



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

Paul-Quentin Elias

Apports du *fluide électrique* sur les systèmes aérospatiaux

Volume 353 (2025), p. 1111-1125

En ligne depuis le 23 octobre 2025

<https://doi.org/10.5802/crmeca.323>



Cet article est publié sous la licence
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de synthèse / *Review article*

Apports du *fluide électrique* sur les systèmes aérospatiaux

Contribution of the electric fluid to aerospace systems

Paul-Quentin Elias ^a

^a DPHY, ONERA, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

Courriel : paul-quentin.elias@onera.fr

Résumé. Les systèmes aérospatiaux cherchent constamment l'optimisation de leurs performances par l'intégration de nouvelles technologies. Les plasmas, ou « fluide électrique » comme l'appelle l'abbé Bertholon du XVIII^{ème} siècle, offrent des possibilités d'action mécanique, thermique et chimique sur les écoulements, mais leur adoption reste limitée par l'équilibre entre gains de performance et complexité du système. À titre d'illustration, on présente trois applications concrètes des plasmas aérospatiaux : la réduction de traînée par filamentation laser femtoseconde, l'amélioration des performances d'allumage en conditions d'altitude par décharges de surface, et l'optimisation de propulseurs à tuyères magnétiques. Bien que peu de dispositifs plasma soient actuellement opérationnels en aéronautique, contrairement à la propulsion spatiale où ils dominent désormais, un mouvement d'adoption graduel est possible. Pour cela, il faudra relever un certain nombre de défis scientifiques et techniques, poursuivant l'ambition historique de maîtriser le « fluide électrique » pour corriger et optimiser les systèmes techniques.

Abstract. Aerospace systems constantly seek performances optimization through the integration of new technologies. Plasmas, or “electric fluid” as 18th-century abbé Bertholon called them, offer unique possibilities for mechanical, thermal, and chemical action on flows, but their adoption remains limited by the balance between performance gains and system complexity. As an illustration, three concrete applications of plasmas in aerospace systems are presented: drag reduction through femtosecond laser filamentation, improvement of ignition performance at altitude conditions through surface discharges, and optimization of magnetic nozzle thrusters. Although few plasma devices are currently operational in aeronautics, unlike space propulsion where they now dominate, a gradual adoption movement is possible. For this to happen, a number of scientific and technical challenges must be overcome, pursuing the historical ambition of mastering the “electric fluid” to correct and optimize technical systems.

Mots-clés. Plasma, aérospatial, contrôle d'écoulement, propulsion spatiale.

Keywords. Plasma, aerospace, flow control, space propulsion.

Manuscrit reçu le 18 juillet 2025, accepté le 11 septembre 2025.

1. Introduction

Un système aérospatial, au sens le plus général, est un dispositif se déployant dans l'atmosphère ou dans l'espace en vue d'accomplir une fonction donnée, telle que le transport, l'observation, ou la défense. Comme tout objet technique, le concepteur cherche à optimiser son fonctionnement pour la mission recherchée. L'optimisation s'appuie sur des modifications du dispositif ou par l'ajout de nouveaux sous-systèmes.

Une classe de sous-systèmes explorée depuis les débuts de l'ère aérospatiale repose sur l'utilisation de plasma. Si la dénomination de « système plasma » semble futuriste, il est bon de rappeler que l'utilisation des plasmas est aussi ancienne, voire plus ancienne, que l'industrie aéronautique. Le premier système plasma opérationnel, toujours utilisé de nos jours, est la bougie d'allumage, brevetée par Lenoir à la fin du XIX^{ème} siècle [1]. L'idée d'accélérer des particules chargées pour obtenir une force propulsive, peut être tracée aux travaux de Tsiolkovsky et Goddard [2]. L'idée clé de ce dispositif est de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, thermique ou chimique pour produire un effet désirable.

Ces systèmes actifs mettant à profit les propriétés des plasmas, conceptualisés par les pionniers de l'aérospatial, mettent du temps à se déployer. En effet, leur utilité opérationnelle résulte d'un équilibre entre le gain en performance qu'ils amènent et le surcoût en complexité du système qu'ils demandent. Si cette balance est très en faveur des bougies d'allumage, objet plasma historique, il n'en va pas de même de beaucoup d'autres dispositifs plasma. Ainsi, ce n'est que récemment que l'industrie spatiale a intégré la propulsion plasma pour certaines missions, en raison de cet équilibre qui a longtemps défavorisé ce moyen de propulsion. De plus, la gradation de l'effet attendu participe aussi à l'évaluation de cet équilibre. En effet, certains dispositifs « plasma » proposent une amélioration incrémentale, alors que d'autres visent un effet disruptif qui a un impact fort sur le dispositif. Dans le premier cas, le concepteur sera très exigeant sur le volume et la puissance allouée à l'actionneur plasma. Dans le second, un gain significatif peut justifier un réexamen de la conception globale pour laisser de la place au dispositif.

Depuis une vingtaine d'années, on assiste à une accélération des études pour la compréhension et le développement de systèmes plasmas pour l'aérospatial, qu'on peut classer selon trois grands axes. Le premier axe porte sur l'utilisation des plasmas pour le contrôle d'écoulement. Ce contrôle peut s'exercer à basse vitesse — par exemple en manipulant la couche limite pour retarder ou déclencher la transition vers le régime turbulent [3] — ou à plus haute vitesse pour agir sur les performances aérodynamiques [4]. Le deuxième axe porte sur l'utilisation de plasmas pour l'assistance à la combustion, afin de stabiliser une flamme, garantir l'allumage ou accrocher une flamme dans un superstatoréacteur [5,6]. Enfin, le troisième axe concerne le développement et l'optimisation de propulseurs à plasma pour la propulsion spatiale [7].

Dans ce contexte, il n'est pas toujours aisé de comprendre les enjeux et les problématiques autour de ces dispositifs à plasma. Aussi, l'objectif de cet article est d'aider à clarifier la vision du lecteur sur ce type de système. D'abord, nous introduirons et nous discuterons les modes d'action du plasma, en se plaçant dans la continuité des travaux des savants du XVIII^{ème} siècle, notamment ceux de l'abbé Bertholon. Ensuite, nous illustrerons l'utilisation de ces dispositifs plasmas dans les trois axes exposés ci-dessus : le contrôle d'écoulement, l'assistance à la combustion et la propulsion spatiale. Pour conclure, nous discuterons les enjeux autour des systèmes plasmas.

2. Le plasma comme moyen d'action

Le plasma, ou « fluide électrique » comme l'appelait l'abbé Bertholon, est un objet physique qui se manifeste naturellement, comme dans le cas de la foudre, ou artificiellement suite à l'injection d'énergie dans le milieu (souvent sous forme électromagnétique). Dans cette section, on discute les modes d'action du plasma. Par cette dénomination, on entend les termes de transferts de matière, de force ou d'énergie qui permettent à la matière ionisée d'avoir une action sur son environnement. Premièrement, en se plongeant notamment dans les contributions de P. Bertholon, il est intéressant de voir que cette idée d'employer le « fluide électrique » pour agir sur et modifier l'environnement est venue presque immédiatement aux premiers observateurs de ce phénomène. Dans la suite, on définira plus précisément ce qu'on entend par plasma, pour ensuite, dans la dernière section, détailler plus formellement ces mécanismes de couplage.

2.1. Les plasmas à l'époque de l'abbé Bertholon

Les savants du XVIII^{ème} siècle comprennent déjà un certain nombre de notions clefs sur le fluide électrique. Initialement, la distinction est faite entre l'électricité naturelle et artificielle. Cette dernière peut être créée au moyen d'électrophore, un appareil triboélectrique popularisé par Volta. Les expérimentateurs savent depuis 1733 que le « fluide électrique » se présente sous deux formes, une positive et une négative [8]. Elle peut être stockée dans des bouteilles de Leyde, ancêtre de nos condensateurs. Si l'électricité artificielle se prête aux expériences, une question est de savoir si ce phénomène étrange se trouve dans la nature. C'est Franklin qui propose en 1749 une expérience pour démontrer le caractère électrique de la foudre et que l'électricité naturelle et artificielle sont une seule et même chose [9]. Cette identité implique que, comme l'électricité artificielle, la foudre peut être attirée par les pointes et guidée par les conducteurs métalliques, menant ainsi Franklin au concept de paratonnerre. Bertholon, vif admirateur de Franklin, soutient sa théorie de l'électricité et l'explicite dans son mémoire de 1777 [10]. Selon la vue de Franklin, la matière électrique peut être accumulée et, comme un fluide, a tendance à fuir les endroits où elle est en excès pour aller à ceux où elle est en déficit. Ainsi, les nuages d'orages sont, par un procédé d'accumulation inconnu, surchargés de fluide électrique. Bertholon fait une analogie avec l'hydrostatique pour expliquer que, comme un liquide en surpression, le fluide électrique en excès va rejoindre les zones où il est en déficit. Ceci « afin de rétablir l'équilibre ». Ce phénomène se manifeste par la foudre. Dès lors, Bertholon se fait l'avocat de Franklin et défend l'usage du paratonnerre, constatant que

Enfin, après que l'efficacité de ce procédé fut démontrée, il fallut encore bien des années pour le faire adopter; tant les vérités utiles ont de peine à braver les préjugés & à les déraciner. [10]

Un constat lucide et qui reste, somme toute, très actuel.

Dans leurs observations et leurs expériences pratiques, ces savants sont constamment exposés à ce qu'on appelle de nos jours le *plasma*, que ce soit dans sa manifestation la plus spectaculaire, la foudre, ou celle plus commune mais tout aussi mystérieuse, les aigrettes observées sur les conducteurs chargés par frottement dans les laboratoires. Le cadre conceptuel n'existe pas pour comprendre ces phénomènes, mais le terme de « fluide électrique » traduit l'intuition de ces observateurs sur cette substance qui peut être conduite, guidée, isolée. Il est encore plus frappant de constater que malgré cette compréhension partielle du phénomène, les philosophes naturels vont rapidement chercher à utiliser ce fluide électrique pour agir sur l'environnement. L'électrovégétomètre de Bertholon en est un exemple éclatant : cet appareil cherche à compenser le défaut de fluide électrique sur les végétaux. Ce défaut est supposé nuire à la croissance et à la fructification des plantes. En soutirant le fluide électrique de sources atmosphériques, Bertholon propose de rétablir cet équilibre. Cette utilisation du fluide électrique en vue d'optimiser un processus peut être considérée comme le fondement conceptuel des recherches actuelles sur l'utilisation des plasmas pour l'aérospatial, illustrées par les trois exemples détaillés dans le présent article. En ce sens, cette activité s'inscrit dans la lignée des savants des Lumières et de Bertholon en particulier, qui écrit en 1777

Quoiqu'il paraisse au premier coup d'œil que l'idée hardie de corriger la nature dans ses écarts soit téméraire, cependant cette nature, toute puissante qu'elle est, s'est montrée si souvent docile aux efforts victorieux de l'industrie humaine, qu'on peut encore espérer d'en triompher une fois. [11]

2.2. Quelques définitions

Avant d'expliciter plus en détail le mode d'action du plasma sur son environnement, il convient de revenir sur quelques définitions qui permettent de mieux saisir cet objet. La première, historique, est celle donnée par I. Langmuir qui, le premier, introduisit ce mot de « plasma ». Langmuir s'intéressait aux décharges électriques générées en appliquant une tension entre deux électrodes placées dans un tube en verre contenant du gaz à basse pression. Voici ce qu'il constata dans ses tubes à décharge :

except near the electrodes, where there are sheaths containing very few electrons, the ionized gas contains ions and electrons in about equal numbers so that the resultant space charge is very small. We shall use the name plasma to describe this region containing balanced charges of ions and electrons. [12]

On le voit, le plasma désignait, dans l'esprit de Langmuir, une région d'un tube à décharge au sein de laquelle existe un équilibre des charges. Il choisit le terme grec *plasma* qui désigne une entité sans forme propre, moulée par un contenant. Langmuir a probablement choisi ce terme en constatant que cette région, qui s'observe facilement par le rayonnement qu'elle émet, épousait la forme parfois complexe des contenants en verre dans lesquels étaient générées ces décharges.

Une définition plus moderne est rappelée par Moisan [13]. Un plasma est un :

- milieu gazeux (les particules peuvent se mouvoir dans toutes les directions),
- constitué de particules chargées et neutres (électrons, ions),
- macroscopiquement neutre,
- qui manifeste comportements collectifs.

Cet objet physique est défini par un certain nombre de paramètres clefs, en particulier :

- La densité volumique de charge n , qui indique le nombre d'un type de particules par unité de volume, illustrée dans la figure 1(a). Ces particules peuvent être des électrons n_e , des ions n_i ou des neutres n_n . Selon la définition d'un plasma, on a la plupart du temps $n_e \simeq n_i$.
- La température T , qui renseigne sur l'agitation thermique du plasma, figure 1(b). D'un point de vue plus formel, la température est liée à l'énergie cinétique microscopique des particules. Elle peut être définie pour les différentes espèces présentes dans le plasma : les électrons T_e , les ions T_i et les neutres T_n . Une particularité des plasmas est qu'il existe des régimes de déséquilibre, où la température des électrons T_e est très supérieure à la température des espèces lourdes (ions, neutres). On parlera dans ce cas de plasmas « froids ».
- La fraction d'ionisation $\alpha = n_e / (n_e + n_n)$ indique l'abondance relative des espèces chargées (électrons ou ions). Pour un plasma complètement ionisé, $\alpha = 1$. Les plasmas « froids » évoqués précédemment sont usuellement tels que $\alpha \ll 1$.

2.3. Mécanismes de couplages

La dynamique d'un écoulement peut être formellement décrite comme un jeu d'équations de transport pour la densité volumique de masse ρ , la densité volumique d'impulsion $\rho \vec{v}$ et la densité volumique d'énergie ρe . L'action du plasma sur l'écoulement se manifeste de deux façons. Premièrement, le plasma peut agir sur les propriétés thermophysiques du milieu : modification des propriétés thermodynamiques (chaleur massique, rapport des chaleurs spécifiques) ou des coefficients de transport (viscosité, conductivité électrique et thermique). Ce mode d'action peut

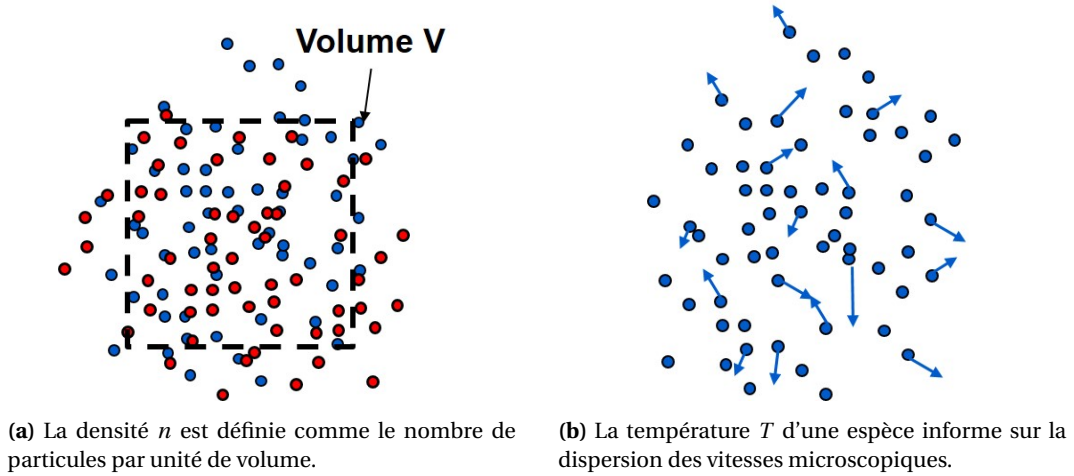


FIGURE 1

être très significatif dans les plasmas thermiques, mais reste marginal pour les plasmas faiblement ionisés. Deuxièmement, le plasma peut agir par le biais de termes sources dans les équations de transport :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{T} + \rho_c \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(u + \frac{1}{2} v^2 \right) + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} \left(u + \frac{1}{2} v^2 \right) = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_U - \vec{T} \cdot \vec{v}) + \vec{j} \cdot \vec{E} + \sigma_E. \quad (3)$$

Ces équations de transport résument les trois modes d'action d'un plasma sur un écoulement : une action mécanique, par les forces de Coulomb ou de Laplace $\rho_c \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}$, exprimée en Nm^{-3} , une action thermique $\vec{j} \cdot \vec{E} + \sigma_E$ exprimée en Wm^{-3} . À cela s'ajoute une action chimique, qui n'est pas figurée dans ces équations, mais qui se traduit par des termes sources σ_j dans les équations de transport spécifiques à chaque espèce j . Ce terme source est dû à la production d'espèces réactives par le plasma.

Dans cette perspective, l'intérêt du plasma est de permettre un contrôle de cette action thermique, mécanique ou chimique sur un écoulement. Cette action peut être continue, pulsée, avec une dynamique lente ou très rapide devant les temps caractéristiques de l'écoulement. Selon les types de décharge, l'action peut être découplée, c'est-à-dire que la modification induite sur l'écoulement n'est pas suffisante pour rétroagir sur le plasma, ou couplée. Enfin, l'action du plasma peut être en surface ou en volume. La section suivante explore différents exemples d'utilisation de ces mécanismes de couplage pour obtenir une action physique.

3. Exemples d'applications des plasmas pour l'aérospatiale

Dans cette section, on s'attache à présenter trois exemples d'application des plasmas dans le domaine aérospatial. Il s'agit d'une illustration basée sur les travaux de l'auteur ; elle n'est donc pas exhaustive. L'objectif de cet exposé est d'éclairer les propos très généraux de la section précédente par trois cas concrets d'utilisation du *fluide électrique* sur des systèmes aérospatiaux. On posera d'abord deux cas d'étude ayant trait aux écoulements rapides externes (contrôle

d'écoulement) ou internes (allumage et assistance à la combustion). Ces deux cas illustreront le couplage par le terme source d'énergie σ_E dans l'équation (3) : comment le plasma, en permettant un apport d'énergie de topologie et d'intensité contrôlées, permet d'obtenir des effets désirables pour optimiser un système aéronautique. Le dernier cas concernera l'utilisation d'un plasma à très basse pression pour communiquer de la quantité de mouvement à la matière, c'est-à-dire le terme source de force dans l'équation (2).

3.1. Réduction de traînée par filamentation femtoseconde

Pour les écoulements supersoniques, il a été établi expérimentalement et numériquement que l'apport d'énergie en amont de l'écoulement peut permettre une diminution de la traînée significative [4,14]. Selon la description proposée dans les équations (1)–(3), ceci revient à établir un terme source σ_E en amont de l'aéronef. Le plasma est un outil très approprié pour effectuer un tel dépôt d'énergie. Différentes voies ont été explorées : la focalisation de micro-ondes, la génération de décharges continues ou encore l'utilisation de claquages laser. Dans ce dernier cas, un laser impulsionnel est focalisé dans un gaz pour créer un plasma au point focal. Pour une énergie d'impulsion suffisante, l'intensité laser au point focal est telle que les atomes ou les molécules du milieu peuvent être ionisés. Ce claquage laser forme ainsi un volume de plasma au voisinage du point focal. Pour des durées d'impulsions de l'ordre de la nanoseconde, le volume de ce plasma est de quelques millimètres cubes.

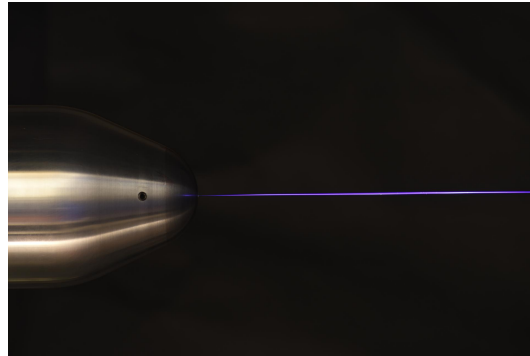


FIGURE 2 – Filament femtoseconde générée à la pression atmosphérique. © ONERA-LOA

Pour des durées d'impulsion inférieures à la picoseconde, la topologie du plasma change significativement. Le plasma se présente sous forme de filaments centimétriques, voire décimétriques. En effet, les impulsions laser ultra-courtes peuvent générer de longues colonnes de plasma continues et faiblement ionisées par un processus dit de filamentation laser [15]. Pour des énergies d'impulsion suffisantes, cette filamentation est due à la compétition entre l'auto-focalisation du faisceau laser par effet Kerr (nonlinéarité de la réponse diélectrique du gaz) et sa défocalisation due à la chute de permittivité dans le plasma. Il résulte de cette compétition la formation d'une colonne de plasma de durée de vie très brève et le chauffage subséquent du gaz lors de sa recombinaison. Ce processus permet donc de déposer de l'énergie en volume, sur une longueur décimétrique. De tels dépôts d'énergie peuvent être intéressants pour modifier la traînée de corps en écoulement rapide. Par analogie avec un dispositif physique parfois placé au nez des ogives supersoniques, ce concept a été appelé « perche laser ». La simulation a montré

qu'un dépôt linéique unique induit une perturbation significative de l'écoulement, et une réduction importante de la traînée sur un profil supersonique générique (dénommé HB2) [16]. La durée caractéristique de la perturbation est de l'ordre de la durée de convection du filament. L'intensité de cette perturbation croît avec l'énergie déposée, mais de manière non-linéaire. Pour des conditions d'un vol supersonique d'une ogive décimétrique, un effet significatif est possible avec une énergie déposée dans le gaz de l'ordre de $0.4\text{--}1\text{ mJ cm}^{-1}$. Depuis la mise en évidence du phénomène de filamentation en 1995, la plupart des études se sont concentrées sur le cas de longs filaments produits en focalisant faiblement des faisceaux (environ 0.5 mJ pour une durée de 100 fs). Cependant, des études au Laboratoire d'Optique Appliquée à l'école Polytechnique ont montré, avec des impulsions femtosecondes plus énergétiques (de 5 à 250 mJ), une augmentation de l'ionisation d'au moins un ordre de grandeur et une augmentation du dépôt d'énergie du même ordre. Dans le dépôt, la température initiale des neutres dans le filament atteint environ 1400 K dans un canal de $150\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre pour une énergie déposée de $800\text{ }\mu\text{J cm}^{-1}$ environ. Lorsqu'on augmente l'énergie laser incidente, ce canal chaud s'élargit et l'énergie laser déposée atteint 4 mJ cm^{-1} ce qui est largement suffisant en théorie pour modifier un écoulement supersonique. Cette hypothèse a été testée dans la soufflerie supersonique R1Ch de l'ONERA, afin de créer un filament en amont d'une maquette, comme le montre la figure 2. En utilisant des moyens de diagnostics optiques (strioscopie nanoseconde, analyseur de front d'onde) et des capteurs montés sur l'ogive, on peut ensuite reconstruire l'interaction entre le filament laser et l'écoulement afin de mettre en évidence l'effet du dépôt d'énergie sur l'écoulement. On observe que le filament génère dans le gaz une onde de choc cylindrique et un canal sous-dense, dû à l'échauffement du milieu. Quand elle est générée en amont de la maquette d'essai, cette zone chaude sous-dense vient interagir avec le choc détaché. La figure 3 montre une visualisation par strioscopie des différentes phases d'interaction entre la colonne chaude et le système de chocs généré par la maquette. L'effet du dépôt est de former une zone décollée de basse pression, en amont du corps, qui diminue transitoirement la traînée. La formation de cette zone décollée est due à l'apparition d'un couple barocline quand le canal sous-dense traverse l'onde de choc. Dans cette configuration, le gradient de densité, dû au canal sous-dense, est principalement radial, tandis que le gradient de pression, dû au choc, est axial. Cette configuration favorise la formation d'une zone tourbillonnaire, qui se transforme en bulle de recirculation en amont de l'ogive. Cette bulle décollée est ensuite convectée vers l'aval, formant un tourbillon toroïdal qui génère une dépression importante lors du passage sur la paroi de l'ogive. Cette dépression entraîne une forte chute du coefficient de traînée. Expérimentalement, on mesure une réduction transitoire de la traînée de l'ordre de 40% [17].

Ces travaux apportent une première preuve expérimentale de la faisabilité du concept de perche laser, montrant ainsi qu'il est possible de modifier significativement un écoulement supersonique à l'aide d'impulsions ultra-courtes de faible énergie générant un plasma en amont d'une ogive. Ils démontrent également que la *perche laser* induit une réduction transitoire de traînée significative. Cette première démonstration reste toutefois encore assez éloignée d'une application pratique pour le contrôle de traînée. En effet, la fréquence de répétition du laser est juste suffisante pour observer un faible effet moyen. Cependant, si on note L la longueur du canal sous-dense formé par le dépôt laser, u_∞ la vitesse amont de l'écoulement et f la fréquence de l'écoulement, une première analyse indique qu'un effet quasi-continu pourrait être observé dès lors que le temps entre chaque impulsion est identique au temps de convection du canal

$$fL/U_\infty \approx 1.$$

Cette relation fait ressortir tout l'intérêt de la filamentation femtoseconde. En effet, si on suppose $U_\infty \sim 1 \times 10^3\text{ m s}^{-1}$ et une impulsion femtoseconde telle que $L \sim 0.1\text{ m}$, on a $f \sim 10\text{ kHz}$. Le grand rapport d'aspect des filaments diminue la cadence nécessaire à l'entretien du phénomène.

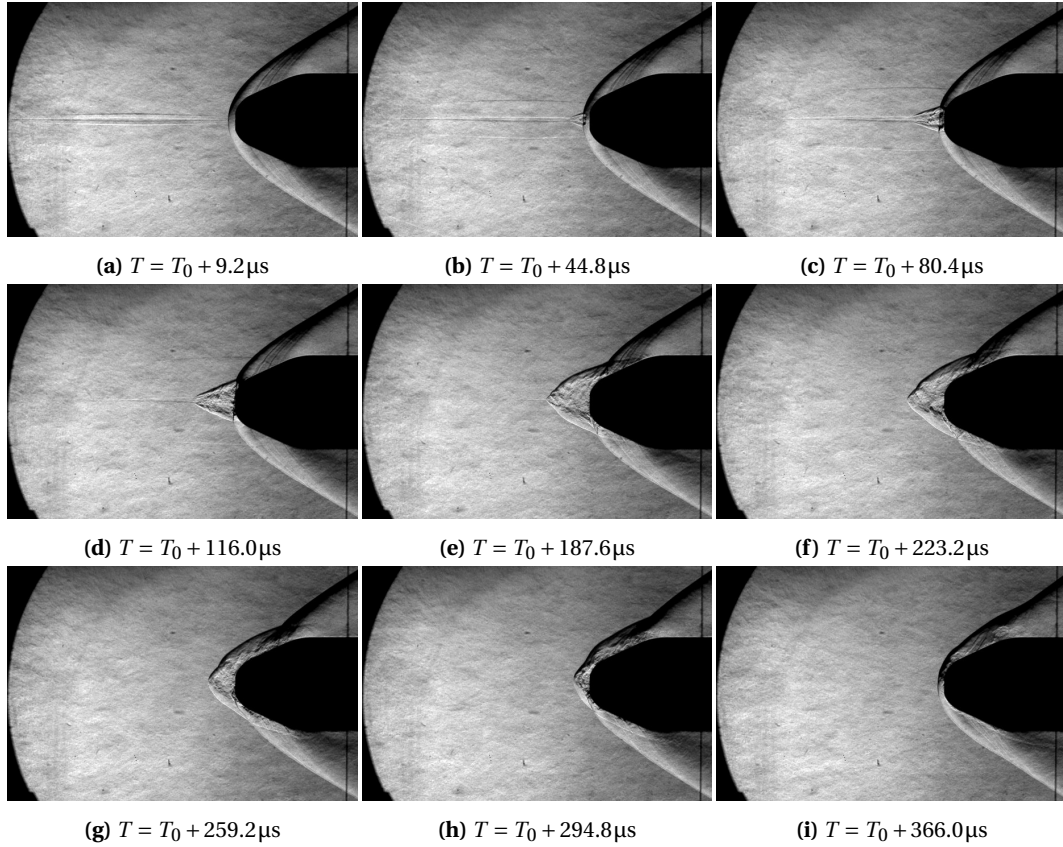
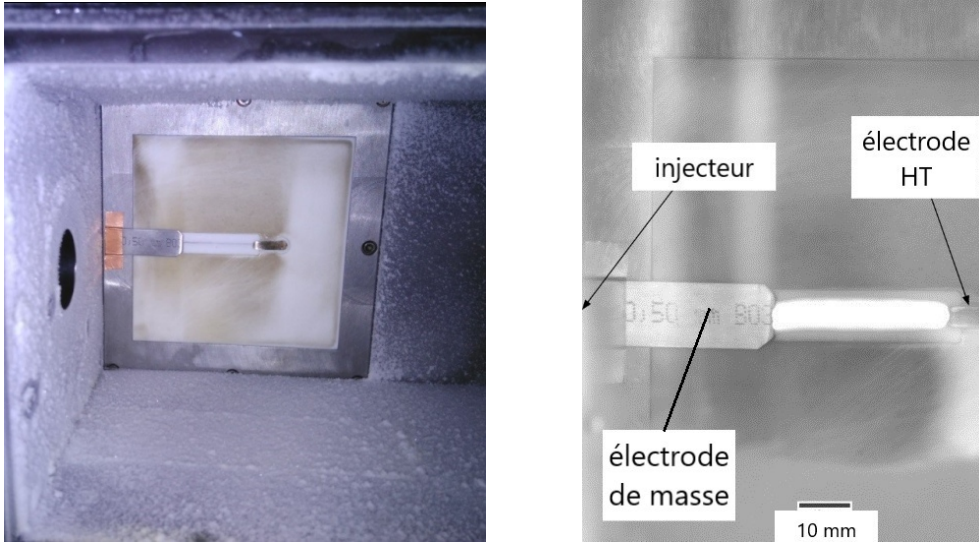


FIGURE 3 – Strioscopie montrant l’interaction du canal de gaz chaud généré par filamentation femtoseconde avec le choc détaché de l’ogive. $M=3$, pression génératrice $P_i = 3.59 \times 10^5$ Pa, température génératrice $T_i = 359$ K, Reynolds unitaire amont $Re_u = 2.9 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, laser LLR à 1064 nm, énergie d’impulsion $E = 250$ mJ et fréquence de répétition du laser $f = 1$ kHz.

L’analyse plus poussée de la dynamique de l’interaction montre que la durée d’expansion de la bulle décollée est encore plus longue que le temps de convection (autour de 0.1–0.2 ms). On peut donc s’attendre à des effets cumulatifs pour des fréquences autour de 5–10 kHz, et observer des effets moyens pour des fréquences encore plus basses (autour de 1 kHz). De nouveaux types de laser, plus compact et opérant à des cadences compatibles avec ces exigences, vont être évalués pour explorer ces effets en régime quasi-permanent.

3.2. Allumage

Un point critique pour l’opération des turbines d’hélicoptère concerne l’allumage ou le ré-allumage en condition de haute altitude. En effet, en cas d’extinction de la turbine en vol, il est nécessaire de la redémarrer rapidement. Pour cela, l’allumeur doit pouvoir initier la combustion avec de l’air froid à une pression inférieure à l’atmosphère. Ce problème se pose également lors d’opérations en altitude ou à très basse température. Les allumeurs aéronautiques sont constitués par des dispositifs très semblables aux bougies automobiles. Un système d’électrodes est alimenté par une impulsion haute-tension pour générer un arc de quelques millimètres cubes.



(a) Bougie plasma dans la chambre de combustion du banc MERCATO. L'injecteur de kérosène est l'orifice à droite. La chambre est refroidie avant essai pour simuler les conditions d'allumage à basse température.

(b) Vue de la décharge de surface dans la chambre de combustion. La décharge s'établit entre l'électrode HT et la masse.

FIGURE 4

En condition froide et déprimée, cette excitation est insuffisante pour garantir l'allumage à la stœchiométrie. On est alors obligé d'augmenter la richesse Φ du mélange assez significativement pour allumer la chambre. La richesse Φ est définie comme le nombre de mole de carburant par unité de masse du mélange, rapporté à ce même nombre de mole par unité de masse pour un mélange stœchiométrique. Augmenter la richesse signifie l'injection de plus de carburant que le régime idéal, entraînant une dégradation des performances.

Or, certaines configurations d'électrodes asymétriques, combinées à des impulsions haute-tension microseconde, génèrent des décharges filamenteuses se propageant en surface sur des distances centimétriques. Cette propriété permet de déposer de l'énergie de manière quasi-linéique [18]. Elle peut notamment être exploitée pour l'allumage ou le ré-allumage de foyers aéronautiques. En effet, contrairement aux bougies, la décharge de surface permet de générer un arc sur des longueurs centimétriques. Ceci se traduit par un plus grand volume de plasma, qui a pour conséquence d'augmenter la probabilité d'avoir des conditions favorables à l'allumage pour un champ fluctuant donné. La figure 4(a) montre un tel dispositif de décharge de surface installé dans le banc MERCATO de l'ONERA. Ce banc permet notamment d'étudier l'allumage sur des injecteurs « swirlés » typiques de turbines aéronautiques. En alimentant l'allumeur avec de l'air et du kérosène refroidis, en régime déprimé (environ 0.6 atmosphère) il simule les régimes d'allumage les plus contraignants.

Dans l'expérience, la décharge présente une extension de 33 mm, comme le montre la figure 4(b). La figure 5 présente le résultat d'une série d'essais d'allumage à basse pression et basse température. Pour la bougie aéronautique classique, il est nécessaire d'augmenter la richesse à $\Phi = 2.17$ pour garantir un allumage à basse température. Avec l'allumeur à décharge de surface, l'allumage est obtenu même pour une richesse de $\Phi = 1.22$ à basse température et à l'atmosphère, et pour une richesse inférieure à $\Phi = 1.5$ à basse température et basse pression. On parvient ainsi

à diminuer significativement la richesse minimale nécessaire à l'allumage. Ce résultat illustre l'effet de la topologie sur la performance d'allumage. L'extension plus importante du plasma augmente la probabilité d'allumage et autorise un fonctionnement en régime nominal, même dans des conditions d'altitude.

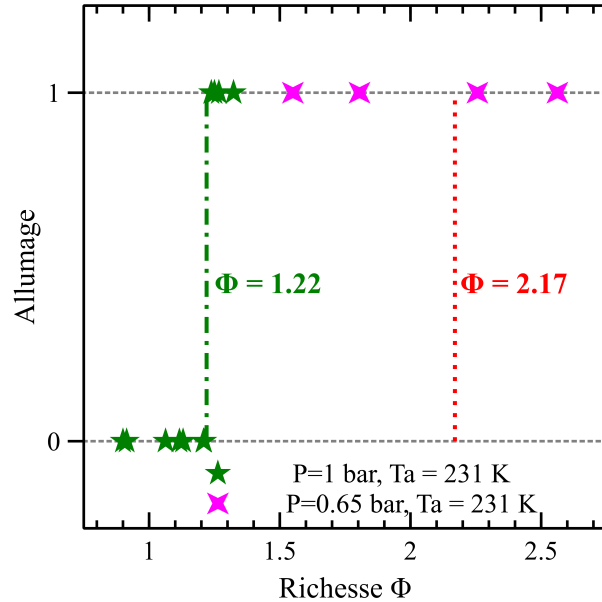


FIGURE 5 – Probabilité d'allumage en fonction de la richesse, pour de l'air refroidi à 231 K. La richesse minimum pour garantir l'allumage pour la bougie classique est figurée en rouge.

3.3. Propulsion spatiale

Au cœur du propulseur électrique se trouve un plasma dont le rôle est d'ioniser l'ergol pour permettre son accélération par des forces électromagnétiques. Comme évoqué dans l'introduction, l'idée d'accélérer des charges électriques pour générer, par réaction, une force propulsive n'est pas nouvelle et a été évoquée dès le début de la conquête spatiale. Ce concept a progressé tout au long du XX^{ème} siècle, principalement développé dans le cadre de missions institutionnelles, avant de s'imposer très récemment comme le type de propulsion majoritaire avec l'explosion du nombre de satellites en orbite, dû principalement aux méga-constellations. Le grand intérêt de la propulsion électrique est de permettre des vitesses d'éjection de la matière d'ordre de la dizaine de kilomètres par seconde, là où la propulsion chimique ne permet que des vitesses de l'ordre du kilomètre par seconde. Actuellement, deux grands types de propulseurs électriques se disputent le marché : les propulseurs à courant de Hall et les propulseurs à grilles [19]. En parallèle, de nouveaux concepts sont étudiés pour remédier à certaines limitations de ces deux technologies. La principale est due à la nécessité de neutraliser le faisceau de particules chargées accélérées, afin de conserver la neutralité du satellite. C'est le rôle du neutraliseur, qui doit être une source d'électrons extrêmement performante et efficace mais, par voie de conséquence, fragile, notamment sur la durée de vie de plusieurs milliers d'heures [7]. Parmi les nouveaux concepts de propulseurs électriques qui sont actuellement étudiés en laboratoire, ceux ne nécessitant pas de neutraliseurs sont particulièrement intéressants pour circonvenir ce problème. Ces nouvelles

configurations de propulseurs (propulseur Hélicon ou propulseur à résonance cyclotronique des électrons) proposent d'utiliser un champ magnétique statique pour créer une tuyère magnétique permettant, comme dans le cas d'une tuyère physique, d'accélérer le plasma.

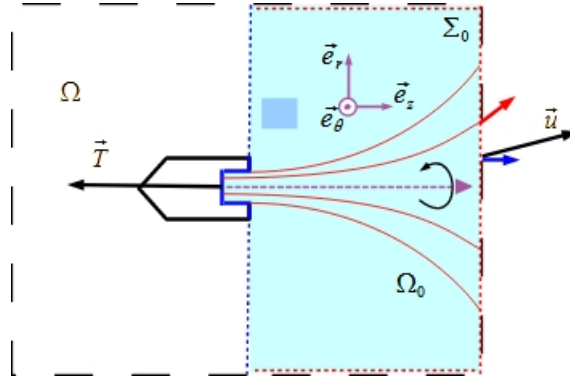


FIGURE 6 – Représentation schématique du volume de contrôle et du propulseur. Le bilan de quantité de mouvement sur le volume Ω_0 permet d'exprimer la poussée comme la somme d'une contribution volumique due à la force de Lorentz et d'une contribution surfacique due à la pression et à la convection (cf. eq. (4)). Les lignes de champ magnétique sont représentées en rouge.

Pour étudier l'éjection du plasma dans ces configurations, ainsi que l'effet d'une tuyère magnétique, une approche simple utilise une description magnétohydrodynamique (MHD) du plasma. Ce modèle décrit le plasma comme un mono-fluide chargé, soumis à la force de Lorentz, qui est représentée par le terme $\vec{j} \times \vec{B}$ dans l'équation de conservation de quantité de mouvement (2). En définissant un volume de contrôle tel que présenté dans la figure 6, une intégration de l'équation de conservation de quantité de mouvement du fluide permet d'écrire la projection de la poussée T selon l'axe z comme [20] :

$$T_z = \underbrace{\int_{\Omega_0} j_{\theta e} B_r dV}_{\text{poussée magnétique}} + \underbrace{\int_{\Sigma_T} (\rho_i U_z (\vec{U} \cdot \vec{n}) + p n_z) dS}_{\text{poussée cinétique}}. \quad (4)$$

L'équation (4) montre que la poussée du propulseur avec tuyère magnétique s'exprime comme la somme d'une contribution cinétique et d'une contribution magnétique. Le premier terme est dû au transfert de quantité de mouvement des particules chargées impactant les parois, qui comprend un terme convectif $\rho_i U_z U_n$, où ρ_i est la masse volumique des ions et U leur vitesse, et un terme de transport microscopique p , la pression. Le second terme apparaît du fait du développement de courants électroniques azimuthaux $j_{\theta e}$ dans le plasma. Ces courants vont interagir avec le champ magnétique. Pour une tuyère divergente ($B_r > 0$), on voit que les courants électroniques paramagnétiques ($j_{\theta e} > 0$) réduisent la poussée, tandis que les courants électroniques diamagnétiques ($j_{\theta e} < 0$) augmentent la poussée [20]. Ceci est identique à la force qui s'établit entre deux spires de courant. Si les courants sont dans le même sens, les deux spires s'attirent, ce qui correspond au cas de courants électroniques paramagnétiques. Si les courants sont dans le sens opposé, les deux spires se repoussent, correspondant au cas diamagnétique.

La figure 7 illustre ce cas de figure dans le cas d'une source de plasma cylindrique située dans un champ magnétique purement divergent, typique de la configuration du propulseur ECR développé à l'ONERA [21,22]. Le plasma se détend en suivant initialement les lignes de champ magnétique. Cette détente permet d'accélérer les ions. La figure 8 montre les zones où la force

volumique $j_{\theta e} B_r$ s'applique, essentiellement sur la périphérie du jet de plasma où un courant électronique azimuthal significatif s'établit.

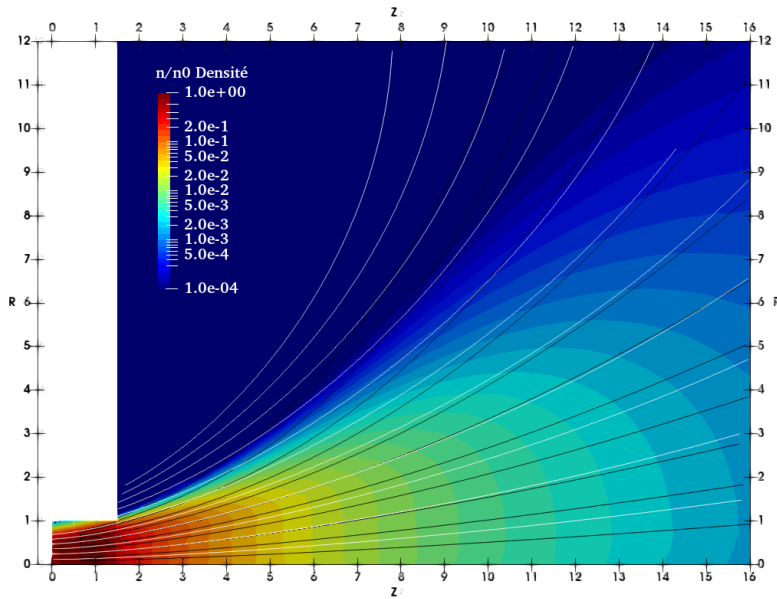


FIGURE 7 – Coupe R-Z montrant la densité adimensionnée dans la tuyère magnétique. Les lignes de champ magnétique sont en blanc, les lignes du champ de vitesse plasma en noir. Paramètre du calcul : $\delta = m_e / M_i$ du xénon, $R/r_{ci} = 10$, où r_{ci} est le rayon cyclotronique des ions.

4. Conclusion

Les savants des Lumières, observateurs du « fluide électrique », ont rapidement spéculé sur son intérêt pour « corriger la nature dans ses écarts », comme le proposait Bertholon. En résonance avec cette considération, les travaux menés actuellement sur l'utilisation des plasmas sur des systèmes aérospatiaux (aéronefs, satellites) connaissent une croissance continue. Le présent article a illustré certaines applications pour le contrôle d'écoulement, l'assistance à la combustion ou encore la propulsion spatiale. Ces trois exemples constituent un échantillon des travaux actuellement menés, qui peut être considéré comme représentatif des trois grandes classes de problèmes. Bien sûr, il en existe d'autres. Pour donner quelques exemples, on peut citer l'actuation magnétohydrodynamique d'écoulement de rentrée [23], le dégivrage par plasma [24], la furtivité électromagnétique [25] et la fonctionnalisation de surface par plasma, ce dernier sujet étant largement étudié dans de nombreuses industries, en particulier la microélectronique.

Si le domaine d'usage des plasmas pour l'industrie aérospatiale est étonnamment varié, pour l'heure peu de dispositifs sont passés au stade opérationnel. Parmi ceux-ci, on peut compter les systèmes de propulsions par plasma historiques comme les propulseurs à courant de Hall ou les propulseurs à grille [2] qui forment maintenant une grande partie des systèmes propulsifs lancés en orbite. La vague du « Newspace » a permis une accélération de tests en orbite de nouveaux concepts de propulseurs, étape clef pour le déploiement de nouveaux types de propulseur à plasma. Pour les applications aéronautiques, la plupart des dispositifs à l'étude sont encore au stade d'objet de laboratoire ou de prototype. Plusieurs raisons expliquent cela. Dans certains cas,

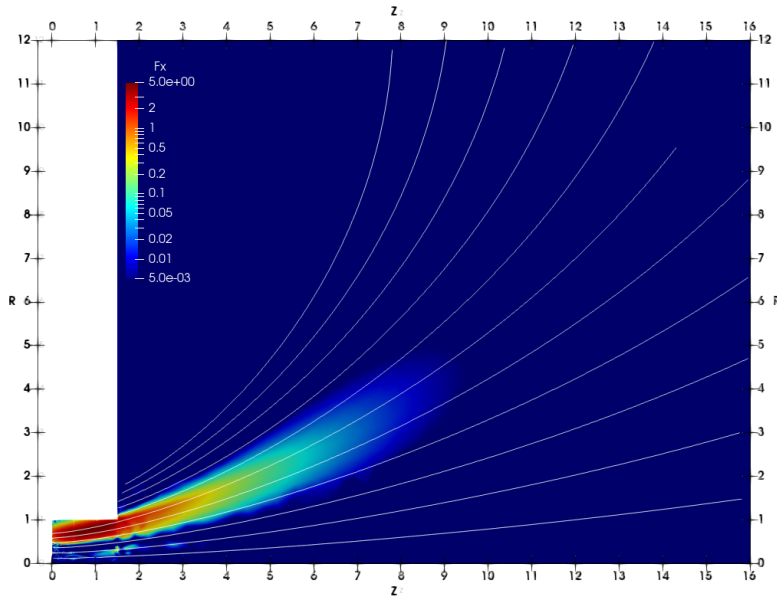


FIGURE 8 – Coupe R-Z du terme de force volumique $F_x = j_{\theta e} B_z$, dans la tuyère magnétique. Les lignes du champ de vitesse sont en noir.

il reste des questions ouvertes ou des inconnues sur les mécanismes d'action des plasmas [3,4]. Dans d'autres, il reste des obstacles au déploiement opérationnel du système. En effet, si l'efficacité intrinsèque du dispositif plasma est un facteur déterminant (ex. combien de pourcent de traînée réduite, quel gain sur les limites d'extinction d'une chambre de combustion), ce n'est pas le seul. Un dispositif d'actuation plasma doit également utiliser un convertisseur d'énergie efficace pour ne pas dégrader l'efficacité totale. Il doit être fiable et présenter une durée de vie suffisante pour ne pas alourdir la maintenance, il ne doit pas perturber d'autres systèmes (par exemple en provoquant des perturbations électromagnétiques) ou introduire une faiblesse dans la sécurité, comme par exemple la protection à la foudre. Ainsi, l'emploi d'une technologie plasma permettant un gain de performance incrémental ne se justifiera que si elle induit un accroissement également incrémental du coût et de la complexité. A contrario, un système plasma promettant un gain disruptif pourra légitimement demander un effort plus conséquent pour son déploiement.

Pour certaines missions dans l'industrie spatiale, cet équilibre entre les gains et les coûts a peu à peu basculé en faveur de la propulsion par plasma. Ce basculement a été lent à advenir, il a nécessité une recherche constante depuis le début des missions spatiales. Mais une fois enclenché, sa rapidité a surpris plus d'un observateur. Pour le domaine aéronautique, paradoxalement, l'effort de recherche est beaucoup plus récent, mais il est très probable que, comme pour l'industrie spatiale, un mouvement d'adoption de systèmes plasma s'opère graduellement puis se généralise. Les études à venir pour parvenir à l'adoption de ces dispositifs plasma s'annoncent passionnantes. En un sens, elles poursuivront l'ambition de Bertholon de maîtriser le « fluide électrique ».

Remerciements

L'auteur remercie l'association ONERA-Alumni pour l'organisation du Colloque en hommage à P. Bertholon, ainsi que les nombreux chercheurs et personnels de l'ONERA ou d'ailleurs qui sont

associés aux travaux présentés ci-dessus. En particulier, l'auteur remercie Mikaël Orain, Nicolas Séverac, Jean-Marc Luyssen, Jean-Pierre Tobeli, Reynald Bur, Aurélien Houard, Julien Jarrige, Denis Packan, Philippe Castera et Christophe Laux.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que ses organismes de recherche.

Références

- [1] E. Lenoir, Gas-Engine, brevet US, US345596A, 1886.
- [2] E. Choueiri, « A critical history of electric propulsion : the first fifty years (1906–1956) », in *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, American Institute of Aeronautics et Astronautics, 2004.
- [3] J. Kriegseis, B. Simon et S. Grundmann, « Towards in-flight applications? A review on dielectric barrier discharge-based boundary-layer control », *Appl. Mech. Rev.* **68** (2016), no. 2, article no. 020802 (41 pages).
- [4] D. Knight et N. Kianvashrad, « Review of energy deposition for high-speed flow control », *Energies* **15** (2022), no. 24, article no. 9645 (40 pages).
- [5] S. B. Leonov, I. V. Adamovich et V. R. Soloviev, « Dynamics of near-surface electric discharges and mechanisms of their interaction with the airflow », *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016), no. 6, article no. 063001 (32 pages).
- [6] Y. Ju et W. Sun, « Plasma assisted combustion : dynamics and chemistry », *Prog. Energy Combust. Sci.* **48** (2015), p. 21–83.
- [7] E. Dale, B. Jorns et A. Gallimore, « Future directions for electric propulsion research », *Aerospace* **7** (2020), no. 9, article no. 120 (30 pages).
- [8] C. F. de Cisternay du Fay, « Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction & répulsion des corps électriques », *Mém. Acad. R. Sci.* **1733** (1733), p. 457–476.
- [9] J. L. Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th centuries : a study of early modern physics*, University of California Press, 1979, xiv+606 pages.
- [10] P. Bertholon, *Mémoire sur un nouveau moyen de se préserver de la foudre*, Jean Martel Ainé, 1777, 30 pages.
- [11] P. Bertholon, *De l'électricité des végétaux : ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, de leurs vertus médico & nutritivo-électriques, & principalement des moyens de pratique de l'appliquer utilement à l'agriculture, avec l'invention d'un électro-végétomètre. Avec figures en taillédouce*, Didot Jeune, 1783, xvi+468 pages.
- [12] I. Langmuir, « Oscillations in ionized gases », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **14** (1928), no. 8, p. 627–637.
- [13] M. Moisan et J. Pelletier, *Physics of collisional plasmas : introduction to high-frequency discharges*, Springer, 2012, xxiv+480 pages.
- [14] D. Knight, « Survey of aerodynamic drag reduction at high speed by energy deposition », *J. Propul. Power* **24** (2008), no. 6, p. 1153–1167.
- [15] A. Houard et A. Mysyrowicz, « Femtosecond laser filamentation and applications », in *Light filaments : structures, challenges and applications* (J.-C. Diels, M. C. Richardson et L. C. Arissian, eds.), Institution of Engineering et Technology, 2021, p. 11–30.
- [16] P.-Q. Elias, « Numerical simulations on the effect and efficiency of long linear energy deposition ahead of a supersonic blunt body : toward a laser spike », *AerospaceLab J.* (2015), no. 10, article no. AL10-03 (11 pages).
- [17] P.-Q. Elias et al., « Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation », *Sci. Adv.* **4** (2018), no. 11, article no. eaau5239 (5 pages).
- [18] P.-Q. Elias et P. Castera, « Measurement of the impulse produced by a pulsed surface discharge actuator in air », *J. Phys. D : Appl. Phys.* **46** (2013), no. 36, article no. 365204 (12 pages).
- [19] D. M. Goebel et I. Katz, *Fundamentals of electric propulsion : ion and Hall thrusters*, John Wiley & Sons, 2008, xv+509 pages.
- [20] K. Takahashi, T. Lafleur, C. Charles, P. Alexander et R. W. Boswell, « Electron diamagnetic effect on axial force in an expanding plasma : experiments and theory », *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011), no. 23, article no. 235001.
- [21] F. Cannat, T. Lafleur, J. Jarrige, P. Chabert, P.-Q. Elias et D. Packan, « Optimization of a coaxial electron cyclotron resonance plasma thruster with an analytical model », *Phys. Plasmas* **22** (2015), no. 5, article no. 053503.
- [22] T. Vialis, J. Jarrige, A. Aanesland et D. Packan, « Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster », *J. Propul. Power* **34** (2018), no. 5, p. 1323–1333.

- [23] T. Fujino, Y. Matsumoto, J. Kasahara et M. Ishikawa, « Numerical studies of magnetohydrodynamic flow control considering real wall electrical conductivity », *J. Spacecr. Rock.* **44** (2007), no. 3, p. 625-632.
- [24] C. Kolbakir, H. Hu, Y. Liu et H. Hu, « An experimental study on different plasma actuator layouts for aircraft icing mitigation », *Aerosp. Sci. Technol.* **107** (2020), article no. 106325.
- [25] X. Liu, J. Zhang, C. Luo, M. Dang, M. Lin et P. Zhang, « Experiment and simulation of electron density distribution in discharge plasma at hypersonic speed », *AIP Adv.* **13** (2023), no. 9, article no. 095307 (14 pages).