

Allumage par retournement temporel dans une chambre de combustion *Ignition using time reversal in a combustion chamber*

J. Sokoloff¹, O. Pascal¹, O. Rouzaud², M. Orain², B. Fragge^{1,2}, P. Dussolliet-Berthod^{1,2}, L. Szuter¹

¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France, jerome.sokoloff@laplace.univ-tlse.fr

²ONERA/DMPE, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, France

Mots clés (en français et en anglais) : Allumage, plasma, retournement temporel microonde, combustion
Ignition, plasma, microwave time reversal, combustion

Résumé/Abstract

L'allumage d'un brouillard de carburant dans une chambre de combustion nécessite le dépôt d'une énergie initiale capable de créer une décharge plasma dont la position optimale peut varier suivant les conditions de pression et de température. Pour atteindre cet objectif nous proposons d'utiliser le retournement temporel microonde afin de contrôler dans le temps et dans l'espace la focalisation de l'onde électromagnétique dans une cavité. Au-delà d'un certain seuil de densité de puissance, un plasma peut être créé au niveau de la tache focale. Dans ce papier, nous présentons les travaux effectués au cours de deux thèses et du projet ANR ASTRID Altiport2 dans le cadre d'une collaboration entre le LAPLACE et l'ONERA. Une cavité d'étude de grand volume a été fabriquée afin de réaliser l'allumage d'un brouillard de carburant par retournement temporel. Nous montrons les difficultés rencontrées pour obtenir ce résultat du fait de la densité de puissance nécessaire à atteindre dans une bande de fréquence autour de 2,45 GHz imposée par le matériel à disposition. Nous montrons également les stratégies imaginées pour déplacer le plasma au cours du temps. Enfin, nous présentons les premiers travaux entrepris en vue d'appliquer cette technique dans une cavité plus représentative d'une chambre de combustion en termes de géométrie et de taille.

The ignition of a fuel spray in a combustion chamber requires the deposition of an initial energy capable of creating a plasma discharge whose optimal position can vary according to pressure and temperature conditions. To achieve this objective, we propose to use microwave time reversal to control the spatial and temporal focusing of electromagnetic waves in a cavity. Above a certain power density threshold, a plasma can be created at the focal spot. In this paper, we present the work carried out during two theses and the ANR ASTRID Altiport2 project as part of a collaboration between LAPLACE and ONERA. A large-volume study cavity was built in order to ignite a fuel spray using time reversal. We show the difficulties encountered in obtaining this result, linked to the power density required in a frequency centered around 2.45 GHz imposed by the available equipment. We also show the strategies devised to displace the plasma over time. Finally, we present the initial work undertaken to apply this technique in a cavity that is more representative of a combustion chamber in terms of geometry and size.

1 Contexte et motivation

L'allumage ou le ré-allumage d'un brouillard de carburant est un point critique pour la conception d'une chambre de combustion aéronautique, tant du point de vue de l'opérabilité que de celui de la sécurité. Le système classique d'allumage repose sur une bougie à arc positionnée en paroi à un emplacement précis de la chambre. Ce système n'est pas optimal en termes de performances. En effet, la paroi absorbe une part importante du dépôt d'énergie et l'emplacement fixe de la bougie n'est pas forcément adapté aux différentes conditions d'allumage. Dans cet article nous présentons les travaux effectués et en cours utilisant le principe du retournement temporel avec des microondes pour créer un dépôt d'énergie modulable en espace et en temps dans la chambre de combustion. La focalisation de l'énergie permet de générer un plasma à l'instant et à l'endroit voulus, ce plasma permettant à son tour d'allumer un brouillard de carburant.

2 Dimensionnement d'un banc expérimental dédié et premiers résultats d'allumage

Les premiers travaux présentés ont été effectués lors de la thèse de Beatrice Fragge [1] soutenue en 2022 dont l'objectif était de réaliser un banc permettant d'allumer un brouillard de carburant par retournement temporel.

Le retournement temporel consiste à générer une onde modulée dans le temps autour d'une fréquence principale afin de la focaliser à l'endroit et à l'instant voulus dans une cavité métallique. La forme de l'onde à émettre est obtenue après une phase d'apprentissage durant laquelle la réponse de la cavité à une impulsion électromagnétique émise depuis l'endroit souhaité est enregistrée par un accès de la cavité (Figure 1.a). Le signal enregistré est ensuite réémis par ce même accès mais retourné temporellement (Figure 1.b). Les ondes à l'intérieur de la cavité font alors le chemin inverse et viennent se focaliser à l'endroit de l'émission initiale. L'idée de ces travaux consiste à supposer que cette focalisation peut générer un plasma, qui à son tour, pourra allumer un brouillard de carburant.

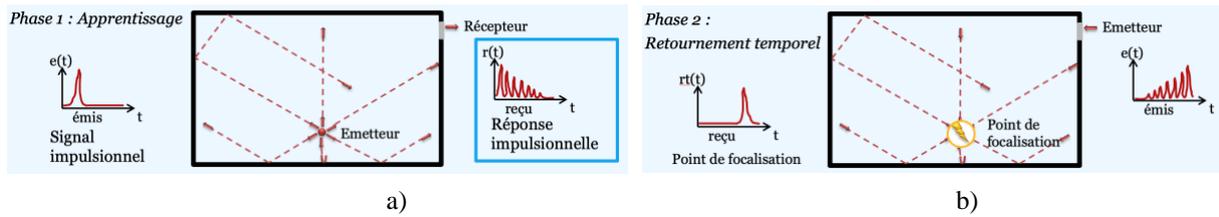


Figure 1 : Schéma de principe du retournement temporel ; a) Phase d'apprentissage, b) Allumage d'un plasma au point de focalisation

Ainsi l'application du retournement temporel pour allumer un plasma par focalisation de l'onde nécessite d'avoir une chaîne hyperfréquence capable de générer l'onde avec la forme temporelle souhaitée et de l'amplifier fortement (Figure 2.b). Le coût d'un tel matériel devient vite prohibitif lorsque l'on monte en fréquence. Ainsi, la première contrainte rencontrée est liée à la fréquence autour de 2,4 GHz qui nous a été imposée par le matériel à disposition dans le laboratoire. A cette fréquence, la taille décimétrique d'une chambre de combustion réaliste rend impossible l'application du retournement temporel qui nécessite un très grand nombre de modes dans la cavité. Il a fallu ainsi fabriquer une cavité beaucoup plus volumineuse (2m^3) permettant de satisfaire cette contrainte modale (Figure 2.a). Il est à noter que les résultats obtenus dans cette cavité restent transposables pour une chambre de combustion réelle de taille plus réduite à condition de monter en fréquence.

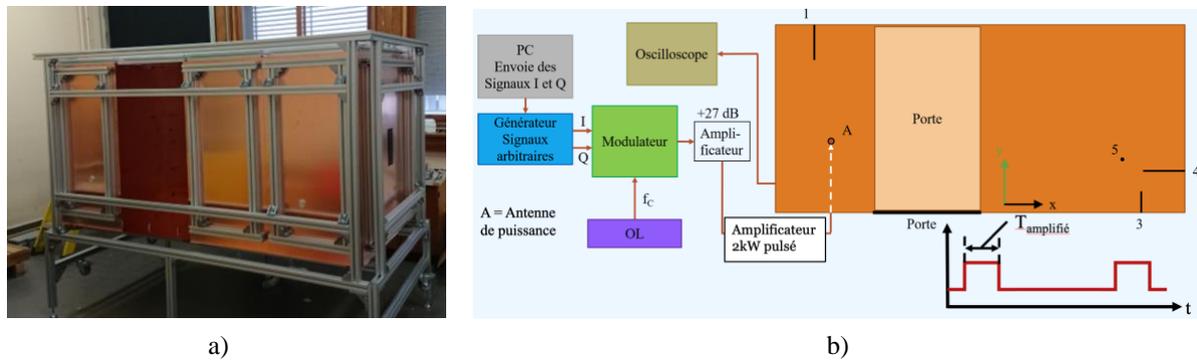


Figure 2 : a) Cavité en cuivre de 2m^3 , b) Schéma du dispositif expérimental pour générer l'onde émise à l'intérieur de la cavité par l'antenne de puissance en A et mesurer les signaux en différents points de la cavité (1,3,4 et 5)

Une autre difficulté liée à cette fréquence est que la tache focale minimale correspond approximativement à une sphère de 6 cm de rayon. Il devient ainsi difficile d'atteindre la densité de puissance nécessaire pour allumer un plasma d'air à pression atmosphérique. Pour pallier ce problème nous avons utilisé des Split Ring Resonators (SRR) comme initiateurs. En effet, lorsque ceux-ci sont excités à leur fréquence de résonance en ciblant la tache focale dessus, une surtension importante apparaît dans leur gap pouvant potentiellement allumer un plasma (Figure 3.a).

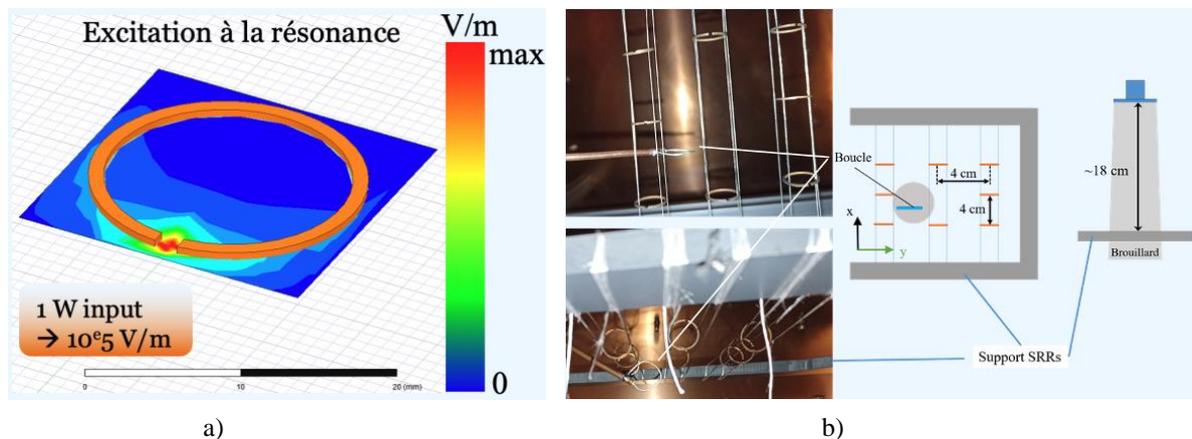


Figure 3 : a) Simulation de la surtension dans le gap d'un SRR, b) Photos des SRR avec leur support et schéma de leur disposition par rapport au brouillard de kérosène

Nous avons ensuite placé plusieurs SRR soutenus par des fils afin d'assurer leur positionnement et leur orientation avec leur gap vers le haut (Figure 3.b). L'ensemble des SRR est placé dans la zone où le bouillard de kérosène est

créé par un injecteur (représentée en gris clair sur la figure). Un capteur (boucle magnétique) a été placé à proximité des SRR afin de mesurer le champ magnétique et visualiser son évolution temporelle via un oscilloscope.

Les principaux résultats obtenus sont montrés sur la Figure 4. Le premier objectif est de générer une forme d'onde capable de focaliser sur les SRR et d'allumer les plasmas. Une étude préliminaire a été faite en alimentant la cavité par une onde électromagnétique en CW à la fréquence de résonance des SRR (2,8667GHz). Elle a montré que les plasmas pouvaient s'allumer dans le gap des SRR au bout d'environ 1 μ s avec une puissance d'entrée d'environ 1500 W (Figure 4.a). Nous avons montré également que les plasmas générés étaient capables d'allumer le brouillard de kérosène [2].

En revanche, avec cette alimentation en CW toute la cavité était remplie sans aucune focalisation de l'onde électromagnétique sur les SRR. Pour concentrer l'énergie au niveau des SRR, une phase d'apprentissage via la technique du retournement temporel a été nécessaire. Afin d'assurer une focalisation temporelle et spatiale correcte, il faut utiliser une impulsion la plus courte possible. Nous avons montré avec le matériel à disposition qu'une impulsion de 8ns permettait une bonne focalisation temporelle et spatiale. Or, une impulsion aussi courte au niveau des SRR est incapable de générer des plasmas. Le caractère multiphysique et le grand volume de cette expérience rend toute approche par simulation impossible pour nous guider dans les modifications de la forme du signal à entreprendre. Seule l'expérience précédente en CW nous indiquait qu'une durée plus longue proche de 1 μ s était susceptible d'allumer les plasmas. Ainsi, il a fallu sculpter le signal en vue d'allonger sa durée avec les degrés de liberté que nous avons à disposition expérimentalement, à savoir : le nombre d'impulsions à répéter et la durée de chacune des impulsions.

Après de nombreux essais, nous avons obtenu l'allumage des plasmas avec la répétition de 4 impulsions de 200 ns chacune. Le signal mesuré au niveau des SRR est montré sur la figure 4.b. Les plasmas générés par ce signal ont également été capables d'allumer le brouillard de kérosène (Figure 4.c).

Ainsi, nous avons allumé un brouillard de kérosène par retournement temporel ce qui constituait l'objectif principal de cette thèse. Toutefois, le signal utilisé n'a pas été optimisé et sa focalisation spatiale n'a pas été évaluée.

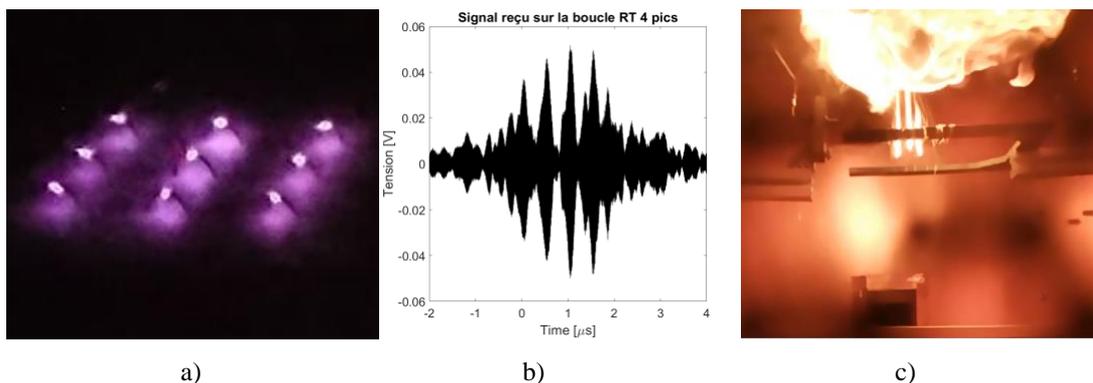


Figure 4 : a) Plasmas créés dans les SRR, b) Signal mesuré au niveau des SRR, c) Allumage de kérosène

3 Nouvelle stratégie pour optimiser la focalisation et déplacer le plasma

La thèse de Beatrice Fragge a montré la possibilité d'utiliser le retournement temporel pour l'allumage. Cependant, la création des plasmas sur les SRR a nécessité la génération d'une forme temporelle d'onde non optimisée.

La thèse de Pierre Dussolliet-Berthod commencée il y a un an, a pour premier objectif d'améliorer la forme d'onde émise en vue d'une meilleure focalisation temporelle et spatiale. En effet, la répétition des impulsions comme l'élargissement de leur durée dégradent les performances du retournement temporel. En premier lieu, la hauteur des pics de chaque impulsion diminue et peut donc passer sous le seuil de la tension de claquage. D'autre part, la focalisation spatiale n'est pas garantie. En effet, nous ne sommes pas certains que le signal utilisé dans la thèse de Beatrice Fragge ne soit pas capable d'allumer le plasma ailleurs à un endroit non désiré dans la zone couverte par le brouillard de kérosène. Pour pouvoir évaluer la focalisation spatiale, une nouvelle technique de mesure utilisant une sonde non-intrusive (Enprobe EFS-105) a été mise en œuvre afin d'obtenir le champ en plusieurs points de la cavité et non pas seulement à l'endroit de la focalisation supposée. Cette technique a permis de tester l'impact des répétitions et de l'élargissement de l'impulsion sur la focalisation spatiale dans la zone couverte par le jet de kérosène. Le détail des résultats obtenus est donné dans [3].

Le deuxième et principal objectif de la thèse Pierre Dussolliet-Berthod consiste à déplacer le plasma dans la cavité. Comme cela est illustré sur la Figure 5, la stratégie adoptée consiste à focaliser l'onde à proximité d'un plasma déjà allumé par une source externe pour le déformer puis le déplacer par focalisations successives espacées le long de la trajectoire souhaitée pour l'amener jusqu'à la zone d'allumage de carburant. L'apprentissage de la forme d'onde nécessaire sera effectué soit au moyen de la sonde peu intrusive Enprobe, soit par perturbations successives couplées à l'opérateur de Wigner-Smith.

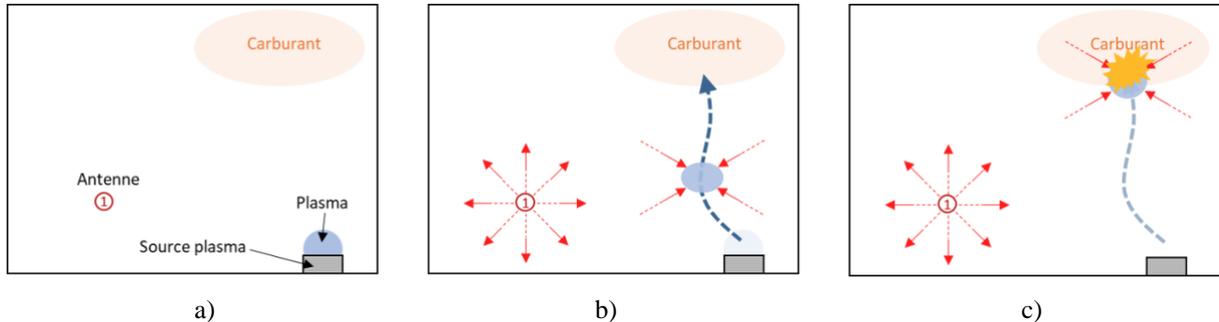


Figure 5 : a) Étape 1 : création du plasma par une source conventionnelle, b) Étape 2 : déplacement du plasma par retournement temporel, c) Étape 3 : allumage dans la zone du brouillard de carburant

4 Application dans une chambre de combustion réaliste

Parallèlement à cette thèse, le projet ANR ASTRID Altiport2 a débuté cette année. Son objectif est d'appliquer le retournement temporel sur un prototype dont la géométrie et la taille sont plus représentatives d'une chambre de combustion réelle, fréquemment de forme torique (Figure 6.a). L'ONERA nous a mis à disposition son banc d'essai MERCATO de forme parallélépipédique (Figure 6.b) capable de faire des tests d'allumage avec un flux d'air dont la pression et la température peuvent varier. Le défi consiste donc à réaliser un allumage par retournement temporel à l'intérieur de cette chambre de combustion. L'idée est d'introduire les ondes électromagnétiques à travers les 2 fenêtres diélectriques de part et d'autre de l'enceinte et d'empêcher leur sortie au niveau de l'éjection des gaz sans gêner cette dernière.

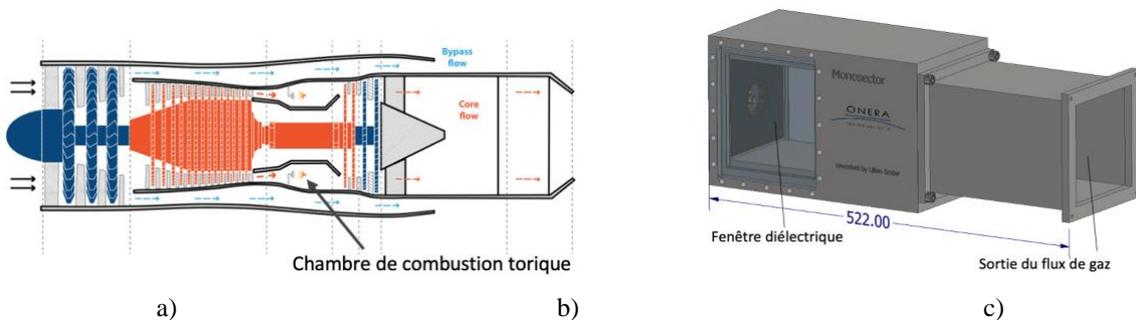


Figure 6 : a) Étape 1 : création du plasma par une source conventionnelle, b) Étape 2 : déplacement du plasma par retournement temporel, c) Étape 3 : allumage dans la zone du brouillard de carburant

Ainsi, une enceinte torique en aluminium a été conçue afin de s'adapter aux fenêtres diélectriques (Figure 7.a). Cette forme torique a été choisie afin de s'approcher de celle d'une chambre de combustion classique. Il est à noter que le retournement temporel pourrait permettre l'allumage de plasmas n'importe où dans le tore, uniquement à partir de la forme d'onde adéquate injectée par un seul accès microonde. Pour cette étude la focalisation des ondes se fera à l'intérieur du banc Mercato (en passant à travers les fenêtres diélectriques), seul endroit où les conditions d'allumage réelles seront réalisées.

Nous avons placé pour l'étude deux accès microondes sur le haut du tore afin de pouvoir générer deux polarisations différentes (horizontale ou verticale). La fréquence haute de travail a été fixée autour de 8GHz du fait de la limite imposée par l'amplificateur dont nous disposons (prêté par le CEA Gramat). A cette fréquence, le nombre élevé de modes est suffisant pour assurer un retournement temporel de qualité.

Le retournement temporel est possible lorsque l'enceinte forme une cavité étanche électromagnétiquement. Pour cela, nous avons disposé une structure en nid d'abeille (Figure 7.b) au niveau de la sortie des gaz. Cette structure présente l'avantage de réfléchir les ondes dans la bande de fréquence de travail, tout en laissant l'échappement des gaz possible. L'assemblage de l'ensemble des pièces est montré sur la Figure 7.c.

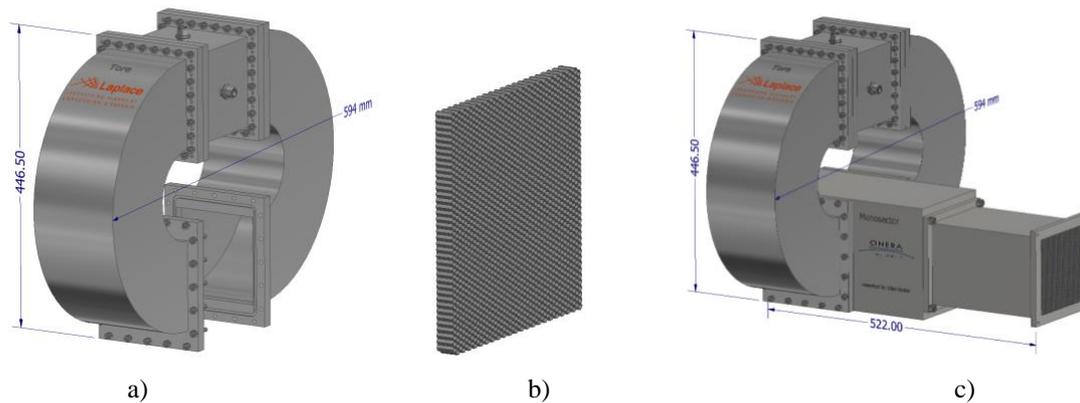


Figure 7 : a) enceinte torique avec 2 accès microondes, b) structure en nid d'abeille, c) assemblage complet

Nous illustrons sur la Figure 8 le fonctionnement attendu à partir d'une coupe longitudinale du prototype. Après une phase d'apprentissage, la forme d'onde adéquate est injectée par le monopôle situé sur le haut du tore. Après de nombreuses réflexions dans toute l'enceinte, les ondes viennent se focaliser en phase au niveau du brouillard produit par l'injecteur de carburant. La densité de puissance est assez élevée (si besoin à l'aide d'un initiateur) pour créer un plasma. Celui-ci allume à son tour le mélange carburant-air et génère une flamme. Les gaz de combustion sont ensuite éjectés à travers la structure en nid d'abeille.

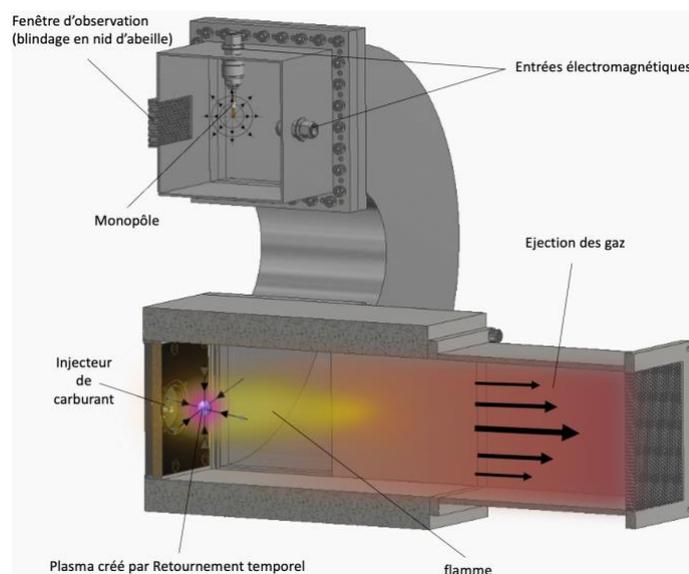


Figure 8 : Illustration de l'allumage du brouillard de carburant par retournement temporel sur une coupe longitudinale du prototype.

Aujourd'hui le prototype a été réalisé. Les premiers essais de retournement temporel à bas niveau vont bientôt commencer. Les essais à haute puissance de l'allumage du plasma et du carburant se dérouleront dans l'année qui vient.

5 Conclusion et perspectives

Dans cet article nous avons montré les potentialités et les difficultés du retournement temporel microonde pour allumer un brouillard de carburant.

Un premier allumage a été réussi autour de 2,4 GHz à l'aide d'initiateurs de type SRR. Toutefois, la forme temporelle de l'onde utilisée n'a pas permis de garantir une bonne focalisation spatiale de l'onde. Actuellement, une étude en vue d'optimiser le signal est en cours afin de pallier ce problème. Elle permettra d'aboutir à l'allumage d'un brouillard de carburant à différents endroits en jouant simplement sur la forme temporelle de l'onde.

La présence des initiateurs est gênante en vue d'une application dans une chambre de combustion. Ainsi, une nouvelle stratégie va être mise en œuvre avec un plasma initial généré par une source indépendante sur lequel une onde viendra se focaliser par retournement temporel afin de le déformer puis de le déplacer de proche en proche jusqu'à la zone d'allumage du carburant.

La cavité dans laquelle les travaux mentionnés précédemment ont été ou vont être faits est trop volumineuse et ne permet pas de reproduire les conditions des chambres de combustion réelles. Afin de s'approcher de ces conditions, une nouvelle étude est en cours dans laquelle un prototype de taille plus réduite de forme torique et s'adaptant à un banc d'essai d'allumage existant a été conçu et réalisé. Les essais de retournement temporel bas niveau et forte puissance autour de 8GHz vont bientôt être entamés.

Cette technique de retournement temporel microonde pour générer des plasmas à pression atmosphérique pourrait également être améliorée en la combinant avec des ondes de surface. Cette idée fait l'objet d'un nouveau projet en vue d'une application pour contrôler l'onde de détonation dans un moteur à détonation rotative ou encore la SER d'un véhicule. Un premier dimensionnement d'une structure pouvant supporter un retournement temporel d'ondes de surface a été effectuée. Quelques résultats sont montrés dans [4].

Nous tenons à remercier le CEA pour le prêt de l'amplificateur et l'AID pour le co-financement des travaux de thèse de Pierre Dussolliet-Berthod.

Références bibliographiques

- [1] B. Fragge, « Allumage d'une chambre de combustion par retournement temporel micro-onde », Thèse de doctorat, Toulouse, ISAE, 2022.
- [2] 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.
- [3] P. Dussolliet-Berthod, J. Sokoloff, O. Rouzaud, O. Pascal, et M. Orain, « Etude de la focalisation par retournement temporel pour le claquage de plasmas : influence de la répétition et de la durée d'impulsion », *Journées Scientifiques d'URSI France*, 26-27 mars 2024.
- [4] L. Szuter, J. Sokoloff, V. Mazières, N. Lebbe, « Dimensionnement d'une cavité à propagation d'ondes de surfaces 1D pour le pilotage plasma par retournement temporel », *Journées Scientifiques d'URSI France*, 26-27 mars 2024.