

Pilotage des plasmas par retournement temporel d'ondes de surface

Contexte

Au 20^{ème} siècle, l'étude de la plasmonique, c'est-à-dire l'étude des ondes existants à l'interface entre les matériaux diélectriques et métalliques, a révélé l'existence d'ondes de surface avec des longueurs d'onde effectives arbitrairement petites. Dans le domaine des microondes, de tels modes de surface peuvent exister de manière classique à l'interface entre un diélectrique (comme l'air) et un métal périodiquement corrugué. De manière plus complexe mais avec de plus nombreux degrés de liberté le métal corrugué peut être remplacé par une métasurface afin de mieux contrôler l'onde de surface [1]. La capacité à confiner l'énergie électromagnétique sur des surfaces a donné lieu à de nombreuses applications et a récemment été proposée pour la conception de sources de plasma [2]. Le "wavefront shaping", c'est-à-dire le contrôle des ondes dans l'espace et le temps, est un autre domaine qui a suscité beaucoup d'intérêt au cours des dernières décennies. L'une des méthodes développées dans ce contexte s'appelle le "retournement temporel" (RT), qui a été largement étudiée comme méthode de focalisation des ondes acoustiques et électromagnétiques. Tout récemment, il a été démontré que le RT permettait de contrôler efficacement les plasmas sur les initiateurs dans une cavité surmodée [3]. Cependant, le décrochage du plasma de ces initiateurs, qui permettrait un contrôle spatio-temporel "total" des plasmas, n'a encore jamais été réalisé.

Motivations

La présente thèse propose une manière innovante de contrôler les plasmas en combinant ces deux domaines (onde de surface et wavefront shaping). Plus précisément, son objectif est d'explorer la possibilité de contrôler spatio-temporellement les plasmas en utilisant le retournement temporel d'ondes de surface. La manipulation d'ondes de surface offre plusieurs avantages par rapport aux travaux antérieurs réalisés avec des plasmas à retournement temporel. Tout d'abord, le confinement des ondes conduit à une densité de puissance plus élevée, ce qui permet d'atteindre plus facilement les conditions de claquage. Deuxièmement, les corrugations de la surface supportant les modes de surface augmentent localement le champ électrique au niveau des arêtes, ce qui permet également d'atteindre plus facilement les conditions de claquage. Enfin, la possibilité de sonder le champ électrique de manière non intrusive est beaucoup plus facile sur la surface 2D que

pour les systèmes 3D.

Pour toutes les raisons évoquées ci-dessus, le pilotage des plasmas par retournement temporel d'ondes de surface semble très prometteur. De plus, il pourrait trouver des applications intéressantes dans plusieurs domaines. D'une part, cela pourrait être intéressant pour les systèmes de propulsion. Dans ce contexte, les moteurs à détonation ont récemment attiré beaucoup d'attention car ils pourraient potentiellement permettre une augmentation de l'efficacité jusqu'à 20 % par rapport aux systèmes conventionnels. Par exemple, le « US Air Force laboratory » a mené avec succès en 2008 une expérience de vol propulsée par un moteur à détonation pulsée et, plus récemment, en 2021, la JAXA a lancé avec succès la première expérience suborbitale d'un « rotating detonation engine » [4]. Récemment, de nombreux efforts ont été réalisés pour relever les défis associés au développement de tels moteurs de propulsion, tels que la stabilisation de l'onde de détonation. Une approche intéressante pour relever ce défi est l'utilisation de plasmas contrôlés pour maîtriser cette onde instable. Il a déjà été souligné que la synchronisation des décharges avec cette onde est extrêmement importante et difficile. La possibilité de contrôler les plasmas par des ondes de surface se propageant sur les parois de la chambre de combustion annulaire semble vraiment prometteuse pour relever ce défi. D'autre part, ces plasmas pilotés par ondes de surface pourraient constituer un moyen élégant et efficace de contrôler la surface équivalente radar (SER) ou l'écoulement (dans le contexte du "contrôle de l'écoulement du plasma"). En effet, la furtivité plasma est une technique de contrôle de SER qui repose sur la réflexion et/ou l'absorption des ondes électromagnétiques par un plasma présent sur la surface d'un objet [5]. La possibilité de piloter dans l'espace et dans le temps les plasmas par retournement temporel d'ondes de surface offre des perspectives prometteuses pour le développement d'un dispositif de contrôle de SER versatile et reconfigurable.

Plan de thèse

Cette thèse propose de développer un dispositif expérimental pour démontrer pour la première fois l'allumage de plasmas par retournement temporel des ondes de surface. Elle est organisée selon le plan suivant :

- Au cours de la première année, nous nous concentrerons sur la mise en œuvre de la méthode proposée sur une interface d'ondes de surface 1D. Pour cela, il est nécessaire de concevoir une structure avec des corrugations métalliques permettant un grand nombre de modes de surface 1D dans la bande de fréquence souhaitée. Ensuite, le système d'excitation sera conçu. Une fois ces étapes franchies, la cavité 1D expérimentale sera réalisée, et le retournement temporel d'ondes de surface sera validé expérimentalement (comparaison simulation/expérience). Enfin, des expériences de retournement temporel à haute puissance seront menées sur ce dispositif afin d'amorcer des plasmas. Cette étape constitue la première démonstration du pilotage des plasmas par RT d'ondes de surface.
- Ensuite, au cours de la deuxième année, l'influence de la courbure de la cavité 1D sur les performances sera évaluée. Des cavités 2D permettant l'allumage du

plasma par retournement temporel d'ondes de surface seront conçues. L'influence de la forme, de la taille et de la courbure de la cavité 2D sur la capacité à contrôler les plasmas sera évaluée.

- La troisième année sera consacrée à l'utilisation des compétences acquises pour étudier des configurations plus "réalistes", comme l'interface cylindrique (pour l'application moteur à détonation rotatif) ou l'interface courbée représentant la surface d'un engin volant.

Informations

- Localisation : Laboratoires LAPLACE (<https://www.laplace.univ-tlse.fr/>) et ISAE-SUPAERO (<https://www.isae-supaero.fr/en/>).
- Disciplines : électromagnétisme, plasmas microondes.
- Profil recherché : Nous recherchons un(e) candidat(e) titulaire d'un master ou un diplôme d'école d'ingénieurs en physique des micro-ondes et/ou des plasmas, avec un intérêt particulier pour les interactions microondes-plasma.
- Contacts :

Valentin Mazières : valentin.mazieres@isae-supaero.fr

Jérôme Sokoloff : sokoloff@laplace.univ-tlse.fr

Références

- [1] Stanislav B. Glybovski, Sergei A. Tretyakov, Pavel A. Belov, Yuri S. Kivshar, and Constantin R. Simovski. Metasurfaces : From microwaves to visible. *Physics Reports*, 634 :1–72, May 2016.
- [2] M. Moisan and Z. Zakrzewski. Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 24(7) :1025, July 1991.
- [3] Valentin Mazières, Romain Pascaud, Laurent Liard, Simon Dap, Richard Clergereaux, and Olivier Pascal. Plasma generation using time reversal of microwaves. *Applied Physics Letters*, 115(15) :154101, October 2019.
- [4] Keisuke Goto, Ken Matsuoka, Koichi Matsuyama, Akira Kawasaki, Hiroaki Watanabe, Noboru Itouyama, Kazuki Ishihara, Valentin Buyakofu, Tomoyuki Noda, Jiro Kasahara, Akiko Matsuo, Ikkoh Funaki, Daisuke Nakata, Masaharu Uchiumi, Hiroto Habu, Shinsuke Takeuchi, Satoshi Arakawa, Junichi Masuda, Kenji Maehara, Tatsuro Nakao, and Kazuhiko Yamada. Space Flight Demonstration of Rotating Detonation Engine Using Sounding Rocket S-520-31. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 60(1) :273–285, January 2023. Publisher : American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Hema Singh, Simy Antony, and Rakesh Mohan Jha. *Plasma-based Radar Cross Section Reduction*. Springer, Singapore, 1st ed. 2016 édition edition, October 2015.