



Laboratoire d'Energétique
Moléculaire & Macroscopique,
Combustion – EM2C – UPR288

Avis de Soutenance

Monsieur Renaud GAUDRON

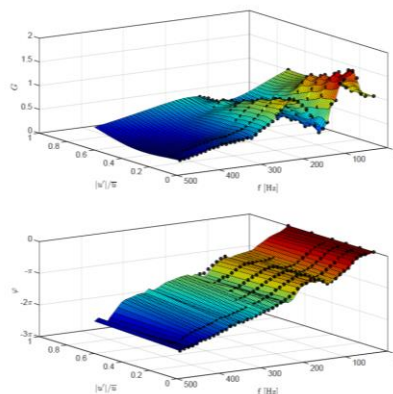
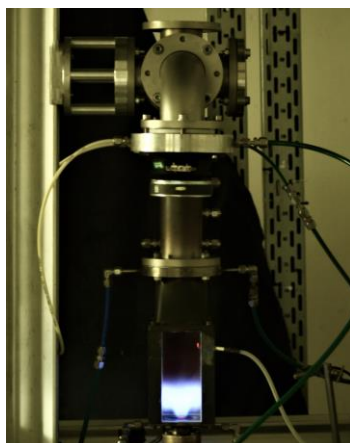
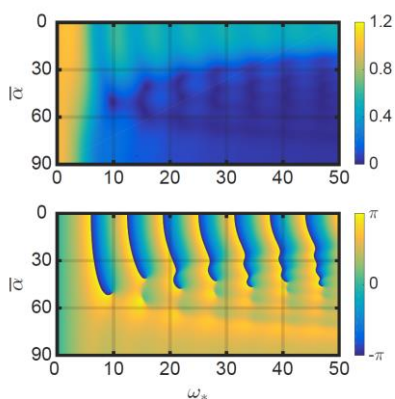
Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Acoustic response of premixed flames submitted to harmonic sound waves

dirigés par Monsieur Thierry SCHULLER

Soutenance prévue le **Mercredi 17 Octobre 2018** à 14h00

Lieu : CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex
Amphithéâtre des langues vivantes (Bâtiment Eiffel)



Composition du jury proposée

Pr. Franck NICOU
Pr. Françoise BAILLOT
Dr. Thierry POINSOT
Dr. Lutz LESSHAFFT
Pr. Wolfgang POLIFKE
Pr. Thierry SCHULLER
Dr. Clément MIRAT

Université de Montpellier
Université de Rouen
IMFT/CNRS
Ecole Polytechnique
Technische Universität München
CentraleSupélec - IMFT/CNRS
CentraleSupélec

Président du Jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Invité
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse

Titre : Réponse acoustique de flammes prémélangées soumises à des ondes sonores harmoniques

Mots clés : Flammes prémélangées, Thermoacoustique, Fonction de Transfert de Flamme, Fonction Descriptive de Flamme, Réseaux d'éléments acoustiques, Matrices de Transfert Acoustiques, Analyse de stabilité

Résumé : Les instabilités thermoacoustiques sont un problème majeur pour la production d'électricité ainsi que dans l'industrie aérospatiale. Ces instabilités sont dues à un transfert d'énergie entre une source chaude, le plus souvent une flamme stabilisée dans un brûleur, et le champ acoustique environnant. Les instabilités de combustion peuvent avoir de nombreuses conséquences délétères telles que l'extinction de la flamme, l'augmentation des flux de chaleur pariétaux, l'émission d'ondes sonores de grande amplitude à certaines fréquences, des vibrations importantes, des dégâts structurels et même l'explosion du moteur dans certains cas. Cependant, la prédiction de la stabilité thermoacoustique d'un brûleur demeure une tâche ardue. Une technique pour prédire l'apparition d'instabilités de combustion est de coupler un solveur acoustique avec une fonction décrivant la réponse de la flamme lorsque celle-ci est soumise à des ondes acoustiques harmoniques. Cette fonction, appelée Fonction de Transfert de Flamme (FTF) ou Fonction Descriptive de Flamme (FDF) lorsqu'elle est non-linéaire, est ensuite déterminée en utilisant des expériences, des simulations numériques ou des modèles analytiques. Néanmoins, l'impact de divers paramètres tels que le niveau de forçage acoustique, la façon dont le forçage est introduit dans le système ou encore la modification de la taille de la zone de réaction sur la réponse acoustique de la flamme est encore mal compris. L'objectif de cette thèse est donc d'étudier la réponse acoustique de flammes prémélangées laminares et turbulentes soumises à des ondes acoustiques harmoniques dans le but d'améliorer la prédiction de la stabilité thermoacoustique des brûleurs, qu'ils soient industriels ou de taille plus réduite. Le cas des flammes prémélangées laminares coniques, qui sont rencontrées dans de nombreux brûleurs industriels et domestiques de faible puissance, est d'abord examiné mais ne sera pas présenté ici. Dans un second temps, la réponse acoustique de flammes prémélangées confinées turbulentes soumises à des ondes acoustiques harmoniques est étudiée d'une part expérimentalement et d'autre part en employant plusieurs approches

analytiques. Une première série d'expériences est consacrée à l'étude des FDF définies par rapport à différents signaux de référence. Il est démontré que toutes ces FDF peuvent être reliées entre elles analytiquement en utilisant un réseau non-linéaire d'éléments acoustiques. De plus, il est observé que la FDF est différente en fonction de la façon dont le forçage acoustique est introduit dans le brûleur, excepté lorsque le signal de référence est la vitesse acoustique juste avant la flamme. Dans une seconde série d'expériences, la matrice de transfert acoustique représentant le brûleur est mesurée à froid et à chaud (en présence d'une flamme) et pour un injecteur tourbillonnant et non-tourbillonnant. Le niveau de forçage acoustique est contrôlé au niveau du fil chaud et des mesures sont effectuées pour plusieurs niveaux de forçage prédéfinis. Il est ainsi démontré que la réponse acoustique du brûleur est non-linéaire aussi bien à froid qu'à chaud. De plus, deux réseaux d'éléments acoustiques représentant le brûleur à froid et à chaud sont conçus. Les mesures et prédictions de la matrice de transfert acoustique sont en accord aussi bien à froid qu'à chaud. La FDF mesurée en utilisant une technique optique est également reconstruite avec succès à partir des mesures de la matrice de transfert acoustique. Enfin, la stabilité thermoacoustique de six configurations différentes du brûleur est prédite en utilisant deux réseaux d'éléments acoustiques. Dans le premier réseau, la réponse acoustique de la flamme est prise en compte en utilisant une FDF préalablement mesurée tandis que dans le second réseau, la réponse de la flamme est incluse dans la mesure de la matrice de transfert acoustique correspondant à la majeure partie du brûleur. Ces deux modèles sont capables de prédire l'apparition d'instabilités thermoacoustiques ainsi que la fréquence de ces instabilités le cas échéant. Néanmoins, le modèle basé sur la FDF ne prédit pas l'amplitude du cycle limite de façon satisfaisante contrairement au modèle basé sur la mesure de la matrice de transfert acoustique. Cette observation s'explique par la façon dont les pertes acoustiques à l'intérieur du brûleur sont prises en compte.

Title: Acoustic response of premixed flames submitted to harmonic sound waves

Keywords: Premixed flames, Thermoacoustics, Flame Transfer Function, Flame Describing Function, Acoustic network models, Acoustic Transfer Matrices, Stability analysis

Abstract: Thermoacoustic instabilities are a major concern in the aerospace and energy production industries. They are due to an energy transfer between a heat source, usually a flame stabilized inside a combustor, and the surrounding acoustic field and may lead to undesirable phenomena such as flame extinction, increased heat fluxes, very large sound emissions at certain frequencies, vibration, structural damage and even catastrophic failure in some cases. However, predicting the thermoacoustic stability of a combustor at an early design stage is a challenging task. One way to predict the onset of thermoacoustic instabilities is to couple an acoustic solver with a function that describes the frequency response of the flame when submitted to harmonic sound waves. This function, called a Flame Transfer Function (FTF) or a Flame Describing Function (FDF) when it is nonlinear, is then determined using experiments, numerical simulations or analytical models. However, the impact of many parameters such as the forcing level, the way sound waves are introduced inside the combustor, or a modification of the flame size on the flame frequency response remain poorly understood. The objective of this thesis is to study the acoustic response of various laminar and turbulent premixed flames submitted to harmonic sound waves using experiments and analytical approaches in order to improve the thermoacoustic stability predictions of lab scale and industrial combustors. The case of premixed laminar conical flames, used in a variety of domestic and industrial low-power combustors, is first investigated but will not be presented here. The acoustic response of premixed confined turbulent flames submitted to harmonic forcing is then investigated using experiments and various modeling strategies. In a first set of experiments, the FDF defined with respect to various reference signals is measured using an

optical technique. All these describing functions are then related using a nonlinear acoustic network model. Moreover, the FDF is shown to be different depending on the way acoustic forcing is introduced inside the combustor, except when the reference signal is the acoustic velocity assessed just before the flame. In a second set of experiments, the Dimensionless Acoustic Transfer Matrix (DATM) of the burner is measured for cold and reactive conditions and with a swirling and non-swirling injector. The acoustic forcing level is controlled at the hot wire location and measurements are performed for various predefined forcing levels. The acoustic response of the burner is found to be nonlinear for both cold and reactive conditions. Moreover, two acoustic network models representing the burner operated for cold and reactive conditions are assembled. The measured and predicted DATM are then found to be in good agreement for cold and reactive conditions and for both injectors. The FDF measured using optical techniques is also reconstructed from the DATM measurements with excellent agreement. Finally, the thermoacoustic stability of six distinct configurations of the burner is predicted for reactive conditions using two acoustic network models. In the first model, the acoustic response of the flame is accounted for using a measured FDF while in the second model, the flame response is embedded inside a measured DATM. Both models are able to predict the onset of thermoacoustic instabilities and the associated frequency of the instability. However, the model based on the FDF does not predict the correct limit cycle amplitude as opposed to the model based on the DATM measurement. This is attributed to the way acoustic losses occurring inside the combustor are taken into account.

