

## *Etude de la focalisation par retournement temporel pour le claquage de plasmas : influence de la répétition et de la durée d'impulsion*

---

P. DUSSOLLIET-BERTHOD<sup>1,2</sup>, J. SOKOLOFF<sup>2</sup>, O. ROUZAUD<sup>1</sup>, O. PASCAL<sup>2</sup>, M. ORAIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ONERA/DMPE, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, France, pierre.dussolliet-berthod@onera.fr

<sup>2</sup>LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France, dussolliet@laplace.univ-tlse.fr

---

*Mots clés : Retournement temporel, micro-ondes, plasma, allumage*

*Keywords : Time reversal, microwaves, plasma, ignition*

---

### **Résumé/Abstract**

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre du développement d'un nouveau système d'allumage d'une chambre de combustion à l'aide de plasmas contrôlés par des micro-ondes focalisées par retournement temporel (RT). Les expériences menées précédemment dans le cadre de ce projet montrent qu'il est nécessaire d'envoyer plusieurs impulsions successives de courte durée ou une impulsion de longue durée pour générer un plasma. Dans cet article, nous étudions l'impact de l'envoi répété d'impulsions et de la durée de l'impulsion sur la qualité de focalisation spatiale et temporelle du retournement temporel. Les résultats préliminaires obtenus montrent que dans les deux cas la focalisation est dégradée.

The work presented here is part of a broader project whose goal is to develop a new ignition system for combustion chambers based on a plasma generated by microwaves focused by time-reversal. Previous work showed that it is necessary to use multiple short pulses or pulses of longer duration in order to generate a plasma. In this article, we study the impact of the use of multiple pulses and of the length of the pulses on the quality of the spatial and temporal focalization. Preliminary results show a degradation of the focalization.

### **1 Introduction**

Pour allumer un mélange air/carburant, il est nécessaire d'apporter une quantité d'énergie initiale. Récemment, il a été montré en laboratoire que cet apport d'énergie pouvait être réalisé via un plasma généré à l'aide de micro-ondes focalisées par retournement temporel [1]. L'utilisation d'une unique impulsion de courte durée (8ns) focalisée par retournement temporel n'ayant pas permis de claquer un plasma, plusieurs impulsions successives (entre 4 et 7) de plus longue durée (environ 200ns chacune) ont été utilisées. Une dégradation de la qualité de la focalisation semble alors avoir été observée, mais n'a pas été étudiée plus en détail. Il apparaît cependant nécessaire d'étudier cette dégradation puisqu'elle peut avoir plusieurs conséquences indésirables. Premièrement, une partie non négligeable de l'énergie injectée peut ne pas être utilisée pour le claquage du plasma et il faut alors utiliser une source micro-onde de puissance plus élevée. Deuxièmement, lorsque la focalisation est trop détériorée, il devient difficile de contrôler le point et l'instant de refocalisation des micro-ondes. Un plasma peut alors éventuellement apparaître à un autre endroit de la cavité. Cette situation serait particulièrement problématique dans le cadre d'un système d'allumage, puisqu'elle pourrait conduire à un non-allumage (par exemple si le claquage a lieu là où il n'y a pas de carburant) ou à allumer le carburant à un endroit non désiré. Dans cet article, nous proposons donc de nous intéresser à ce phénomène de dégradation de la focalisation lors de l'utilisation de plusieurs impulsions ou d'une unique impulsion de plus longue durée par une approche couplant mesures expérimentales et calculs numériques.

### **2 Dispositif expérimental**

Les travaux présentés ici reposent sur l'utilisation du retournement temporel monovoie en cavité réverbérante, principe d'abord introduit par Draeger & al. [2] en acoustique, puis ensuite transposé aux ondes électromagnétiques par Lerosey & al. [3]. A cette fin, nous disposons d'une cavité électromagnétique de grandes dimensions en cuivre (Figure 1) déjà utilisée dans le cadre des travaux de B. Fragge & al. [4]. Une antenne de puissance permet d'injecter les micro-ondes dans la cavité et plusieurs monopôles de petite taille devant la longueur d'onde peuvent être utilisés comme cibles pour la focalisation par retournement temporel. Un accès sur la paroi supérieure permet d'introduire

une sonde non-intrusive *enprobe EFS-105* dans la cavité afin de mesurer le champ électrique en divers points situés sur une droite d'axe vertical  $\vec{z}$ . Pour finir, une chaîne de génération de signaux RF constituée d'un générateur de signaux arbitraires et d'un amplificateur de puissance permet de générer les signaux de retournement temporel à injecter dans la cavité. La plage de fréquences utilisée est centrée sur  $f_c = 2,4GHz$ , mais il est possible d'utiliser des fréquences plus élevées si besoin.

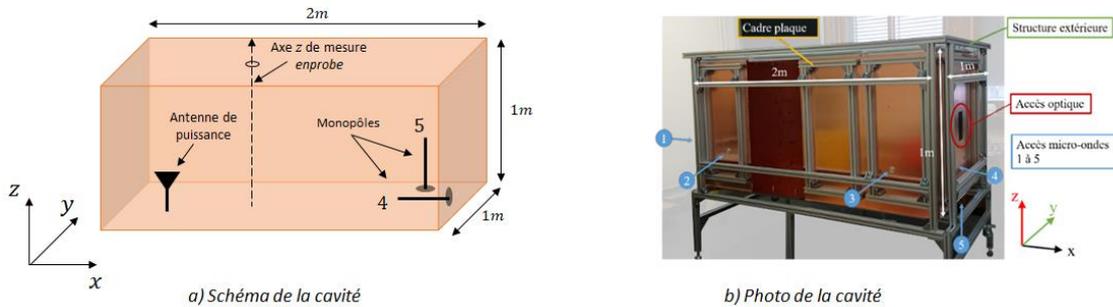


Figure 1: Cavité microonde utilisée pour les expériences d'allumage par retournement temporel

### 3 Etude préliminaire de la focalisation

Avant d'étudier la focalisation de manière plus détaillée, nous commençons par vérifier la capacité à focaliser spatialement et temporellement dans notre cavité réverbérante à l'aide d'une configuration simplifiée. Cette configuration comprend l'antenne de puissance et deux monopôles (numérotés 4 et 5) servant de cibles pour le retournement temporel (voir Figure 1a).

#### 3.1 Méthode

La première étape consiste à mesurer la fonction de transfert  $H_k(f)$  entre l'antenne de puissance P et chacun des monopôles. Le signal  $R_{i,j}(f)$  obtenu après retournement temporel sur le monopôle  $j$  lorsque l'on cherche à focaliser sur le monopôle  $i$  est ensuite calculé numériquement dans le domaine fréquentiel via la formule :

$$R_{j,i}(f) = H_j(f) \cdot H_i(f)^* \cdot E(f)^* \quad (1)$$

avec  $E(f)$  la forme de l'impulsion initiale et  $H_i(f)^*$  le conjugué de  $H_i(f)$ . Cela permet notamment la comparaison entre l'amplitude du signal  $R_{i,i}$  reçu au point de focalisation et l'amplitude du signal  $R_{j,i}$  reçu en un autre point. Si besoin, une transformée de Fourier inverse permet de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel et obtenir le signal  $r_{j,i}(t)$  reçu sur le monopôle  $j$  en fonction du temps. Le calcul du signal après retournement temporel étant effectué de manière numérique, il est possible de faire varier l'impulsion initiale  $E(f)$ , que ce soit en terme de durée, de nombre de répétitions, de fréquence de la porteuse ou de tout autre paramètre caractérisant l'impulsion, sans avoir à effectuer d'autres mesures. Dans la suite nous nous intéresserons en particulier à l'influence de la durée de l'impulsion et à l'influence du nombre d'impulsions successives.

#### 3.2 Résultats

Dans un premier temps, nous cherchons à focaliser sur l'antenne 4. L'antenne 5 sert quant à elle à évaluer le signal reçu à un autre point de la cavité. Les résultats de ces calculs (voir Figure 2) montrent que, pour une impulsion de courte durée (8ns), nous sommes capables d'obtenir une bonne focalisation en temps et en espace. En effet, nous constatons sur la Figure 2b que le pic de retournement temporel est de courte durée et que le bruit est de faible niveau par rapport au pic. La focalisation spatiale semble bonne, elle aussi, puisqu'il n'y a pas de pic de focalisation sur l'antenne 5 (Figure 2c). Après ce premier calcul, nous nous intéressons à la qualité de la focalisation pour une impulsion initiale de plus longue durée, ici 100ns (deuxième ligne de la Figure 2). Dans ce cas, la focalisation temporelle s'est dégradée puisque le rapport entre l'amplitude du pic et le bruit est plus faible qu'avant (Figure 2e). La focalisation spatiale s'est aussi dégradée puisque l'amplitude relative du signal reçu sur l'antenne 5 (Figure 2f) est elle aussi plus importante qu'avant.

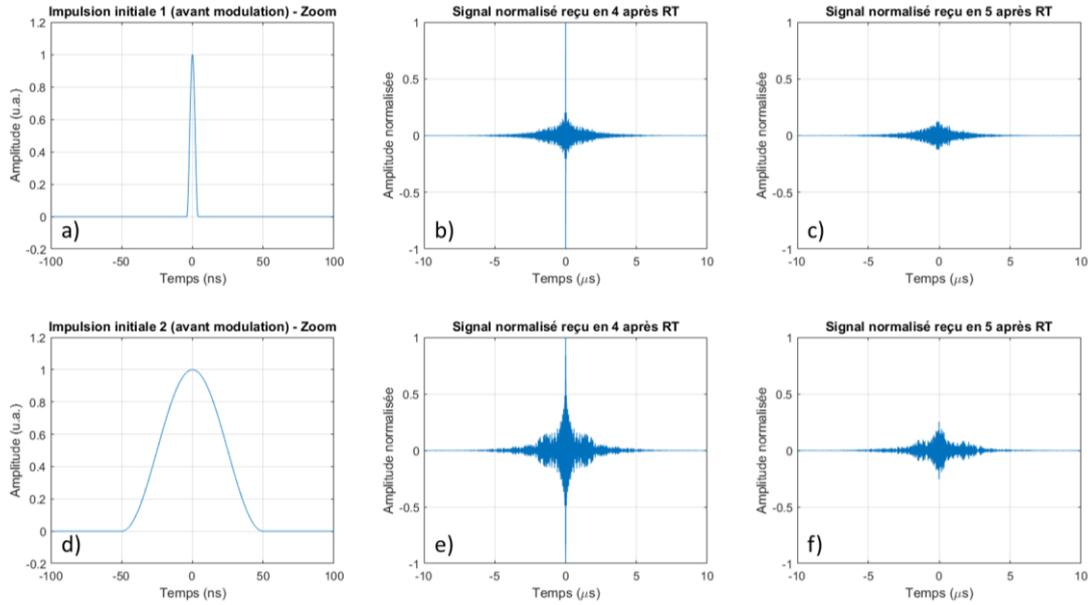


Figure 2: Résultats de calculs de retournement temporel

Une autre méthode permettant d'apporter une quantité d'énergie suffisante pour claquer un plasma consiste à générer plusieurs pics successifs de courte durée par retournement temporel. Cette deuxième méthode conduit elle aussi à une dégradation de la focalisation, comme cela sera montré dans la partie suivante.

## 4 Etude de la focalisation spatiale et temporelle

Dans la partie précédente, nous avons obtenu quelques résultats préliminaires quant à l'évolution de la qualité de la focalisation spatiale et temporelle en fonction de la durée de l'impulsion initiale. Cependant, le nombre réduit de monopôles (deux) et leur espacement (environ 30cm) limite grandement l'étude de la focalisation spatiale. Dans cette partie, nous répétons donc la même étude, mais pour un plus grand nombre de points.

### 4.1 Méthode

Afin d'évaluer la fonction de transfert entre l'antenne de puissance et plusieurs points de la cavité, nous utilisons cette fois-ci une sonde non-intrusive *enprobe EFS-105*. Celle-ci permet de réaliser un balayage de la cavité selon une droite d'axe  $\vec{z}$  (voir Figure 1a) et, ainsi, de déterminer les fonctions de transfert  $H_k(f)$  pour un ensemble de points  $z_k$ , ici espacés de 2cm. Comme précédemment, le signal reçu au point  $z_j$  lorsque l'on cherche à focaliser sur le point  $z_i$  est déterminé numériquement par l'équation (1) :  $R_{j,i}(f) = H_j(f) \cdot H_i(f)^* \cdot E(f)^*$ .

### 4.2 Durée de l'impulsion

En premier lieu, nous nous intéressons à l'influence de la longueur de l'impulsion sur la focalisation spatiale et la focalisation temporelle. Pour cela, nous choisissons des impulsions de durées 10ns, 100ns et 1000ns, puis nous évaluons, de manière numérique, le signal reçu en différentes positions sur la ligne de mesure lorsque l'on cherche à focaliser en un point donné (ici  $z = 30\text{cm}$ ). Les résultats sont donnés sur la Figure 3.

*Notes : Les traits pointillés gris sur les lignes 1 et 3 de la Figure 3 indiquent la position ciblée et l'instant de refocalisation attendu  $t_{rt}$  (ici choisi tel que  $t_{rt} = 0$ ). Les échelles de temps de la ligne 1 sont différentes de celles de la ligne 2. Les graphes des lignes 2 et 3 sont normalisés par rapport au maximum du signal obtenu pour l'impulsion de référence (impulsion de durée 10ns).*

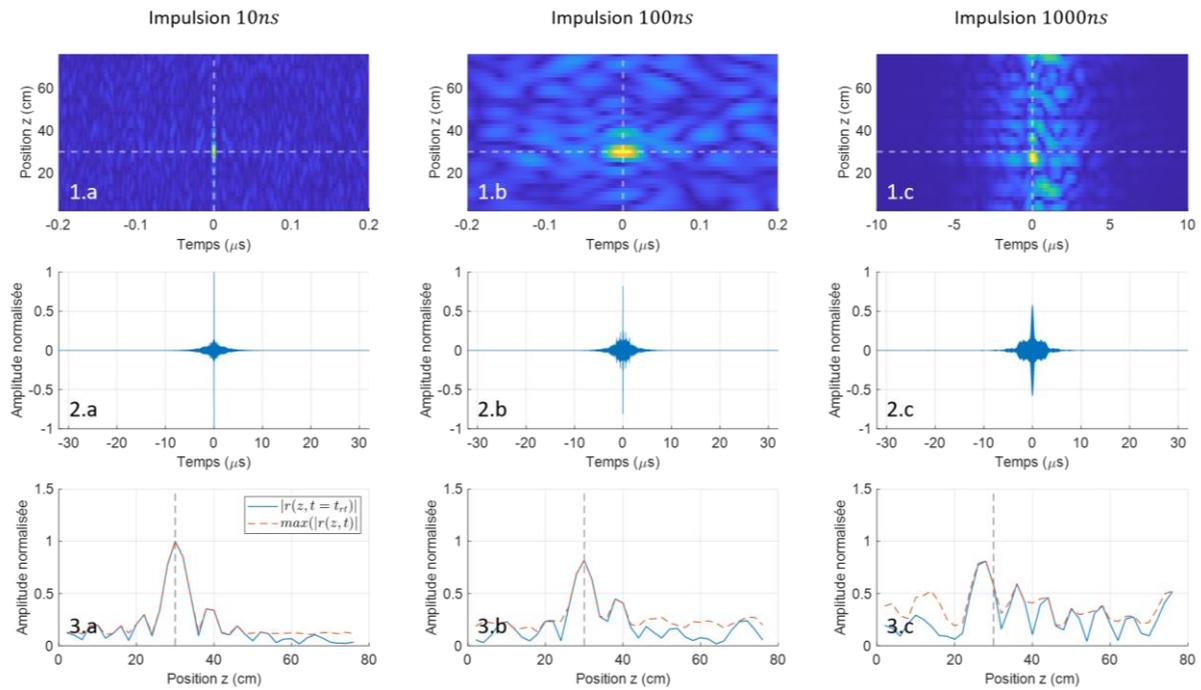


Figure 3: Résultats de calculs de retournement temporel pour des impulsions de 10ns, 100ns et 1000ns (cible :  $z = 30\text{cm}$ )

La première ligne de la Figure 3 donne l'évolution de l'amplitude du signal reçu en fonction du temps et de la position  $z$ . On observe, de manière qualitative, un agrandissement de la tâche focale, à la fois dans le temps et dans l'espace, lorsque la durée de l'impulsion initiale augmente. La deuxième ligne de la figure donne quant à elle l'évolution de l'amplitude du signal au point ciblé (position  $z = 30\text{cm}$ ) en fonction du temps. Comme attendu, nous observons un pic de refocalisation à  $t = t_{rt}$  dans les trois cas. Ce pic est entouré de bruit, dont le niveau augmente lorsque la durée de l'impulsion augmente (autrement dit, la focalisation temporelle se dégrade). Il s'agit là d'un résultat bien connu pour le retournement temporel (voir par exemple [5]). La dernière ligne de la Figure 3 donne le signal reçu au moment de la refocalisation en fonction de la position suivant l'axe  $z$  (courbe bleue) et l'amplitude maximale du signal pour chacune des positions, tous temps confondus (courbe orange pointillée). Pour les impulsions de 10ns et 100ns, on constate que le pic de refocalisation se situe bien à l'endroit souhaité ( $z = 30\text{cm}$ , indiqué par le trait vertical en pointillés) et que son niveau est supérieur au niveau obtenu dans le reste de la cavité. Cela est vrai à l'instant de la focalisation (courbe  $|r(z, t = t_{rt})|$  en bleu), mais aussi aux autres instants (courbe  $\max(|r(z, t)|)$  en orange). En effet, pour l'impulsion de 10ns, l'amplitude du lobe secondaire le plus important vaut seulement 35% de l'amplitude au point de focalisation. Pour l'impulsion de 100ns, l'amplitude du pic de refocalisation est de  $|r(z = 30\text{cm}, t_{rt})| = 0,82$ , alors qu'elle ne dépasse jamais  $|\max(z, t)| = 0,45$  ailleurs (soit 56% du pic refocalisation, maximum atteint en  $z = 38\text{cm}$ ). En revanche, pour l'impulsion de 1000ns, on constate, premièrement, que le maximum du signal à  $t_{rt}$  ne se situe pas exactement à l'endroit désiré ( $|r(z = 30\text{cm}, t_{rt})| = 0,58$ ), mais un peu à côté ( $|r(z = 28\text{cm}, t_{rt})| = 0,81$ ). Par ailleurs, on constate que le signal peut atteindre un niveau proche de celui au point de focalisation en d'autres points de la cavité et à des instants différents de  $t_{rt}$ . C'est par exemple ici le cas pour la position  $z = 12\text{cm}$  où l'amplitude du signal peut atteindre jusqu'à 90% de la valeur au point de focalisation à  $t_{rt}$  ( $|\max(z = 12\text{cm}, t)| = 0,52$ ). Une durée d'impulsion de 1000ns conduit donc, dans notre cas, à une très forte dégradation des focalisations spatiale et temporelle. Cette durée d'impulsion ne peut ainsi pas être utilisée avec notre configuration pour claquer un plasma de manière localisée par retournement temporel : il y aurait un risque de claquer un plasma à un autre endroit et/ou à un instant différent de  $t_{rt}$  (sous réserve que la puissance injectée soit suffisante pour claquer un plasma).

Ces résultats préliminaires sont intéressants d'un point de vue prospectif puisqu'ils semblent éliminer certaines durées d'impulsions trop longues pour assurer un claquage localisé (ici 1000ns). En revanche, au premier abord, ils ne permettent pas de garantir que, dans le cas des impulsions plus courtes (ici 10ns et 100ns), le niveau du signal obtenu en d'autres points de la cavité ne soit pas plus élevé qu'au point de focalisation, les fonctions de transfert ayant servi au calcul étant connues en seulement quelques points se trouvant tous sur la même droite d'axe  $\vec{z}$ .

### 4.3 Nombre d'impulsions

Nous nous intéressons désormais à la focalisation lors de l'envoi d'impulsions répétées, cela constituant un autre moyen d'apporter davantage d'énergie lorsque la puissance du générateur micro-onde est limitée. Pour cela, nous étudions plusieurs cas comprenant respectivement 1, 10 ou 20 impulsions. Chaque impulsion a ici une durée de 10ns et le délai inter-impulsion est fixé arbitrairement à 20ns (durée très inférieure au temps de stockage de l'énergie dans la cavité, de l'ordre de quelques microsecondes pour notre cavité). Les résultats de ce calcul sont donnés sur la Figure 4.

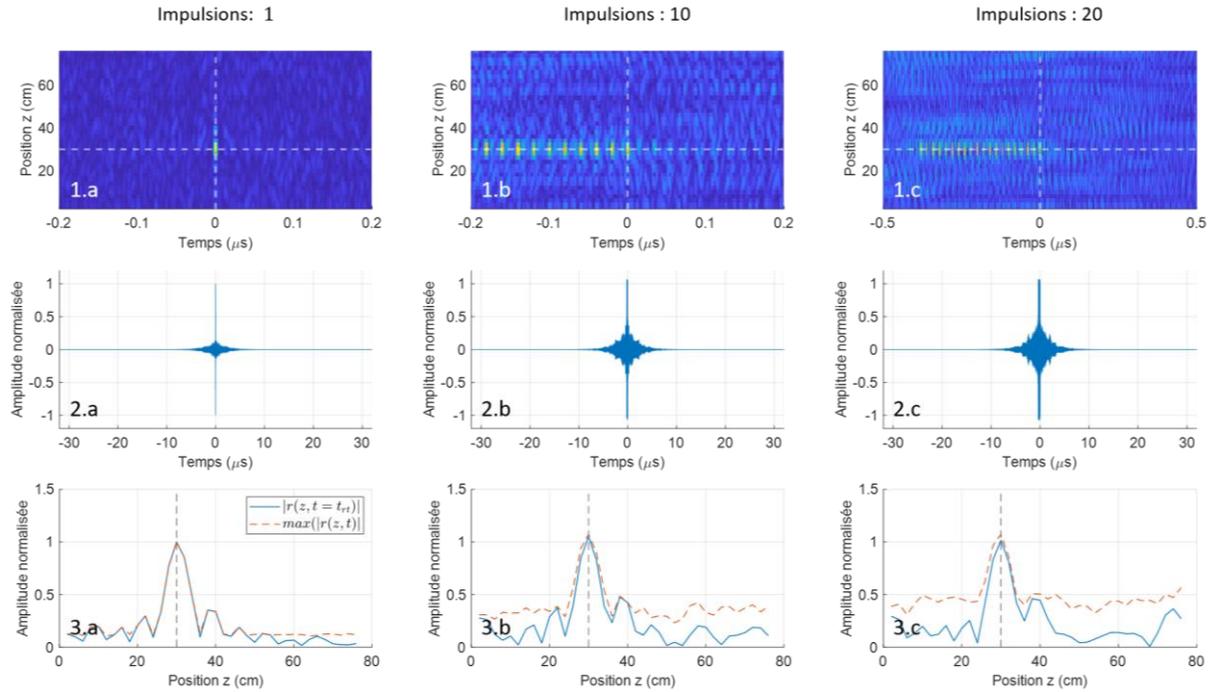


Figure 4: Résultats pour 1, 10, ou 20 impulsions (cible :  $z = 30\text{cm}$ )

Les résultats obtenus montrent qu'augmenter le nombre d'impulsions conduit à une dégradation de la qualité de la focalisation temporelle, comme l'illustre l'augmentation du niveau de bruit avant et après le pic de refocalisation (Figure 4, ligne 2). Cette dégradation de la focalisation temporelle s'accompagne d'une légère dégradation de la focalisation spatiale à  $t_{rt}$  (ici choisi comme étant l'instant du dernier pic) (courbes bleues), puisque le pic reste facilement distinguable dans les trois cas. En revanche, l'impact de la répétition d'impulsion est plus important sur la focalisation spatio-temporelle puisque les amplitudes maximales enregistrées tous temps confondus (courbes oranges en pointillés) atteignent, dans le cas de 20 impulsions, un niveau égal à la moitié du niveau du pic de retournement temporel.

## 5 Conclusion

Nos travaux traitent de la focalisation de micro-ondes par retournement temporel pour créer un plasma et ainsi allumer du carburant. Les résultats obtenus jusqu'ici montrent que le besoin d'augmenter la durée du pic de retournement temporel ou de créer plusieurs pics successifs pour pouvoir claquer un plasma conduit à une dégradation des focalisations spatiale et temporelle. Cela confirme, à l'aide d'une méthode mêlant expérimental (mesure des fonctions de transfert) et numérique (calcul des signaux après retournement), certains résultats théoriques sur la focalisation par retournement temporel (voir, par exemple, la synthèse de ces résultats donnée dans [5]). Cette dégradation de la focalisation reste néanmoins faible dans notre configuration pour des impulsions uniques d'une durée allant jusqu'à 100ns ou pour un train d'impulsions courtes (10ns) contenant jusqu'à 10 impulsions. En revanche, nous observons, qu'au-delà d'une certaine durée d'impulsion dont la valeur exacte n'a pas encore été déterminée pour notre configuration, la focalisation n'est plus suffisamment bonne pour focaliser les ondes au point et à l'instant choisi. Il est ainsi possible d'éliminer certaines durées d'impulsions si l'on souhaite claquer un plasma de manière localisée. Le constat est similaire en ce qui concerne le nombre d'impulsions. Dans les deux cas, un risque de claquer un plasma en un autre endroit apparaît sinon (sous réserve que l'énergie apportée soit suffisante). Ces résultats préliminaires pourront être complétés par l'étude d'un plus grand nombre de cas

(variation de la durée de l'impulsion, espacement des impulsions dans le cas d'impulsions successives, ...). Cela devrait permettre de dégager un compromis entre apport d'énergie et dégradation de la focalisation.

Une prochaine étape de notre travail s'intéressera au déplacement du point de focalisation pour essayer, par la suite, de déformer ou déplacer le plasma. Les résultats développés ici, par exemple sur l'envoi d'impulsions répétées, devraient pouvoir être utiles dans ce cadre.

### Références bibliographiques

- [1] B. Fragge, « Allumage d'une chambre de combustion par retournement temporel micro-onde », Thèse de doctorat, Toulouse, ISAE, 2022.
- [2] C. Draeger, J.-C. Aime, et M. Fink, « One-channel time-reversal in chaotic cavities: Experimental results », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, n° 2, p. 618-625, févr. 1999, doi: 10.1121/1.426252.
- [3] G. Lerosey, J. Rosny, A. Tourin, D. Arnaud, G. Montaldo, et M. Fink, « Time Reversal of Electromagnetic Waves », *Physical review letters*, vol. 92, p. 193904, juin 2004, doi: 10.1103/PhysRevLett.92.193904.
- [4] B. Fragge, J. Sokoloff, O. Rouzaud, O. Pascal, et M. Orain, « Fuel ignition using remote generation of microwave plasma in air at atmospheric pressure », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 99, p. 2, 2024, doi: 10.1051/epjap/2023230152.
- [5] V. Mazières, « Claquage microonde par retournement temporel », Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2020.

Les travaux présentés ici sont effectués dans le cadre d'une thèse disposant d'un cofinancement AID-ONERA.