

Caractérisation fine de la combustion d'ergols liquides verts non hypergoliques

Contexte et objectifs

La réglementation européenne Reach interdira, à terme, l'utilisation d'ergols toxiques de type hydrazines actuellement utilisés dans les propulseurs de satellites et/ou pour les missions complexes d'exploration spatiale. De plus, les ergols liquides cryogéniques actuellement utilisés sur les lanceurs imposent des contraintes de fabrications (fabrication in-situ) et de manipulations importantes (maintien à très basse température 90K pour l'oxygène, 20 K pour l'hydrogène). Aussi il est primordial d'identifier de nouveaux couples d'ergols liquides stockables «verts», ayant un impact réduit pour l'environnement et la santé du fait de leur très faible toxicité. A ce jour, les ergols alternatifs envisagés n'ont pas montré de propriété d'hypergolicité (auto-inflammation par simple mise en contact des deux ergols) et nécessitent donc l'utilisation de systèmes d'allumage dédiés. Leur potentiel en terme de performances ouvre des possibilités d'application plus larges sur des missions autres que la simple mise en orbite assurée actuellement par les moteurs à hydrazine.

L'utilisation de ces ergols, éventuellement composés d'hydrocarbures d'origine renouvelable (éthanol, alcane bio-sourcés, ...), requiert une maîtrise de la combustion dans ces conditions particulières. Cela suppose une nouvelle définition des systèmes d'injection et d'allumage, et il est donc primordial d'étudier les processus physiques impliqués lors de ces phases critiques ainsi qu'au cours des phases stabilisées de la combustion.

Depuis 2011, Le CNES développe en association avec l'institut PPRIME des travaux de recherche fondamentaux sur la pulvérisation, l'allumage et la combustion de couples d'ergols liquides stockables non hypergoliques ; ces activités visent à identifier puis qualifier des substituts aux ergols toxiques tels que MMH/N₂O₄, utilisé sur le moteur d'étage supérieur Aestus. Ainsi trois bancs spécifiques ont été conçus et déployés à cet effet : le banc AILFES pour l'étude de la pulvérisation par impact de jets ; le banc ACSEL pour l'allumage et la combustion à faible débit (< 20 g/s), faible durée de fonctionnement (< 5 s) et faible pression (< 6 bar) ; le banc PERGOLA pour l'étude en condition représentative des applications moteur (débit jusqu'à 800 g/s, pression chambre jusqu'à 50 bar, température des gaz brûlés supérieure à 2500 K et durée de fonctionnement de plusieurs dizaines de secondes). La complémentarité de ces différents bancs tous regroupés sur le site de Poitiers permet à l'institut PPRIME et au CNES d'être en mesure de tester les performances de nouveaux couples d'ergols liquides en prenant en compte l'ensemble des problématiques évoquées.

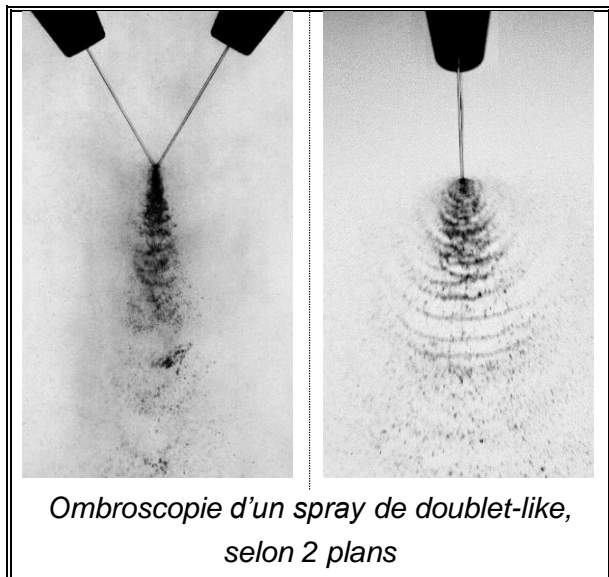
L'obtention de bonnes performances propulsives passe par l'utilisation d'ergols particulièrement énergétiques, mais également par la maîtrise de l'ensemble des phénomènes physiques impliqués depuis l'injection des ergols jusqu'à l'éjection des produits de combustion. Il est donc primordial d'être en mesure d'optimiser chaque étape du processus : l'injection, l'allumage et la combustion dans les conditions envisagées pour une application spatiale.

Etude de la pulvérisation d'ergols verts

Concernant la phase d'injection, les contraintes sont donc d'assurer une pulvérisation la plus fine possible, avec une pression d'alimentation la plus faible possible. En effet, l'utilisation de haute pression à l'injection (1500-2000 bar) comme dans les moteurs à piston utilisés dans le transport terrestre génère un surcroît de masse des systèmes d'alimentation inacceptable pour le transport spatial où le poids de la structure impacte considérablement la performance d'ensemble. Aussi, s'agissant de la propulsion bi-ergol liquide, le processus de pulvérisation envisagé ne peut reposer sur des principes classiques d'injecteurs swirlés privilégiant la pulvérisation par cisaillement liquide-gaz. Le choix retenu par PPRIME et le CNES est la pulvérisation par impact de jets [1], dont les premiers résultats obtenus dans le cadre de la

Thèse de Clément Indiana soutenue en décembre 2016, montrent une grande efficacité que ce soit en mode de doublet-like ou de triplet-unlike. Bien que ce processus de pulvérisation soit peu utilisé actuellement, on peut noter un intérêt certain porté par d'autres équipes scientifiques travaillant dans le domaine de la propulsion spatiale. On peut ainsi évoquer les travaux expérimentaux de l'équipe de Kwon en Corée du Sud [2] et les récents travaux numériques de Chen [2]. Le banc d'essais AILEFS dédié à la pulvérisation, développé par PPRIME depuis 2013, permet une caractérisation par

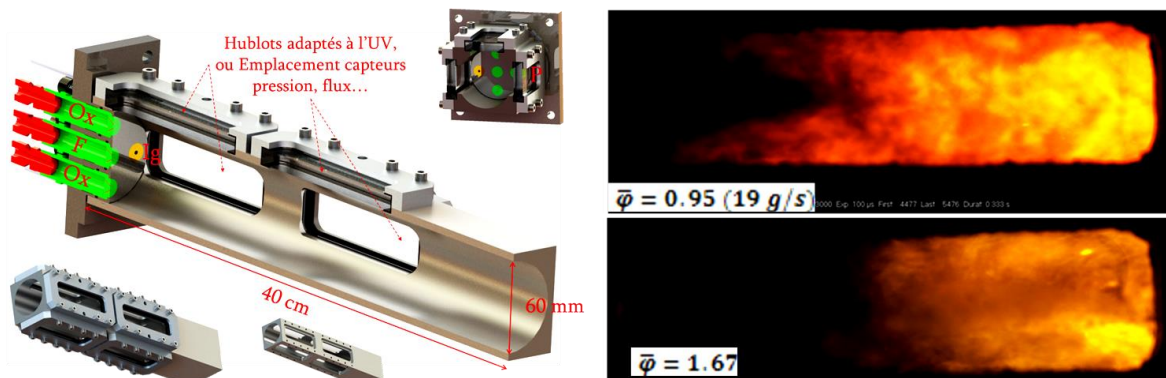
visualisation et granulométrie des sprays obtenus par impact de jets. Les résultats de visualisation (ci-contre) montrent une structure de spray en nappe évasée bidimensionnelle, ainsi que la production rapide de gouttelettes propices à la génération de la phase vapeur qui permettra la combustion des ergols en phase gazeuse. Si cette stratégie de pulvérisation semble performante, en revanche, aucun nombre adimensionnel habituel (nombre de



Reynolds ou de Weber) n'a pu être identifié comme paramètre de similitude. Il est donc important de poursuivre les efforts dans ce domaine de la compréhension du processus de pulvérisation. De plus, la capacité de miscibilité des ergols n'a pas à ce jour été prise en compte et étudiée, en particulier dans le cas de triplet-unlike.

Etude de l'allumage d'ergols verts

La plupart des couples d'ergols « verts » ne présentent pas la capacité d'hypergolicité. Aussi, il est primordial de développer dès à présent des systèmes d'allumage capables d'assurer la vaporisation des ergols (injectés en phase liquide) et leur allumage. Actuellement, des torches d'allumage sont utilisées, cependant des systèmes catalytiques pourront être envisagés (collaboration avec l'IC2MP de Poitiers) et testés en conditions représentatives des applications finales. La phase d'allumage et la combustion peuvent être caractérisées à l'aide du banc d'essais ACSEL développé depuis 2014 à PPRIME, par imagerie rapide et mesures de pression et flux thermique [4]. Les résultats obtenus durant la thèse de C. Indiana montrent une structure de flamme très turbulente, qui se décroche de l'injecteur à mesure que la richesse ϕ s'éloigne de la stœchiométrie :



Banc d'essais ACSEL (gauche) – Visualisation rapide de la combustion stabilisée (droite)

Etude de la combustion d'ergols verts

Concernant la phase de combustion, celle-ci est fortement dépendante des interactions entre plusieurs phénomènes :

- la cinétique chimique du couple d'ergols considéré
- les conditions aérodynamiques (pression, température, vitesse, turbulence, etc...) influençant entre autre l'évaporation et le mélange et donc le processus de combustion (flamme de diffusion, flamme de prémélange, combustion homogène)

- le temps de résidence dans la chambre de combustion, fortement dépendant du débit et de la géométrie de la chambre.

Ainsi la capacité d'assurer une combustion complète dans un volume le plus réduit possible est fortement dépendante des caractéristiques physico-chimiques des ergols (pression de vapeur saturante, tension superficielle...), de leur cinétique chimique (peu ou pas connue, c'est le cas de la combustion Peroxyde d'hydrogène/Ethanol), de la qualité de pulvérisation et de celle du mélange des ergols. Sur cette phase également, l'aspect miscible ou non des ergols liquides testés reste un point important inexploré.

La thèse de doctorat s'intéressera de manière privilégiée aux phases de pulvérisation et de combustion. L'approche retenue est donc principalement expérimentale sur les bancs d'essais déjà opérationnels, notamment en mettant en œuvre des stratégies d'injection optimisées (pulvérisation par impact de jets triplets), et des ergols verts à plus forte densité, ainsi plus proches d'un couple réactif idéal. L'optimisation du mélange dans le cas d'ergols miscibles et non miscible sera regardée avec attention.

L'effort se poursuivra sur la caractérisation in-situ des propriétés locales de l'écoulement réactif turbulent, par des diagnostics laser (granulométrie en milieu réactif, vélocimétrie, fluorescence, spectrométrie) et par des mesures physiques rapides (pression, flux thermique). Ces mesures expérimentales seront réalisées sur les bancs expérimentaux opérationnels qui autorisent de larges accès optiques pour les diagnostics fins in-situ. La compréhension des mécanismes de pulvérisation et de stabilisation de la combustion permettra la mise en place d'une phase d'optimisation de la géométrie de la chambre de combustion vis-à-vis du degré d'avancement de la réaction, et du rendement de vitesse caractéristique (c^*), paramètre traduisant la qualité d'une combustion dans un volume donné.

- [1] Indiana C., Bellenoue M. and Boust B., "Experimental investigation of drop size distribution with impinging liquid jets using phase Doppler anemometer", International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, Volume 14 issue 3, 241-264, 2015
- [2] Kang, H., Jang, D., Kwon, S., "Demonstration of 500N scale bipropellant thruster using non-toxic hypergolic fuel and hydrogen peroxide", Aerospace Science and Technology, No. 49, pp. 209-2014, 2016.
- [3] Chen, X., Ma, D., Yang, V., Popinet, S., "High-Fidelity Simulations of Impinging Jet Atomization", Atomization and Sprays, Vol. 23, N. 12, 1079-1101, 2013
- [4] Indiana C., Boust B., Bellenoue M. and Petitot S., "Experimental Combustion Investigations from Like-Impingement Sprays of Green Propellants" AIAA Propulsion and Energy Forum

and Exposition 2016, Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, 25-27 July 2016.

Profil du candidat

Diplôme de Master ou d'Ingénieur en mécanique des fluides, énergétique, combustion

Co-financement

CNES

Laboratoire d'accueil

Institut PPRIME (UPR3346)

www.pprime.fr

Directeur de thèse

Pr Marc Bellenoue

+33 (0) 5 49 49 80 99

marc.bellenoue@ensma.fr