

**Titre de la thèse :** Modélisation et simulation numérique des transferts thermiques pariétaux en écoulements gaz-particules dans les récepteurs solaires.

**Mots-clés de la thèse :** mécanique des fluides, transferts thermiques, méthodes numériques, écoulement diphasique gaz-particule anisotherme, simulation numérique, énergie solaire.

**Encadrement de la thèse :**

Adrien TOUTANT - 04 68 68 27 09 - [adrien.toutant@univ-perp.fr](mailto:adrien.toutant@univ-perp.fr) - HDR obtenu en 2013

Françoise BATAILLE - 04 68 68 22 32 - [francoise.bataille@promes.cnrs.fr](mailto:francoise.bataille@promes.cnrs.fr) - HDR obtenu en 2000

Samuel MER – 04 68 68 22 38 – [samuel.mer@univ-perp.fr](mailto:samuel.mer@univ-perp.fr)

**Comité de thèse :**

- M. Gilles FLAMANT [gilles.flamant@promes.cnrs.fr](mailto:gilles.flamant@promes.cnrs.fr)

- M. Olivier SIMONIN, référent, [Olivier.Simonin@imft.fr](mailto:Olivier.Simonin@imft.fr)

- M. Stéphane VINCENT [stephane.vincent@univ-eiffel.fr](mailto:stephane.vincent@univ-eiffel.fr)

**CNU de thèse :** 62 - Énergétique, génie des procédés

**Résumé du projet de thèse :**

**Contexte**

Afin d'augmenter le rendement des centrales solaires à tour de prochaine génération, la température de fonctionnement du récepteur solaire doit être augmentée autour de 1000°C. Les fluides de transferts actuels ne peuvent supporter ces niveaux de température aussi de nouvelles alternatives doivent être trouvées. Une des possibilités pour atteindre cet objectif est d'utiliser au sein du récepteur solaire un mélange gaz-particules comme fluide de transfert. La maîtrise des écoulements gaz-particules des futures centrales solaires à tour est un verrou scientifique important. En effet, les couplages entre l'agitation, le caractère diphasique de l'écoulement et la thermique rendent la physique particulièrement complexe. Cette thèse vise à améliorer la compréhension et la modélisation des transferts thermiques pariétaux dans ces configurations d'écoulements.

**Objectifs**

Les objectifs du projet de thèse sont les suivants (présentés par ordre chronologique) :

1. Développement de la partie thermique de la méthode de simulation numérique fluide-particules utilisant la méthode Front-Tracking du logiciel TrioCFD et une approche DEM.
2. Réalisation et analyse de simulations numériques anisothermes d'écoulements denses gaz/particules.
3. Développement de modèles pour les transferts thermiques entre la paroi du récepteur solaire et le mélange gaz/particules.

**Méthode**

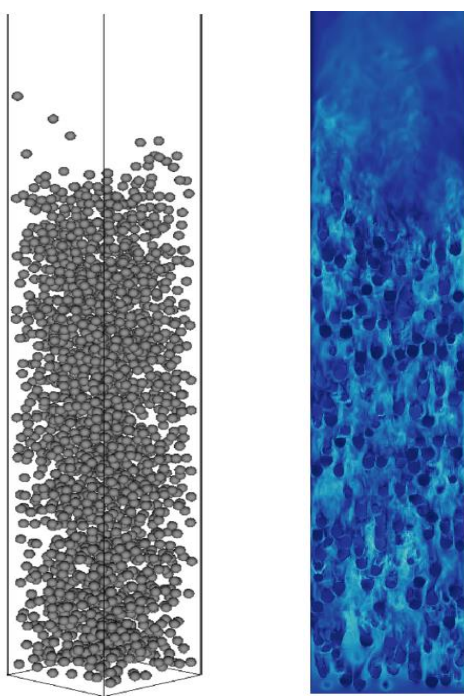
Dans cette thèse nous utiliserons la méthode de Front-Tracking du logiciel TrioCFD pour prendre en compte le caractère diphasique de l'écoulement. Celle-ci utilise un maillage mobile de surface qui représente explicitement les interfaces. Elle permet donc de décrire précisément des géométries quelconques de particules ainsi que leurs interactions avec le fluide environnant. Récemment, cette méthode initialement développée pour les écoulements liquide/gaz a été adaptée pour les écoulements fluide/particules (voir [1] et [2]). Les interactions particules/particules sont modélisées par des lois de collision de sphères molles (DEM) et le caractère indéformable des particules est obtenu grâce à une pénalisation par la viscosité de la phase solide.

Pour simuler des écoulements denses fluide/particules, en représentant explicitement les particules, on a recours au calcul haute performance et on utilise plusieurs centaines voire milliers de processeurs. Pour réaliser une simulation numérique directe (SND) de lit fluidisé, d'après la littérature, la bonne

prise en compte du couplage fluide/particules nécessite des maillages d'au moins quarante mailles par diamètre de particules afin de bien capturer la sous-couche visqueuse (frottement) et la sous-couche conductive (transfert thermique fluide/solide). Ces simulations sont donc extrêmement coûteuses numériquement. Or, pour prendre en compte les effets collectifs prépondérant dans ce genre d'écoulement - et donc se rapprocher des applications solaires - il est indispensable de réaliser des simulations avec plus de 10000 particules. Ainsi, on cherchera dans cette thèse la résolution permettant un bon compromis entre coût de calcul, précision et représentativité des écoulements au sein des récepteurs solaires à haute température.

Pour ce faire, le doctorant/la doctorante réalisera une étude de sensibilité en maillage et une étude paramétrique sur la taille du domaine et le nombre de particules simulées. Il/elle constituera une base de données étendue de simulations de lits fluidisés anisothermes résolues à une échelle plus petite que le diamètre des particules. Il/elle analysera physiquement les résultats obtenus. Une attention particulière sera portée aux transferts thermiques pariétaux. On évaluera par exemple la partie du flux échangé avec les particules et celle échangé avec le gaz. Pour ce faire, on s'intéressera notamment aux moyennes, aux écarts types, aux transformées de Fourier et aux densités de probabilités de ces flux en fonction des propriétés de l'écoulement.

Ces analyses permettront la mise en place de modèles des transferts thermiques entre la paroi du récepteur solaire et le mélange gaz/particules. Une première étape pourra concerner le développement d'une corrélation pour le transfert pariétal moyen. L'objectif du travail de thèse est cependant plus ambitieux avec le développement, par remontée d'échelle, d'un modèle utilisable dans l'approche Euler-Euler (modèle à deux fluides - TFM). Il s'agira ici de pouvoir estimer le flux local instantané à partir de données comme la fraction volumique de solide, les vitesses et températures du gaz et de la phase dispersée ainsi que les agitations du fluide et des particules.



Calcul haute performance 3D (550 cœurs) d'un lit fluidisé de 2000 particules (16 mailles par diamètre).  
Figure de gauche : positions des particules. Figure de droite : champ de vitesse.

## Références

[1] Hamidi S., Toutant A., Mer S., Bataille F. Assessment of a coupled VOF-Front-Tracking/DEM method for simulating fluid-particles flows, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 165, 104467, 2023.

[2] Butaye E., Toutant A., Mer S., Bataille F., Development of Particle Resolved - Subgrid Corrected Simulations: Hydrodynamic force calculation and flow sub-resolution corrections, *Computers and Fluids* vol. 267, 106071, 2023.

**PhD thesis title:** Modeling and numerical simulation of parietal heat transfer using gas-particle flows in solar receivers.

**Key words:** fluid mechanics, heat transfer, numerical methods, anisothermal gas-particle two-phase flow, numerical simulation, solar energy.

### **PhD thesis supervision**

Adrien TOUTANT - 04 68 68 27 09 - [adrien.toutant@univ-perp.fr](mailto:adrien.toutant@univ-perp.fr) - HDR obtained in 2013

Françoise BATAILLE - 04 68 68 22 32 - [francoise.bataille@promes.cnrs.fr](mailto:francoise.bataille@promes.cnrs.fr) - HDR obtained in 2000

Samuel MER - 04 68 68 22 38 - [samuel.mer@univ-perp.fr](mailto:samuel.mer@univ-perp.fr)

### **Thesis committee**

- Mr. Gilles FLAMANT [gilles.flamant@promes.cnrs.fr](mailto:gilles.flamant@promes.cnrs.fr)

- Mr. Olivier SIMONIN, referent, [Olivier.Simonin@imft.fr](mailto:Olivier.Simonin@imft.fr)

- Mr. Stéphane VINCENT [stephane.vincent@univ-eiffel.fr](mailto:stephane.vincent@univ-eiffel.fr)

**Specialty:** Energetics, process engineering

### **Summary of the PhD project:**

#### **Context**

In order to increase the efficiency of next-generation solar tower power plants, the operating temperature of the solar receiver must be increased to around 1000°C. Current transfer fluids cannot withstand these temperature levels, so new alternatives must be found. One way of achieving this goal is to use a gas-particle mixture as the transfer fluid within the solar receiver. Controlling gas-particle flows in future solar tower power plants is a major scientific challenge. Couplings between agitation, the two-phase nature of the flow and temperature make the physics particularly complex. This PhD thesis aims to improve the understanding and modeling of parietal heat transfer in these flow configurations.

#### **Objectives**

The objectives of the PhD project are as follows (presented in chronological order):

1. Development of the thermal part of the fluid-particle numerical simulation method using the Front-Tracking method of the TrioCFD software and a DEM approach.
2. Realization and analysis of anisothermal numerical simulations of dense gas/particle flows.
3. Development of heat transfer models between the solar receiver wall and the gas/particle mixture.

#### **Method**

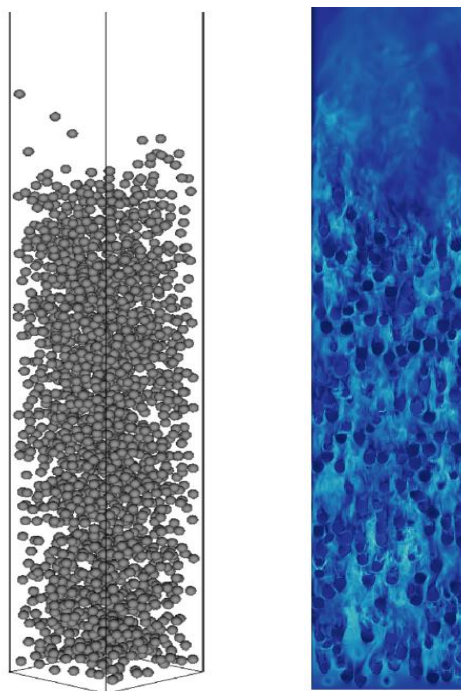
In this PhD thesis, we will use the Front-Tracking method of the TrioCFD software to take into account the two-phase nature of the flow. This uses a moving surface mesh that explicitly represents the interfaces. It can therefore accurately describe any particle geometry and its interaction with the surrounding fluid. Recently, this method, originally developed for liquid/gas flows, has been adapted for fluid/particle flows (see [1] and [2]). Particle/particle interactions are modeled by Soft Sphere Collision Laws (SSCL), and the non-deformable nature of the particles is achieved by penalizing them with the viscosity of the solid phase.

To simulate dense fluid/particle flows, by explicitly representing the particles, we use high-performance computing and several hundred or even thousands of processors. According to the literature, direct numerical simulation (DDS) of fluidized beds requires mesh sizes of at least forty meshes per particle diameter, in order to properly capture the viscous sublayer (friction) and the

conductive sublayer (fluid/solid heat transfer). These simulations are therefore extremely costly numerically. However, to take into account the collective effects prevalent in this type of flow - and thus get closer to solar applications - it is essential to carry out simulations with more than 10,000 particles. The aim of this PhD thesis is to find the resolution that strikes the right balance between computational cost, accuracy and representativeness of flows in high-temperature solar receivers.

To this end, the PhD student will carry out a mesh sensitivity study and a parametric study on the size of the domain and the number of particles simulated. He/she will build up an extensive database of anisothermal fluidized bed simulations resolved on a scale smaller than particle diameter. He/she will physically analyze the results obtained. Particular attention will be paid to parietal heat transfer. For example, the part of the flow exchanged with the particles and that exchanged with the gas will be evaluated. To do this, he/she will look at averages, standard deviations, Fourier transforms and probability densities of these heat fluxes as a function of flow properties.

These analyses will enable the development of heat transfer models between the wall of the solar receiver and the gas/particle mixture. A first step could be the development of a correlation for the mean wall to bed heat flux. However, the aim of the PhD work is more ambitious, with the development, by upscaling, of a model that can be used in the Euler-Euler approach (two-fluid model - TFM). The challenge is to estimate the instantaneous local wall to bed heat flux from data such as solid volume fraction, gas and dispersed phase velocities and temperatures, and fluid and particle agitation.



3D high performance computing (550 cores) of a fluidized bed of 2000 particles (16 meshes per diameter). Left figure: particle positions. Right figure: velocity field.

## References

[1] Hamidi S., Toutant A., Mer S., Bataille F. Assessment of a coupled VOF-Front-Tracking/DEM method for simulating fluid-particles flows, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 165, 104467, 2023.

[2] Butaye E., Toutant A., Mer S., Bataille F., Development of Particle Resolved - Subgrid Corrected Simulations: Hydrodynamic force calculation and flow sub-resolution corrections, *Computers and Fluids* vol. 267, 106071, 2023.