

## Simulation numérique de la pulvérisation et la combustion d'ergols liquides verts non hypergoliques

**Encadrants :** Zakaria BOUALI, Marc BELLENOUE

@ : [zakaria.bouali@ensma.fr](mailto:zakaria.bouali@ensma.fr) , [marc.bellenoue@ensma.fr](mailto:marc.bellenoue@ensma.fr)

La réglementation européenne Reach interdira, à terme, l'utilisation d'ergols toxiques de type hydrazines utilisés dans les propulseurs de satellites du fait de leur propriété d'hypergolicité particulièrement intéressante pour assurer des ré-allumages. Aussi l'identification de nouveaux couples d'ergols liquides stockables, qualifiés de verts pour l'environnement et la santé du fait de leur faible toxicité, est primordiale. A ce jour, les ergols alternatifs envisagés n'ont pas montré de propriété d'hypergolicité et nécessitent donc l'utilisation de systèmes d'allumage dédiés. Cependant leur potentiel en terme de performances ouvre des possibilités d'application plus larges sur des missions autres que la mise en orbite par exemple.

L'utilisation de ces ergols, éventuellement composés d'hydrocarbures d'origine renouvelable (éthanol, alcane, ...), requiert une maîtrise de la combustion dans ces conditions particulières. Cela suppose une nouvelle définition des systèmes d'injection et d'allumage, et nécessite l'étude des processus physiques impliqués lors de ces phases critiques mais également lors de la phase stabilisée de la combustion.

Dans ce cadre, le CNES, l'ISAE-ENSMA et l'Institut PPRIME sont associés depuis 2011 pour mettre en œuvre ces ergols verts, respectueux de la santé humaine et de l'environnement. Un banc d'essais unique en Europe, dénommé PERGOLA [1], a été réceptionné en 2015 dans une configuration permettant la caractérisation globale des performances (pression de combustion, poussée) d'un premier couple d'ergols dans des conditions représentatives des applications spatiales visées. Une première thèse de doctorat [2] cofinancée par le CNES et le CNRS a permis d'identifier les phénomènes-clés impliqués dans la pulvérisation, l'allumage et la combustion des ergols dans des conditions académiques maîtrisées, mettant en exergue l'effet de la qualité d'injection sur le processus de combustion (Fig. 1).

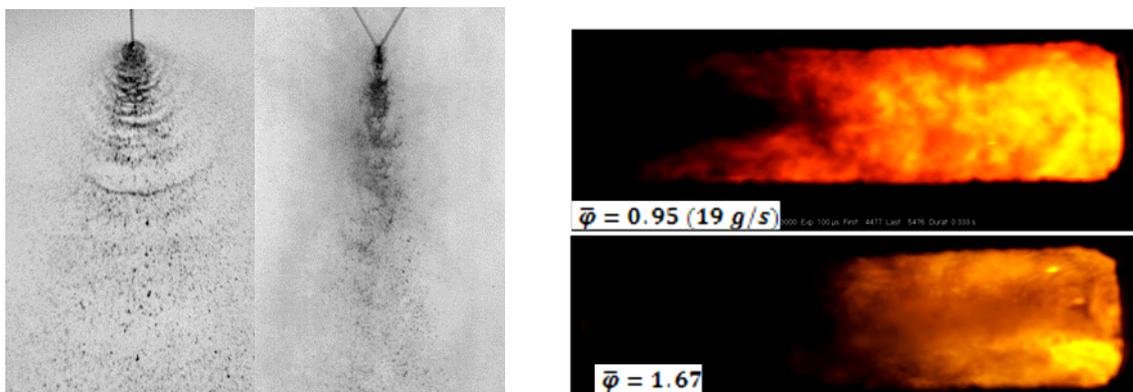


Fig 1 : Pulvérisation par jet impactant et visualisation de la combustion stabilisée

Le consortium, ainsi constitué, souhaite approfondir l'étude de ces phénomènes fondamentaux dans des conditions proches de l'application, notamment en mettant en œuvre des stratégies d'injection optimisées (pulvérisation par impact de jets doublets et triplets). En revanche, si ces stratégies de pulvérisation semblent performantes, 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 le domaine de la compréhension du processus de pulvérisation. L'analyse de ce processus de pulvérisation par impact de jets ne peut être menée par voie expérimentale seule, les données accessibles étant alors toujours limitées aux diagnostics existant.

L'objectif visé de cette thèse est donc de compléter les travaux expérimentaux menés à PPRIME sur cette problématique avec un volet simulation. L'idée est d'une part d'apporter une aide à la définition des configurations/conditions d'essais et d'autre part d'assurer une meilleure capitalisation des travaux expérimentaux ainsi qu'étudier numériquement la problématique de l'injection bi-liquide. Cette activité permettra ainsi de valider les outils numériques développés pour étudier le processus d'atomisation en profitant des essais réalisés à PPRIME [1-5]. Ce travail sera réalisé au moyen du solveur DNS tridimensionnel incompressible ARCHER [6] développé spécialement pour ce type d'étude (Fig. 2). Le doctorant sera amené à réaliser une étude paramétrique pour évaluer l'impact des conditions opératoires (pression d'injection, angle des jets ...) sur les caractéristiques du spray généré.

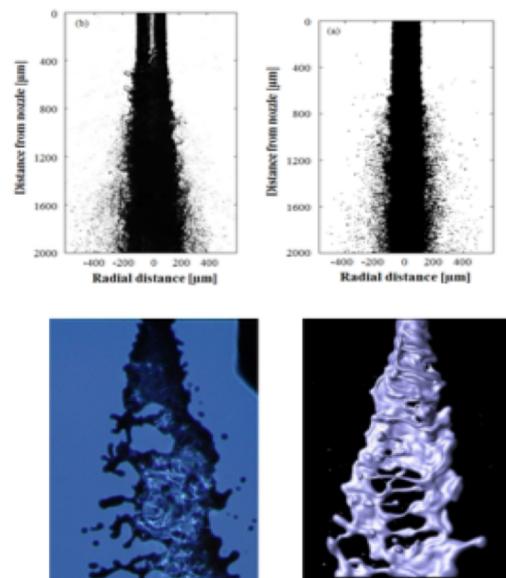


Fig 2 : Comparaison exp./num. : injection diesel (en haut), injecteur triple disque (en bas) [7]

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 aérothermodynamiques (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.

Les simulations numériques envisagées dans le cadre de cette thèse (à l'aide du code YALES2 et/ou du code OpenFOAM actuellement déployé au sein de l'équipe Combustion Turbulente du laboratoire PPRIME) ont pour objectif de bien comprendre le processus de propagation de flamme dans un spray représentatif à celui obtenu expérimentalement (et probablement numériquement). Une attention particulière sera portée à la fois, sur l'étude de l'évaporation du

couple d'ergols et sur le développement d'un modèle cinétique à une étape capable de reproduire les propriétés essentielles de la flamme à partir des données expérimentales [8].

L'ensemble de ces travaux viendront compléter les études expérimentales actuellement menées par le CNES et PPRIME avec le soutien de la Région Nouvelle Aquitaine qui assureront la disponibilité des bases de données nécessaires à la validation des simulations numériques.

**Profil :** Diplôme de Master et / ou d'Ingénieur en mécanique des fluides, énergétique, combustion, simulation et modélisation numérique.

### Références :

- [1] B. Boust, Q. Michalski, A. Claverie, C. Indiana and M. Bellenoue. Characterization of liquid impinging jet injector sprays for bi-propellant space propulsion. *28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS 2017, Valencia, 2017.*
- [2] C. Indiana. Caractérisation expérimentale de la pulvérisation, de l'allumage et de la combustion de bi-ergols. Application à la propulsion spatiale par ergols stockables. *Doctoral dissertation, 2016.*
- [3] C. Indiana, B. Boust, M. Bellenoue and S. Petitot. 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, 2016.*
- [4] C. Indiana, B. Boust and M. Bellenoue. Ignition of sprays from impinging jets of green propellants: ethyl alcohol and hydrogen peroxide. *7th European Combustion meeting, Budapest, Hungary, 2015.*
- [5] C. Indiana, M. Bellenoue and B. Boust. Experimental investigation of drop size distribution with impinging liquid jets using phase Doppler anemometer. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 10th International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion. Poitiers, 2014.*
- [6] T. Ménard, S. Tanguy and A. Berlemont, Coupling level set / VOF / ghost fluid methods: validation and application to 3D simulation of jet primary break-up. *International Journal of Multiphase Flow, 33(5), 510-524, 2007.*
- [7] A. Berlemont, J. B. Blaisot, Z. Bouali, J. Cousin, P. Desjonqueres, M. Doring, C. Dumouchel, S. Idlahcen, N. Leboucher, K. Lounnaci, T. Menard, C. Roze, D. Sedarsky, G. Vaudor. Numerical simulation of primary atomization: Interaction with experimental analysis. *Atomization and Sprays, 23(12), 2013.*
- [8] A. Er-raiy, Z. Bouali, J. Réveillon and A. Mura. Optimized single-step (OSS) chemistry models for the simulation of turbulent premixed flame propagation. *Combustion and Flame, in press, 2018.*