ce CPER

#### 4.4. Accompagnement prévu (moyens spécifiques)

Aujourd'hui, ce groupe est soutenu par le service II et TEAM avec des ingénieurs de recherche dont un poste viendrait d'être affecté pour la prochaine campagne. Il bénéficie également du fort soutien administratif du service partenariat pour l'aider dans les nombreux projets de recherche auxquels il participe.

Des moyens communs mi-lourds sont également prévus avec l'acquisition d'équipements millimétriques, d'une base d'antenne ainsi que d'une station de mesure en ambiance contrôlée. Enfin, dans le cadre de la plateforme de conception du LAAS un soutien très fort est apporté dans le domaine de la maintenance des moyens de calcul (accès cluster, licences logiciels, accès grille de calcul).