



## Avis de soutenance

**Monsieur Yanis BENDALI**

soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés,

### ***Multiscale modeling of heat exchangers for aircraft propulsion systems***

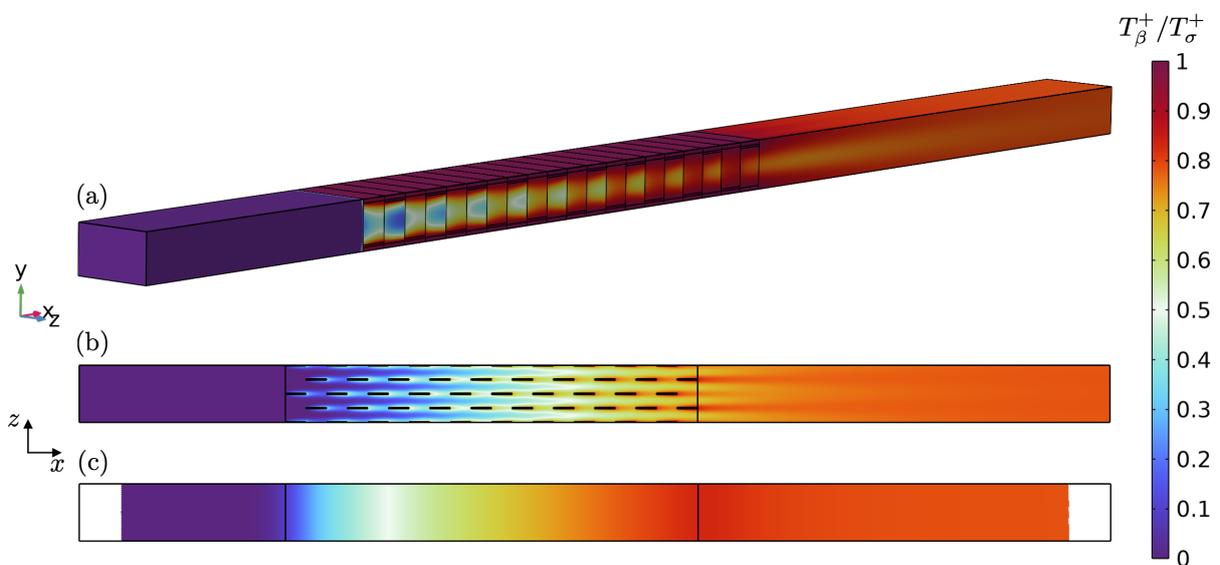
*Modélisation multi-échelle d'échangeurs thermiques  
de systèmes propulsifs aéronautiques*

([Lien visio](#))

Thèse dirigée par **Benoît GOYEAU**, co-encadrée par **Morgan CHABANON**  
au laboratoire EM2C (CNRS) de CentraleSupélec, Université de Paris-Saclay,  
et co-supervisée par **Quentin HOLKA** et **Ephraïm TOUBIANA**  
à Safran Tech, Châteaufort Magny-Les-Hameaux

**Le Lundi 16 juin 2025 à 10h00**

À CentraleSupélec, 3 rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex  
Théâtre Rousseau (e.070, Bâtiment Bouygues)



Temperature field in a single channel of a plate-fin heat exchanger. (a) 3D geometry. (b) Cut plane (Oxz).  
(c) Homogenized channel.

### Composition du jury

<b>Fabrice GOLFIER</b>	Professeur, GeoRessources, CNRS, Université de Lorraine	Rapporteur
<b>Cyprien SOULAINÉ</b>	Chargé de Recherche HDR, ISTO, CNRS, Université d'Orléans	Rapporteur
<b>Azita AHMADI-SÉNICHAULT</b>	Professeure, I2M, CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université de Bordeaux	Examinatrice
<b>Stéphane VINCENT</b>	Professeur, MSME, CNRS, Université Gustave Eiffel, Université Paris-Est Créteil	Examinateur

**Titre :** Modélisation multi-échelle d'échangeurs thermiques de systèmes propulsifs aéronautiques

**Mots clés :** changeurs thermiques, propulsion aéronautique, remontée d'échelle de milieux poreux, Méthode de prise de Moyenne Volumique, écoulement inertiel et transfert thermique, simulations numériques CFD

**Résumé :** L'amélioration de l'efficacité des échangeurs thermiques est un des principaux défis à relever pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des avions. Si les progrès en termes d'optimisation et de fabrication additive permettent de concevoir des échangeurs toujours plus complexes, ils rendent également la prédiction de leurs performances d'autant plus difficile.

L'objectif de cette thèse est de développer et évaluer des modèles multi-échelles d'échangeurs à l'aide de méthodes de remontée d'échelle des transferts en milieu poreux. Leurs modèles macroscopiques offrent un bon compromis entre précision et coût de calcul, lorsque les propriétés de transport sont déterminées avec précision. Ce travail porte sur le couplage entre écoulement inertiel et transfert thermique hors équilibre en milieu poreux. La Méthode de prise de Moyenne Volumique (VAM) est utilisée pour obtenir des problèmes macroscopiques et calculer leurs propriétés effectives. Les prédictions de ces modèles sont évaluées par rapport à des Simulations Numériques Directes (DNS) de modèles d'échangeurs.

Tout d'abord, la remontée d'échelle d'écoulements inertiels, incompressibles et laminaires est étudiée. L'équation de Forchheimer décrit le transport macroscopique de quantité de mouvement, en tenant compte des effets inertiels avec un tenseur de correction non-linéaire de la perméabilité. La VAM propose de résoudre un problème aux déviations non-linéaire, résolu en découplant la vitesse convective de sa déviation. Une autre approche est proposée ici en utilisant une expansion par perturbation régulière, menant à une série de problèmes de fermeture linéaires. Les tenseurs de Forchheimer des deux méthodes sont comparés pour différents nombres de Reynolds et orientations de l'écoulement. La fermeture linéarisée s'avère autosuffisante et indépendante de ces deux paramètres. Cependant, elle reste limitée à des Reynolds inférieurs à 1 et nécessite la résolution de problèmes de dimensions élevées. Ensuite, des simulations macroscopiques sont effectuées, démontrant l'importance de l'orientation du gradient de pression et révélant le besoin de déterminer les termes extra-diagonaux du tenseur de Forchheimer.

Ensuite, le couplage écoulement inertiel/transfert thermique en milieu poreux isotherme est examiné. Les modèles macroscopiques de la VAM sont comparés au modèle d'Écoulement Périodiquement Développé (PDF). Des comparaisons numériques sont effectuées d'abord sur une cellule unitaire, puis sur des cas test macroscopiques par rapport aux DNS. Les résultats révèlent des divergences entre la VAM et les autres modèles pour des nombres de Péclet élevés. Des formulations revisitées de la VAM avec une autre définition de la température moyenne et moins d'hypothèses sur les échelles de longueur sont proposées afin d'améliorer sa précision. De nouveaux résultats montrent un bon accord entre les modèles VAM revisités, le modèle PDF et les DNS pour des Péclet élevés.

Enfin, le transfert thermique fluide/solide en milieu poreux avec une seconde phase fluide isotherme est considéré. Les modèles VAM et PDF sont revisités théoriquement avec du transfert thermique fluide/solide hors équilibre. Des comparaisons numériques sont effectuées sur une cellule unitaire 3D d'un échangeur plaques-ailettes. Avec une phase solide idéale, les résultats numériques s'alignent sur les conclusions précédentes. Avec un solide à conductivité finie, le modèle PDF montre un bon accord avec les DNS, tandis que les modèles VAM calculent précisément la température moyenne du solide.

Dans l'ensemble, ce travail met en évidence les forces et limites des méthodes de remontée d'échelle pour le transfert thermique et les écoulements inertiels. Des développements méthodologiques de la VAM ont été proposés afin d'améliorer ses prédictions pour les transferts thermiques hors équilibre, démontrant son potentiel en tant que méthodologie pour la modélisation d'échangeurs aéronautiques complexes.

**Title:** Multiscale modeling of heat exchangers for aircraft propulsion systems

**Keywords:** Heat exchangers, aircraft propulsion, porous media upscaling, Volume Averaging Method, inertial flow and heat transfer, CFD numerical simulations

**Abstract:** Improving the efficiency of heat exchangers is one of the key technological challenges to curb aircraft greenhouse gas emissions. While recent advances in geometric optimization and additive manufacturing have led to ever more complex heat exchanger designs, they have also made it exponentially difficult to predict their performances.

The goal of this thesis is to develop and assess multiscale heat exchanger models based on upscaling methods of transfers in porous media. Macroscopic models offer a good trade-off between accuracy and computational cost, providing relevant transport features are accurately treated in the upscaling procedure. This work focuses on the coupling of inertial flow and non-equilibrium heat transfer in porous media. The Volume Averaging Method (VAM) is employed to derive macroscopic transport equations and determine their effective properties. Predictions of the macroscopic models are assessed against Direct Numerical Simulations (DNS) of heat exchanger models from the engineering literature.

First, the upscaling of incompressible and laminar inertial flow without heat transfer is studied. The Forchheimer equation describes macroscopic momentum transport, accounting for inertial effects at the pore-scale level through a non-linear correction tensor to permeability. The VAM involves solving a non-linear problem for the velocity field deviations, commonly tackled by decoupling the inertial convective velocity from the velocity deviations. Here, an alternative approach is proposed using regular perturbation expansion, leading to a series of linear closure problems. The Forchheimer correction tensor values from both methods are compared for various Reynolds numbers and flow orientations. The proposed linearized closure approach is shown to be self-consistent and independent of Reynolds number and flow orientations. However, it is limited to Reynolds numbers below one and requires solving higher-dimensional closure problems. Then, macroscopic simulations are performed, highlighting the importance of varying pressure gradient orientations on inertial flows and revealing the

necessity to account for extra-diagonal terms in the Forchheimer tensor.

Next, the coupling of inertial flow and heat transfer in isothermal porous media is considered. Macroscopic fluid inertial heat transfer models developed with the VAM are compared to the Periodically Developed Flow (PDF) model. Numerical comparisons are conducted first on a reference unit cell and then on macroscopic test cases against DNS. Results reveal discrepancies between VAM and other models at high Péclet numbers. Revisited formulations of the VAM with a different averaged temperature definition and limited length-scale assumptions are proposed to improve accuracy. Additional results show excellent agreement between the revisited VAM models, the PDF model, and DNS for high Péclet number flows.

Finally, fluid/solid heat transfer in porous media where a secondary fluid phase maintains a constant temperature is considered. VAM and PDF models are revisited theoretically to account for non-equilibrium fluid/solid heat transfer. Numerical comparisons are performed on a plate-fin heat exchanger 3D unit cell. In the case of an ideally conductive solid phase, numerical results align with previous findings, even for complex geometries. For a solid phase with finite conductivity, the generalized PDF model shows excellent agreement with DNS, while VAM models accurately compute the average temperature in the solid phase.

Overall, this work highlights the strengths and limitations of upscaling methods for heat transfer and inertial flow. Methodological developments to the VAM were proposed to improve its predictions for out-of-equilibrium heat transfers, demonstrating its potential as a general framework for modeling complex aircraft heat exchangers.