



## L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

**Titre (français) : Potentialités des plasmas froids pour la reconfigurabilité de dispositifs micro-ondes**

**Title (English): Non-thermal plasma potentialities for microwave device reconfigurability**

---

*J. Sokoloff\*\*\*, O. Pascal\*\*\*, T. Callegari\*\*\*, R. Pascaud\*\*\*, F. Pizarro\*\*\*, L. Liard\*\*\*, J. Lo\*\*\*, A. Kallel\*\*\**

\* Université de Toulouse, UPS-INPT LAPLACE, [jerome.sokoloff@laplace.univ-tlse.fr](mailto:jerome.sokoloff@laplace.univ-tlse.fr), [olivier.pascal@laplace.univ-tlse.fr](mailto:olivier.pascal@laplace.univ-tlse.fr), [thierry.callegari@laplace.univ-tlse.fr](mailto:thierry.callegari@laplace.univ-tlse.fr), [laurent.liard@laplace.univ-tlse.fr](mailto:laurent.liard@laplace.univ-tlse.fr), [justin.lo@laplace.univ-tlse.fr](mailto:justin.lo@laplace.univ-tlse.fr), [asma.kallel@laplace.univ-tlse.fr](mailto:asma.kallel@laplace.univ-tlse.fr)

\*\* CNRS, LAPLACE

\*\*\* Université de Toulouse, ISAE DEOS, [romain.pascaud@isae.fr](mailto:romain.pascaud@isae.fr), [f.pizarro-torres@isae.fr](mailto:f.pizarro-torres@isae.fr)

---

*Mots-clefs* (en français et en anglais) : Micro-ondes, plasma froid, métamatériaux, dispositifs, ondes de fuite  
Microwave, non-thermal plasma, metamaterials, devices, leaky waves

---

### Résumé

Nous présentons dans ce papier les travaux menés à Toulouse par des équipes issues des communautés micro-onde et plasma. L'objectif est d'utiliser un ou plusieurs plasmas froids pour rendre un dispositif micro-onde reconfigurable. En effet, la permittivité relative du plasma peut être contrôlée et varier de l'unité jusqu'à des valeurs négatives. L'exploitation de cette propriété s'avère potentiellement très intéressante. En revanche, aux fréquences micro-ondes les pertes électromagnétiques sont importantes. D'autre part, le contrôle de la pression et l'intégration des électrodes au sein d'un dispositif micro-onde requièrent des configurations spécifiques. Dans ce papier nous présentons quelques exemples de résultats obtenus liés à l'intégration de plasmas dans des métamatériaux ou dans des structures planaires. En complément le principe d'une antenne à balayage exploitant une onde de fuite dans une couche plasma est présenté.

### Introduction

Dans le domaine des micro-ondes, l'intégration de fonctions de plus en plus nombreuses a conduit à rationaliser la conception de dispositifs en mutualisant des sous-ensembles. Par exemple, un même filtre peut commuter entre des modes Wifi et 3G et éviter la multiplication des circuits. La reconfigurabilité est ainsi un moyen d'obtenir cette rationalisation.

Sans entrer dans un état de l'art exhaustif, on peut noter que de multiples stratégies sont actuellement déployées en exploitant des composants comme les diodes, les MEMS, les cristaux liquides ou encore les matériaux ferromagnétiques. Chaque technologie présente des avantages et des inconvénients. Pour notre part nous avons opté pour une solution alternative : l'utilisation de plasmas froids. Ce choix nous permet d'exploiter au sein du LAPLACE et alentours les compétences tant en plasmas froids qu'en dispositifs micro-ondes.

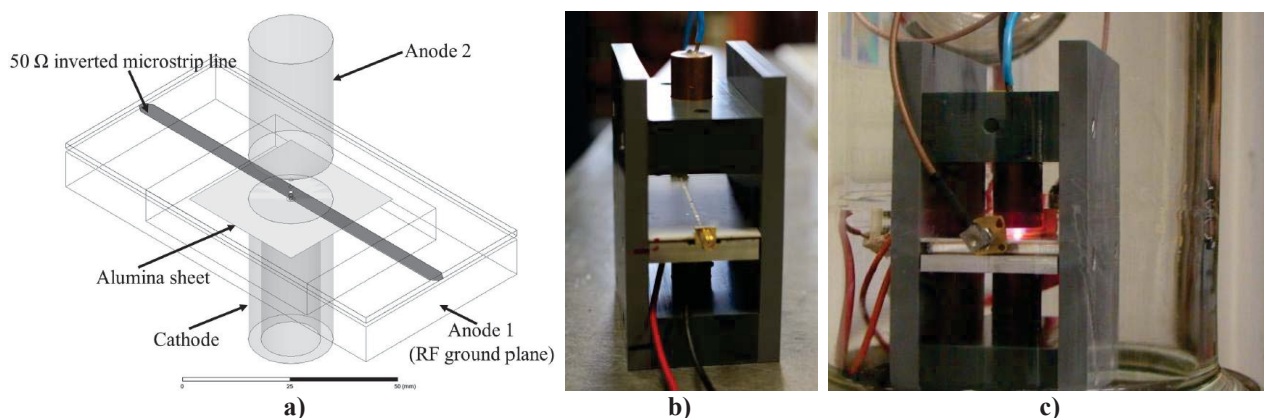
L'intérêt des plasmas réside dans leurs propriétés remarquables vis-à-vis des ondes électromagnétiques. Leurs atouts se situent dans les registres des fortes densités de puissance, de la capacité à faire évoluer le volume actif d'interaction avec l'onde et de disposer d'une permittivité réglable inférieure à l'unité, voire négative. Leur défaut majeur est lié aux pertes, mais ce dernier peut aussi s'avérer être un avantage dans des circonstances particulières. Enfin, l'intégration des plasmas froids représente tout de même un verrou technologique. La présence d'un confinement contrôlé en pression et en composition gazeuse, l'insertion d'électrodes pour amorcer ou contrôler le plasma sont autant d'éléments à faire coexister avec des guides d'onde très sensibles à leur environnement proche.

Depuis quelques années, les échanges scientifiques locaux entre les deux communautés, historiquement séparées, ont permis de conduire plusieurs actions novatrices tant dans les registres amonts du développement de modèles non linéaires Maxwell - Plasma froid ou bien de l'exploitation des plasmas dans les métamatériaux, que dans celui plus aval de l'intégration de micro-décharges dans les dispositifs micro-ondes planaires. Les travaux initiés il y a cinq ans commencent à fournir les premiers résultats significatifs. Ce papier se propose de passer en revue quelques exemples qui illustrent la démarche scientifique sur ce thème conduite sur le site toulousain.

### 1. Acquisition de données expérimentales réalistes

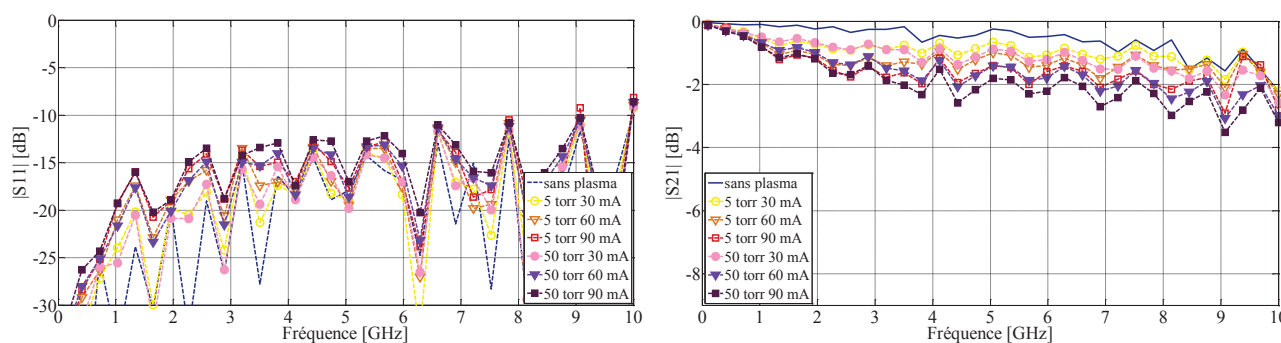
Dans le cadre d'un modèle simplifié de plasma fluide, les deux paramètres fondamentaux qui décrivent le milieu sont la densité électronique et la fréquence de collision. Il s'avère qu'ils ne sont pas indépendants et qu'ils sont fortement conditionnés par le dispositif qui génère le plasma. De plus, selon les valeurs choisies, l'interaction entre une onde incidente de fréquence fixée et le milieu plasma peut changer de manière radicale. Ainsi, l'identification des potentialités de systèmes micro-ondes incluant des plasmas doit nécessairement passer par l'évaluation quantitative et expérimentale de ce comportement de façon à éviter de spéculer sur des hypothèses irréalistes.

Parmi les divers systèmes étudiés, nous avons conçu des dispositifs à lignes micro ruban intégrant une décharge de type Micro-hollow Cathode Sustained Discharge (MCSD) et autorisant une large plage d'utilisation [1]. Le dispositif est décrit sur la figure 1 dans sa configuration en ligne inversée. Dans le premier cas, il inclut une ligne microruban standard  $50 \Omega$ , de largeur  $0.966 \text{ mm}$ , conçue sur substrat d'alumine de hauteur  $1 \text{ mm}$  et de permittivité  $9.9$ . Cela permet de résister à l'abrasion de la décharge et à sa température. Le trou de  $0.6 \text{ mm}$  de diamètre percé au centre de ce dispositif peut alors accueillir le plasma.



**Figure 1 :** montage expérimental. a) schéma en transparence du dispositif ; b) montage incluant le support PVC ; c) plasma de Néon-Xénon 1% allumé

La mesure des paramètres S pour un mélange Néon-Xénon à 5 et 50 Torr dans une bande entre 100 MHz et 10 GHz est donnée sur la figure 2. Elle atteste d'une interaction modeste avec le plasma. L'adaptation de la ligne est correcte et peu sensible à la présence du plasma. L'écart de transmission entre les états On et Off n'excède pas 2 dB pour des courants qui commencent à être élevés. Les résultats les plus significatifs sont obtenus à 50 Torr.



**Figure 2 :** Résultats ligne micro ruban classique.

On constate que l'onde électromagnétique guidée par la ligne micro ruban reste confinée dans le diélectrique de forte permittivité. Cela engendre une interaction peu significative qui nous a conduits à tester une seconde configuration en ligne inversée. L'absence de contraste diélectrique favorise cette fois l'interaction entre l'onde guidée et le plasma. Cette ligne est réalisée avec un substrat de permittivité  $3.5$  placé au dessus du ruban. Son impédance caractéristique reste fixée à  $50 \Omega$ . Sa largeur est  $4.06 \text{ mm}$ , la hauteur de vide entre le plan de masse et la ligne est de  $1 \text{ mm}$  et le trou est également de  $1 \text{ mm}$  de diamètre. Les mesures sont données sur la figure 3.

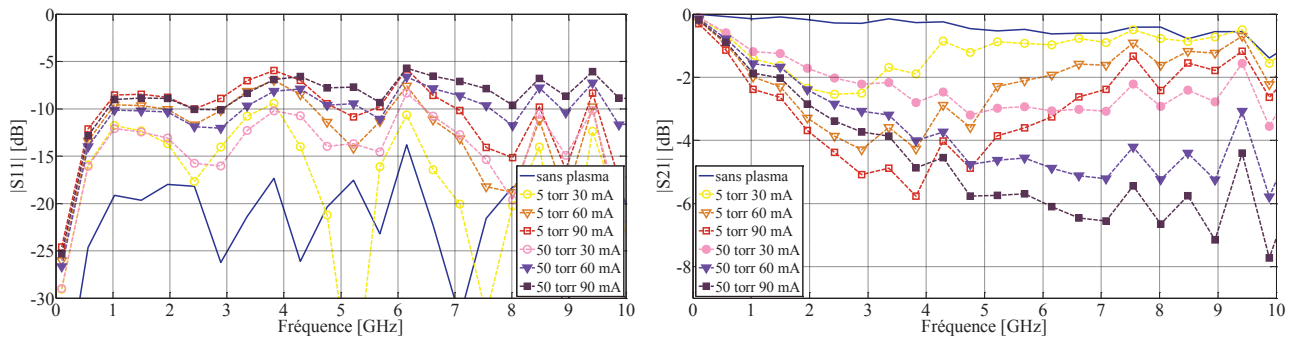


Figure 3 : Résultats ligne micro ruban inversée.

On constate à présent que la réflexion et la transmission sont significativement affectées par la présence du plasma. La première atteste d'une dégradation substantielle de l'adaptation qui passe de valeurs inférieures à -15 dB à des valeurs de l'ordre de -6 à -8 dB. La transmission qui est excellente sans plasma, de l'ordre de -0.5 dB, se dégrade jusqu'à des valeurs de -6 à -7 dB. On constate également que ces valeurs sont contrôlables en jouant sur les paramètres de pression et courant.

Les quelques résultats présentés ci-dessus démontrent que ce dispositif permet de larges études paramétriques. On mesure ainsi sur une très large bande les propriétés de cette ligne et l'on peut jouer commodément sur l'intensité du courant de décharge ou la pression et la composition du gaz. Ces deux configurations attestent de l'intérêt de conduire de telles investigations tant pour optimiser, comme cela a été fait ici, que pour mesurer l'interaction unitaire entre l'onde guidée et le plasma localisé. La collecte des paramètres S en amplitude et phase dans les états On et Off peut alors permettre d'insérer un quadripôle reconfigurable équivalent pour concevoir des circuits aux fonctionnalités dédiées. Des investigations sont en cours pour des antennes ou des commutateurs. Elles bénéficient du principal avantage issu de ces mesures : un modèle réaliste du comportement de l'onde en présence de plasma.

## 2. Métamatériaux reconfigurables

Parallèlement aux travaux décrits dans le paragraphe précédent d'autres études ont été menées pour explorer la potentialité des plasmas comme élément reconfigurable dans un dispositif hyperfréquence. Cette partie présente un exemple des investigations faites portant sur les métamatériaux et les matériaux à Bande Interdite Electromagnétique (BIE). Ces derniers sont l'objet d'une activité foisonnante dans la communauté micro-onde depuis bientôt 20 ans. Ils possèdent des propriétés extraordinaires (indice de réfraction négatif, anisotropie, bande interdite,...) et sont généralement structurés de manière périodique. Les rendre reconfigurables est un nouveau défi à relever. Nous proposons d'utiliser les plasmas pour remplir cette fonction.

Les travaux précurseurs de Sakai [2] consistaient à réaliser un réseau entier de plasmas. Cette belle réussite technologique présente tout de même de nombreux problèmes : pertes élevées et complexités d'alimentation et d'intégration. L'originalité de notre démarche consiste à utiliser les plasmas en petit nombre et judicieusement positionnés pour réduire les pertes associées. Ils jouent ainsi le rôle de défauts contrôlables. Leur nombre réduit limite les problèmes d'intégration et la puissance consommée.

Plusieurs configurations ont été testées : BIE 1D placé sur une ligne à fente, BIE 2D diélectrique [3] ou métallique [4]. Ce dernier cas (fig. 4) concerne une structure BIE anisotrope dont les contours sont triangulaires et qui est constituée de tiges métalliques à maillage carré. Un cornet, positionné à gauche sur la figure, éclaire le BIE à 18 GHz suivant une direction de propagation interdite dans le réseau. Deux tubes plasmas sont insérés à la place de deux tiges sur l'interface éclairée du BIE. Ils assurent la commutation entre la réflexion de l'onde émise par le cornet lorsque les plasmas sont allumés (fig. 4a) et la propagation de celle-ci selon les deux directions diagonales permises du BIE lorsque les plasmas sont éteints (fig. 4b). La validation de ce concept a été effectuée expérimentalement (fig. 4c) et a permis d'observer une dynamique de 8.3 dB entre l'état passant et l'état bloquant pour un courant dans la décharge variant de 0 à 120 mA.

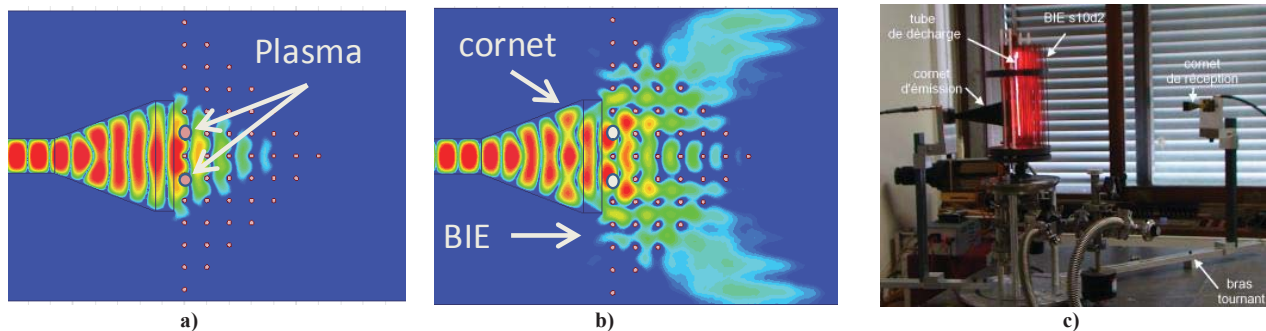
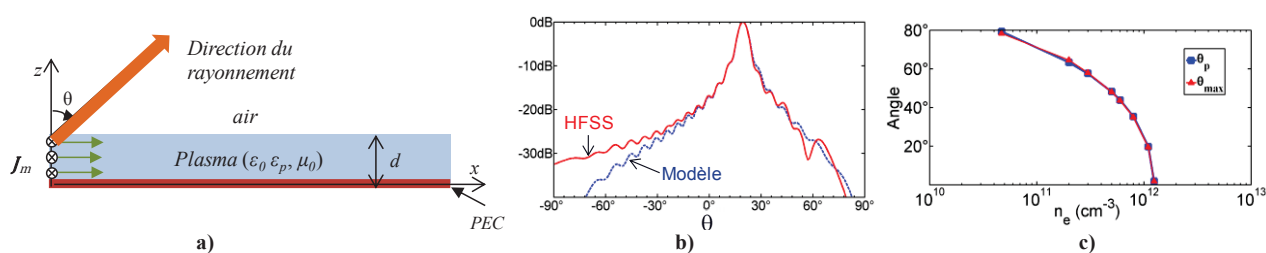


Figure 4 : BIE triangulaire anisotrope intégrant 2 défauts plasmas éclairé par un cornet. a) simulation plasmas allumés : aucune transmission ; b) simulation plasmas éteints : transmission de l'onde suivant les deux directions diagonales permises du BIE ; c) photo du dispositif expérimental

### 3. Antenne plasma à onde de fuite accordable

L'idée consiste ici à utiliser le plasma non plus de manière localisée mais comme milieu de propagation en mettant à profit l'existence de modes de fuite lorsque sa permittivité varie entre 0 et 1. L'utilisation d'une permittivité positive limite la densité électronique nécessaire et permet donc de baisser la pression du plasma. Il devient alors possible de limiter les collisions engendrant les pertes électromagnétiques et d'augmenter le volume du plasma. D'autre part, les modes de fuite rayonnent en dehors du plasma avec un angle qui dépend de sa densité électronique  $n_e$ . L'exploitation de cette propriété pour réaliser une antenne à balayage peut alors être envisagée. Afin de pré-dimensionner le plasma et les performances d'un tel dispositif, nous avons modélisé une configuration 2D simplifiée montrée sur la figure 5a : une onde est émise par une distribution de courants magnétiques plongée dans un plasma homogène d'épaisseur  $d$  et placé au-dessus d'un plan conducteur. Les résultats théoriques obtenus nous ont permis de pré-dimensionner le plasma pour qu'une variation de sa densité électronique comprise entre  $4.7 \cdot 10^{10}$  et  $1.24 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  crée une onde de fuite à 10 GHz dont la direction de propagation varie entre  $1.8^\circ$  et  $79^\circ$  ( $\theta_p$  sur la fig. 5c). Un exemple du champ lointain rayonné est donné sur la figure 5b. Les résultats théoriques issus de notre modèle sont confirmés numériquement (courbe rouge fig. 5b et  $\theta_{\max}$  fig. 5c).



**Figure 5 :** Antenne plasma à balayage. a) configuration canonique 2D ; b) simulations théorique (modèle) et numérique (HFSS) du champ lointain rayonné à 10 GHz pour un plasma d'épaisseur  $d=2 \text{ cm}$ , de densité électronique  $n_e=1.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  et de fréquence de collision  $10^8 \text{ s}^{-1}$ . La permittivité relative du plasma vaut alors  $0.11-j14 \cdot 10^{-4}$ ; c) variation de la direction du champ rayonné en fonction de la densité électronique  $n_e$  :  $\theta_p$  angle (théorique),  $\theta_{\max}$  angle (HFSS)

Ce pré-dimensionnement a permis de dégager un ordre de grandeur pour les caractéristiques du plasma. Ainsi, sa densité maximale est de l'ordre de  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , pour une fréquence de collision autour de  $10^8 \text{ s}^{-1}$ , avec une épaisseur de quelques centimètres et une longueur maximale de 30 cm. Ces caractéristiques excluent a priori les alimentations DC et AC pour créer le plasma. Ainsi, nous avons opté pour une source plasma à couplage inductif RF. Des mesures plasmas avec ce type de sources ont été effectuées au laboratoire et confirment la création d'un plasma satisfaisant notre cahier des charges avec cependant la présence d'un gradient de la densité électronique. Nous avons introduit le profil du plasma mesuré et rajouté une couche diélectrique supplémentaire assurant le confinement du plasma dans nos simulations. Les premiers résultats obtenus montrent que la prise en compte de ces nouvelles données modifie légèrement le champ rayonné obtenu sur la configuration canonique mais confirment l'intérêt de ce concept pour une application antenne à balayage.

### 4. Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté quelques travaux effectués à Toulouse issus de la rencontre d'équipes appartenant aux communautés micro-ondes et plasmas froids. Ils ont montré la potentialité de l'utilisation des plasmas froids pour répondre aux besoins de reconfigurabilité micro-ondes. Les premières difficultés liées à l'intégration des plasmas ont été levées. Le problème lié aux pertes demeure mais de nouvelles configurations permettent de les utiliser ou d'en limiter les effets. Aujourd'hui ces travaux continuent et s'ouvrent de plus en plus sur la maîtrise de la non linéarité du plasma tant au niveau de la modélisation [5] qu'au niveau des applications tournées vers les moyennes et fortes puissances comme des antennes auto-limitantes par exemple.

### Références bibliographiques

- [1] F. Pizarro, R. Pascaud, O. Pascal, T. Callegari, L. Liard, "Experimental study of RF/microplasma interaction using an inverted microstrip line", EUCAP 2013, 8-12 April 2013, Gothenburg, Sweden.
- [2] O Sakai *et al* , "Interaction and control of millimetre-waves with microplasma arrays", Plasma Phys. Control. Fusion, 2005.
- [3] S. Varault, B. Gabard, J. Sokoloff, S. Bolioli, "Plasma-based localized defect for switchable coupling applications", Applied Physics Letters, n°13, Vol 98,p 134103, 2011.
- [4] J. Lo , J. Sokoloff, T. Callegari, J.P. Boeuf, " Reconfigurable electromagnetic band gap device using plasma as a localized tunable defect ", Applied Physics Letters, 2010.
- [5] A. Hamiaz, R. Klein, X. Ferrieres, O.Pascal, J.P. Boeuf, J.R. Poirier, "Finite Volume Time Domain modelling of microwave breakdown and plasma formation in a metallic aperture", Computer Physics Communications, Vol. 183, n°8, pp 1634-1640, 2013.