

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modélisation du plissement de sous-maille par apprentissage automatique pour les simulations aux grandes échelles de la combustion turbulente prémélangée

Référence : MFE-DMPE-2025-02

Début de la thèse : Octobre 2025

Date limite de candidature : Juillet 2025

Mots clés : Machine Learning, Deep Learning, Intelligence artificielle, Combustion, Turbulence, Mélange, Moteur Aérobie

Profil et compétences recherchées :

Diplôme d'Ingénieur ou Master en mécanique des fluides, avec spécialité en combustion. Des compétences en intelligence artificielle seront appréciées.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Avec l'augmentation significative de la puissance de calcul, les simulations aux grandes échelles (SGE) sont devenues courantes dans de nombreuses applications d'ingénierie. En effet, cette approche joue un rôle crucial dans la conception de moteurs moins polluants, dans la réduction des coûts de développement des chambres de combustion aéronautiques, ainsi que dans la prédiction des instabilités thermo-acoustiques dans les turbines à gaz.

Contrairement à l'approche RANS, ne calculant que les champs de l'écoulement moyen, l'approche LES est capable de capturer les structures turbulentes à grande échelle et les phénomènes instationnaires, offrant ainsi une vision plus détaillée et précise des interactions complexes entre la flamme et la turbulence. Cette interaction se produit à des échelles spatiales trop fines pour être directement simulées et doit donc être modélisée.

Dans le domaine de l'aéronautique, l'approche LES appliquée aux chambres de combustion améliore la compréhension de la dynamique des flammes et des contraintes de conception associées. Cependant, la qualité de la représentation de l'interaction flamme-turbulence est essentielle pour capturer les phénomènes d'intérêt (position de la flamme, champs de température et de taux de dégagement de chaleur, instabilités ...).

Afin de résoudre la flamme dans la maille de calcul, une des approches consiste à épaissir artificiellement celle-ci tout en réalisant les effets de l'interaction via une fonction d'efficacité du plissement de sous-maille [1]. Dans la littérature, trois types de modélisations du plissement de sous-maille ont été développés :

- La modélisation algébrique, dite non-dynamique, évaluée en présence de conditions spécifiques (soit pour des flammes soumises à une turbulence homogène isotrope [2], ou des flammes soumises à une échelle spécifique de tourbillon [1]) ;
- La modélisation algébrique, dite dynamique, [3,4], où les paramètres du modèle sont ajustés automatiquement au cours du calcul, en tirant parti de la connaissance des échelles résolues ;
- La modélisation construite avec des outils d'apprentissage profond [5].

Plusieurs auteurs ont proposé des modélisations du plissement de sous-maille plus ou moins complexes [6,7,8,9,10]. Cependant, les constantes du modèle ne sont pas universelles, pouvant conduire à des difficultés de généralisation.

Des approches dynamiques se sont avérées efficaces pour la prédiction de plusieurs types de flamme, mais restent fortement dépendantes de la résolution du maillage (facteur d'épaississement inférieur à 5). De nouvelles approches basées sur l'apprentissage automatique ont montré un potentiel prometteur pour la construction de modèles de sous-maille pour la combustion turbulente [6,11,12].

Ainsi, le principal objectif de cette thèse est d'explorer l'ensemble de ces éléments (génération d'une base de données haute-fidélité et construction d'un modèle basé sur l'apprentissage automatique) afin de mieux modéliser le plissement de sous-maille en présence d'un épaississement artificiel.

D'abord, des cas canoniques de référence seront définis et une base de données DNS sera réalisée. Des cas CH_4 avec chimies simplifiées seront effectuées. A partir de cette base de données, plusieurs types de méthodes d'apprentissage automatique (réseau de neurone, forêts aléatoires, réseau antagoniste génératif, ...) seront essayés et évalués pour une taille de filtre donnée, suffisamment faible pour pouvoir effectuer des DNS à coût raisonnable. Ces méthodes seront essayées (i) *a priori* puis (ii) *a posteriori* sur des cas similaires mais non identiques aux cas d'entraînement. En outre, une méthode de passage à l'échelle analytique, permettant de calculer le plissement de sous-maille à Δ élevé, sera développée. Une première phase consistera à construire un modèle fonctionnant pour un hydrocarbure classique tel que le méthane. Le modèle de passage à l'échelle ne devra donc tenir compte uniquement de la contribution du plissement de sous-maille. Le processus de validation sera effectué sur des cas à Δ plus élevés que celui utilisé pour l'apprentissage. Le modèle sera ensuite évalué sur une configuration plus réaliste telle que le brûleur de Chen *et al.* [13].

Cette thèse de doctorat, proposée en partenariat avec IFPEN et L'Ecole CentraleSupélec, sera financée entièrement par l'ONERA.

References:

- [1] Colin, O., Ducros, F., Veynante, D., & Poinso, T. (2000). A thickened flame model for large eddy simulations of turbulent premixed combustion. *Physics of fluids*, 12(7), 1843-1863.
- [2] Charlette, F., Meneveau, C., & Veynante, D. (2002a). A power-law flame wrinkling model for LES of premixed turbulent combustion Part I: non-dynamic formulation and initial tests. *Combustion and Flame*, 131(1-2), 159-180.
- [3] Charlette, F., Meneveau, C., & Veynante, D. (2002b). A power-law flame wrinkling model for LES of premixed turbulent combustion Part II: dynamic formulation. *Combustion and Flame*, 131(1-2), 181-197.
- [4] Volpiani, P. S., Schmitt, T., & Veynante, D. (2017). Large eddy simulation of a turbulent swirling premixed flame coupling the TFLES model with a dynamic wrinkling formulation. *Combustion and Flame*, 180, 124-135.
- [5] Genot A., Durand J.-E., Stefanin-Volpiani P. (2021). Etude bibliographique sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la combustion turbulente, RT 5/31868 DMPE.
- [6] Grenga, T., Nista, L., Schumann, C., Karimi, A. N., Scialabba, G., Attili, A., & Pitsch, H. (2023). Predictive data-driven model based on generative adversarial network for premixed turbulence-combustion regimes. *Combustion Science and Technology*, 195(15), 3923-3946.
- [7] Ho, J.Z., Talei, M., Brouzet, D., Chung, W.T., Sharma, P., Ihme, M., 2024. Augmenting filtered flame front displacement models for LES using machine learning with a posteriori simulations. Proceedings of the Combustion Institute 40, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105311>
- [8] Malé, Q., Lapeyre, C.J., Noiray, N., 2024. Hydrogen reaction rate modeling based on convolutional neural network for large eddy simulation.
- [9] Seltz, A., Domingo, P., Vervisch, L., Nikolaou, Z.M., 2019. Direct mapping from LES resolved scales to filtered-flame generated manifolds using convolutional neural networks. *Combustion and Flame* 210, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.08.014>
- [10] Xing, V., Lapeyre, C., Jaravel, T., Poinso, T., 2021. Generalization Capability of Convolutional Neural Networks for Progress Variable Variance and Reaction Rate Subgrid-Scale Modeling. *Energies* 14, 5096. <https://doi.org/10.3390/en14165096>
- [11] Lapeyre, C. J., Misdariis, A., Cazard, N., Veynante, D., & Poinso, T. (2019). Training convolutional neural networks to estimate turbulent sub-grid scale reaction rates. *Combustion and Flame*, 203, 255-264.
- [12] Ren, J., Wang, H., Luo, K., & Fan, J. (2021). A priori assessment of convolutional neural network and algebraic models for flame surface density of high Karlovitz premixed flames. *Physics of Fluids*, 33(3).

