

ONDES AU SERVICE DES PLASMAS PLASMAS AU SERVICE DES ONDES

Dimensionnement d'une cavité à propagation d'ondes de surfaces 1D pour le pilotage plasma par retournement temporel

Design of a 1D surfaces waves propagation for plasma steering using time reversal

Lilian Szuter¹, Jérôme Sokoloff¹, Valentin Mazières² and Nicolas Lebbe¹

¹ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, UPS, INPT, Toulouse, France. lilian.szuter@laplace.univ-tlse.fr ² ISAE-SUPAERO, Toulouse, France.

Keywords : Plasma, Microondes, Retournement temporel, Ondes de surfaces. **Mots-clés :** Plasma, Microwaves, Time reversal, Surfaces waves.

Résumé

Cet article s'inscrit dans la suite des travaux de recherches sur le pilotage plasma par retournement temporel (RT). Les capacités de focalisation spatio-temporelle des ondes électromagnétiques offertes par cette technique ont permis d'amorcer et de contrôler des plasmas sur des initiateurs, avec des pics de focalisation de 8 ns modulés à 2.45 GHz. Cependant le fort niveau du champ de claquage nécessaire pour contrôler ces plasmas rend difficile le décrochage de ces plasmas des initiateurs. Pour faire face à cette limite, l'utilisation d'ondes de surfaces semble être une solution prometteuse grâce à leurs propriétés de confinement spatial et de diminution de la longueur d'onde. De plus, le support corrugué sur lequel se propage ces ondes peut jouer le rôle d'initiateur. Ainsi l'objectif de ce papier est de présenter une cavité 1D. Nous verrons que sur une bande de fréquence courte de 200 MHz autour de 2.45 GHz, il est possible d'obtenir une dizaine de modes nécessaires au RT. Enfin, nous vérifierons la présence de ces modes grâce à une mesure de paramètre S_{II} au niveau d'un accès de la cavité.

Abstract

This article is part of the continuation of research work on plasma control by time reversal (TR). The spatio-temporal focusing capabilities of electromagnetic waves offered by this technique have made it possible to initiate and control plasmas on initiators, with focusing peaks of 8 ns modulated at 2.45 GHz. However, the high level of breakdown field required to control these plasmas makes it difficult to unhook them from the initiators. To overcome this limitation, the use of surface waves appears to be a promising solution thanks to their spatial confinement and wavelength-decreasing properties. Moreover, the corrugated support on which these waves propagate can play the role of initiator. The aim of this paper is to present a 1D cavity. We will show that on over short frequency band of 200MHz around 2.45GHz, it is possible to obtain the ten or so modes required for TR. Finally, we will verify the presence of these modes by measuring the S_{11} parameter at a cavity port.

1 Introduction

Le retournement temporel (RT) est une technique permettant le contrôle spatio-temporel des ondes. Le principe, utilisé pour la première fois par M. Fink et al. [1] dans les années 1990, consiste à faire revivre aux ondes le trajet inverse de leur propagation, afin de les focaliser au point source qui leur avait donné naissance. En pratique, deux phases sont nécessaires. La première consiste à envoyer une courte impulsion par une source, et à enregistrer à l'aide de transducteurs le signal qui s'est propagé dans un certain milieu. La deuxième consiste à réémettre par ces transducteurs l'information préalablement enregistrée, mais retournée temporellement. Les ondes reprennent ainsi leurs trajets en sens inverse jusqu'à la source initiale. Au final, cette méthode permet de focaliser efficacement l'énergie micro-onde si le milieu de propagation est « complexe », c'est-à-dire qu'il possède un grand nombre de modes sur la bande de fréquence considérée [2]

Récemment, cette technique a été employée pour amorcer et contrôler des plasmas microondes sur des initiateurs placés dans une cavité [3]. Pour cela, les pics de focalisation étaient des impulsions de 8 ns modulées à 2.45 GHz (donc une bande passante de 250 MHz). Le claquage du gaz est rendu possible par le fort niveau du champ de focalisation, qui dépasse alors un certain seuil (le champ de claquage). Dans ces expériences, le champ électrique de focalisation est intensifié localement par effet de pointe dû à la présence de l'antenne de réception (type monopôle [3]), qui agit comme un initiateur. Cependant le contrôle « total » des plasmas, *i.e.* ailleurs que sur des

initiateurs, est compliqué. Une des difficultés principales réside dans le fort niveau de champ qu'il est nécessaire d'obtenir pour compenser l'absence de ces initiateurs.

Une idée pour améliorer l'intensification du champ à la focalisation consiste à utiliser les ondes de surfaces. En effet, le confinement de l'onde à l'interface entre deux milieux et la diminution de la longueur d'onde sont des propriétés intéressantes conduisant respectivement à une concentration spatiale du champ ainsi qu'à une tâche focale plus petite spatialement. Par ailleurs, l'utilisation d'une structure corruguée comme support de propagation des ondes de surface est un moyen supplémentaire d'intensification du champ par effet de pointe. En effet, la périodicité des corrugations peut rendre imaginable le déplacement du plasma en focalisant à différents temps et différents endroits de la surface corruguée.

Cet article s'inscrit dans une démarche visant à exploiter les ondes de surfaces pour contrôler les plasmas par RT. Pour cela, la première étape sur laquelle se concentre ce papier consiste à dimensionner une cavité $1D^1$ à ondes de surface contenant un nombre suffisant de modes (une dizaine) sur une bande de 250 MHz autour de 2.45 GHz. Le plan de cette recherche est structuré ainsi : dans un premier temps, une étude paramétrique sur la géométrie des corrugations a été réalisée. Dans un deuxième temps, nous mesurons le nombre de modes propres possibles dans une cavité de 30 cm de longueur. Enfin, l'objectif est d'exciter les modes obtenues en mesurant le paramètre S_{11} par le port d'entrée situé au milieu de la cavité et de vérifier si les modes correspondent bien à ceux calculés lors de l'analyse modale.

2 Dimensionnement de la cavité

L'objectif de cette partie est le dimensionnement d'une cavité 1D à ondes de surface contenant un nombre suffisant de modes (une dizaine) sur une bande de 250 MHz autour de 2.45 GHz. Un moyen courant pour générer des ondes de surfaces dans le domaine microondes consiste à corruguer un métal afin d'obtenir une permittivité effective négative [4] [5].

2.1 Dimensionnement d'une corrugation

Nous nous inspirons de la structure corruguée présenté dans [4] pour construire la corrugation. La structure ainsi modélisée avec le logiciel COMSOL est représentée sur la figure 1(a).

Tout d'abord, nous avons réalisé une étude sur l'influence des paramètres de dimensionnement d'une corrugation sur les diagrammes de dispersion, en variant un paramètre à la fois. Les trois différentes variables géométriques (p, w, h) sont reportées sur la figure 1(a). La zone grise correspond au domaine d'air au-dessus de la cellule unitaire, la corrugation est placée en dessous. Pour rappel, p est la période de répétition de la corrugation, w la largeur de la corrugation et h la hauteur. Des conditions de périodicité Bloch-Floquet sont appliquées sur les deux côtés latéraux de la cellule unitaire. Un domaine PML (Perfectly Match Layer) est définie au-dessus de l'air et des condition PEC sont appliquées sur les frontières supérieures et inférieures.



Figure 1: (a) Dimension d'une corrugation, (b) Conditions aux limites appliquées à la géométrie d'une corrugation et (c) son maillage. Les traits en jaune correspondent à une condition périodique de Floquet. Les traits en bleu représentent du PEC. La couche supérieure définie la PML. La dent de la corrugation est visible en bleu en bas du domaine. La surface grise correspond à de l'air.

¹ On appelle « cavité 1D » une cavité pour laquelle les ondes se propagent suivant une dimension bien que la configuration simulée soit 2D.

Les résultats de l'étude paramétrique sont tracés sur la figure 2. Le paramètre h a été varié dans un intervalle entre 3 mm et 30 mm et le paramètre w dans un intervalle entre 1 mm et 4 mm. L'analyse de l'influence du paramètre p n'est pas montré ici car les courbes obtenues sont normalisées par ce paramètre et deviennent difficilement interprétables.



Figure 2 : (a) Diagramme de dispersion du paramètre h variable avec w et p fixé respectivement à 2mm et 5mm. (b) Diagramme de dispersion du paramètre w variable avec h et p fixé 5mm

Les résultats obtenus montrent clairement que le paramètre h a le plus d'influence sur la forme des courbes de dispersions et plus particulièrement sur la fréquence asymptotique. En effet, comme le montre les courbes de la figure 2(b), le paramètre w influe peu sur le diagramme de dispersion. Nous nous concentrons donc dans la suite sur l'analyse de l'influence du paramètre h. Par exemple pour une hauteur h = 5 mm (la courbe verte de la figure 2(a)), la fréquence à l'asymptote est obtenue à 11.6 GHz, alors qu'elle atteint quasiment 3 GHz pour h = 25 mm. Les tendances observées sur ces courbes permettent également de nous rassurer quant à la validité de nos résultats. En effet, plus h est grand, plus la fréquence à l'asymptote diminue. Pour h = 3 mm en revanche, la courbe commence à se redresser comme une droite linéaire qui s'approche de la « light line ». Cela signifie que l'onde incidente ne se couple plus avec le métal pour former une onde de surface. La raison vient du fait que la hauteur de la corrugation est très petite et que la surface vue par l'onde incidente est quasiment plane. Ainsi, l'onde incidente ne se couple plus avec la surface et les ondes de surfaces deviennent inexistantes.

Cette analyse paramétrique nous a permis de retenir une hauteur de corrugation h = 30 mm afin d'obtenir un maximum de modes propres dans une bande de fréquence étroite autour de 2.45 GHz.

2.2 Modes propres d'une cavité 1D avec pertes

L'objectif de cette partie est d'atteindre une dizaine de modes propres sur une bande de 250 MHz autour de 2.45 GHz dans une cavité 1D corruguée. La figure 3(a) présente la cavité modélisée sur COMSOL à partir des résultats de l'étude paramétrique présentés dans la sous-partie précédente (h=30 mm, w=3 mm et p=5 mm). La structure est composée de corrugations périodiques et de deux plaques métalliques réelles à ses extrémités, permettant la réflexion des ondes. Un câble coaxial est introduit au centre de la structure, comme représenté sur la figure 3(b). La tige métallique représente le conducteur interne et les parois des corrugations à ses côtés représentent le conducteur externe. Le diélectrique représenté par le domaine gris est de l'air.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3(b), la géométrie des corrugations a légèrement été modifié au sommet. La corrugation est maintenant « pointue » afin de bénéficier encore plus de l'effet de pointe. En termes de conception mécanique, cette structure peut être réalisée en faisant une découpe laser ou un fraisage d'un bloc de métal. Les chanfreins des corrugations peuvent être également obtenus à l'aide d'une fraise (il faut voir un trou fraisé entre les corrugations). L'ajout d'un câble coaxial au milieu et des plaques métalliques à la verticale à ces extrémités complètera la cavité.



Figure 3: Cavité sans pertes en modélisant une épaisseur de métal réel (aluminium). A droite, un zoom sur l'approximation d'un câble coaxial en 2D.

Les modes obtenus avec une étude en mode propre de cette cavité sont reportés sur le diagramme de dispersion obtenu avec des conditions de périodicité Bloch-Floquet appliqués sur les deux côtés latéraux de la cellule unitaire (comme étudié à la sous-partie précédente). Sur la figure 4, les points noirs qui signalent la présence d'un mode propre de la cavité suivent bien le diagramme de dispersion de la structure « infinie » (conditions de périodicité Bloch-Floquet). La cavité ainsi obtenue présente bien une dizaine de mode dans la bande visée (250 MHz autour de 2.45 GHz). Nous nous intéressons dans la prochaine sous-partie sur l'excitation de ces modes.



Figure 4: Modes propres (points noirs) de la cavité. Courbe de dispersion (trait bleu) obtenue lors d'une étude d'une corrugation en condition de périodicité

2.3 Excitation des modes de surfaces dans la cavité 1D avec pertes

L'objectif de cette section est d'exciter les modes obtenus lors de l'étude précédente. Pour cela, le paramètre S_{11} est mesuré sur le port 1 représenté sur la figure 5(b). Ainsi, seule la partie gauche de la cavité est excitée dans ce cas (le port 2 est inactif).

La figure 5(a) présente une cartographie de la composante du champ électrique E_y selon l'axe y lorsque le mode de fréquence propre 2.4272 GHz est excité par le port 1. On observe bien l'excitation du mode de surface, mode dont le champ est confiné au niveau de la surface et dont la longueur d'onde est de $\lambda \approx 15$ mm. On observe aussi qu'une partie de l'énergie s'échappe de la surface est rayonnée dans l'espace au-dessus de la cavité, avec des ondes de longueur d'onde $\lambda_0 \approx 144$ mm dont le centre de phase semble correspondre à l'intersection de la paroi et de la structure corruguée. On remarque ici tout l'intérêt de travailler avec des ondes de surfaces, qui présentent pour une même fréquence, une longueur d'onde beaucoup plus petite que les ondes radiatives. De plus, on note également que les champs sont maximums au niveau des corrugations.

La figure 5(b) affiche le coefficient de réflexion obtenue sur le port 1 pour une cavité avec et sans pertes. Pour le cas sans perte (les corrugations et les parois de la cavité sont en PEC), les seules pertes possibles sont les pertes par rayonnement au-dessus de la structure corruguée. Ces ondes sont absorbées par les PML situées sur le haut du domaine. Pour le cas avec perte, les corrugations et les parois de la cavité sont en aluminium (conductivité électrique =37.3°6 S/m à 293.15 K). Dans les deux cas, les modes sont résolus spectralement et il existe bien une dizaine de modes autour de 2.45 GHz. On observe bien des niveaux de S_{11} moins élevé pour le cas avec perte, une partie de l'énergie électromagnétique étant dissipée au niveau des conducteurs dans ce cas. Pour finir, on observe que ces modes correspondent bien aux modes obtenus précédemment avec l'analyse en mode propre.



Figure 5 : (a) Cartographie du champ E_y lors de l'excitation d'un mode propre à 2.4272 GHz.(b) Coefficient de réflexion S₁₁ de la cavité dans le cas avec et sans pertes, i.e. cas sans pertes = PEC, cas avec pertes = aluminium. Les points verts correspondent aux modes discrets obtenues lors de l'excitation par le port 1

3 Conclusion

Cette étude s'intègre dans une démarche consistant à exploiter le RT d'ondes de surface pour le contrôle de plasma. En particulier, dans cette étude nous avons dimensionné en simulation une cavité 1D à ondes de surface contenant une dizaine de mode sur la bande d'intérêt autour de 2.45 GHz. La cavité ainsi obtenue est une cavité de 300 mm structurée en corrugation de dimension h=30mm, w=3mm et p= 5mm.

Ces résultats constituent la première étape vers la mise en place du RT d'ondes de surface. La prochaine étape consiste à simuler temporellement le RT dans une telle cavité puis en faire la démonstration expérimentale en basse puissance. Il faudra ensuite exploiter ces résultats pour dimensionner et réaliser une cavité 2D à ondes de surface permettant de faire du RT. Pour finir, le passage aux fortes puissances permettra de tester la génération de plasma.

Les applications possibles de ce type de cavité peuvent être nombreuses. Des perspectives de réduction de SER d'un aéronef peuvent être envisageables. De la même manière, cette structure peut être intéressante pour un allumage à détonation rotative dans une chambre de combustion. Enfin, on peut également imaginer un métamatériaux modulable en temps par plasma pour donner de nouvelles caractéristiques.

4 Bibliographie

- [1] M. Fink, C. Prada, F. Wu et D. Cassereau, Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors, Proceedings. IEEE Ultrasonics Symposium, 1989.
- [2] C. &. F. M. Draeger, «One-channel time-reversal in chaotic cavities: Theoretical limits.,» The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 105(2), pp. 611-617, 1999.
- [3] V. Mazières, Claquage microonde par retournement temporel, Toulouse, 2020.
- [4] J. Pendry, L. Marti n-Moreno et F. Garcia-Vidal, Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces, Science vol305, Issue 5685, 2004.
- [5] Y. J. J. Q. &. C. T. J. Zhou, Bidirectional surface wave splitters excited by a cylindrical wire., Optics express, 19(6), 5260-5267., 2011.
- [6] B. Fragge, Allumage d'une chambre de combustion par retournement temporel micro-onde, Toulouse, 2022.