

Contexte : Dans le contexte énergétique actuel, le développement et l'optimisation des procédés de conversion des énergies renouvelables suscite de plus en plus d'attention. Les technologies solaires concentrés (CSP) s'inscrivent dans ces procédés propres de génération d'énergie. Cette technique consiste à concentrer les rayons du soleil à l'aide de miroir (héliostats) sur un récepteur, pour produire de la chaleur. Celle-ci est transférée par un fluide caloporteur vers un échangeur de chaleur où un cycle thermodynamique transforme la chaleur en électricité. Selon Carnot le rendement conversion du cycle augmente avec la température de la source chaude. Actuellement, le fluide caloporteur est le facteur limitant cette température. Pour les centrales à tour, la technologie actuelle utilise des sels fondus comme fluide de transfert, coûteux et avec une température de source chaude de 550°C et donc un rendement de conversion de 42%. Dans ce contexte, le laboratoire PROMES développe des recherches visant à augmenter ce rendement de conversion de 42 à 50 % via l'utilisation de cycles combinés, associant une turbine à gaz avec une turbine à vapeur. Le cycle amont nécessite une température de source chaude de 800°C ne pouvant être atteinte avec les fluides caloporteurs actuels. Une solution envisagée pour atteindre ces températures est d'utiliser comme fluide caloporteur des particules fluidisées par de l'air [1]. Les lits fluidisés sont intéressants pour leurs capacités à produire une forte agitation des particules résultant de leurs interactions avec les bulles de gaz. Cette propriété tend à améliorer le transfert thermique avec les parois du récepteur et à homogénéiser les températures. La faisabilité de cette technique a déjà été démontrée et plusieurs projets ont permis de mettre en place une base de données expérimentales d'écoulement de lits fluidisés tant en conditions isothermes que sous irradiation solaire concentrée [2] (voir Fig. 1). Les objectifs de cette thèse sont donc (i) d'explorer les capacités d'un solveur Euler-Euler pour simuler les écoulements gaz-particules mis en jeu et (ii) d'analyser les simulations réalisées pour étudier la physique des lits fluidisés transportés anisothermes.

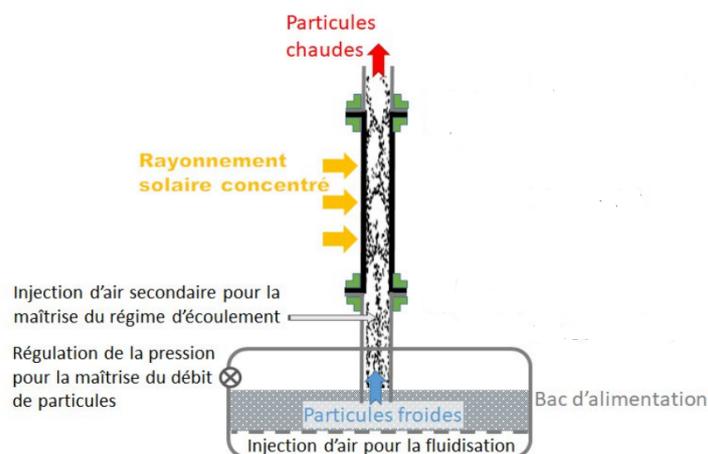


FIGURE 1 – Schéma de principe d'un récepteur à lit fluidisé en circulation ascendante.

Méthodes & Outils : La modélisation des lits fluidisés est faite par approche eulérienne à n phases à travers le logiciel de mécanique des fluides numérique NEPTUNE_CFD. Ce dernier est développé par le consortium EDF, CEA, IRSN et Framatome, utilisé en particulier pour les systèmes diphasiques eau-vapeur apparaissant dans les centrales nucléaires, ainsi que par l’Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) qui a adapté le code de calcul aux mélanges gaz-solide. NEPTUNE_CFD est un système conçu pour résoudre les équations de Navier-Stokes multi-phases. Les équations de conservation (masse, quantité de mouvement et énergie) sont moyennées dans chacune des phases. Ces équations sont couplées par l’intermédiaire de termes de transferts entre les phases et complétées par des équations de transport sur les variables scalaires et sur les grandeurs turbulentes (modèles $k - \epsilon$ ou $q_p - q_{fp}$ par exemple). La validité de la démarche de modélisation dépend donc fortement de la pertinence de ces termes de fermeture. L’algorithme de résolution de NEPTUNE_CFD suit une discrétisation semi-implicite en volumes finis afin d’assurer une stabilité numérique et un déploiement massivement parallèle permettant la réalisation de calculs prenant en compte une physique complexe sur des maillages conséquents.

Pour ce qui est de la modélisation des lits fluidisés, des études précédentes [3-5] ont montré que les modèles en place dans NEPTUNE_CFD permettent de reproduire le comportement de particules de taille relativement élevée – c’est-à-dire de type B selon la classification de Geldart [6]. En revanche, pour des plus petites particules – de type A selon Geldart – l’approche tend à surestimer l’expansion du mélange [7]. Ainsi, afin de prendre en compte les plus petites structures de l’écoulement sans développer un maillage très fin, nous utiliserons une approche similaire à la Simulation des Grandes Echelles mais appliquée aux mélanges gaz-particules. Le principe est de résoudre explicitement les grandes échelles de l’écoulement pour avoir des résultats globaux puis de modéliser l’action des petites échelles, appelées termes de sous-maille, sur les échelles résolues. Ces termes de sous-maille apparaissent par l’application d’un filtrage spatial des équations de Navier-Stokes. Un terme de vitesse de dérive de sous-maille est introduit et modifie la vitesse relative effective utilisée dans la loi de traînée ce qui permet d’obtenir de bons résultats pour les particules de classe A [8-9]. L’avantage de la stratégie est de réduire fortement la puissance de calcul tout en résolvant la majorité des phénomènes physiques d’intérêt.

Objectifs & Programme de recherche : A ce jour, 4 classes de simulations numériques à effectuer ont été identifiées pour étudier la physique des mécanismes en jeu dans un récepteur solaire. Ces différents items constituent la trame du travail de thèse proposé. Pour chacune des tâches prévues, les simulations seront validées par confrontation à la base de données expérimentale disponible :

- ▷ Etude des régimes d’écoulement en condition isotherme : le régime de fluidisation dans le tube des récepteurs varie en fonction du débit d’aération injecté en bas du tube. Les simulations auront pour objectif de reproduire les différents régimes et d’étudier les mécanismes physiques des transitions de régime.
- ▷ Evaluation de l’impact de la condition à la limite sur les régimes d’écoulement : Numériquement, l’aération peut être soit imposée via une augmentation homogène de la vitesse entrante dans le tube soit en considérant localement la buse d’injection en périphérie du tube au prix d’un maillage plus raffiné dans cette zone. Les avantages et limites des deux configurations seront évalués.
- ▷ Etude des régimes d’écoulement sous flux solaire concentré : Les expériences ont montré que la température influe fortement sur les seuils de transitions entre les régimes. Les mécanismes physiques modifiant ces transitions restent cependant mal compris. Les simulations permettront une étude fine de ce phénomène. De plus, les coefficients d’échange paroi-particule seront mesurés pour chaque régime.

- ▷ Exploration des phénomènes en jeu dans le bac d'alimentation (dispenser) : Lors de la mise en circulation de la suspension dans le tube, un déficit de pression dans le dispenser est observé. Les simulations analyseront ce phénomène en fonction du régime de fluidisation dans le dispenser.

Profil : Nous recherchons des candidats/candidates de niveau master avec une spécialisation en mécanique des fluides ou en énergétique. Compte tenu du programme de recherche, une appétence pour l'informatique et la modélisation est indispensable. Une habileté avec linux et un langage de programmation (C/C++,Python) sera appréciée mais n'est pas nécessaire.

Lieu de stage : Laboratoire PROMES – Site de Perpignan.

Rémunération : ≈ 1500 €/mois selon le barème de l'Ecole Doctorale [↗ ED305](#)

Candidature : Les lettres de candidature devront être accompagnées d'un CV et adressées à Samuel Mer : samuel.mer@univ-perp.fr, Adrien Toutant : adrien.toutant@univ-perp.fr

[↗ Candidater](#)

Références :

- [1] Flamant, G. ; Hemati, H. Dispositif Collecteur D'énergie Solaire. French Patent FR 1058565, 20 Octobre 2010 ; PCT extension WO2012052661, 26 avril 2012.
- [2] Gueguen, R. ; Sahuquet, G. ; Mer, S. ; Toutant, A. ; Bataille, F. ; Flamant, G. Gas-Solid Flow in a Fluidized-Particle Tubular Solar Receiver : Off-Sun Experimental Flow Regimes Characterization. *Energies* 2021, 14, 7392.
- [3] Balzer, G. ; Boelle, A. ; Simonin, O. Eulerian gas-solid flow modelling of dense fluidized bed. *Fluidization*. 1995 ;8 :1125.
- [4] Gobin, A. ; Neau, H. ; Simonin, O. ; Llinas, J. ; Reiling, V. ; Slo J. Fluid dynamic numerical simulation of a gas phase polymerisation reactor. *Int J Numer Meth Fluids*. 2003 ; 43 :1199–1220.
- [5] Van Wachem, BGM. ; Schouten, JC. ; Van den Bleek, CM. ; Krishna, R. ; Sinclair, JL. Comparative analysis of CFD models of dense gas–solid systems. *AIChE J*. 2001 ;47 :1035–1051.
- [6] Geldart, D. Chap.2 : Single particles, Fixed and Quiescent Beds. In *Gas Fluidization Technology* ; John Wiley & Sons Ltd. : Chiches-ter, U.K., 1986 ; pp. 11–32.
- [7] Wang J. A review of eulerian simulation of geldart a particles in gas-fluidized beds. *Ind Eng Chem Res*. 2009 ;48 :5567–5577.
- [8] Sabatier, F. ; Ansart, R. ; Zhang, H. ; Baeyens, J. ; Simonin, O. Experiments support simulations by NEPTUNE CFD Code in a Upflow Bubbling Fluidized Bed reactor. *Chem. Eng. J*. 2020, 385, 123568.
- [9] Deng, Y. ; Sabatier, F. ; Dewil, R. ; Flamant, G. ; Le Gal, A. ; Gueguen, R. ; Baeyens, J. ; Li, S. ; Ansart, R. Dense upflow fluidized bed (DUFb) solar receivers of high aspect ratio : Different fluidization modes through inserting bubble rupture promoters. *Chem. Eng. J*. 2021, 418, 129376.