



**HAL**  
open science

## Absorption virtuelle microonde pour l'allumage de plasma sans réflexion

Théo Delage, Valentin Mazieres, Olivier Pascal, Thierry Callegari, Jérôme Sokoloff

► **To cite this version:**

Théo Delage, Valentin Mazieres, Olivier Pascal, Thierry Callegari, Jérôme Sokoloff. Absorption virtuelle microonde pour l'allumage de plasma sans réflexion. Journées scientifiques d'URSI-France : ONDES AU SERVICE DES PLASMAS, PLASMAS AU SERVICE DES ONDES, Mar 2024, Paris, France. pp.71-73. hal-04881577

**HAL Id: hal-04881577**

**<https://hal.science/hal-04881577v1>**

Submitted on 12 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.

## **Absorption virtuelle microonde pour l'allumage de plasma sans réflexion** *Microwave virtual absorption for reflectionless plasma ignition*

---

*T. Delage<sup>1</sup>, V. Mazières<sup>2</sup>, O. Pascal<sup>1</sup>, T. Callegari<sup>1</sup>, J. Sokoloff<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France, [theo.delage@laplace.univ-tlse.fr](mailto:theo.delage@laplace.univ-tlse.fr)

<sup>2</sup>ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, Toulouse, France

---

*Mots clés : Absorption virtuelle parfaite (Virtual perfect absorption), Source plasma microonde (microwave plasma source)*

---

### **Résumé/Abstract**

Dans ce travail, nous présentons une approche originale pour l'allumage de décharges plasma à travers une analyse des aspects fondamentaux de la diffusion de la lumière dans le plan complexe des fréquences. Pour cela, nous mettons en œuvre une stratégie d'excitation microonde par absorption virtuelle d'une cavité résonante. Celle-ci permet de confiner parfaitement l'énergie électromagnétique dans le résonateur. Par la mise en forme précise du profil temporel de l'onde incidente, nous minimisons effectivement la réflexion pendant l'excitation et le processus d'allumage du plasma. À travers différentes investigations expérimentales, nous montrons que l'absorption virtuelle peut être un outil intéressant pour l'excitation sans réflexion et le contrôle optimal de la décharge plasma.

In this work, we present an innovative approach to plasma ignition by incorporating an analysis of fundamental aspects of light scattering in the complex frequency plane. To achieve this, we are implementing a microwave excitation strategy of a resonant cavity based on virtual perfect absorption. This enables the electromagnetic energy to be perfectly captured within a resonator. By carefully designing the temporal profile of the incident wave, we effectively minimize reflections during the ignition stages. Through comprehensive experimental investigations, we validate the viability of this approach, establishing virtual perfect absorption as an interesting tool for reflectionless excitation and optimal control of plasma discharge.

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre général de recherche de stratégies de contrôle spatio-temporel des plasmas. Dans ce cadre, nous investiguons les possibles ouverts par les récents travaux autour de phénomènes singuliers de diffusion des ondes [1], en particulier des états électromagnétiques résonants sans réflexion [2]. Ces états semblent pouvoir offrir des conditions électromagnétiques favorables à l'allumage de décharges plasma. Cet allumage représente un intérêt critique pour de multiples applications scientifiques et industrielles.

Dans notre cas d'étude, une cavité résonante microonde possédant un unique accès de couplage est excitée par une fréquence complexe particulière qui correspond à un zéro de la matrice  $S$ . Concrètement, cela se traduit par une modulation temporelle exponentielle de l'amplitude du champ incident, permettant de compenser les mécanismes de diffusion. Ce phénomène singulier, connu sous le nom d'absorption virtuelle [3-4], conduit au stockage intégral de l'énergie portée par le champ incident, le temps de l'excitation. Cette intensification locale et rapide du champ électrique dans la cavité présente un intérêt particulier pour l'allumage de décharges plasma.

Ces travaux proposent notamment des méthodes permettant d'identifier les zéros de la matrice  $S$  à partir de la mesure du  $S_{11}$ , pour une cavité microonde résonante de géométrie quelconque couplée à un accès et monomodale. Ensuite, nous exposons une démonstration expérimentale de l'absorption virtuelle dans cette cavité [5]. Cette dernière expérience est prolongée par la démonstration de l'allumage de plasmas par absorption virtuelle, c'est-à-dire sans réflexion antérieurement au claquage [6]. La Figure 1 montre deux photographies de la cavité. Deux tiges métalliques permettent la concentration du champ électrique. Une grille de Faraday est insérée sur une paroi de la cavité, permettant la caractérisation de la variation temporelle de l'intensité lumineuse émise par le plasma via une caméra. Un tube en verre de 6 mm de diamètre externe (5 mm interne), rempli d'argon à 5.3 mbar, traverse la cavité et passe entre les concentrateurs. Ces conditions doivent faciliter l'allumage du plasma. La Figure 2 illustre les signaux électromagnétiques incident et réfléchis (plasma OFF et ON - période de répétition de 500  $\mu$ s). Comme attendu avec l'absorption virtuelle, nous observons l'absence de réflexion pendant une grande partie de l'excitation. L'évolution temporelle de l'intensité lumineuse intégrée du plasma est superposée à ces courbes. La hausse subite de l'intensité lumineuse indique l'allumage du plasma.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives. Entre autres, ils motivent l'exploration du contrôle de la dynamique temporelle (ns) du claquage des plasmas. Celui-ci semble en effet envisageable par la mise en forme précise des signaux incidents microondes, dont la dynamique temporelle surpasse celle des interactions dans les gaz et les plasmas. Cela peut avoir un intérêt particulier pour les décharges pulsées. Finalement, ces travaux semblent ouvrir une voie pour l'adaptation d'une stratégie d'excitation par retournement temporel. Cette dernière a déjà démontré son intérêt pour l'allumage de décharges plasma [7].

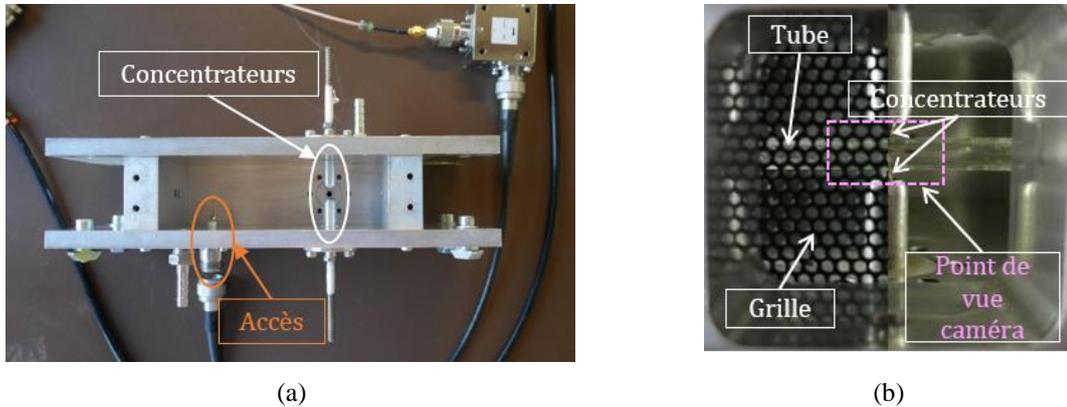


Figure 1 : Photographies de la cavité pour l'expérience. (a) Vue d'ensemble et (b) vue au niveau de la grille de Faraday.

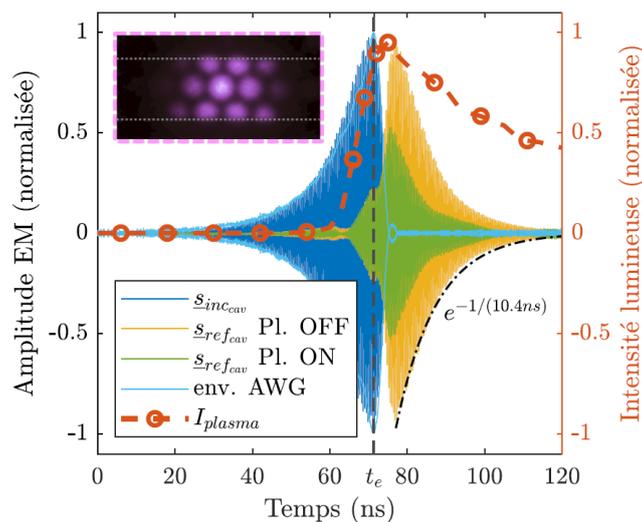


Figure 2 : Allumage du plasma par absorption virtuelle. L'insert montre une image du plasma captée par la caméra pour l'intensité maximale.

## Références bibliographiques

- [1] Krasnok, A. et al. "Anomalies in light scattering". *Adv. Opt. Photonics* 11, 892 (2019).
- [2] A. Douglas Stone et al. "Reflectionless Excitation of Arbitrary Photonic Structures: A General Theory". *Nanophotonics* 10.1, 343-360 (2020).
- [3] Baranov, D. G., Krasnok, A. and Alù, A. "Coherent virtual absorption based on complex zero excitation for ideal light capturing". *Optica* 4, 1457 (2017).
- [4] Ra'di, Y., Krasnok, A. and Alù, A. "Virtual Critical Coupling". *ACS Photonics* 7, 1468–1475 (2020).
- [5] Delage, T., Pascal, O., Sokoloff, J. and Mazières, V. "Experimental demonstration of virtual critical coupling to a single-mode microwave cavity". *J. Appl. Phys.* 132, 153105 (2022).
- [6] Delage, T., Sokoloff, J., Pascal, O., Mazières, V., Krasnok, A. and Callegari, T. "Plasma ignition via high-power virtual perfect absorption". *ACS Photonics* (2023).
- [7] Mazières, V. et al. "Plasma generation using time reversal of microwaves". *Applied Physics Letters* 115.15 (2019).