

Proposition de thèse en combustion dans le groupe PSC (IMFT) - 2013 : Simulations aux grandes échelles des instabilités de combustion sur machines massivement parallèles.

Responsables scientifiques : L. Selle (CR CNRS) et T. Poinso (DR CNRS)
Contacts : selle@imft.fr, poinso@imft.fr

1 Contexte

Ce projet entre dans le cadre du projet 'ERC advanced grant' INTECO-CIS qui débutera à l'IMFT en Février 2012. Il a pour but d'étudier les instabilités de combustion de deux systèmes : (1) un brûleur installé expérimentalement à l'IMFT et (2) une chambre de combustion de turbine à gaz réelle. L'étude faite sur le brûleur de l'IMFT permettra de développer les méthodes numériques avant de les appliquer à une vraie chambre de turbine à gaz.

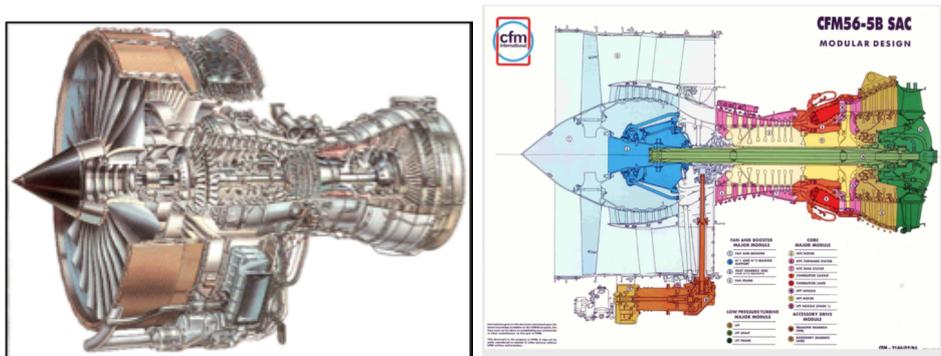


FIGURE 1 – Turbines à gaz : l'objectif du programme.

Le projet INTECO-CIS est un des tout premiers projets ERC acceptés sur Toulouse : supporté par un budget de 2.5 Meuros et par de nombreux liens avec les industriels développant des turbines à gaz (Turbomeca, Snecma, Siemens, Ansaldo) et les centres de recherche développant les grands codes de calcul parallèles en combustion (CERFACS), il va permettre d'embaucher quatre thésards et cinq chercheurs confirmés dans le groupe PSC de

l'IMFT pour étudier les instabilités de combustion. C'est donc une occasion unique pour des jeunes doctorants d'intégrer un projet de grande taille dédié à un problème fondamental (le couplage acoustique / combustion) mais ayant de nombreuses applications pratiques et critiques aujourd'hui : en effet, la combustion produit aujourd'hui 90 pourcent de l'énergie mondiale et va continuer à être la première source d'énergie pendant encore très longtemps. La difficulté est de maîtriser notre consommation de carburants (fossiles et renouvelables) et pour cela d'optimiser les systèmes de combustion. Dans de nombreux cas, ceci nécessite de maîtriser les instabilités de combustion.

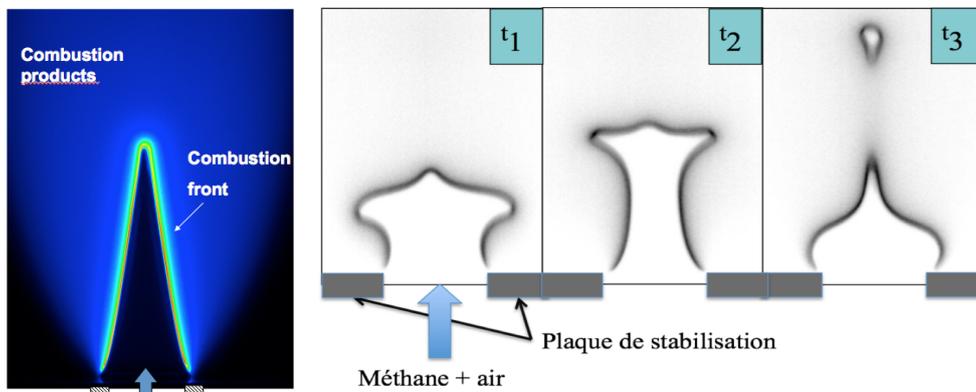


FIGURE 2 – Exemple d'instabilité de combustion mesurée expérimentalement à l'IMFT. A gauche : vue directe de la flamme dans un cas stable ; la flamme est immobile. A droite : position du front de flamme à trois instants successifs lorsque la flamme vibre.

Les instabilités de combustion (aussi connues sous le nom de phénomènes "thermoacoustiques") sont connues depuis plus de 200 ans [1, 2] mais toujours pas maîtrisées. Elles sont le résultat d'un couplage constructif entre le dégagement de chaleur instationnaire d'une flamme et les ondes acoustiques dans la chambre de combustion. Elles se manifestent par des mouvements très forts de la flamme (Fig. 2) et par des oscillations de pression et de vitesse de très forte amplitude qui peuvent provoquer une fatigue excessive des structures ou même une destruction rapide du système. Une particularité des instabilités de combustion est d'être très sensibles à des variations mineures de la géométrie ou du point de fonctionnement. La prédiction de la carte de stabilité des machines thermiques (*i.e.* le domaine de fonctionnement dans lequel il n'y a pas d'instabilités) est donc un enjeu majeur dès la conception afin d'éviter les nombreux surcoûts associés aux tests et aux modifications du dessin original. L'objectif de ce projet est de regarder l'influence d'un

paramètre particulier sur la stabilité : les transferts de chaleur. En effet, les expérimentateurs et les ingénieurs observent souvent que la stabilité d'un moteur est différente lors d'un "démarrage à froid" ou en régime établi. Il semble donc que la réponse de la flamme aux ondes acoustiques, appelée *Flame Transfer Function* (FTF), est modifiée par les transferts thermiques entre le fluide et la paroi. Malgré quelques études récentes, les mécanismes physiques responsables de ces modifications ne sont pas clairement identifiés. Une expérience dédiée à ce phénomène est disponible à l'IMFT et un des objectifs de cette thèse est de compléter les résultats expérimentaux par des simulations numériques. Ces simulations couplées résolvent simultanément la combustion dans le fluide et les transferts thermiques dans le brûleur avec la chaîne de calcul AVBP/AVTP développé par le CERFACS et l'FPEN. On regardera en particulier l'influence de la dynamique de la zone d'accrochage de la flamme sur sa FTF. Ceci sera fait sur l'expérimentation de l'IMFT puis sur une chambre réelle.

2 Présentation du programme de travail

La cause des instabilités de combustion est le fait que les flammes produisent du bruit (phénomène bien connu) mais aussi qu'elles sont sensibles au bruit. Cette sensibilité permet de créer un boucle résonnante et donc de générer des instabilités. C'est cette sensibilité qui est difficile à quantifier. La grandeur de base pour étudier la sensibilité des flammes est la réponse de la flamme à une perturbation acoustique, appelée *Flame Transfer Function* (FTF) :

$$F(\omega) = \frac{u'/u_0}{Q'/Q_0} \quad (1)$$

où u' et Q' sont les fluctuations de vitesse et de dégagement de chaleur et u_0 et Q_0 leurs valeurs moyennes. Le paramètre principal influant sur la FTF est la pulsation ω de l'onde acoustique, mais de nombreuses études ont montré que la FTF dépendait aussi du point de fonctionnement, de la composition du carburant, de la longueur de la flamme, de la géométrie du brûleur, *etc.* Dans le cadre de ce projet, on se focalisera sur **l'influence des transferts thermiques sur la FTF**.

On dispose à l'IMFT d'un brûleur laminaire (*cf.* Fig. 3) avec une buse de sortie rectangulaire de 1 cm de large et 10 cm de long. Près de la zone où la flamme se stabilise, la buse est équipé d'un système de refroidissement par eau, ce qui permet d'étudier la réponse de la flamme en fonction de la température de la paroi de la buse.

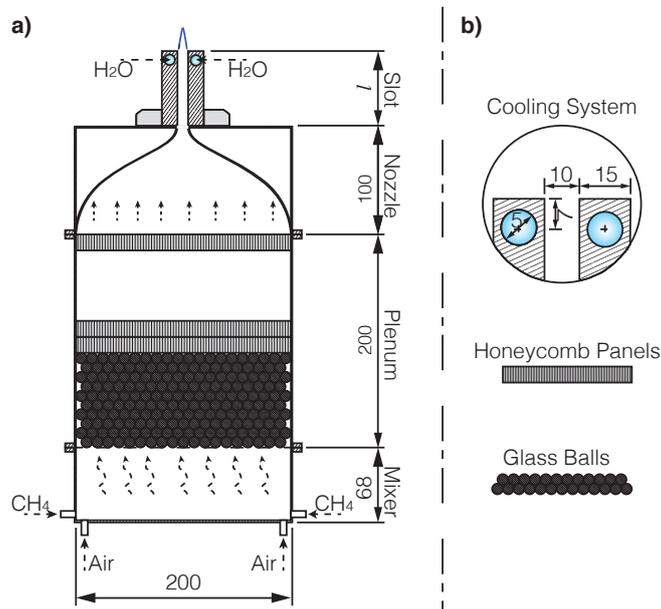


FIGURE 3 – Vue en coupe transverse du brûleur laminaire installé à l’IMFT.

On a mis en évidence expérimentalement un point de fonctionnement naturellement instable lorsque la buse est froide mais pour lequel l’instabilité disparaît lorsque la buse est chauffée par la flamme. Le système de refroidissement permet de contrôler la présence de cette instabilité, comme le montre la Fig. 4 : à l’allumage ($t = 10$ s), des oscillations de forte amplitude sont enregistrées puis elles diminuent pour totalement disparaître vers $t = 150$ s. Lorsque le système de refroidissement est mis en route ($t = 200$ s), l’instabilité réapparaît en une vingtaine de secondes. Cependant, la disparition ou la réapparition de l’instabilité sont des phénomènes trop longs (car leur échelle de temps dépend de l’établissement de la thermique dans la buse) pour être modélisés avec un code de calcul instationnaire compressible. On ne simulerait donc pas une instabilité naturelle pour étudier l’influence des transferts thermiques mais on adoptera une approche plus générale. En effet, il suffit de calculer la FTF pour deux conditions aux limites thermiques différentes pour quantifier l’influence des transferts thermiques sur la flamme.

L’objectif de ce projet est de reproduire ces FTF avec des simulations numériques compressibles de type *simulation directe* (DNS). En effet, la géométrie du brûleur permet de se restreindre à la partie centrale de la flamme. Une fois validées, les simulations seront utilisées pour analyser les mécanismes physiques responsables de la modification de la FTF. En effet,

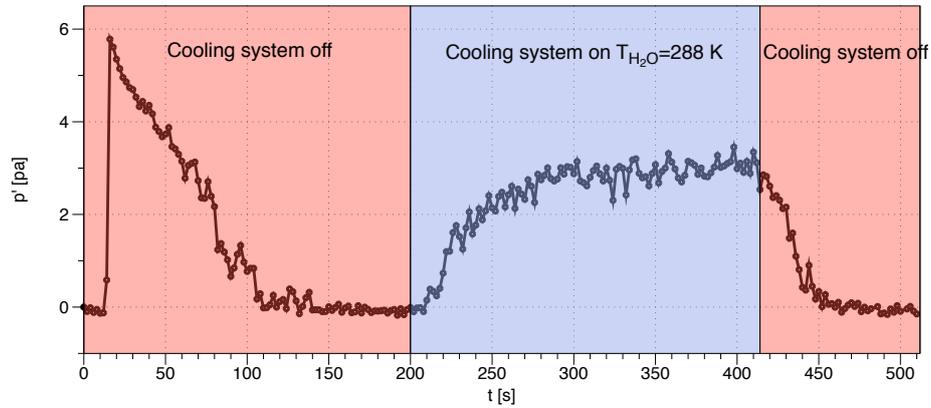


FIGURE 4 – Influence du refroidissement de la buse sur l’amplitude des fluctuations de pression.

à ce jour, très peu d’études proposent une explication pour la modification de la FTF [4, 5]. Un autre point original de ce projet est d’utiliser des calculs couplés (combustion dans le fluide et thermique dans le solide) plutôt qu’une condition limite à température imposée. Des mesures expérimentales permettront de valider le champ de température dans le solide et ainsi évaluer l’applicabilité de ce type de calcul à des configurations plus complexes. En effet, le calcul simultané de la combustion et de la thermique est un enjeu majeur pour l’optimisation des turbines aéronautiques ou des injecteurs de moteurs de fusée.

Dans un second temps, la méthodologie appliquée au petit brûleur de l’IMFT sera étendue à un cas de turbine industriel qui sera décidé avec les partenaires de l’IMFT pendant la première année de thèse. On s’attaquera alors à une chambre de combustion réelle sur laquelle on cherchera aussi à mesurer l’importance de la thermique sur les instabilités.

3 Méthode

Une grande partie de l’étude de thèse sera basée sur la théorie (combustion, acoustique, systèmes dynamiques) mais les méthodes théoriques trouvent ici leurs limites et doivent être complétées par des approches de simulation qui sont un des points forts de l’équipe PSC. Les calculs nécessaires pour la prévision des instabilités de combustion dans cette thèse ne sont possibles que sur les plus gros ordinateurs du monde. Ces centres de calcul sont en France (grâce à GENCI), en Europe (grâce à PRACE) et aux USA (grâce

à INCITE). Le doctorant sera appelé à travailler sur tous ces systèmes, utilisant des machines de 10 à 500 000 processeurs. Ceci ne peut être fait qu'avec des codes spécifiques qui sont un des points forts de la communauté combustion numérique en France.

3.1 Le code AVBP

AVBP est un code de mécanique des fluides instationnaire compressible développé par le CERFACS et IFPEN. C'est un outil idéal pour le calcul des FTF car tous les développements nécessaires (combustion, conditions aux limites acoustiques, schémas d'ordre élevé, *etc.*) ont été effectués. Il a déjà été utilisé pour de nombreux projets de recherche en France et par de nombreux laboratoires (CERFACS, EM2C, IMFT, IRPHE, CORIA, UPPA). Les développements effectués sur toutes les architectures parallèles disponibles en France profitent directement aux actions de recherche de ces laboratoires. AVBP a été porté sur des architectures parallèles de tout type (IBM Bluegene/L, /P et /Q, SGI O3800, IBM PowerX, Cluster x86 ou Itanium, Cray XD1, Cray XT3/XT4/XT5, Bull Novascale et plateforme BULLX, SGI ALTIX ICE, *etc.*) et fait partie du bench PRACE. Grâce à plusieurs collaborations, notamment avec IBM, Cray, le CEA et le CINES (projet CECT), il a également été employé sur différentes machines du Top 20 de ces dernières années (Marenostrum, Ter@10, IBM eServer BlueGene/L à Thomas Watson, BlueGene/P à Argonne National Labs, Cray XT3/XT4 à Oakridge, BG /Q JUQUEEN à Forschungszentrum Jülich et CRAY XE6 au HLRS) et constitue donc un code parallèle de référence en mécanique des fluides.

3.2 La chaîne de couplage AVBP / AVTP / OpenPALM

Le code AVTP est basé sur les mêmes routines que AVBP et résout la thermique dans les solides. Les deux codes AVBP et AVTP peuvent être utilisés simultanément pour réaliser un calcul couplé de la combustion dans le fluide et la thermique dans les parois solides [6]. Pour un calcul couplé, le coupleur OpenPALM, développé par le CERFACS et l'ONERA gère les communications entre les deux codes.

3.3 Architecture

Le code de calcul AVBP est basé sur la bibliothèque MPL développée au CERFACS. La décomposition de domaine s'appuie sur la librairie ParMETIS. Les algorithmes sont basés sur une structure de données *non-structurée*,

constituée d'éléments arbitraires de type triangles ou quadrilatères en 2D et tétraèdres, prismes ou hexaèdres en 3D. Le code AVBP utilise une famille de schémas dits "cell vertex" qui permet de construire des schémas peu dissipatifs et précis à l'ordre 3 en espace et en temps [7]. AVBP peut également traiter des conditions aux limites acoustiques (entrées pulsées, frontières non réfléchissantes, *ect.*) [8].

3.4 Langages utilisés

La plus grande partie d'AVBP est codée en Fortran 77 et 90 et quelques routines de bas-niveau (allocation/dé-allocation, construction des métriques notamment) sont en C. Les fichiers d'entrée/sortie d'AVBP (maillages et solutions) utilisent la librairie HDF5. La Fig. 5 illustre le *speed-up* de AVBP sur différentes plateformes parallèles. Les conditions d'utilisation d'AVBP sont proches d'être optimales sur l'architecture visée dans ce projet.

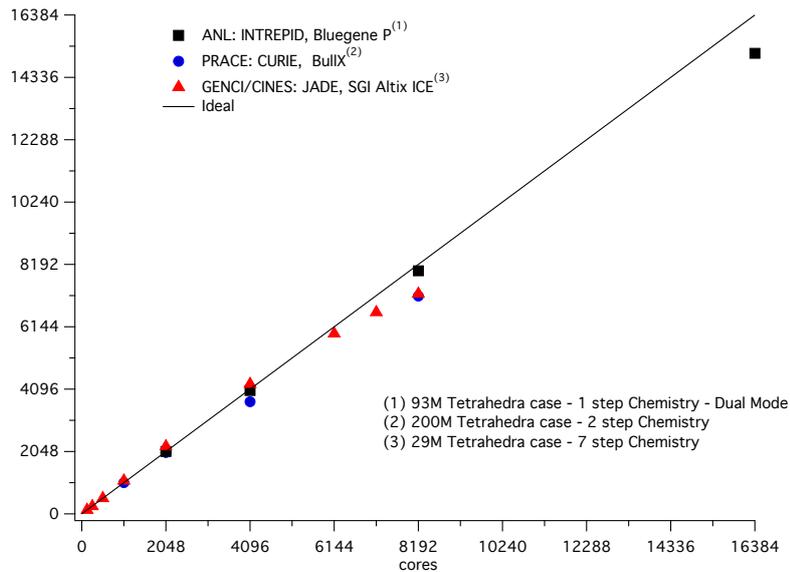


FIGURE 5 – Courbe de speed-up obtenue avec AVBP sur différentes architectures HPC (strong scaling).

4 Bibliographie

Les références [2, 3, 4, 8, 9] sont celles de l'équipe. Les références [6, 7] sont celles du CERFACS avec qui une collaboration étroite aura lieu puisque le CERFACS est partenaire du projet ERC.

Références

- [1] JWS Rayleigh Lord. The explanation or certain acoustic phenomena. *Nature*, 18 :319, 1878.
- [2] T. Poinsot and D. Veynante. *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc., 2005.
- [3] L Selle, L Benoit, T Poinsot, F Nicoud, and W Krebs. Joint use of compressible large-eddy simulation and Helmholtz solvers for the analysis of rotating modes in an industrial swirled burner. *Combustion and Flame*, 145(1-2) :194–205, April 2006.
- [4] F. Duchaine, F. Boudy, D. Durox, and T. Poinsot. Sensitivity analysis of transfer functions of laminar flames. *Combustion and Flame*, June 2011.
- [5] H. Murat Altay, Kushal S. Kedia, Raymond L. Speth, and Ahmed F. Ghoniem. Two-dimensional simulations of steady perforated-plate stabilized premixed flames. *Combustion Theory and Modelling*, 14(1) :125–154, March 2010.
- [6] F. Duchaine, A. Corpron, L. Pons, V. Moureau, F. Nicoud, and T. Poinsot. Development and assessment of a coupled strategy for conjugate heat transfer with Large Eddy Simulation : Application to a cooled turbine blade. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(6) :1129–1141, December 2009.
- [7] Olivier Colin and Michael Rudgyard. *Journal of Computational Physics*, 162(2) :338–371, August 2000.
- [8] Thierry Poinsot and S.K. Lele. Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows. *Journal of Computational Physics*, 101(1) :104–129, July 1992.
- [9] L. Selle, T. Poinsot, and B. Ferret. Experimental and numerical study of the accuracy of flame-speed measurements for methane/air combustion in a slot burner. *Combustion and Flame*, 158(1) :146–154, January 2011.