



**HAL**  
open science

# Etudes expérimentale et numérique d'un limiteur de puissance en technologie microruban suspendue utilisant un plasma de décharge

Lucas Fuster, A. Simon, Romain Pascaud, Thierry Callegari, P. Hoffmann, G J M Hagelaar, Laurent Liard, Olivier Pascal

## ► To cite this version:

Lucas Fuster, A. Simon, Romain Pascaud, Thierry Callegari, P. Hoffmann, et al.. Etudes expérimentale et numérique d'un limiteur de puissance en technologie microruban suspendue utilisant un plasma de décharge. Ecole technologique des plasmas froids, 15ième journées du réseau, Sep 2020, Saint-Dié-des-Vosges, France. hal-04884901

**HAL Id: hal-04884901**

**<https://hal.science/hal-04884901v1>**

Submitted on 13 Jan 2025

**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.

# Etudes expérimentale et numérique d'un limiteur de puissance en technologie microruban suspendue utilisant un plasma de décharge

L. Fuster<sup>1,3</sup>, A. Simon<sup>2,3</sup>, R. Pascaud<sup>2</sup>, T. Callegari<sup>3</sup>, P. Hoffmann<sup>1</sup>, G. Hagelaar<sup>3</sup>, L. Liard<sup>3</sup> et O. Pascal<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Commissariat à l'Energie Atomique, Gramat, France

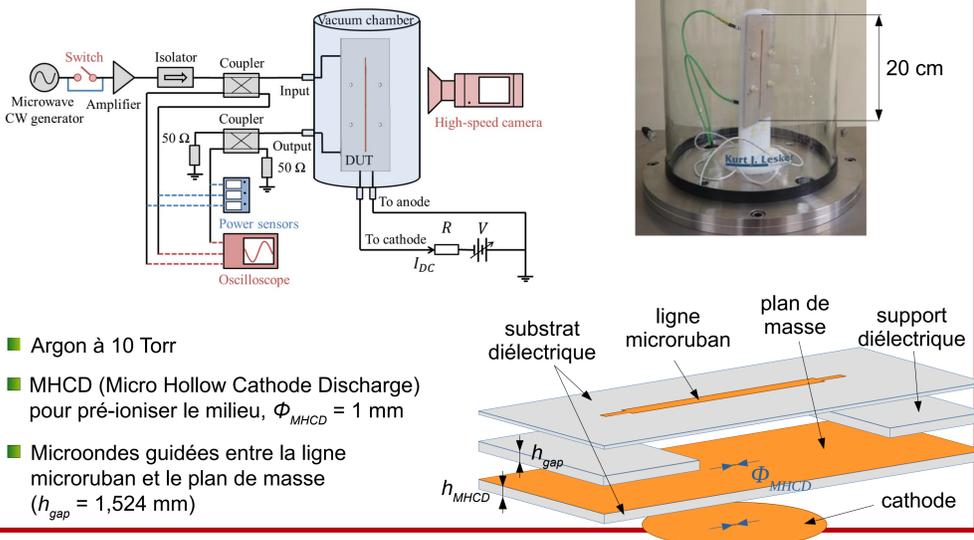
<sup>2</sup> Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), Toulouse, France

<sup>3</sup> Laboratoire PLASMA et Conversion d'Energie LAPLACE, Toulouse, France

## CONTEXTE

Historiquement, les premiers dispositifs à utiliser des plasmas pour la limitation de puissance étaient les « Transmit/Receive tubes » [1] dans les guides d'ondes. De nos jours, les circuits microondes ont été miniaturisés à l'aide de lignes microruban. Des limiteurs classiques tels que les diodes PIN, les diodes Schottky [2] ou les MEMs [3] sont utilisés afin d'assurer la protection des circuits contre les agressions électromagnétiques. Cependant, avec la montée en puissance des sources électromagnétiques, les limites de tenue en puissance de ces limiteurs commencent à être atteintes, et d'autres voies doivent être explorées. Ici, nous présentons un nouveau prototype de limiteur en technologie microruban suspendue, intégrant un plasma d'Argon. Le dispositif a été caractérisé expérimentalement en terme de limitation de puissance. De plus, la structure quasi-TEM du champ électrique dans le limiteur permet d'effectuer des simulations en 2D : l'interaction non-linéaire entre le champ microonde et le plasma a été étudiée à l'aide du code de calcul PlasmaSimWave, développé au LAPLACE, afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu dans le dispositif. En outre, nous présentons une comparaison directe des résultats expérimentaux et numériques.

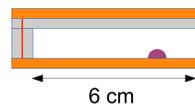
## DISPOSITIF EXPERIMENTAL



- Argon à 10 Torr
- MHCD (Micro Hollow Cathode Discharge) pour pré-ioniser le milieu,  $\Phi_{MHCD} = 1$  mm
- Microondes guidées entre la ligne microruban et le plan de masse ( $h_{gap} = 1,524$  mm)

## SIMULATION (CODE PLASMASIMWAVE [4])

### Géométrie simulée (2D)



### Modèle microonde

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \vec{J}_{exc} - en_e \vec{v}_e + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

couplage plasma → microonde

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -\frac{e}{m_e} \vec{E} - \nu_m \vec{v}_e$$

### Modèle plasma

- ▶ électrons : équations de continuité, de dérive-diffusion et d'énergie

$$\frac{3e}{2} \frac{\partial (n_e T_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{5e}{2} n_e v_e T_e + Q_e \right) = \alpha n_e P - en_e v_e \cdot \vec{E} - \Pi$$

couplage microonde → plasma

- ▶ ions : équations de continuité et de quantité de mouvement

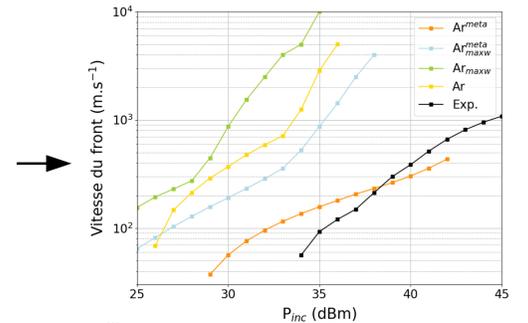
## CHIMIE DU PLASMA

### Réactions chimiques prises en compte

#	Réaction	Taux de réaction	Commentaire
1	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^*$		Ionisation directe
2	$e + Ar \rightarrow e + Ar^*$		Excitation par impact
3	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^*$		Ionisation par étape
4	$e + Ar^* \rightarrow e + Ar$		Désexcitation
5	$e + Ar^* \rightarrow e + Ar$		Quenching
6	$Ar^* + Ar^* \rightarrow e + Ar_2^+$	$0,7 \times 6,4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	Ionisation $Ar^*-Ar^*$
7	$Ar^* + Ar^* \rightarrow e + Ar + Ar_2^+$	$0,3 \times 6,4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	Ionisation $Ar^*-Ar^*$
8	$Ar^* + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$	$2 \cdot 10^{-43} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	Formation des ions mol.
9	$e + Ar_2^+ \rightarrow Ar + Ar^*$	$7,35 \cdot 10^{-14} \times T_e^{-2/3} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	Recombinaison dissociative

### Quatre modèles chimiques testés

Modèle	Réactions	Distribution élec.
$Ar$	1	BOLSIG+
$Ar_{maxw}$	1	Maxwellienne
$Ar^{meta}$	1 à 9	BOLSIG+
$Ar^{meta}_{maxw}$	1 à 9	Maxwellienne

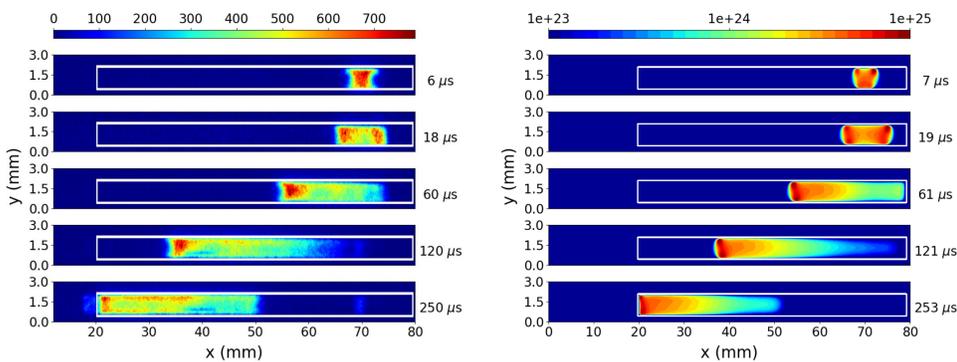


- ▶ Fonction de distribution des électrons non maxwellienne.

- ▶ Effet prépondérant des métastables (93,2 % d'électrons créés par la réaction 4 à 39 dBm).

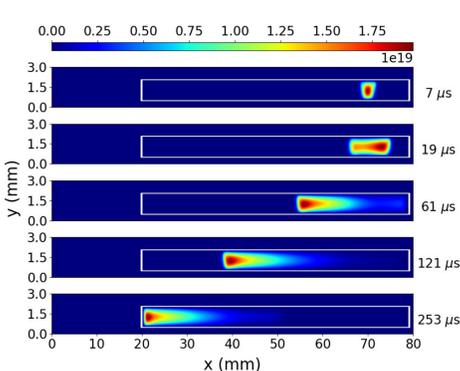
## DYNAMIQUE DU PLASMA

### Comparaison luminosité (U.A.) / Taux de création des métastables ( $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ) à $P_{inc} = 39$ dBm



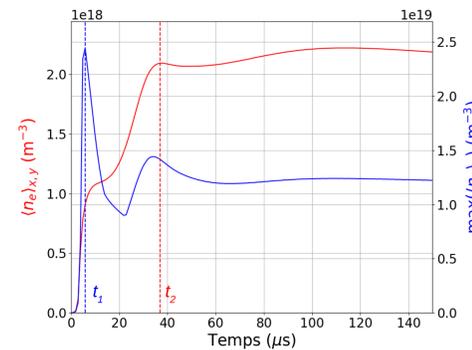
- ▶ Passage de la puissance EM majoritairement par le haut du dispositif → en accord avec les résultats numériques (cf. dissymétrie du profil pour le taux de création).

### Densité électronique ( $\text{m}^{-3}$ ) à $P_{inc} = 39$ dBm



- ▶ Formation d'une structure de densité quasi-stable qui se propage.

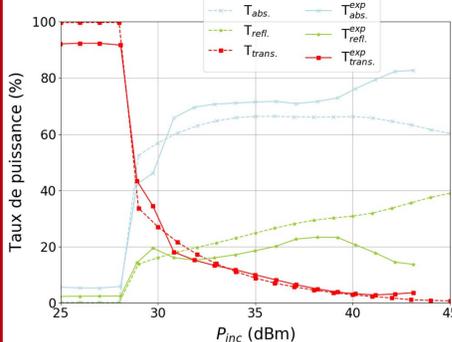
### Évolutions temporelles de profils de densité moyennés sur l'espace



- ▶ Deux temps caractéristiques :  
→ le temps de claquage  $t_1 = 5,9 \mu\text{s}$   
→ le temps de formation de la structure quasi-stable  $t_2 = 36,9 \mu\text{s}$

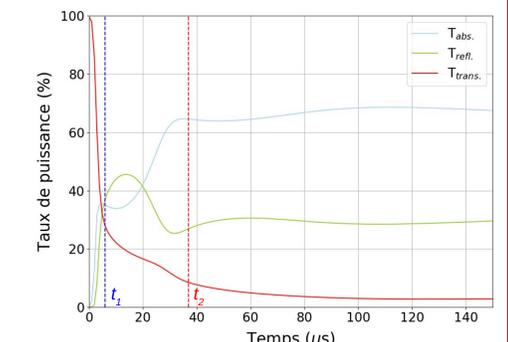
## BILAN DE PUISSANCE

### Régime stationnaire



- ▶ Bon accord entre modèle et expérience → modèle prédictif

### Régime transitoire ( $P_{inc} = 39$ dBm)



- ▶ Corrélation très nette entre taux d'absorption, temps de claquage et temps de formation de la structure quasi-stable.

## PERSPECTIVES

- Dérivation de modèles analytiques pour relier la largeur du front, la vitesse de propagation du plasma, l'absorption de puissance dans le front, etc. aux paramètres fondamentaux du plasma.
- Étude de l'influence du gaz et de la chimie sur le temps de claquage et le seuil de limitation en puissance.
- Étude de l'effet de la fréquence de l'onde électromagnétique sur le rapport  $P_{out} / P_{in}$ .
- Étude numérique de l'effet de la réduction du volume du plasma sur la limitation de puissance.

## RÉFÉRENCES

- [1] L. D. Smullin and C. G. Montgomery, *Microwave Duplexers*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1948.
- [2] S. S. Yang, T. Y. Kim, D. K. Kong, S. S. Kim, and K. W. Yeom, "A novel analysis of a ku-band planar p-i-n diode limiter," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 6, pp. 1447-1460, June 2009.
- [3] S.D. Shojaei-Asanjan, S. Attar, and R. R. Mansour, "Tunable rf membased frequency dependent power limiter" in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, May 2016.
- [4] G. J. M. Hagelaar et al. "Modelling of a dipolar microwave plasma sustained by electron cyclotron resonance", *Journal of Physics D*, 2009.