

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

T. Delage¹, V. Mazières², O. Pascal¹, T. Callegari¹, J. Sokoloff¹

¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France, theo.delage@laplace.univ-tlse.fr

²ISAE-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.

1 Introduction

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre général de recherche de stratégies de contrôle spatio-temporel des plasmas. Dans ce cadre, nous investissons 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, la partie réelle de la fréquence correspond à la fréquence de résonance du mode usuellement considérée. La partie imaginaire traduit une modulation temporelle exponentielle de l'amplitude du champ incident, permettant de compenser les mécanismes de diffusion. En effet, la réflexion totale à l'accès d'un résonateur est le résultat de la superposition entre une part de l'onde incidente réfléchi directement à l'accès et une onde sortant du résonateur, dépendante du coefficient de couplage à l'accès et des pertes par dissipation dans la cavité. À la résonance, ces contributions sont en opposition de phase et interfèrent de manière destructive. Il est alors possible de jouer sur la forme de l'onde incidente, donc de l'onde directement réfléchi à l'accès, pour parfaitement compenser les fuites de la cavité à la résonance. Dans un cas avec peu ou sans pertes par dissipation, 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 seule mesure du S_{11} et de la théorie temporelle des modes couplés [5], 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 [6]. 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 [7]. Nous focalisons cette communication sur ce dernier résultat.

2 Résultats

La Figure 1 montre deux photographies de la cavité. Deux tiges métalliques permettent la concentration du champ électrique, en particulier pour le mode TE_{012} . 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 μ s) au niveau de l'accès de la cavité. Le signal incident est mis en forme via la modulation entre une porteuse à la fréquence réelle souhaitée et une enveloppe exponentielle créée par un générateur de signaux arbitraires, correspondant à la partie imaginaire de la fréquence. Dans ce cas, la fréquence complexe du zéro calculée suite à la mesure du S_{11} vaut $f_{zero} = 2.416 + j0.0136$ GHz (convention $e^{-j2\pi ft}$). Ce signal est ensuite amplifié avant d'être amené à la cavité. Un coupleur directionnel permet de prélever les signaux incident et réfléchis, mesurés ensuite par un oscilloscope. Le pic de tension final atteint dans ce cas 190 V, soit une puissance instantanée de 360 W à 50 Ω . Comme attendu avec l'absorption virtuelle, nous observons l'absence de réflexion pendant une grande partie de l'excitation. La réflexion augmente cependant sur les dix dernières nanosecondes de l'excitation, et cela en présence ou absence de plasma. Cela semble être dû à une légère non-linéarité de l'amplificateur pulsé utilisé. Cet effet montre l'importance de mettre en forme un signal incident dont la fréquence complexe est très proche du zéro de la matrice S considéré. À la coupure de l'excitation, les ondes fuient de la cavité. Dans le cas sans plasma, cette fuite se fait à la fréquence associée au pôle de la matrice S. Nous observons qu'en présence du plasma, l'amplitude du signal de fuite est plus faible et ne décrit plus une exponentielle. Le plasma doit absorber une partie des ondes stockées dans la cavité.

L'évolution temporelle de l'intensité lumineuse intégrée du plasma est superposée à ces courbes. L'allumage du plasma repose sur la présence initiale d'électrons ou d'ions dans la cavité, possible via les rayons cosmiques ou par l'effet d'excitations antérieures, dans un scénario d'excitation pulsée comme appliqué ici. On parle dans ce cas d'effet mémoire. Ces charges sont ensuite mises en mouvement par le champ électrique microonde, ce qui peut mener au phénomène d'avalanche électronique et à l'allumage du plasma. La hausse subite de l'intensité lumineuse sur la Figure 2 est caractéristique de cette avalanche et indique l'allumage du plasma. Cette hausse débute en l'absence de réflexion. L'insert sur cette même figure montre une photographie du plasma (recolorisée) au moment du pic d'intensité. Après la coupure de l'excitation microonde, nous observons une décroissance de l'intensité lumineuse, le plasma étant de moins en moins entretenu lors de la décharge de la cavité.

3 Conclusion

Après avoir rappelé le principe d'absorption virtuelle, nous avons décrit la mise en œuvre d'un banc expérimental et les résultats démontrant l'allumage d'un plasma par absorption virtuelle microonde. 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 [8].

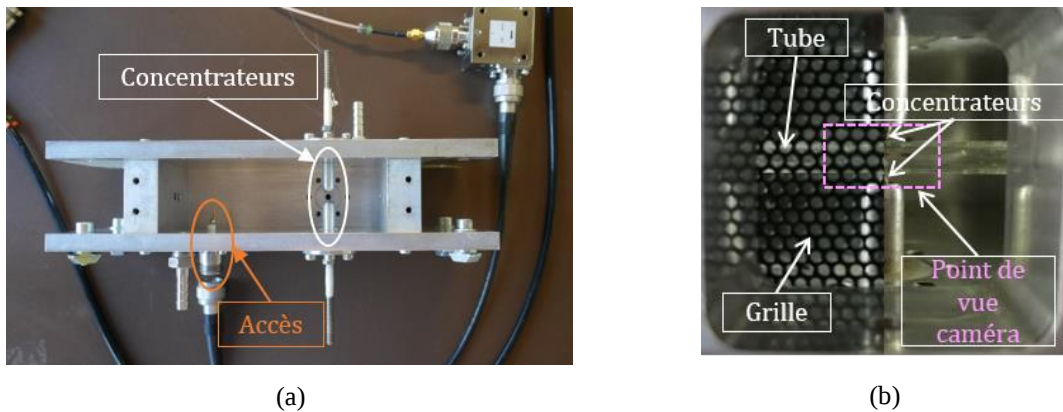


Figure 1 : Photographies de la cavité pour l'expérience. (a) Vue d'ensemble interne et (b) vue au niveau de la grille de Faraday.

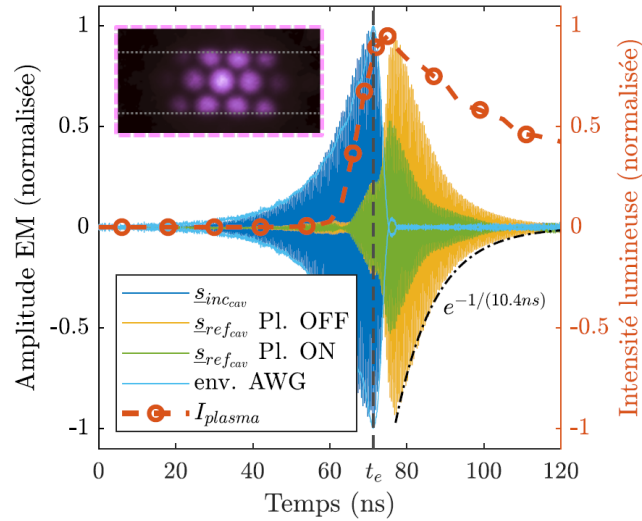


Figure 2 : Allumage du plasma par absorption virtuelle. L'insert montre une image du plasma captée par la caméra pour l'intensité maximale.

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] Haus H.A. "Waves and fields in optoelectronics". *Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall*, chapitre 7 (1984).
- [6] 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).
- [7] Delage, T., Sokoloff, J., Pascal, O., Mazières, V., Krasnok, A. and Callegari, T. "Plasma ignition via high-power virtual perfect absorption". *ACS Photonics* (2023).
- [8] Mazières, V. et al. "Plasma generation using time reversal of microwaves". *Applied Physics Letters* 115.15 (2019).