

## Post-doctorat

### Simulation numérique de la pulvérisation et de la combustion d'ergols liquides alternatifs

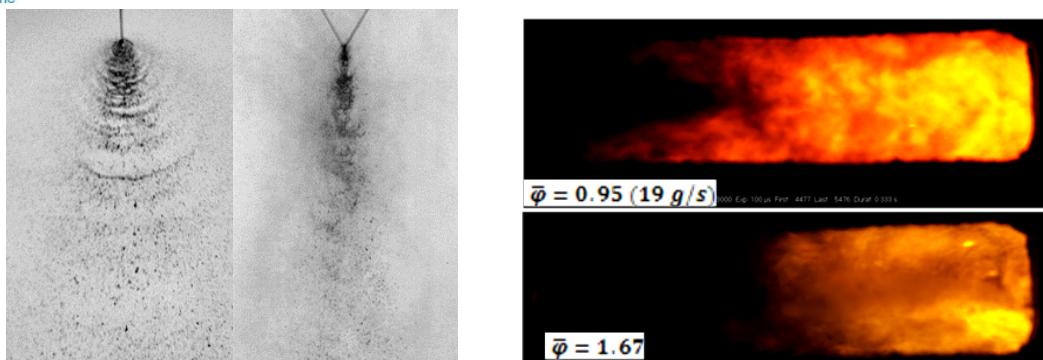
**Encadrants :** Zakaria BOUALI, Marc BELLENOUE  
@ : [zakaria.bouali@ensma.fr](mailto:zakaria.bouali@ensma.fr) , [marc.bellenoue@ensma.fr](mailto:marc.bellenoue@ensma.fr)

A l'horizon de la prochaine décennie, le développement des futures stations spatiales et les besoins en croissance de services en orbite rendent indispensable la disponibilité sur le marché des véhicules modulaires et réutilisables pour répondre notamment aux besoins de fret logistique. Pour répondre à ce besoin, The Exploration Company propose le développement de Nyx Earth, une capsule offrant la capacité de rendez-vous puis d'amarrage passif (berthing) ou actif (docking) aux stations. Pour cela le véhicule Nyx doit être équipé de systèmes propulsifs offrant une solution de propulsion non toxique remplaçant la filière hydrazine actuellement utilisée dans le domaine spatial. Le véhicule sera alors en mesure fournir de nouveaux services et usages en orbites tel que : cargo, ravitaillement, extension de vie des véhicules, stations et satellites en orbite.

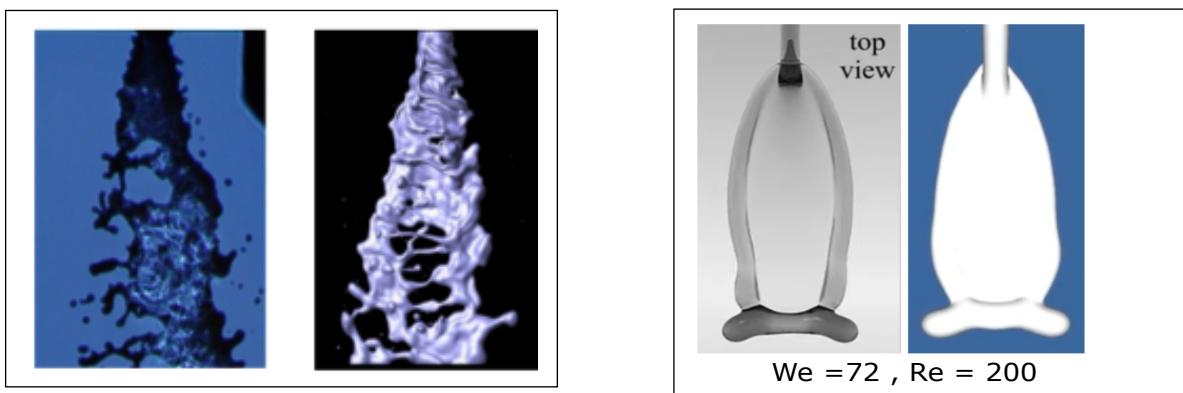
Pour cela, l'identification de nouveaux couples d'ergols liquides stockables, qualifiés de verts pour l'environnement et la santé du fait de leur faible toxicité, est primordiale. L'utilisation de ces ergols, éventuellement composés d'hydrocarbures d'origine renouvelable (éthanol, alcane, ...), requiert une maîtrise de la combustion dans ces conditions particulières. Cela suppose une nouvelle définition des systèmes d'injection et nécessite l'étude des processus physiques impliqués lors de cette phase critique qui pilote l'allumage mais également la phase stabilisée de la combustion.

Une première thèse de doctorat [1] 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).

Aujourd'hui, dans le cadre de France 2030, The Exploration Company, l'ISAE-ENSMA et l'institut PPRIME sont associés pour poursuivre la mise en œuvre ces ergols verts et souhaitent 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 doubles, triplets unlike ...). 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 existants.



**Fig 1 :** Pulvérisation par impact de jets et visualisation de la combustion stabilisée



**Fig 2 :** Comparaison exp./num. : injecteur triple disque (à gauche) [8], impact de jets (à droite)

Dans ce contexte, nous proposons un projet divisé en deux tâches principales :

**Tâche-1 :** La première vise à compléter les travaux expérimentaux menés à l'institut Pprime sur cette problématique en développant un volet simulation. L'objectif de cette tâche est double : d'une part, améliorer la compréhension des mécanismes d'atomisation par impact de jets, et d'autre part, contribuer au choix des configurations et des conditions d'essais. La synergie recherchée entre les approches numérique et expérimentale permettra non seulement une meilleure capitalisation des travaux expérimentaux [1-7], mais également la validation des outils numériques développés spécialement pour étudier le processus d'atomisation. Ce travail sera réalisé au moyen des outils de simulation les plus avancés [8, 9], développés spécialement pour ce type d'étude (Fig. 2). Le postdoctorant sera amené à : (i) évaluer la capacité des outils numériques potentiels à reproduire les phénomènes impliqués lors de l'atomisation par impact de jets, (ii) effectuer une étude paramétrique pour évaluer l'impact des conditions opératoires (vitesse d'injection, angle formé par les jets ...) sur les caractéristiques de la nappe et du spray générés, et (iii) analyser les résultats et concevoir d'éventuels modèles.

**Tâche 2 :** La deuxième tâche sera dédiée à la modélisation de la combustion des ergols considérés. En effet, la combustion de ces ergols sera gouvernée par :

- la cinétique chimique du couple d'ergols ;
- les conditions aérothermodynamiques (pression, température, vitesse, turbulence, etc...), qui gouvernent entre autres l'évaporation et le mélange, et donc le processus de combustion ;

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

Les études numériques envisagées dans le cadre de ce projet (à l'aide du code Asphodèle [10] ou Basilisk [11]) auront pour objectif d'améliorer la compréhension du processus de combustion dans un nuage de gouttelettes représentatif à celui obtenu par les systèmes d'injection retenus. 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 ou deux étapes [12], capable de reproduire les propriétés essentielles de la combustion à partir des données expérimentales.

L'ensemble de ces travaux viendra compléter les études expérimentales, qui assurent la disponibilité des bases de données nécessaires à la validation des simulations numériques, actuellement menées au sein de l'institut Pprime.

**Profil :** Docteur en mécanique des fluides numérique, spécialisé en écoulements diphasiques inertes ou réactifs. Une expérience dans le développement et l'utilisation de méthodes de suivi d'interface serait fortement appréciée.

## Références :

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] Riaud N., Boust B. and Bellenoue M., " Effects of fuel properties on the combustion of storables bipropellants: alkanes, ethanol with hydrogen peroxide", *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, DOI:10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2019028347, Volume 18 (2), 2019, Pages 111-131.
- [7] Indiana C., Boust B, Azuma N. and Bellenoue M., " Effect of Injector Design on the Combustion of Ethanol and Hydrogen Peroxide Sprays ", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 35, N° 3, pp 652-661, 2019.
- [8] A. Berlemont, J. B. Blaisot, Z. Bouali, J. Cousin, P. Desjonquieres, 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.
- [9] B. Zhang, S. Popinet, and Y. Ling. Modeling and Detailed Numerical Simulation of the Primary Breakup of a Gasoline Surrogate Jet under Non-Evaporative Operating Conditions. *International Journal of Multiphase Flow*, 130:103362, 2020.
- [10] Z. Bouali, J. Reveillon and C. Pera. Development of an extended reactor configuration to analyze preferential segregation impact on spray autoignition. *Fuel*, 302, 120869, 2021.
- [11] E. Cipriano, R. Caraccio, A. Frassoldati, T. Faravelli, and A. Cuoci. Coupling Volume-Of-Fluid and Chemical Kinetics for Direct Numerical Simulations of Droplet Combustion. *working paper or preprint*, 2025.
- [12] M. Le Boursicaud, L.A. Carballo-Carrasco, Z. Bouali and A. Mura. Optimized two-step (OTS) chemistry model for the description of partially premixed combustion. *Combustion and Flame*, vol. 245, 112287, 2022.