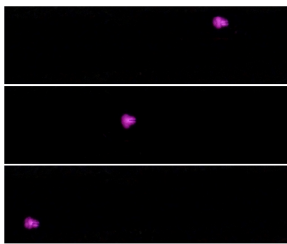


Plasma à Retournement Temporel : puits électromagnétique ?

Contexte

Le retournement temporel (RT) est une technique de contrôle des ondes introduite dans les années 90 par Mathias Fink. Elle a été largement étudiée comme méthode de focalisation des ondes acoustiques [1] et électromagnétiques [2]. Dans une expérience de RT, une source envoie d'abord une courte impulsion qui se propage dans un milieu complexe, et le champ rayonné est enregistré par un réseau de transducteurs situés tout autour de la source, ce que l'on appelle le miroir à retournement temporel (MRT). Les formes d'onde enregistrées sont ensuite inversées dans le temps et réémises par le MRT, de sorte que l'onde résultante converge vers sa source initiale. Le MRT a trouvé de nombreuses applications dans les domaines de la médecine [3], des communications [4, 5], et des objets intelligents [6]. Plus récemment, le RT a été proposé pour piloter les plasmas micro-ondes dans les cavités surmodées. À partir de cette idée, une nouvelle source de plasma, à savoir la "Space-Time Plasma Steering Source" (STPSS) [7], a été introduite afin de relever le défi actuel de structurer les plasmas avec des formes arbitraires en 2D et 3D. L'idée de cette source est de contrôler dynamiquement la position du plasma en modifiant la forme d'onde du signal transmis à une grande cavité surmodée. Cette cavité réverbérante permet de stocker l'énergie électromagnétique



en son sein avant de focaliser cette énergie aux moments et aux endroits souhaités, afin de déclencher des phénomènes de claquage. Selon ce principe, c'est le comportement des ondes à l'intérieur de la cavité qui contrôle la position du plasma. Il permet donc un contrôle dynamique des plasmas, d'où le nom de "Space-Time Plasma Steering Source". Expérimentalement, il a été montré qu'elle permettait de contrôler efficacement les plasmas sur les initiateurs dans une cavité surmodée [8, 9, 10], comme illustré ci-contre.

Motivations du stage

En raison de l'interférence entre une onde convergente et divergente à l'endroit de la focalisation, le RT permet aux ondes d'être focalisées sur une dimension spatiale correspondant à au moins la demi-longueur d'onde – soit la limite de diffraction. Comme

expliqué par exemple dans [11], ceci peut être compris avec le cas simple d'une onde scalaire monochromatique. Considérons une onde sphérique $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r]$ convergeant vers l'origine $r = 0$, où ω est la fréquence angulaire, $k = 2\pi/\lambda$ et λ est la longueur d'onde. Après avoir passé l'origine, l'onde devient divergente et le champ total est une superposition des deux, *i.e.* $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r - e^{ikr-i\omega t}/r] = -\Re [2ie^{-i\omega t}] \sin(kr)/r$, qui a une largeur spatiale de $\lambda/2$. L'évolution temporelle du champ mesuré lors d'une expérience de RT en acoustique est représenté sur la figure 1(a) en guise d'illustration.

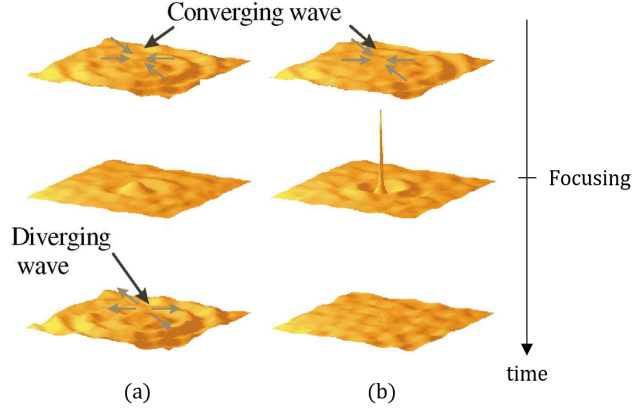


Figure 1: Évolution temporelle du champ : (a) RT (b) RT avec puits actif [12].

La focalisation sub-longueur d'onde a été démontrée en utilisant des métamatériaux [13] ou avec la présence d'un puits à l'endroit de la focalisation. Le puits peut être actif, c'est-à-dire qu'il remplace la source par son image retournée temporellement, *i.e.* générant $\Re [+e^{ikr-i\omega t}/r]$ à l'endroit de la focalisation [12], ou il peut être passif, consistant à supprimer l'onde divergente (par absorption), comme cela a été démontré expérimentalement en acoustique à l'aide d'un "near-perfect absorber" [14] et avec des microondes à l'aide d'antennes absorbantes [15]. Dans ce cas (passif ou actif), le champ total correspond uniquement à l'onde convergente $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r] = \cos(kr + \omega t)/r$. Une autre façon d'obtenir une focalisation inférieure à la longueur d'onde consiste à inverser le signe de l'onde divergente, de sorte que le champ total devient $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r + e^{ikr-i\omega t}/r] = \Re [2e^{-i\omega t}] \cos(kr)/r$. Dans les deux cas, $\cos(kr)/r \rightarrow \infty$ quand $r \rightarrow 0$, traduisant une tache focale plus petite que $\lambda/2$. L'évolution temporelle du champ mesuré lors d'une expérience de RT en acoustique avec un puits actif à l'endroit de la focalisation est représenté sur la figure 1(b) en guise d'illustration.

La question que nous posons dans le cadre de ce stage est de savoir si un plasma généré par RT peut se comporter comme un puits électromagnétique (en absorbant l'onde convergente ou en inversant le signe de l'onde divergente).

Sujet de stage

L'objectif de ce stage est d'étudier la possibilité d'utiliser le plasma à retournement temporel comme puits électromagnétique passif. Pour ce faire, le stagiaire utilisera le

code numérique développé dans [7]. Ce code est un code 2D FDTD (Finite Difference Time Domain), dans lequel les équations de Maxwell sont couplées à une description fluide du plasma. Il permet de décrire numériquement l'allumage des plasmas par RT avec la STPSS. Trois étapes principales peuvent être identifiées pour ce stage :

- **Se familiariser avec les concepts théoriques**

- Le stagiaire devra se familiariser avec les concepts de retournement temporel et de puits. Pour cela, le stagiaire bénéficiera du soutien de personnes de l'institut Langevin (à Paris) qui ont introduit les concepts de retournement temporel et de puits à retournement temporel. Au cours de cette première étape, le stagiaire pourra passer un certain temps à Paris à l'institut (en fonction de sa volonté et des conditions).

- Le stagiaire devra se familiariser avec le concept de STPSS. Pour cela, le stagiaire bénéficiera du soutien de personnes des laboratoires ISAE-SUPAERO et LAPLACE qui ont introduit le concept de la STPSS. Pendant cette étape (et pendant toute la durée du stage), le stagiaire interagira avec des doctorants travaillant sur l'implémentation expérimentale de la STPSS.

- **Maîtriser le code de simulation**

Le stagiaire devra apprendre à manipuler et à modifier le code de simulation, afin d'extraire l'énergie absorbée par le plasma à RT et de trouver les conditions permettant d'inverser le signe de l'onde divergente (si ces conditions existent).

- **Exploiter le code de simulation**

- Le théorème de Poynting sera implémenté numériquement dans le code 2D FDTD et validé sur des cas simples et connus, avant d'être appliqué aux plasmas à RT.

- Ensuite, le stagiaire devra identifier les conditions requises pour qu'un plasma à RT se comporte comme un puits, soit en absorbant l'énergie, soit en inversant le signe de l'onde divergente.

- La dernière partie consiste à rédiger le rapport de stage et éventuellement à publier les résultats dans une revue scientifique, en fonction des résultats obtenus.

Informations

- Localisation : Laboratoires ISAE-SUPAERO et LAPLACE (une partie du temps pourra être passée à Paris à l'institut Langevin).
- Disciplines : électromagnétisme, plasma microondes, simulation numérique.
- 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-superaero.fr

Julien de Rosny : julien.derosny@espci.fr

References

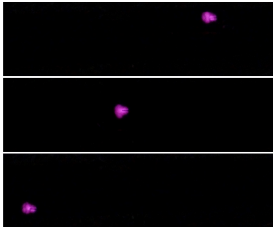
- [1] Mathias Fink. Time Reversed Acoustics. *Phys. Today*, 50(3):34–40, March 1997.
- [2] G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, G. Montaldo, and M. Fink. Time Reversal of Electromagnetic Waves. *Phys. Rev. Lett.*, 92(19):193904, May 2004.
- [3] Mathias Fink, Gabriel Montaldo, and Mickael Tanter. Time-Reversal Acoustics in Biomedical Engineering. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 5(1):465–497, 2003.
- [4] Arnaud Derode, Arnaud Tourin, Julien de Rosny, Mickaël Tanter, Sylvain Yon, and Mathias Fink. Taking Advantage of Multiple Scattering to Communicate with Time-Reversal Antennas. *Phys. Rev. Lett.*, 90(1):014301, January 2003.
- [5] G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, and M. Fink. Time reversal of wideband microwaves. *Appl. Phys. Lett.*, 88(15):154101, April 2006.
- [6] Ros Kiri Ing, Nicolas Quiéffin, Stefan Catheline, and Mathias Fink. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Appl. Phys. Lett.*, 87(20):204104, November 2005.
- [7] V. Mazières, O. Pascal, R. Pascaud, L. Liard, S. Dap, R. Clergereaux, and J.-P. Boeuf. Space-Time Plasma-Steering Source: Control of Microwave Plasmas in Overmoded Cavities. *Phys. Rev. Applied*, 16(5):054038, November 2021.
- [8] Valentin Mazières, Romain Pascaud, Laurent Liard, Simon Dap, Richard Clergereaux, and Olivier Pascal. Plasma generation using time reversal of microwaves. *Appl. Phys. Lett.*, 115(15):154101, October 2019.
- [9] Valentin Mazières, Romain Pascaud, Olivier Pascal, Richard Clergereaux, Luc Stafford, Simon Dap, and Laurent Liard. Spatio-temporal dynamics of a nanosecond pulsed microwave plasma ignited by time reversal. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 29(12):125017, December 2020.
- [10] V. Mazières, A. A. Ibrahim, C. Chauvière, P. Bonnet, R. Pascaud, R. Clergereaux, S. Dap, L. Liard, and O. Pascal. Transient Electric Field Shaping With the Linear Combination of Configuration Field Method for Enhanced Spatial Control of Microwave Plasmas. *IEEE Access*, 8:177084–177091, 2020.
- [11] Heeso Noh, Sébastien M. Popoff, and Hui Cao. Broadband subwavelength focusing of light using a passive sink. *Opt. Express, OE*, 21(15):17435–17446, July 2013. Publisher: Optica Publishing Group.

- [12] J. de Rosny and M. Fink. Overcoming the Diffraction Limit in Wave Physics Using a Time-Reversal Mirror and a Novel Acoustic Sink. *Phys. Rev. Lett.*, 89(12):124301, August 2002.
- [13] Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Arnaud Tourin, and Mathias Fink. Focusing Beyond the Diffraction Limit with Far-Field Time Reversal. *Science*, 315(5815):1120–1122, February 2007. Publisher: American Association for the Advancement of Science.
- [14] Guancong Ma, Xiyang Fan, Fuyin Ma, Julien de Rosny, Ping Sheng, and Mathias Fink. Towards anti-causal Green’s function for three-dimensional sub-diffraction focusing. *Nature Phys*, 14(6):608–612, June 2018. Number: 6 Publisher: Nature Publishing Group.
- [15] Matthieu Davy, Julien de Rosny, and Philippe Besnier. Time reversal with absorbing antennas in a mode-stirred reverberation chamber. In *2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pages 156–160, June 2016.

Time reversal plasma: electromagnetic sink?

Context

Time reversal (TR) is a wavefront shaping technique introduced in the 90s by Mathias Fink. It has been extensively studied as a method to focus acoustic [1] and electromagnetic waves [2]. In a TR experiment, a source first sends a short pulse that propagates through a complex medium, and the radiated field is recorded by an array of transducers located all around the source, the so-called time reversal mirror (TRM). The recorded waveforms are then time-reversed and re-emitted by the TRM such that the resulting wave converges back to its initial source. TRM has found a lot of applications in the fields of medicine [3], communications [4, 5], and smart objects [6]. More recently, TR has been proposed for steering microwave plasmas in overmoded cavities. Following this idea, a new plasma source, namely the "Space-Time Plasma Steering Source" (STPSS) [7], has been introduced in order to address the current challenge of patterning plasma structures with arbitrary shapes in 2D and even more in 3D. The idea of this source is to dynamically control the plasma location by changing the waveform of the transmitted signal to a large, overmoded cavity. This reverberant cavity allows to store the electro-



-magnetic energy inside before focusing this energy at the desired instants and locations, in order to trigger breakdown phenomena. Following this principle, it is then the behavior of the waves inside the cavity that controls the plasma location. Thus, it allows a dynamic control of plasmas, hence the name "Space-Time Plasma Steering Source". Experimentally, it has been shown to efficiently control plasmas on initiators in an overmoded cavity [8, 9, 10], as shown at left.

Motivations of the internship

Due to the interference between a converging and diverging wave at the focusing location, TR allows waves to be focused on a spatial dimension corresponding to at least half the wavelength – the diffraction limit. As for example explained in [11], this can be understood with the simple case of a monochromatic scalar wave. Consider a spherical wave $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r]$ converging to the origin $r = 0$, where ω is the angular frequency, $k = 2\pi/\lambda$ and λ is the wavelength. After passing the origin, the wave becomes diverging and the total field is a superposition of the two, *i.e.* $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r - e^{ikr-i\omega t}/r] = -\Re [2ie^{-i\omega t}] \sin(kr)/r$, which has a spatial width of $\lambda/2$. The temporal evolution of the

field measured during a TR experiment in acoustics is shown in figure 1(a) by way of illustration.

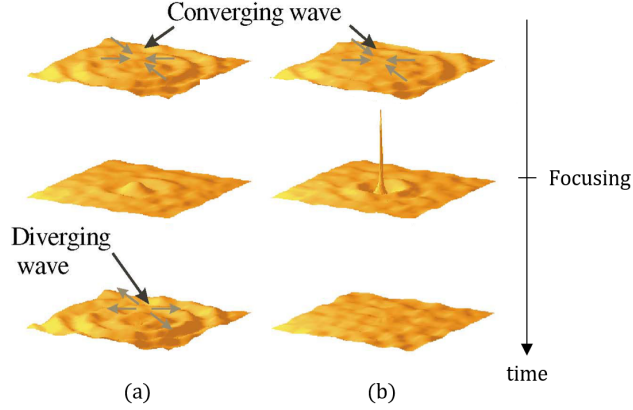


Figure 1: Temporal evolution of the field: (a) TR (b) TR with an active sink [13].

Sub-wavelength focusing has been demonstrated using metamaterials [12] or with the presence of a sink at the focusing location. The sink can be active, consisting in replacing the source by its TR image, *i.e.* generating $\Re [e^{ikr-i\omega t}/r]$ at the focusing location [13], or it can be passive, consisting in suppressing the diverging wave (by absorption), as experimentally demonstrated in acoustics using a near-perfect absorber [14] and in microwave using absorbing antennas [15]. In this case (passive or active), the total field corresponds only to the converging wave $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r] = \cos(kr + \omega t)/r$. Another way of obtaining sub-wavelength focusing is to flip the sign of the diverging wave, so that the total field becomes $\Re [e^{-ikr-i\omega t}/r + e^{ikr-i\omega t}/r] = \Re [2e^{-i\omega t}] \cos(kr)/r$. In both cases, $\cos(kr)/r \rightarrow \infty$ as $r \rightarrow 0$, reflecting a smaller focal spot than $\lambda/2$. The temporal evolution of the field measured during a TR experiment in acoustics with an active sink at the focusing location is shown in figure 1(b) by way of illustration.

The question we are asking for this internship is whether a plasma generated by TR can behave like an electromagnetic sink (absorbing the converging wave or flipping the sign of the diverging wave).

Internship proposal

The aim of this internship is to investigate the ability to use TR plasma as an electromagnetic passive sink. To do that, the trainee will use the numerical code developed in [7]. This code is a 2D FDTD (Finite Difference Time Domain) code, in which Maxwell's equations are coupled with a fluid description of the plasma. It allows to describe numerically the ignition of plasmas by TR with the STPSS. Three main steps can be identified for this internship:

- **Become familiar with theoretical concepts**
 - The trainee will have to familiarize himself with the concepts of time reversal and

time reversal sink. For this, the trainee will benefit from the support of people at the Langevin Institute (in Paris) who have introduced the concepts of time reversal and time reversal sink. During this first step, the trainee may spend some time in Paris at the institute (depending on its own will and on the conditions).

– The trainee will have to familiarize himself with the concept of STPSS. To this end, the trainee will benefit from the support of people from the ISAE-SUPAERO and LAPLACE laboratories who introduced the concept of the STPSS. During this step (and for the duration of the internship), the trainee will interact with PhD students working on the experimental implementation of the STPSS.

- **Master the simulation code**

The trainee will have to learn to handle and modify the simulation code, in order to extract the energy absorbed by the TR plasma and to find conditions allowing to flip the sign of the diverging wave (if such conditions exist).

- **Exploit the simulation code**

– Poynting theorem will be numerically implemented on the 2D FDTD code and validated on simple and known cases, before being applied to the TR plasmas.

– Then, the trainee will have to identify the conditions required for a TR plasma to behave as TR sink, either by absorbing energy or by flipping the sign of the diverging wave.

– The last part consists in writing the internship report and possibility in publishing the results in a scientific journal, depending on the results obtained.

Information

- Location: ISAE-SUPAERO and LAPLACE laboratories (some time may be spent in Paris at the Langevin institute).
- Disciplines: electromagnetism, microwave plasma, numerical simulation.
- Profile required: We are looking for a candidate with a Master's degree/engineering school background in microwave and/or plasma physics, with a particular interest in microwave-plasma interactions.
- Contacts:

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

Julien de Rosny : julien.derosny@espci.fr

References

- [1] Mathias Fink. Time Reversed Acoustics. *Phys. Today*, 50(3):34–40, March 1997.
- [2] G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, G. Montaldo, and M. Fink. Time Reversal of Electromagnetic Waves. *Phys. Rev. Lett.*, 92(19):193904, May 2004.
- [3] Mathias Fink, Gabriel Montaldo, and Mickael Tanter. Time-Reversal Acoustics in Biomedical Engineering. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 5(1):465–497, 2003.
- [4] Arnaud Derode, Arnaud Tourin, Julien de Rosny, Mickaël Tanter, Sylvain Yon, and Mathias Fink. Taking Advantage of Multiple Scattering to Communicate with Time-Reversal Antennas. *Phys. Rev. Lett.*, 90(1):014301, January 2003.
- [5] G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, and M. Fink. Time reversal of wideband microwaves. *Appl. Phys. Lett.*, 88(15):154101, April 2006.
- [6] Ros Kiri Ing, Nicolas Quiéffin, Stefan Catheline, and Mathias Fink. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Appl. Phys. Lett.*, 87(20):204104, November 2005.
- [7] V. Mazières, O. Pascal, R. Pascaud, L. Liard, S. Dap, R. Clergereaux, and J.-P. Boeuf. Space-Time Plasma-Steering Source: Control of Microwave Plasmas in Overmoded Cavities. *Phys. Rev. Applied*, 16(5):054038, November 2021.
- [8] Valentin Mazières, Romain Pascaud, Laurent Liard, Simon Dap, Richard Clergereaux, and Olivier Pascal. Plasma generation using time reversal of microwaves. *Appl. Phys. Lett.*, 115(15):154101, October 2019.
- [9] Valentin Mazières, Romain Pascaud, Olivier Pascal, Richard Clergereaux, Luc Stafford, Simon Dap, and Laurent Liard. Spatio-temporal dynamics of a nanosecond pulsed microwave plasma ignited by time reversal. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 29(12):125017, December 2020.
- [10] V. Mazières, A. A. Ibrahim, C. Chauvière, P. Bonnet, R. Pascaud, R. Clergereaux, S. Dap, L. Liard, and O. Pascal. Transient Electric Field Shaping With the Linear Combination of Configuration Field Method for Enhanced Spatial Control of Microwave Plasmas. *IEEE Access*, 8:177084–177091, 2020.
- [11] Heeso Noh, Sébastien M. Popoff, and Hui Cao. Broadband subwavelength focusing of light using a passive sink. *Opt. Express, OE*, 21(15):17435–17446, July 2013. Publisher: Optica Publishing Group.
- [12] Geoffroy Lerosey, Julien de Rosny, Arnaud Tourin, and Mathias Fink. Focusing Beyond the Diffraction Limit with Far-Field Time Reversal. *Science*, 315(5815):1120–1122, February 2007. Publisher: American Association for the Advancement of Science.

- [13] J. de Rosny and M. Fink. Overcoming the Diffraction Limit in Wave Physics Using a Time-Reversal Mirror and a Novel Acoustic Sink. *Phys. Rev. Lett.*, 89(12):124301, August 2002.
- [14] Guancong Ma, Xiying Fan, Fuyin Ma, Julien de Rosny, Ping Sheng, and Mathias Fink. Towards anti-causal Green's function for three-dimensional sub-diffraction focusing. *Nature Phys*, 14(6):608–612, June 2018. Number: 6 Publisher: Nature Publishing Group.
- [15] Matthieu Davy, Julien de Rosny, and Philippe Besnier. Time reversal with absorbing antennas in a mode-stirred reverberation chamber. In *2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pages 156–160, June 2016.