

Maximisation du niveau du pic de focalisation par retournement temporel pour la génération de plasma microondes *Maximisation of the time reversal peak level for microwave plasma generation*

Saucourt A¹, Mazières V², Liard L³

¹ISAE-SUPAERO 10 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, antoine.saucourt@isae-supero.fr

²ISAE-SUPAERO 10 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, valentin.mazieres@isae-supero.fr

³Laboratoire LAPLACE 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse, liard@laplace.univ-tlse.fr

Mots clés : Source plasma microonde (Microwave plasma source), Retournement Temporel (Time Reversal), Plasma nanoseconde (Nanoseconde plasma)

Résumé/Abstract

Le retournement temporel est une méthode permettant de focaliser des ondes acoustiques ou électromagnétiques. Mazières *et al.* ont récemment mis au point un nouveau type de source plasma exploitant sur le retournement temporel. Ils ont réussi à amorcer des plasmas en focalisant sur des antennes placées dans une cavité réverbérante. La prochaine étape pour le développement de cette source est le décrochage du plasma de ces antennes. Dans cette optique, le niveau du pic de focalisation est un élément clé, puisqu'il conditionne le contrôle spatio-temporel des plasmas. Ce papier étudie différentes méthodes de retournement temporel afin de tester numériquement leur efficacité pour la maximisation du niveau de pic.

Time reversal is a method of focusing acoustic or electromagnetic waves. Mazières *et al.* have recently developed a new type of plasma source exploiting time reversal. They have succeed in initiating a plasma by focusing on antennas placed in a reverberant cavity. The next step in the development of this source is to unhook the plasma from these antennas. In this respect, the level of the focusing peak is a key element, since it rules the spatio-temporal control of the plasma. This paper examines various time-reversal methods to numerically test their effectiveness in maximizing peak level.

1 Introduction

Le Retournement temporel (RT) est une méthode permettant de focaliser des ondes acoustiques ou électromagnétiques, largement étudiée depuis son développement dans les années 1990 par M. Fink *et al.* Une expérience de retournement temporel se déroule en deux phases : lors de la première une impulsion se propage dans un milieu et les réponses à cette impulsion, nommée "réponses impulsionsnelles", sont mesurées à l'aide d'un réseau de récepteurs nommé "time reversal mirror" (TRM) situé dans ce milieu. Lors de la deuxième phase, ces réponses impulsionsnelles sont retournées temporellement puis réémises par le TRM de façon à focaliser les ondes au niveau de la source initiale de l'impulsion. Dans un environnement complexe comme une cavité réverbérante, il est possible de ne considérer qu'une seule antenne dans notre miroir en bénéficiant des multiples réflexions subies par les ondes aux parois de la cavité, technique appelé RT monovoie dans la suite. La focalisation par RT a notamment été utilisée dans des applications biomédicales telles que la lithotritie des calculs rénaux et des tumeurs cérébrales [1,2] et récemment, Mazières *et al.* ont mis au point un nouveau type de source plasma appelé STPSS (SpaceTime Plasma Steering Source) [3], qui exploite les capacités de focalisation du RT pour contrôler temporellement et spatialement l'allumage d'un plasma dans une cavité. Expérimentalement, le RT a permis d'amorcer des plasmas en focalisant sur des antennes placées dans une cavité réverbérante [4]. La prochaine étape à franchir pour le développement de cette source est le décrochage du plasma de ces antennes. Dans cette optique, le niveau du pic de focalisation est un élément clé, puisqu'il conditionne le contrôle spatio-temporel des plasmas.

Une des solutions pour maximiser le niveau du pic de focalisation est de modifier la forme d'onde de l'impulsion renvoyée. Différentes méthodes ont été proposées (dont certaines récemment [5]), et elles ont été récemment comparées entre elles dans le domaine acoustique [6]. L'objectif de ce papier est d'étudier numériquement l'influence de ces différentes méthodes dans le domaine électromagnétique, pour en évaluer leur intérêt dans un contexte de contrôle de plasma (pour la STPSS). Ce papier se concentre sur la comparaison des différentes méthodes en utilisant le code de simulation FDTD (Finite Difference Time-Domain) 2D introduit dans [3]. Cette étude s'inscrit dans l'objectif de décrochage du plasma et nécessite donc l'optimisation du contrôle du plasma par RT dans une cavité réverbérante. Cette étude préliminaire ne prend pas en compte la présence de plasma, mais sera suivie par d'autres études numériques et par des tests expérimentaux sur un nouveau dispositif.

2 Code de simulation FDTD

Cette section décrit l'utilisation du code numérique FDTD ainsi que les divers paramètres associés à nos simulations. Le code utilisé est celui développé par Mazières *et al.* [3] pour étudier numériquement l'amorçage de plasmas par RT. Plus précisément, seules les composantes relatives à la description de la propagation des ondes (équations de Maxwell et conditions limites) seront exploitées dans cette étude, excluant ainsi la partie décrivant le plasma à travers un modèle fluide. La cavité 2D dans laquelle les simulations sont effectuées présente une forme de disque tronqué, comme illustré dans la figure 1. Seul le mode TE (transverse électrique) est pris en compte, impliquant que le champ électrique est orienté dans la direction z et le champ magnétique est confiné dans le plan $OxOy$. Les simulations sont effectuées avec du RT monovoie. En effet, en se positionnant dans un milieu réverbérant pour tirer parti des multiples réflexions subies par les ondes, le nombre de récepteurs peut être réduit à un seul, comme expliqué précédemment. De plus, les conditions adoptées sont similaires à celles ayant permis d'amorcer des plasmas expérimentalement [3]. Cela signifie que nous utilisons une impulsion $e(t)$ de 8 ns avec une fréquence centrale de 2,4 GHz, et un temps de réverbération de 300 ns pour notre cavité. Au cours de la première phase du RT, représentée à gauche dans la figure 1, la réponse $r(t)$ à l'impulsion $e(t)$ est obtenue par le capteur TRM. Ce signal peut être exprimé comme :

$$r(t) = e(t) \otimes h(t) \quad (1)$$

Où $h(t)$ correspond à la réponse d'un système "linear time-invariant" LTI (entre deux positions dans la cavité) à une impulsion de type dirac. Ensuite, lors de la deuxième phase, représenté dans la partie droite de la figure 1, le signal $r_c(t)$ généré par l'une des méthodes décrites dans la section suivante est émis par le TRM, entraînant une focalisation. Le signal obtenu au niveau de la focalisation, que nous désignerons par $rt(t)$, peut s'écrire :

$$rt(t) = r_c(t) \otimes h(t) \quad (2)$$

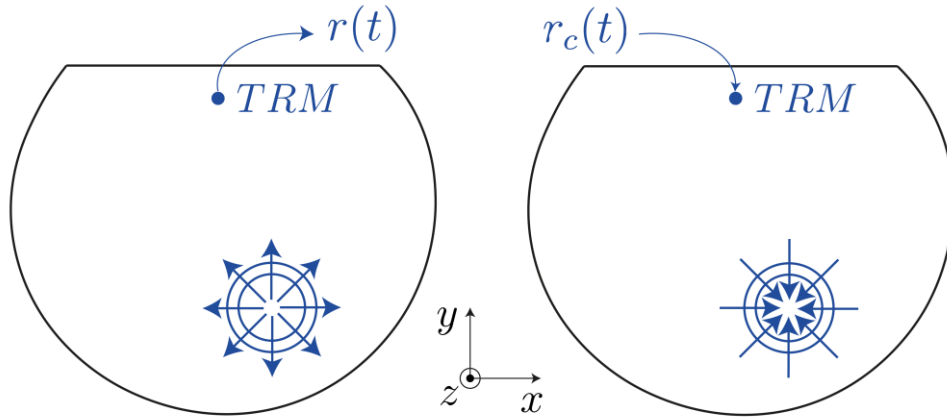


Figure 1 : Schéma des deux étapes du retournement temporel dans la cavité 2D simulée

3 Méthodes RT

Dans cette section, nous allons présenter les différentes méthodes de RT : le RT "standard", le filtre inverse¹, le one-bit et le clipping. Chaque technique altère la forme de la réponse impulsionnelle $r(t)$ pour engendrer le signal $r_c(t)$, permettant ainsi de manipuler le niveau du pic de focalisation et la qualité du rapport signal sur bruit (SNR).

3.1 RT Standard

Au cours de la deuxième étape du retournement temporel standard, cette réponse $r(t)$ est inversée temporellement

¹ Le filtre inverse n'est pas à proprement parler une "méthode de RT", mais par simplicité nous l'intégrons dans la liste des méthodes de RT, pour ensuite comparer ces méthodes entre elles.

et renvoyée à la cavité. Le signal à renvoyer dans la cavité est donc défini par $r_c(t) = r(-t)$, et le signal reçu s'exprimera alors comme :

$$rt(t) = r(-t) \otimes h(t) = e(-t) \otimes h(-t) \otimes h(t) \quad (3)$$

Un exemple du signal $r_c(t)$ à renvoyer pour un RT standard est présenté dans la figure 2(a).

3.2 Filtre inverse

Le filtre inverse est une méthode couramment utilisée dans le traitement d'image ou de signal. Son objectif est de supprimer l'effet du canal de propagation ou d'un filtre précédent. Dans notre contexte, cela équivaut à éliminer l'influence de la fonction de transfert $H(f)$ (qui est la transformée de Fourier de $h(t)$). Pour ce faire, reprenons l'équation (2) dans le domaine fréquentiel :

$$Rt(f) = R_c(f).H(f) \quad (4)$$

Où $Rt(f)$ et $R_c(f)$ représentent les transformées de Fourier de $rt(t)$ et $r_c(t)$, respectivement. L'objectif est de faire en sorte que le signal reçu corresponde exactement à l'impulsion initiale $E(f)$. Ainsi, pour obtenir $E(f)$, le signal $R_c(f)$ peut être exprimé comme :

$$R_c(f) = E(f)/H(f) \quad (5)$$

L'avantage de cette technique réside dans sa capacité à éliminer l'effet de la cavité sur la propagation de l'onde. Cependant, elle requiert la connaissance de la fonction de transfert $H(f)$ de la cavité. De plus, il est nécessaire que la norme de $H(f)$ soit toujours supérieure à zéro. Un exemple du signal $r_c(t)$ à être renvoyé est présenté dans la figure 2(b).

3.3 One-bit

La méthode One-bit est une méthode introduite par Derode *et al.* [7] visant à maximiser le niveau du pic de retournement temporel. Pour y parvenir, le niveau des "lobes" présents dans la réponse impulsionnelle inversée temporellement est élevé au niveau maximal. Cette méthode peut s'écrire comme :

$$r_c(t) = \begin{cases} -1 & \text{si } r(-t) < 0 \\ 1 & \text{si } r(-t) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

Comme l'information de phase est préservée, la focalisation de l'énergie par le retournement temporel demeure valide. Un exemple de signal $r_c(t)$ à renvoyer est présenté dans la figure 2(c).

3.4 Clipping

La méthode du clipping est une approche relativement récente développée par Heaton *et al.*[5]. Cette technique constitue une variante de la méthode One-bit, où l'objectif demeure de préserver l'information de phase du signal tout en conservant également une partie de l'information en amplitude. Cette méthode peut s'écrire comme :

$$r_c(t) = \begin{cases} -1 & \text{si } Cr(-t) \leq -1 \\ 1 & \text{si } Cr(-t) \geq 1 \\ Cr(-t) & \text{si } -1 < Cr(-t) < 1 \end{cases} \quad (7)$$

Où C est une constante choisie arbitrairement, par laquelle le signal normalisé est multiplié. Ainsi, pour des valeurs de C très élevées, le clipping équivaut à la méthode One-bit. Cette technique présente l'avantage de limiter le bruit

généré, ce qui permet d'augmenter le SNR spatial et temporel tout en améliorant le niveau du pic de focalisation. Un exemple du signal $r_c(t)$ pour une valeur de $C = 4$ est présenté dans la figure 2(d).

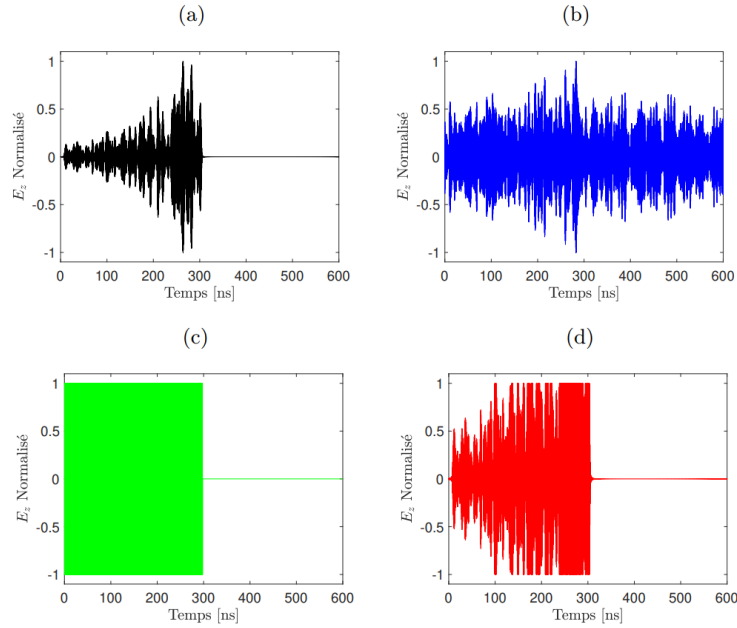


Figure 2 : Exemple de signaux $r_c(t)$ à renvoyer pour différentes méthodes de RT (a) RT Standard (b) Filtre Inverse (c) One-bit (d) Clipping avec $C = 4$

4 Comparaison des méthodes

Dans cette section, les résultats obtenus pour les quatre techniques de retournement temporel décrites précédemment sont comparés. Afin d'évaluer l'efficacité de ces méthodes pour notre application, deux caractéristiques principales du retournement temporel sont quantifiées : le niveau du champ E_p du pic de focalisation et le SNR , qui correspond au rapport entre le niveau du champ au moment de la focalisation et le niveau moyen du bruit :

$$SNR = \frac{\langle |E_p| \rangle}{\langle \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_{bruit}|^2} \rangle} \quad (8)$$

Où les chevrons $\langle \rangle$ indiquent une moyenne d'ensemble prise sur 36 positions différentes du récepteur choisies de manière aléatoire et où N correspond au nombre de points qui échantillonnent le signal. Le niveau du champ au pic de focalisation permet d'évaluer l'efficacité de la méthode pour amorcer un plasma au moment et à l'emplacement souhaités, tandis que le SNR permet d'évaluer la contrôlabilité temporelle du plasma.

4.1 RT standard

Un exemple du signal reçu $rt(t)$ par le récepteur avec un RT standard est donné dans la figure 2(a). Pour pouvoir comparer les méthodes entre elles, les signaux $rt(t)$ ont été normalisés par rapport au signal $rt(t)$ obtenu par RT standard. L'amplitude maximale du pic de RT standard est donc de 1 ± 0.2 kV/m. Pour cette condition le SNR vaut 20.

4.2 Comparaison des résultats obtenus pour les différentes méthodes de RT

Les valeurs obtenues des pics et du SNR pour les quatre méthodes de retournement temporel sont présentées dans le tableau 1.

Niveau du pic et du SNR		
Méthode RT	Niveau du pic [kV/m]	SNR
RT Standard	1.0 ± 0.2	20 ± 4
Filtre inverse	0.4	49 ± 26
One-bit	4.2 ± 0.4	10 ± 1
Clipping C=4	2.6 ± 0.3	16 ± 3
Clipping C=10	3.4 ± 0.4	14 ± 2

Tableau 1 : Niveau du pic de focalisation et du SNR pour 4 méthodes de RT différentes

Pour le filtre inverse, l'objectif était de supprimer l'effet de la cavité sur le signal renvoyé. Bien que cette méthode permette d'obtenir un SNR bien meilleur que le retournement temporel standard, comme indiqué dans le tableau 1, les résultats numériques montrent une perte significative d'un facteur 2.3 sur le niveau du pic, rendant cette méthode moins intéressante dans le cadre de notre application. Pour la méthode One-bit, le niveau du pic est quadruplé (voir tableau 1), ce qui correspond à l'objectif de cette méthode visant à maximiser l'énergie renvoyée dans la cavité en ne conservant que l'information de phase du signal. Le désavantage de cette technique, comme le montrent les valeurs du SNR obtenues (2), c'est qu'en envoyant un maximum d'énergie dans la cavité, le niveau du bruit est fortement augmenté ce qui explique cette diminution d'un facteur de 1.5 pour le SNR. Ainsi, pour cette technique, l'augmentation du niveau du pic obtenu semble intéressante pour l'optimisation du contrôle de l'amorçage du plasma. Enfin, pour le clipping dans le cas $C = 4$ le SNR s'avère bien meilleur que pour le One-bit tout en présentant une augmentation du pic intéressante. De plus, en définissant $C = 10$ cela permet d'obtenir un meilleur niveau de pic que pour $C = 4$ tout en gardant une valeur de SNR intéressante.

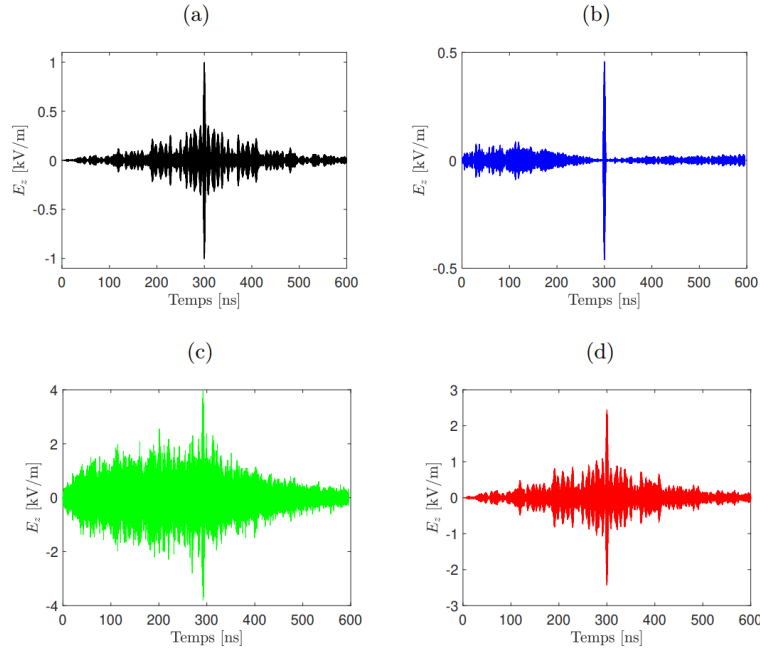


Figure 3 Exemple de signaux à renvoyer pour différentes méthodes de RT (a) RT standard (b) Filtre inverse (c) One-bit (d) Clipping avec C=4

4.3 Influence de la bande passante

Une analyse fréquentielle du signal renvoyé pour les techniques du one-bit et du clipping montre la présence de composantes fréquentielles hors de la bande passante de l'impulsion initiale $e(t)$ (250 MHz autour de 2.4 GHz). Or, l'objectif à terme de cette étude simulateur est la mise en place expérimentale des méthodes identifiées comme prometteuse. Ainsi, il est important de prendre en compte les contraintes associées à l'utilisation des appareils expérimentaux à notre disposition. Cela se traduit par la nécessité de manipuler des signaux dont les composantes spectrales sont comprises entre 2.2 GHz et 2.6 GHz. Ainsi, nous appliquons dans cette section un filtre passe bande (2.2-2.6 GHz) sur nos signaux simulés de one-bit et de clipping afin que les résultats soient plus proches des conditions expérimentales.

Les nouvelles valeurs obtenues pour les pics de focalisation et du SNR pour le one-bit et le clipping $C = 4$ et $C = 10$ ainsi filtrés sont présentées dans le tableau 2.

Niveau du pic et du SNR		
Méthode RT	Niveau du pic [kV/m]	SNR
One-bit filtré	2.1 ± 0.3	14 ± 3
Clipping filtré $C = 4$	1.8 ± 0.2	17 ± 4
Clipping filtré $C = 10$	2.1 ± 0.3	15 ± 3

Tableau 2 : Niveau du pic de focalisation et du SNR pour le One-bit et Clipping $C=4$ filtrés

Pour le one-bit, le filtrage a pour effet de diminuer le niveau du pic d'un facteur 2 (en contrepartie le SNR augmente d'un facteur 1,4). Cela rend cette technique bien moins intéressante pour notre application, l'augmentation du niveau du pic par rapport au RT standard passant ainsi de 4 à 2. Pour le clipping avec $C=4$, le filtrage a pour effet de diminuer le niveau du pic d'un facteur 1.4 (le SNR augmente très légèrement d'un facteur 1.06). Avec $C = 10$, le niveau du pic est doublé comme avec la technique one-bit, mais en obtenant un SNR plus intéressant. Ainsi, malgré le filtrage, la technique du clipping semble rester la technique la plus intéressante dans le cadre de cette étude. Nous nous concentrons donc sur l'étude de cette technique dans la section suivante.

4.4 Impact du paramètre C sur le niveau du pic de focalisation et sur le SNR pour du clipping filtré

L'influence du paramètres C sur le niveau de pic de focalisation et sur le SNR est spécifiquement étudié dans cette partie, par une analyse paramétrique. Pour ce faire, des mesures avec 36 positions différentes du récepteur, choisies aléatoirement ont été réalisées en faisant varier C entre 1 et 40. Les valeurs obtenues des pics et du SNR sont présentées dans le tableau 3.

Niveau du pic et du SNR		
Valeur de C	Niveau du pic [kV/m]	SNR
1	1.0 ± 0.2	20 ± 4
2	1.4 ± 0.3	19 ± 4
3	1.7 ± 0.2	18 ± 4
4	1.8 ± 0.2	17 ± 4
7	2.0 ± 0.2	16 ± 3
10	2.1 ± 0.3	15 ± 3
20	2.1 ± 0.3	14 ± 3
40	2.1 ± 0.3	14 ± 3

Tableau 3 : Niveau du pic de focalisation et du SNR pour le clipping filtré en fonction de la valeur du paramètre C

Pour une valeur de $C = 1$, les résultats obtenus correspondent bien à ceux obtenus avec le RT standard. Lorsque la valeur de C augmente, les valeurs obtenus s'approchent progressivement de la méthode one-bit, comme attendu. En effet pour une valeur de C suffisamment grande, la technique du clipping et du one-bit sont équivalentes. Le cas $C = 7$, semble présenter un optimum avec un meilleur SNR que pour le one-bit filtré et un niveau du pic doublé par rapport au RT standard. Ainsi, à travers cette étude, cette technique du clipping apparaît être la méthode la plus intéressante. La flexibilité de cette méthode en fonction du paramètre C semble en faire une bonne candidate même en prenant en compte la contrainte sur la bande fréquentielle utilisable expérimentalement.

4.5 Comparaison des résultats numérique avec les résultats obtenus dans la littérature

Nous avons ensuite comparé nos résultats numériques obtenus sans filtrage avec ceux obtenus expérimentalement par Willardson *et al.* [6] en acoustique. Les mêmes tendances sont présentes sur le niveau des pics et sur l'évolution du SNR en fonction des méthodes, excepté pour le clipping, où ils obtiennent des pics bien plus élevés que le one-bit, ce qui n'est pas notre cas. Cette différence pourrait provenir de la valeur $C = 4$ ou $C = 10$ fixée arbitrairement, qui est beaucoup plus faible que la leur. De plus, dans leurs études, chaque méthode est optimisée pour obtenir le meilleur rapport niveau du pic / SNR et leur méthode one-bit est modulée à l'aide d'une valeur palier p qui permet de réduire le niveau du bruit.

5 Conclusion

Dans ce papier, une première approche numérique pour étudier différentes méthodes de RT et leur influence au niveau des pics de focalisation et sur le SNR est présenté. Sans filtre fréquentiel, la technique du one-bit permet d'obtenir le meilleur niveau de pic, ce qui semble intéressant pour l'amorçage d'un plasma. Mais dans le cadre des contraintes expérimentales qui sont associées à la réalisation pratique, la technique du clipping semble être la plus prometteuse pour le contrôle temporel de plasmas grâce à la flexibilité offerte par le contrôle du paramètre C . La tendance observée pourrait permettre d'obtenir un meilleur contrôle temporel dans l'optique de l'amorçage d'un plasma par RT puis de son décrochage des initiateurs. Par la suite, l'objectif est de coupler ce code de simulation électromagnétique avec un modèle plasma afin d'étudier l'impact des différentes méthodes de RT sur l'amorçage du plasma dans notre cavité. L'objectif final étant de réaliser un dispositif expérimental optimisé permettant un contrôle spatio-temporel des plasmas dans une cavité réverbérante.

6 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la DGA/AID pour son soutien financier.

Références bibliographiques

- [1] Mickaël Tanter *et al.*, Focusing and steering through absorbing and aberrating layers : Application to ultrasonic propagation through the skull. The Journal of the Acoustical Society of America, 103 :2403–10, 06 1998.
- [2] Jean-Louis Thomas, François Wu, and Mathias Fink. Time reversal focusing applied to lithotripsy. Ultrasonic Imaging, 18(2) :106–121, 1996. PMID : 8813030.
- [3] V. Mazieres *et al.*, “Space-time plasma-steering source : Control of microwave plasmas in overmoded cavities,” Physical Review Applied, vol. 16, 11 2021.
- [4] V. Mazières *et al.*, “Plasma generation using time reversal of microwaves,” Applied Physics Letters, vol. 115, no. 15, p. 154101, 10 2019.
- [5] C. Heaton *et al.*, “Time reversal focusing of elastic waves in plates for an educational demonstration,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 141, no. 2, pp. 1084–1092, 02 2017.
- [6] M. L. Willardson *et al.*, “Time reversal focusing of high amplitude sound in a reverberation chamber,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 143, no. 2, pp. 696–705, 02 2018.
- [7] A. Derode *et al.*, “Ultrasonic pulse compression with one-bit time reversal through multiple scattering,” Journal of Applied Physics, vol. 85, no. 9, pp. 6343– 6352, 05 1999.