

**Titre en français :** Modélisation algébrique des flux turbulents pour des écoulements avec masse volumique variable en approche RANS et hybride RANS/LES

**Titre en anglais :** RANS and hybrid RANS/LES algebraic modeling of turbulent fluxes in variable density flows

**Nom des encadrants :** Christophe Friess (directeur) et Fabien Duval (co-encadrant)

**Tel :** 04.13.94.67.42

**E-Mail :** [christophe.friess@univ-amu.fr](mailto:christophe.friess@univ-amu.fr) , [fabien.duval@irsn.fr](mailto:fabien.duval@irsn.fr)

**Laboratoire :** M2P2

**Financement :** acquis (granted)

**Type de financement :** bourse IRSN (IRSN funding)

#### **Résumé en français :**

Dans le cadre de l'évaluation des risques d'explosion, une première phase d'évaluation des écoulements et de la dispersion est nécessaire. Cette phase est particulièrement importante pour des locaux de grande taille comme on peut en rencontrer dans les installations nucléaires et qui sont le plus souvent le siège de phénomènes de stratification décisifs pour le risque explosif (basculement de part et d'autre de la limite d'inflammabilité de l'atmosphère en fonction du mélange ou de la stratification des gaz combustibles). Par ailleurs, les situations d'incendie dans les locaux génèrent des écoulements avec des masses volumiques très variables. Ces deux problématiques requièrent donc la simulation d'écoulements turbulents avec de forts effets de flottabilité.

Pour modéliser cette dispersion, trois approches sont possibles : une modélisation complète des flux turbulents (RANS), une modélisation des flux de sous-filtre et un calcul direct des grandes échelles (LES), une combinaison des deux approches (méthodes hybrides). Si la première approche présente l'avantage d'être rapide, sa précision dépend du degré de sophistication du modèle de turbulence. La seconde approche est bien plus prédictive mais nécessite des temps de calcul plus importants et souvent rédhibitoires avec les contraintes des études. Enfin la dernière approche (approches hybrides RANS/LES, notamment non-zonales) doit permettre de trouver un compromis entre rapidité et précision ; ces techniques connaissent, pour ces raisons, un intérêt grandissant [1,3].Elles sont d'autant plus performantes que le modèle RANS sous-jacent est précis.

Le sujet de thèse proposé est fondé sur cette analyse, à savoir développer, dans la plate-forme CALIF<sup>3S</sup> [2] de l'IRSN, des modèles algébriques issus d'une modélisation au second ordre dans un contexte RANS pour les flux turbulents et hybride RANS/LES pour les flux de sous-filtre. Ces modèles sont en effet connus pour améliorer de manière significative la modélisation des flux turbulents, aussi bien dans un contexte RANS [10] que LES [9], tout en conservant les performances et la robustesse des modèles de viscosité turbulente. L'ensemble de ces développements participe par ailleurs à l'amélioration des prévisions de la turbulence pour l'ensemble des applications de la plate-forme CALIF<sup>3S</sup> et n'est donc pas restreint aux écoulements non-réactifs.

Il s'agira ici d'étendre la modélisation algébrique, actuellement limitée aux écoulements où l'approximation de Boussinesq reste acceptable, à des écoulements caractérisés par de forts contrastes de masse volumique. Les développements seront dans un premier temps menés dans le cadre d'une modélisation dite homogène sans effets de parois. Les applications viseront des situations d'intérêt dans les locaux de grande taille et concerneront essentiellement le développement libre de jets et de panaches ainsi que l'érosion d'une stratification stable par un jet turbulent. Dans un deuxième temps, on étendra un modèle algébrique à pondération elliptique aux écoulements en proche paroi présentant de fortes variations de masse volumique afin, typiquement, de prendre en compte les situations où les jets et panaches ne se développent plus librement (jets impactants...).

L'ensemble de ces développements proposés pour la modélisation des flux turbulents dans un contexte RANS sera alors étendu au contexte hybride RANS/LES pour la modélisation des flux de sous-filtre. Les développements seront menés dans le cadre de méthodes hybrides dites continues de type DES équivalente [3,8].

Ce travail sera co-encadré par Fabien Duval (LIE, IRSN), Christophe Friess (M2P2, Aix-Marseille Université).

Pour atteindre les objectifs fixés, la thèse se déroulera de la manière suivante :

- La première année sera consacrée au développement d'un modèle algébrique capable de décrire des situations où la masse volumique varie significativement sous les effets de la température ou de la composition. Les développements seront menés sur la base du modèle proposé dans [4] pour les écoulements compressibles qui présente déjà de nombreuses similitudes avec le modèle actuel restreint au cas Boussinesq [8]. La validation du modèle sera menée sur des cas académiques représentatifs des situations d'intérêt pour lesquels on dispose de données de référence dans la littérature (données expérimentales, DNS ou LES). Il s'agira d'écoulements turbulents dits libres (sans effets de parois); on s'intéressera en particulier au développement de jets et de panaches se développant dans un milieu ambiant au repos ainsi qu'à l'érosion d'une stratification stable par un jet turbulent.
- En cours de deuxième année, on s'intéressera également à la prise en compte des effets de parois par pondération elliptique. Il s'agira d'étendre le modèle actuel à pondération elliptique aux écoulements en proche paroi présentant de fortes variations de masse volumique. La validation du modèle sera menée principalement sur des cas académiques, typiquement le cas du canal plan en situation de convection forcée ou de convection naturelle, le cas de la cavité différentiellement chauffée où la prise en compte des effets de flottabilité en proche paroi nécessite une attention particulière [7], ainsi que le cas du jet impactant. Dans un deuxième temps, il s'agira d'étendre la modélisation algébrique proposée au contexte hybride RANS/LES. Les développements seront menés dans le cadre des méthodes hybrides dites continues de type DES équivalente [3,8].
- Enfin, la troisième année sera consacrée à la mise en œuvre des modèles développés dans un contexte RANS et hybride RANS/LES sur des écoulements turbulents présentant de fortes variations de masse volumique. Il s'agira dans un premier temps de poursuivre le travail de validation entamé au cours de la deuxième année et de comparer les prévisions des ap-

proches RANS et hybride RANS/LES sur le cas d'érosion de stratification pour lequel des données expérimentales détaillées ont été acquises dans le cadre d'un programme cofinancé par l'IRSN [5,6]. Enfin, les deux approches seront mises en œuvre sur des configurations représentatives d'écoulements stratifiés dans les locaux de grande taille. On s'intéressera pour cela aux configurations du programme CARDAMOMETTE mené à l'IRSN qui fournit un ensemble de données expérimentales très complet sur des cas de rejet d'hélium dans un local ventilé.

### **Résumé en anglais :**

Within the framework of the assessment of explosion risks, a first phase of evaluation of flows and dispersion is necessary. This phase is particularly important for large premises such as those found in nuclear installations, which are often the site of stratification phenomena that are decisive for the explosive risk (tilting on either side of the flammability limit of the atmosphere depending on the mixture or stratification of combustible gases). In addition, fire situations in premises generate flows with very variable densities. These two problems require the simulation of turbulent flows with strong buoyancy effects.

To model this dispersion, three approaches are possible: a complete modeling of the turbulent flows (RANS), a modeling of the sub-filter flows and a direct calculation of the large scales (LES), a combination of both approaches (hybrid methods). While the first approach has the advantage of being fast, its accuracy depends on the sophistication of the turbulence model. The second approach is much more predictive but requires more computation time and often prohibits the constraints of the studies. Finally, the last approach (hybrid RANS/LES approaches, especially non-zonal ones) should allow to find a compromise between speed and accuracy; for these reasons, these techniques are of growing interest [1,3]. They are all the more efficient as the underlying RANS model is accurate.

The subject of the proposed thesis is based on this analysis, namely to develop, in the CALIF<sup>3</sup>S platform [2] of IRSN, algebraic models derived from a second-order modeling in a RANS context for turbulent fluxes and hybrid RANS/LES for subfilter fluxes. These models are indeed known to significantly improve the modeling of turbulent flows, both in a RANS [10] and LES [9] context, while maintaining the performance and robustness of turbulent viscosity models. All these developments contribute to the improvement of turbulence predictions for all the applications of the CALIF<sup>3</sup>S platform and are therefore not restricted to non-reactive flows.

The aim is to extend algebraic modeling, currently limited to flows where the Boussinesq approximation remains acceptable, to flows characterized by strong density contrasts. The developments will initially be carried out within the framework of a so-called homogeneous modeling without wall effects. The applications will be aimed at situations of interest in large premises and will mainly concern the free development of jets and plumes as well as the erosion of a stable stratification by a turbulent jet. In a second step, an algebraic model with elliptic blending will be extended to near-wall flows with strong density variations in order to take into account situations where jets and plumes do not develop freely (e.g. impinging jets...)

This work will be co-supervised by Fabien Duval (LIE, IRSN) and Christophe Friess (M2P2, Aix-Marseille University).

In order to achieve the objectives, the thesis will proceed as follows:

- The first year will be devoted to the development of an algebraic model able to describe situations where the density varies significantly under the effects of temperature or composition. The developments will be carried out on the basis of the model proposed in [4] for compressible flows which already presents many similarities with the current model restricted to the Boussinesq case [8]. The validation of the model will be carried out on academic cases representative of the situations of interest for which reference data are available in the literature (experimental data, DNS or LES). These will be so-called free turbulent flows (without wall effects); we will be particularly interested in the development of jets and plumes in an ambient medium at rest and in the erosion of a stable stratification by a turbulent jet.

- In the second year, we will also be interested in the consideration of wall effects by elliptic blending. The aim will be to extend the current elliptic blending model to near-wall flows with large density variations. The validation of the model will be carried out mainly on academic cases, typically the case of the plane channel in a forced convection or natural convection situation, the case of the differentially heated cavity where the consideration of near-wall buoyancy effects requires particular attention [7], as well as the case of the impacting jet. In a second step, the proposed algebraic modeling will be extended to the hybrid RANS/LES context. The developments will be conducted in the framework of the so-called seamless hybrid methods, for instance equivalent DES [3,8].

- Finally, the third year will be devoted to the implementation of the models developed in a RANS and hybrid RANS/LES context on turbulent flows with large density variations. The first step will be to continue the validation work started during the second year and to compare the predictions of the RANS and hybrid RANS/LES approaches on the case of stratification erosion for which detailed experimental data have been acquired in the framework of a program co-funded by the IRSN [5,6]. Finally, both approaches will be implemented on representative configurations of stratified flows in large premises. We will focus on the configurations of the CARDAMOMETTE program developed at IRSN, which provides a very complete set of experimental data on helium release in a ventilated room.

#### **Profil du candidat recherché :**

- Compétences en mécanique des fluides, programmation, mise en œuvre des méthodes numériques.

- Formation en mécanique des fluides mathématiques appliquées (école d'ingénieurs / master).

#### **Publications sur le sujet :**

[1] B. Chaouat. *The state of the art of hybrid RANS/LES modeling for the simulation of turbulent flows*. Flow, Turbulence and Combustion, 99 :279-327, 2017.

[2] CALIF<sup>3</sup>S collaborative website. <https://gforge.irsn.fr/gf/project/calif3s>.

[3] C. Friess, R. Manceau, and T.B. Gatski. *Toward an equivalence criterion for hybrid RANS/LES methods*. Computers & Fluids, 122 :233-246, 2015.

- [4] I.A. Grigoriev, S. Wallin, G. Brethouwer, and A.V. Johansson. *Capturing turbulent density flux effects in variable density flow by an explicit algebraic model*. *Physics of Fluids*, 27(4) :045108, 2015.
- [5] J. Herault, F. Duval, and M. Le Bars. *Mass transport induced by a jet impinging on a density interface : The role of interfacial wave breaking*. *EPL (Europhysics Letters)*, 117(6) :64003, 2017.
- [6] J. Herault, G. Facchini, and M. Le Bars. *Erosion of a sharp density interface by a turbulent jet at moderate Froude and Reynolds numbers*. *Journal of Fluid Mechanics*, 838 :631-657, 2018.
- [7] S-H. Peng and L. Davidson. *Computation of turbulent buoyant flows in enclosures with low-Reynolds-number  $k-\omega$  models*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(2) :172-184, 1999.
- [8] A. Ramanathan Krishnan. *Explicit algebraic subfilter scale modeling for DES-like methods and extension to variable density flows*. PhD thesis, Aix-Marseille Université, 2019.
- [9] A. Rasam, G. Brethouwer, and A.V. Johansson. *An explicit algebraic model for the subgrid-scale passive scalar flux*. *Journal of Fluid Mechanics*, 721 :541-577, 2013.
- [10] S. Wallin and A.V. Johansson. *An explicit algebraic Reynolds stress model for incompressible and compressible turbulent flows*. *Journal of Fluid Mechanics*, 403 :89-132, 2000.

**Insertion professionnelle après thèse** : publique et/ou privée