

Avis de Soutenance

Monsieur Karl Töpperwien

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Analyse numérique de l'allumage circulaire dans les foyers annulaires diphasiques avec conditions thermiques de paroi réalistes

Numerical analysis of light-round ignition in annular spray-flame combustors with realistic thermal wall conditions

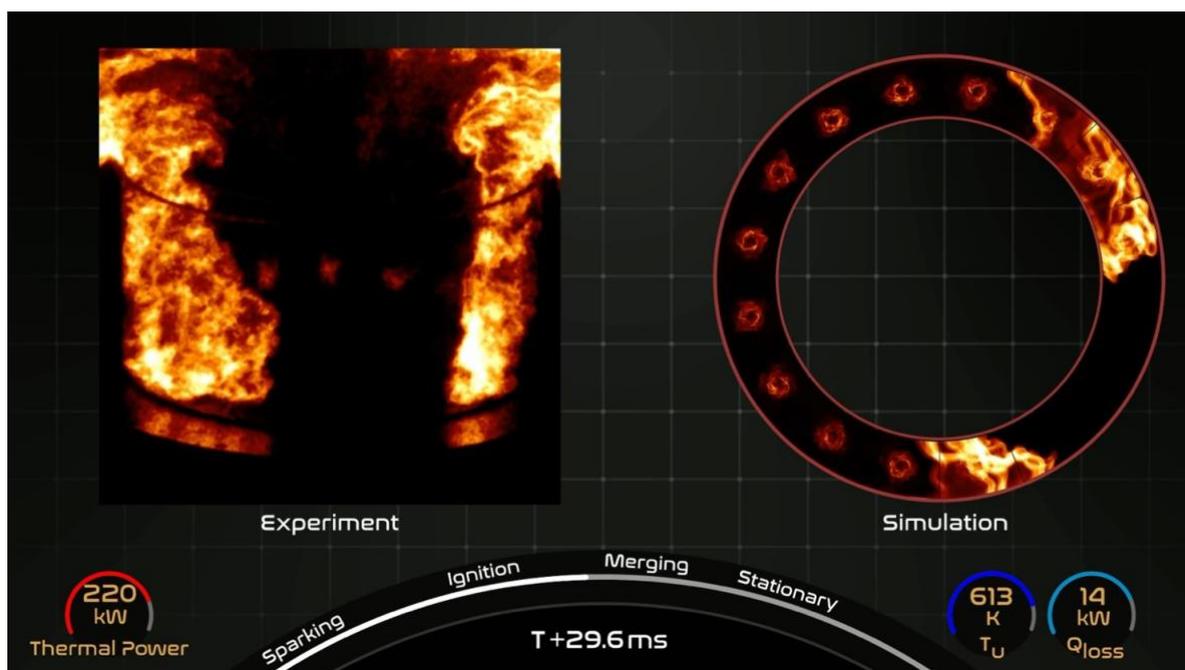
Dirigés par Monsieur Ronan Vicquelin

Le **mercredi 29 juin** à 14h00

A CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex

Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)

Livestream : [cliquez ici/click here](#)



*Flame propagation during ignition in the annular spray-flame combustor MICCA at the EM2C laboratory.
Images shown in false colors.*

Composition du jury

M. Laurent Gicquel	Chercheur senior, CERFACS	Rapporteur
M. Epaminondas Mastorakos	Professeur, University of Cambridge	Rapporteur
M. Sébastien Candell	Professeur, CentraleSupélec (EM2C), Université Paris-Saclay	Examinateur
M. James Dawson	Professeur, Norwegian University of Science and Technology	Examinateur
Mme. Christine Rousselle	Professeur, Université d'Orléans (PRISME)	Examinatrice
M. Denis Veynante	Directeur de recherche, CNRS (EM2C)	Examinateur
M. Stéphane Richard	Chef du Service DT/MD/CC, Safran Helicopter Engines	Invité
M. Ronan Vicquelin	Professeur, CentraleSupélec (EM2C), Université Paris-Saclay	Directeur de thèse

Titre : Analyse numérique de l'allumage circulaire dans les foyers annulaires diphasiques avec conditions thermiques de paroi réalistes

Mots clés : allumage; chambres de combustion annulaires; simulation aux grandes échelles; flammes diphasiques; transferts thermiques

Résumé : La transition vers des technologies à faibles émissions nécessite que les chambres de combustion des moteurs aéronautiques fonctionnent avec des carburants de plus en plus propres. Le redémarrage du moteur doit se produire de manière fiable et sûr et doit être assuré pour différents points de fonctionnement, qui sont spécifiés par les autorités de certification. Les scénarios de redémarrage impliquent (entre autres) un rallumage rapide en montée, ou un redémarrage à haute altitude en auto-rotation, ce qui entraîne une large gamme de températures d'air, de délais de redémarrage et de températures pariétales de chambre de combustion. L'étude des effets de la température pariétale sur l'allumage dans des foyers annulaires simplifiés à l'échelle du laboratoire a récemment reçu plus d'attention. En particulier, l'impact sur la propagation de la flamme pendant l'allumage circulaire (light-round en anglais) — la phase finale du processus en quatre étapes d'allumage forcé dans les chambres de combustion annulaires — a été révélé expérimentalement, indiquant une propagation plus rapide de la flamme et des durées d'allumage plus courtes à des températures de paroi élevées par rapport aux parois à température ambiante. Malgré son impact de premier ordre, le rôle des transferts de chaleur n'a pas été entièrement clarifié. Par conséquent, l'allumage circulaire est étudié numériquement et théoriquement dans la chambre de combustion annulaire diphasique MICCA-Spray en deux configurations : (i) parois à température ambiante, représentant un cas de redémarrage à haute altitude, et (ii) parois de la chambre de combustion préchauffées, ce qui correspond à un rallumage rapide. Des simulations aux grandes échelles (LES en anglais) sont effectuées dans une configuration unique comprenant une description lagrangienne polydispersée des gouttes du spray de combustible, un modèle de combustion dynamique et un nouveau modèle de paroi tabulé avec une description détaillée des propriétés thermophysiques dans la couche limite. Les durées prédites d'allumage retrouvent remarquablement bien les données expérimentales. Il est démontré que l'expansion volumétrique des gaz brûlés induit une accélération azimutale de l'écoulement qui constitue un mécanisme clé de la propagation de flamme dans le premier cas. Des accumulations de gouttes dans le sillage des jets swirlés sont générées en avant des fronts de flamme, ce qui provoque un mode de propagation caractéristique en dents de scie de la pointe avant de la flamme. Un effet de refroidissement des parois de la chambre de combustion sur les gaz brûlés est particulièrement prononcé en aval, diminuant la vitesse de propagation résultante. Pour le deuxième cas, des simulations de transfert conjugué de chaleur sont effectuées pour obtenir des profils de température de paroi réalistes dans des conditions de fonctionnement stationnaires, qui ne sont pas disponibles expérimentalement. Ces profils de température sont ensuite imposés comme conditions aux limites pour les simulations de carburation ainsi que d'allumage. Les résultats montrent que le préchauffage diminue l'effet de la phase liquide, et augmente l'accélération azimutale de l'écoulement. Le préchauffage des gaz frais dans le second cas provoque une augmentation importante de la vitesse de la flamme laminaire, qui compense la diminution observée du rapport de densité. Ces observations sont ensuite analysées théoriquement à l'aide d'un modèle d'ordre réduit, capable de prédire les vitesses moyennes de propagation de la flamme à partir des données LES. Ce modèle souligne également l'importance d'une modélisation détaillée, et prouve que tous les mécanismes pilotant la propagation de flamme doivent être modélisés avec précision dans les simulations, afin d'éviter de possibles compensations d'erreur. L'analyse complète clarifie également le rôle des transferts de chaleur pendant l'allumage circulaire. Enfin, un processus dynamique de stabilisation de la flamme est examiné, initialement observé pendant la phase d'allumage et étudié en détail dans une chambre de combustion mono-brûleur. Deux phases distinctes sont observées, commençant par une flamme attachée à l'intérieur de l'injecteur pendant un temps caractéristique, avant la transition vers la position finale détachée de l'injecteur.

Title: Numerical analysis of light-round ignition in annular spray-flame combustors with realistic thermal wall conditions

Keywords: ignition; annular combustors; large-eddy simulation; spray flames; heat transfer

Abstract: The forthcoming transition in aviation burner technology towards renewable energy sources and reduced emissions requires aero-engine combustors to operate on increasingly cleaner fuels and new designs without compromising on safety. Engine restart in particular is of paramount importance, as its success must be ensured under a variety of operating conditions, which are specified by certification authorities. Restart scenarios involve (among others) quick relight in climb, or restart from windmilling at high altitude, equivalent to a large range of inflow temperatures, restart delay periods, and combustor wall temperatures. In quick relight, engine parts will remain at an elevated temperature as there is not enough time for the air flow to cause a noticeable cooling effect. Conversely, restart from windmilling at high altitude after extended delay periods is likely to be performed with substantially cooled combustor walls, impeding fuel evaporation and successful ignition. Academic test facilities which can emulate real engine conditions in terms of both temperature and pressure are extremely scarce due to their complexity and cost. However, the study of wall temperature effects on ignition in simplified lab-scale annular combustors has recently received more attention. In particular, the impact on flame propagation during light-round — the final phase in a complex four-step process of forced ignition in annular combustors — has been revealed experimentally, indicating faster flame propagation and shorter light-round durations at increased wall temperatures over ambient temperature walls. Despite its first order impact, the role of heat transfer was not fully clarified in a comprehensive analysis. Therefore, we study light-round ignition numerically and theoretically in the annular spray-flame combustor MICCA-Spray in a lab-scale setting in two configurations to enhance the effect of heat transfer: (i) ambient temperature walls, approximating restart from windmilling, and (ii) preheated combustor walls, approximating quick relight. Large-Eddy Simulations are performed in a unique setup including Lagrangian particle tracking for the polydisperse liquid fuel spray, a dynamic combustion model, and a novel tabulated wall model with a detailed description of thermophysical properties in the boundary layer. Predicted light-round durations agree remarkably well with experimental data. It is shown that the volumetric expansion of burnt gases induces a flow acceleration in azimuthal direction which constitutes the main driving mechanism of flame propagation in the first case. Droplet accumulations in the wake of swirling jets are generated ahead of the propagating flame fronts, which in turn cause a characteristic sawtooth propagation mode of the leading point. A cooling effect of the combustor walls on burnt gases is particularly pronounced downstream, diminishing the resulting flame propagation speed. For the second case, precursor Conjugate Heat Transfer simulations are carried out to obtain realistic wall temperature profiles in stationary operating conditions, which are not readily available from the experiment. These temperature profiles are subsequently imposed as boundary conditions for prefueling and final light-round simulations in preheated conditions. Results suggest that preheating diminishes the effect of the liquid phase, and enhances the azimuthal flow acceleration. Fresh gas preheating in the second case causes a substantial increase of the laminar flame speed over the first case, outweighing the observed decrease of the density ratio. These observations are supported by a theoretical analysis by means of a low-order model, capable of predicting average flame propagation speeds from LES data. It is also used to emphasize the importance of detailed modeling, and proves that all governing mechanisms must be accurately modeled in LES, which would otherwise be corrupted by compensating errors. The comprehensive analysis also clarifies the role of heat transfers during light-round. Finally, a dynamic flame stabilization process is examined, initially observed during light-round and studied in detail in a single-injector combustor. Two distinct phases are observed, starting with a flame anchoring inside the injector unit during a characteristic time, before transitioning into the final position detached from the injector.

