



Dynamique et instabilités de combustion d'une flamme swirlée LOx/CH₄ en conditions d'injection transcritiques dans les moteurs fusées

Maxime BOUTON – ONERA DMPE/MPF

Directeur de thèse : Guillaume RIBERT, CORIA

Encadrant ONERA : Aurélie NICOLE, DTIS/RFDS; Aurélien GENOT DMPE/STAT

Contexte

- Volonté de l'Europe de développer de nouveaux lanceurs réutilisables et réallumables à bas coûts
- Développement de nouvelles technologies : injecteurs swirl LOx/CH₄
- Problème**: injecteurs susceptibles de présenter des instabilités thermo-acoustiques[1], potentiellement destructrices pour la fusée
- Collaboration CNES/ONERA pour étudier la dynamique des injecteurs swirl
- Objectif industriel** : Disposer d'un outil permettant de simuler un injecteur swirlé et de prévoir rapidement le développement de ses instabilités thermo-acoustiques

Définitions

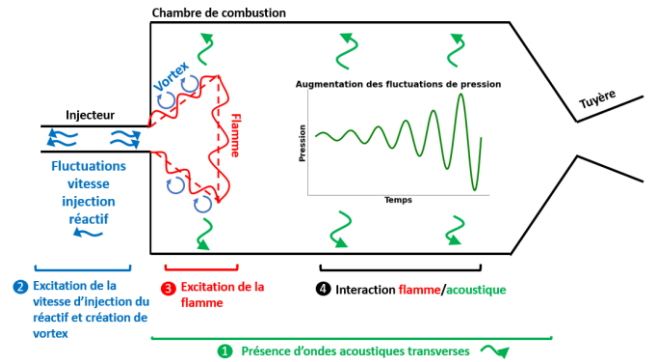
Instabilité thermo-acoustique:

- Interaction entre l'acoustique de la chambre et la flamme en phase [2]
- Emballlement du niveau des fluctuations de pression [2] ⇒ destructeur à haute fréquence [3]
- Plusieurs mécanismes en sont à l'origine, notamment l'excitation acoustique de la vitesse d'injection des réactifs [3]

Swirl:

- Mise en rotation de la phase liquide (oxygène liquide = LOx) à l'injection [4]
- Phénomène de succion en sortie d'injecteur [4]
- Meilleur mélange des réactifs et stabilisation de la flamme [4]

Processus d'interaction flamme/acoustique



Approche expérimentale

- Post-traitement d'un tir du banc cryogénique MASCOTTE de l'ONERA
- Première compréhension de la physique de l'écoulement
- Observations vidéos de la phase liquide LOx (ombroscopie) et de la combustion (chimiluminescence OH*)

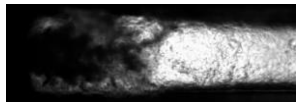


Image ombroscopie (phase liquide)

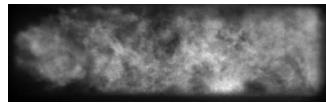
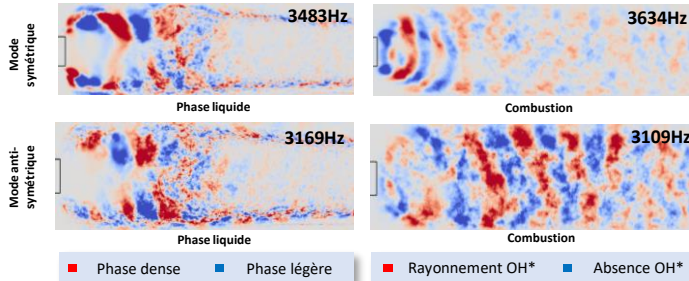


Image chimiluminescence OH* (combustion)

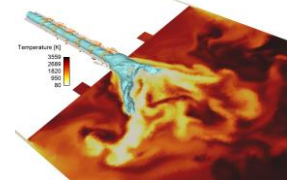
- Début du post-traitement et mise en évidence de modes anti-symétriques et symétriques par analyse spectrale et filtrage des vidéos



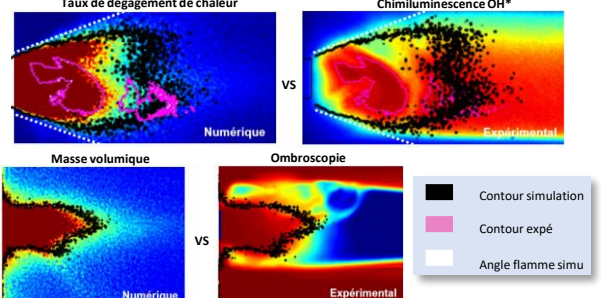
- Données de pression en milieu de chambre et de température aux parois disponibles mais qui restent à être exploitées
- Objectif de l'exploitation des tirs expérimentaux : constituer une base de données détaillée pour un point de fonctionnement du banc MASCOTTE en vue de la validation des simulations numériques avant de réaliser des excitations acoustiques la flamme numérique.

Approche numérique

- Mise en place d'une simulation à grande échelle (LES) du point de fonctionnement MASCOTTE expérimental avec le code CEDRE de l'ONERA pour une approche plus détaillée des phénomènes
Champ instantané de température, vecteurs vitesses et iso-volume de fraction massique d'oxygène liquide



- Début de validation avec les données expérimentales : comparaison des grandeurs moyennes

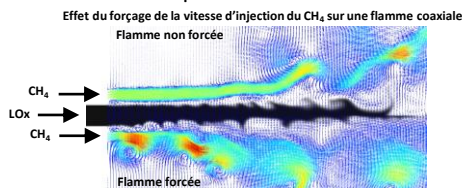


- Objectif: confirmer, par analyse spectrale, que la flamme reproduit les comportements expérimentaux. Meilleure compréhension de l'écoulement (par visualisation 3D de multiples grandeurs physiques)
- Finalité: forçage acoustique de la flamme via la modulation de la vitesse d'injection des réactifs afin de valider l'approche analytique

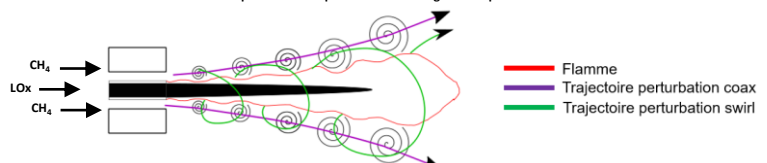
Méthodologie & Résultats

Approche analytique

- Mise en équation du mécanisme de déstabilisation de la flamme
- Travaux préliminaires: utilisation d'un modèle existant [5] dans des conditions de forçage fortes, impliquant une réponse de flamme non-linéaire dans le cadre d'une flamme coaxiale [6]
- Objectif: extension du modèle à une flamme swirlée par transformation géométrique de la trajectoire d'une perturbation de vitesse autour de la flamme
- Finalité: modèle d'estimation rapide de la stabilité d'une flamme swirlée LOx/CH₄ pour peu de ressources numériques et matérielles



Principe d'extension par transformation géométrique du modèle initial



[1] Guven U. (2018). Simulation haute-fidélité de la combustion pour les moteurs-fusées. PhD, Normandie Université

[2] Rayleigh, L. (1896). The Theory of Sound. Macmillan.

[3] Hakim, L. (2013). Dynamics of transcritical coaxial flames in high-frequency transverse acoustic fields: Application to liquid rocket engine instabilities. PhD thesis, Ecole Centrale Paris.

[4] Sýred N., Beér J.M. (1974). Combustion in swirling flows: a review. *Combustion and flame*, **23**, pp143-201

[5] Nez R., Schmitt T., Gonzalez-Flesca M.S., Candel S. & Ducruix S. (2017). Response of a transcritical coaxial flame to fuel injection rate modulations: analysis and low-order modeling of the generation of unsteady heat release rate. EUCASS

[6] Bouton M., Genot A., Nicole A., Ribert G. (2024). Flame dynamics under methane injection modulations in a transcritical coaxial flow. *Space Propulsion*

Bibliographie