

Etude dynamique et thermique d'un lit fluidisé dense en Euler-Lagrange/DEM

Claudia CADILE^{1*}, Frédéric TOPIN¹, Lounès TADRIST¹

¹Laboratoire IUSTI, UMR 7343, CNRS, Aix Marseille Université, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13

* (auteur correspondant : ccadile@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - L'objectif de cette étude est de comprendre les différents phénomènes liés à la gazéification de la biomasse en lit fluidisé dense. Nous nous intéressons, dans un premier temps, à la caractérisation comportementale d'un lit fluidisé dense peu profond (LFDPP). Ensuite, nous réalisons une étude thermique d'un système 3D afin d'identifier les paramètres influant sur les échanges entre phases, dont l'objectif est de trouver une loi de comportement thermique dédiée aux lits fluidisés denses. La phase gazeuse sera modélisée comme un continuum (Navier-Stokes), et la phase solide sera traitée via la « discrete element method » (DEM), comprenant un modèle collisionnel appelé « sphères molles ». Parmi les résultats obtenus, nous retrouvons qualitativement les principales caractéristiques de la dynamique du lit tant au plan thermique qu'hydrodynamique.

Nomenclature

v, u	vitesse, $m.s^{-1}$	k	constante de raideur, $N.m^{-1}$
T	température, K	i	vecteur unité
C_p	capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
D	diamètre, m	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
S	surface d'échange, m^2	μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
V	volume, m^3	α	fraction volumique
\dot{m}	débit massique, $kg.s^{-1}$	δ	distance d'interpénétration, m
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	γ	coefficient d'amortissement, N
t	temps, s	<i>Indices et exposants</i>	
f	fréquence, Hz	p	particules
\hat{f}	fréquence renormée	g	gaz
g	gravité terrestre, $m.s^{-2}$	cp	compacité maximale des particules
H	hauteur, m	i	phase i
N_p	nombre de couches de particules	DPM	« discrete phase model »
F_D	force de traînée, $N.kg^{-1}$	$1,2$	numéro de la particule
C_D	coefficient de frottement	0	initial
K	échange de moment de force, $N.m^{-3}$		

1. Introduction

La gazéification du bois est une technique très ancienne qui remonte aux débuts de la révolution industrielle. Les récentes discussions sur le changement climatique, les émissions de CO₂, et de la disponibilité limitée de combustibles fossiles ont renouvelé l'intérêt pour le gaz provenant de la biomasse. Les systèmes actuels de gazéification comprennent des réacteurs à lit fixe ou mobile, fluidisé ou circulant, ou encore avec des brûleurs à combustible pulvérisé. Les avantages de réacteurs à lit fluidisé sont le bon mélange entre les différentes phases favorisant les transferts de chaleur et de masse, et une bonne performance pour une large gamme de qualités de carburant. En dépit de la longue tradition d'utilisation de gaz combustible à partir de la gazéification du bois, il existe encore un manque de connaissances scientifiques significatif sur le détail des interactions complexes entre les réactions de gazéification et de l'hydrodynamique de lits fluidisés.

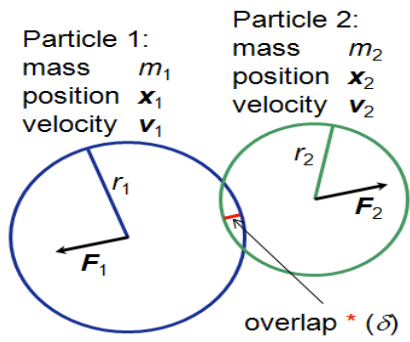


Figure 1: *particules représentées par des "sphères molles"*

L'objectif de ce travail est d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes de fluidisation à différentes échelles en vue d'élaborer un outil de simulation numérique, permettant de définir des règles de design des réacteurs.

Nous détaillons ici deux cas tests à échelles et configurations différentes dans le but d'évaluer les grandeurs caractéristiques du système localement, et de les formaliser macroscopiquement [1]. Quelques points clés, représentatifs de configurations expérimentales, sont étudiés comme l'étude hydrodynamique 3D d'un lit fluidisé dense peu profond (LFDPP). Les échanges thermiques sont également traités, plus

conceptuellement, à l'échelle d'un lit quasi-3D et comparés ensuite à un modèle analytique. La méthode employée est une approche Euler (gaz) / DEM (particules, biomasse) en utilisant l'outil CFD Fluent v14.5 de Ansys. Les collisions interparticulaires seront traitées en utilisant un modèle de « sphères molles ».

La validation hydrodynamique est réalisée à partir des expériences de Sierra [2]. Ce dernier a étudié l'influence des conditions aux limites sur la dynamique des lits denses, en définissant la fréquence de battement propre au lit. Pour l'étude des modèles thermiques, il s'agit de mettre en place un lit fluidisé dense chauffé par le biais d'un gaz entrant, et d'étudier l'évolution du profil de température au travers de ce lit pour en déduire le coefficient d'échange entre phases. Nous comparerons ensuite ces résultats à ceux obtenus par un modèle analytique basé sur un poreux homogène.

1. Modèles mathématiques

1.1. Phase continue

La phase gazeuse sera modélisée selon une approche eulérienne, régie par les équations de conservations de Navier-Stokes 3D [3]. La force de trainée sera décrite par le modèle de Morsi & Alexander [4] dans le cas présent.

1.2. Phase discrète

L'approche DEM se différencie de la DPM (Discrete Phase Model) en ce que chaque parcel, suivi individuellement, représente un groupe de particules. La dynamique des parcelles est donc régie par des équations moyennées :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \bar{\mathbf{v}}_p) = \sum_{p=1}^n (m_{gp} \dot{m}_{gp} - m_{gp}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p \bar{\mathbf{v}}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \bar{\mathbf{v}}_p \bar{\mathbf{v}}_p) = -\alpha_p \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_p \mu_p (\nabla \bar{\mathbf{v}}_p + \nabla \bar{\mathbf{v}}_p^T)) + \alpha_p \rho_p \vec{g} + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{gp} \bar{\mathbf{v}}_{gp} - \bar{\mathbf{v}}_{gq} \dot{m}_{gq} + \bar{K}_{qp} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_p)) + K_{DPM} (\bar{\mathbf{v}}_{DPM} - \bar{\mathbf{v}}_p) \quad (2)$$

Le modèle DEM est basé sur les travaux de Cundall & Strack [5], dont le calcul des forces résultantes des collisions de particules (dit « sphère molle ») est déterminé par la déformation, mesurée par le chevauchement interparticulaire (Figure 1).

$$\mathbf{F}_1 = (k\delta + \gamma(\bar{\mathbf{v}}_{12} \cdot \bar{\mathbf{l}}_{12})) \bar{\mathbf{l}}_{12} \quad \& \quad \bar{\mathbf{F}}_2 = -\bar{\mathbf{F}}_1 \quad (3) \& (4)$$

2. Développement des modèles : discussions et résultats

2.1. Etude de la dynamique d'un LFDPP (lit fluidisé dense peu profond)

2.1.1. Description



Figure 2: photographie de la surface libre d'un lit fluidisé dense peu profond

Dans la littérature, les données sont usuellement moyennées (dans le temps et l'espace) et il n'existe comparativement que très peu de données quantitatives exploitables relatives à la dynamique de comportement d'un lit fluidisé dense. Nous pouvons trouver des éléments de comparaison sur des profils de concentration de particules et/ou de gaz sur une section donnée [6], des profils de vitesse en sortie du lit [6], des mesures de hauteur de lit obtenue par expansion [7 - 8], ou encore des suivis de vitesse de bulle dans le lit [8].

En outre, la majorité des outils CFD a déjà été validée (avec des approches euler/euler principalement) par comparaison avec les valeurs moyennées au plan hydrodynamique (par exemple : taux de vide moyen) [9 - 11]. N.Herzog et al. [11] présentent une étude comparative des logiciels OpenFoam, Mfix, et Fluent dont les meilleurs accords avec les données expérimentales ont été obtenus par Fluent et Mfix. Il est à noter que toutes ces simulations ont été étudiées en 2D, et majoritairement en euler-euler. Nous n'avons pas encore trouvé de comparaison similaire au plan du couplage thermique-écoulement en lit dense. De même, l'approche DEM ne fait encore l'objet que d'un nombre restreint de travaux. L'originalité de ce travail vient de l'étude 3D, et instationnaire en euler-DEM.

Nous nous sommes basés sur les expériences réalisées par Sierra [2], qui consistaient en l'observation comportementale de LFDPP et à leur caractérisation. Pour cela, il s'est basé sur des mesures de pertes de charges entre l'entrée du gaz et le sommet du lit, reflétant une dynamique périodique. Il a identifié ainsi une fréquence d'oscillation du lit.

Comme illustré dans la figure 2, le débit d'air est bien homogène sur toute la surface d'entrée du réacteur ce qui permet de restreindre le domaine de manière axisymétrique. C'est dans une optique de simplification du système et de précision optimale que nous avons choisi de travailler en lagrangien pur (1particule/parcel) pour pouvoir valider l'outil numérique utilisé ici (Figure 3).

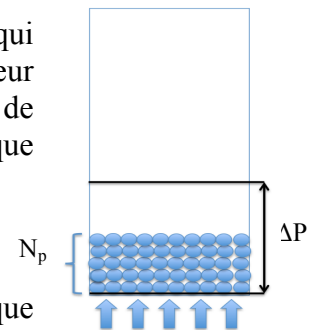


Figure 3: schéma du système

	<i>longueur</i>	<i>largeur</i>	<i>H</i>	<i>Taille maille</i>
Géométrie	m	m	m	m
	0,01	0,01	0,06	0,005
Air	ρ	μ	<i>T</i>	U_g
	kg.m ⁻³	kg.m ⁻¹ .s ⁻¹	K	m.s ⁻¹
	1,225	1,7894.10 ⁻⁵	298,15	1,3 ; 1,5 ; 1,7 ; 1,9 ; 2 ; 2,5 ; 3
Particules	ρ	<i>T</i>	$D_{parcel} = D_p$	N_p
	kg.m ⁻³	K	µm	
	8802	298,15	170	17 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40

Tableau 1 : Données de référence du cas étudié

2.1.2. Résultats & Discussions

Nous avons réalisé une première série de mesure dans les conditions expérimentales proche du seuil de fluidisation mais les signaux obtenus numériquement ne sont pas exploitables pour le moment. Nous avons donc augmenté la vitesse de gaz jusqu'à obtenir des amplitudes de fluctuations de pertes de charge utilisables.

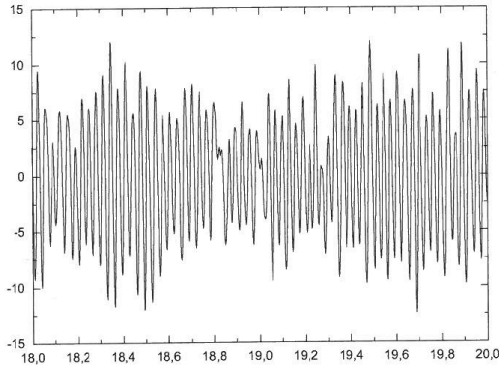


Figure 3: signal de perte de charge en fonction du temps expérimental pour $N_p=7$ et $u_g=0,13m.s^{-1}$ [9]

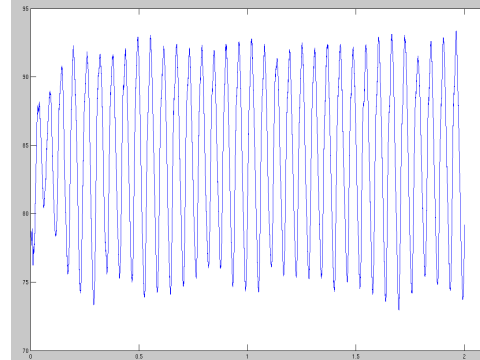


Figure 4: signal de perte de charge en fonction du temps numérique pour $N_p=12$ et $u_g=1,3m.s^{-1}$

Pour pouvoir étudier l'influence de la hauteur du lit (nombre de couches de particules), pour une vitesse de fluidisation donnée, sur la dynamique du lit, Sierra a démontré que la loi de Baskakov et al. (1986) pouvait être utilisable en guise de première approximation comportementale du lit :

$$\hat{f} = \pi \left(\frac{H_{cp}}{g} \right)^{1/2} f \quad (5)$$

Entre autre, il a étudié le cas de lit à particules de forte densité et de petite taille (Tableau 1) dont la dynamique de lit obtenue correspondait à une évolution typique de fréquence normalisée (Figure 5). Nous pouvons y voir deux régimes de comportement dépendants du nombre couches de particules N_p , séparés par une hauteur critique N_p^* . Nous retrouvons qualitativement cette dynamique via la simulation (Figure 6).

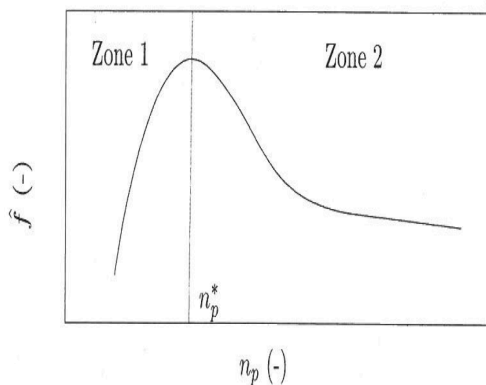


Figure 5: évolution de la fréquence renormalisée en fonction de N_p [9]

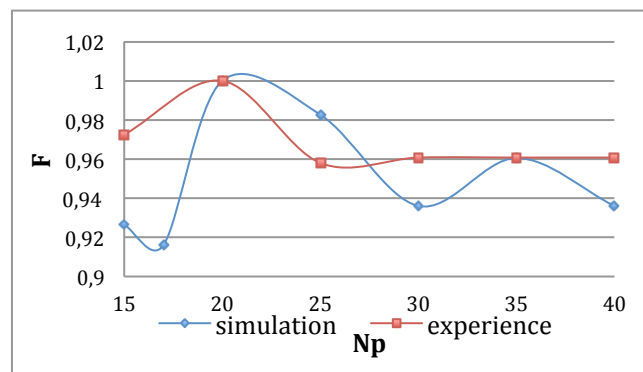


Figure 6: Comparaison entre données expérimentales pour $u_g = 0,13$ m/s et résultats de simulation pour $u_g = 1,3$ m/s (avec $F = \frac{\hat{f}}{\max(\hat{f})}$)

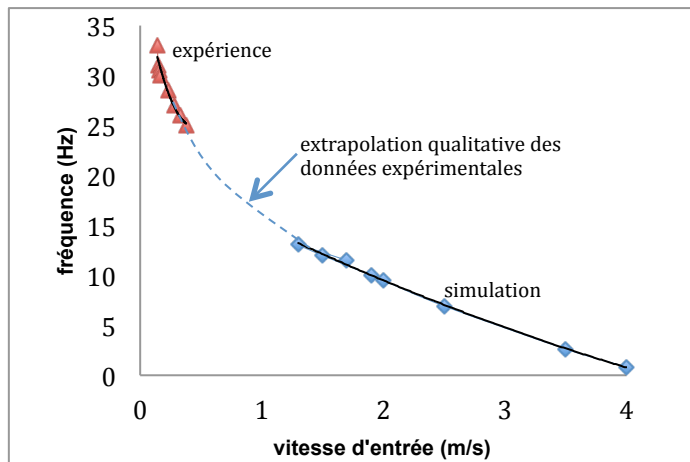


Figure 7: évolution de la fréquence en fonction de la vitesse d'entrée de fluide : $N_p = 20$

Nous avons voulu regarder également l'influence de la vitesse de fluidisation sur la fréquence de battement du lit malheureusement, les limites numériques ne nous ont pas permis de simuler des points directement comparables aux expériences (Figure 7).

Nos premiers résultats semblent suivre qualitativement la tendance expérimentale.

Les résultats de simulation sont donc comparables à ceux de la littérature.

2.2. Etude thermique d'un lit dense : comparaison à un modèle analytique

2.2.1. Description

La procédure de validation du système consiste à pouvoir s'appuyer sur des éléments de comparaison avec des configurations similaires, où nous avons imposé dans le modèle numérique une vitesse minimale de fluidisation en entrée du lit. L'état obtenu de celui-ci est quasiment statique, ce qui conduit à notre choix d'un modèle analytique en lit fixe.

Nous cherchons à comprendre l'influence de la fluidisation du lit sur les échanges entre phases et à en déterminer les propriétés thermiques. Ainsi, un modèle 3D de lit étroit a été développé, d'une épaisseur de deux particules ($D_p = 0,003\text{m}$), sur une hauteur de 11,3 cm. Le gaz entrant est constitué d'air à 1000 K, avec une vitesse imposée de 1 m.s^{-1} .

	<i>longueur</i>	<i>largeur</i>	<i>H</i>	<i>Taille maille</i>
Géométrie	m	m	m	m
	0,096	0,008	0,6	0,004
	ρ	μ	<i>T</i>	C_p
Air	kg.m^{-3}	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	K	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}$
	1,225	$1,7894.10^{-5}$	1000	1006,43
	ρ	<i>T</i>	$D_{parcel} = D_p$	C_p
Particules	kg.m^{-3}	K	m	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}$
	1550	300	0,003	1680

Tableau 2 : Données de référence du cas étudié

Le lit est constitué de 3989 particules au total dont nous allons regarder l'évolution de température au cours du temps en faisant une moyenne massique volumique par tranche de 1 cm pour chacune des phases:

$$\frac{\int \rho T dV}{\int \rho dV} = \frac{\sum T_i \rho_i |V_i|}{\sum \rho_i |V_i|} \quad (6)$$

2.2.2. Modèle analytique développé

Le modèle analytique sur lequel nous allons nous référer est formulé à partir des hypothèses suivantes :

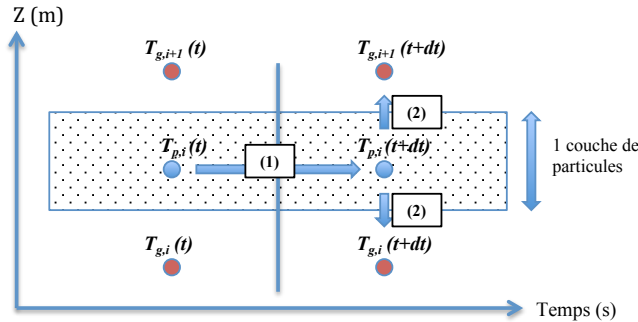
- le lit est fixe : les particules sont immobiles

- la propagation de chaleur par conduction est négligée
- les couches de particules sont considérées comme des milieux homogènes

Ce qui revient à écrire :

$$\dot{m}_g C_{p,g} (T_{g,0} - T_g) = hS(T_g - T_p) = m_p C_{p,p} \frac{(T_p(t+dt) - T_p(t))}{dt} \quad (7)$$

Le bilan est déterminé par les étapes (1) et (2) décrites en Figure 9.



L'indice i correspond aux coordonnées physiques de l'espace, les indices g et p correspondent respectivement à la phase gazeuse et particule.

Figure 9: étapes de calcul de température pour chacune des phases

2.2.3. Résultats et discussions

Dans un premier temps, nous avons étudié les résultats d'évolution de température au cours du temps sur les quatre premières couches du lit pour les deux phases (gaz/particules). Nous avons identifié le coefficient h, supposé constant dans tout le lit, à partir des données issues de la simulation directe. Pour ce faire, nous ajustons h de manière à minimiser les écarts entre le modèle analytique et les données de Fluent (Figures 11 et 12).

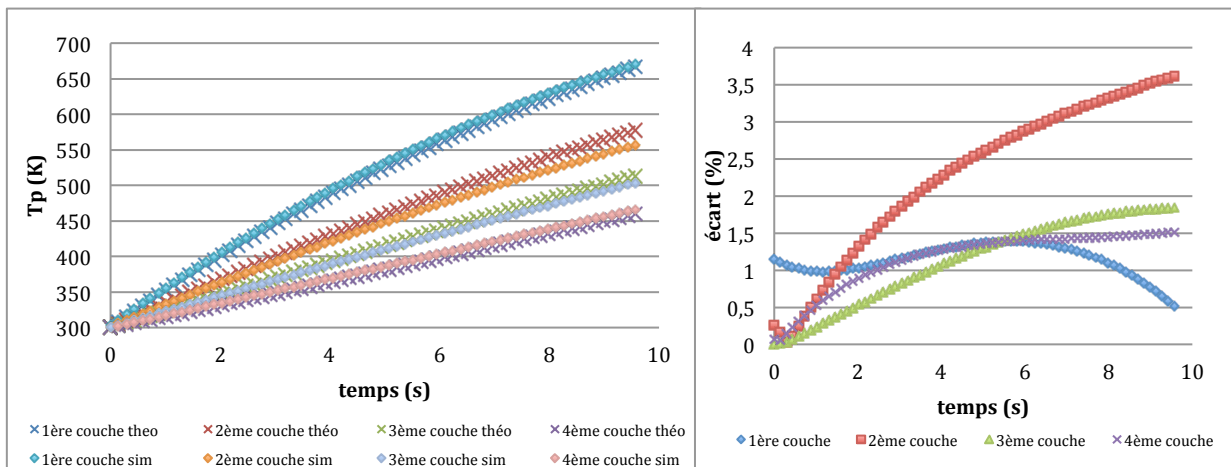


Figure 11: comparaison entre le modèle analytique (h constant) et les données de simulation: évolution de la température des particules

Figure 12: écart entre théorie (h constant) et simulation sur l'évolution des températures de particules

Avec moins de 3% d'écart (Figures 12), les données analytiques sont en adéquation avec les résultats issus de la simulation, qui de plus, nous atteste sur la viabilité de l'outil CFD utilisé.

La valeur moyenne optimale du h obtenue est de $137 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Elle est comparable aux données de la littérature [12 - 13], où sont exposées des données expérimentales dans des configurations proches de notre modèle et donnent des résultats de mesure de coefficient d'échange dans une gamme de valeurs comprises entre 100 et $150 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Puis, en appliquant les données de notre modèle à la corrélation décrite par Morelus et al. [12], nous obtenons une estimation du coefficient d'échange entre phase de $124 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Le modèle analytique développé ici présente donc des valeurs cohérentes, et il en est de même pour les données issues de simulation.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'évolution temporelle des échanges thermiques entre phases à l'échelle d'une couche que nous reportons sur les figures suivantes :

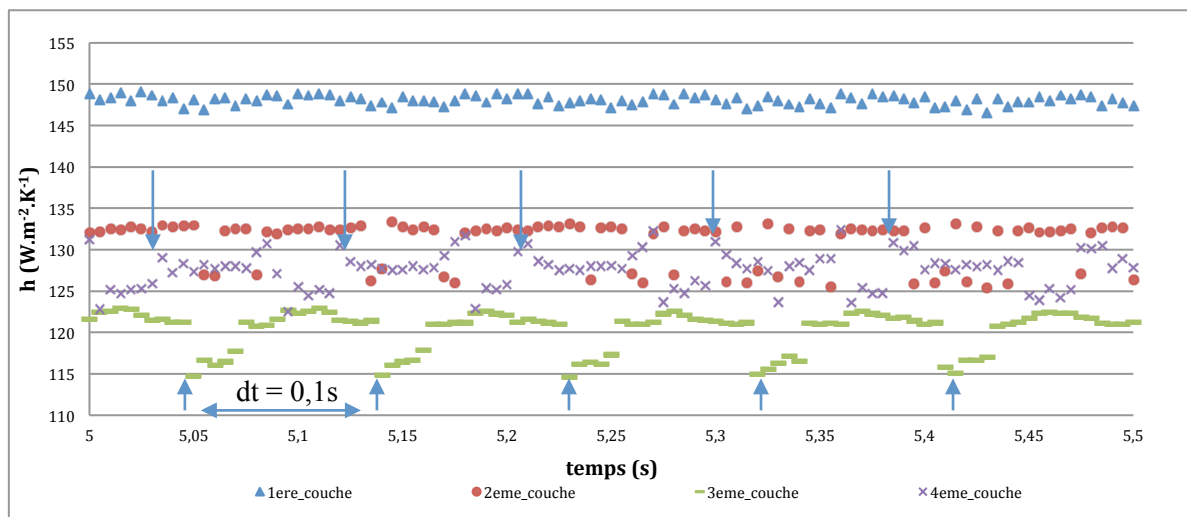


Figure 13: évolution du coefficient h en fonction du temps, localement pour chaque couche

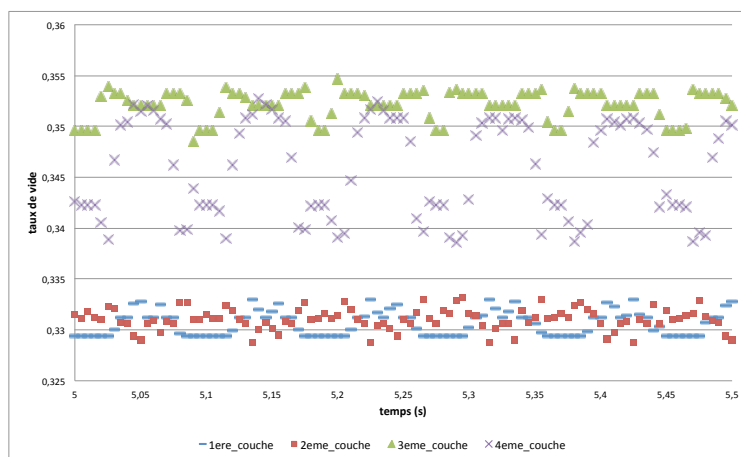


Figure 14: taux de vide de gaz en fonction du temps

Pour chaque couche nous avons une valeur à peu près constante avec un passage de perturbations régulière (Figure 13) à une fréquence d'environ 10 Hz. Cette dernière correspond aux valeurs attendues pour la fréquence de battement du lit en extrapolant les données expérimentales de Sierra [2] au cas présent. Nous les retrouvons également sur les signaux de taux de vide du gaz (Figure 14).

Pour conclure, nous retrouvons bien le comportement thermique global, et au niveau local, nous voyons bien les perturbations hydrodynamiques dans les transferts de chaleur.

3. Conclusion

Grâce aux données de la littérature, nous avons pu identifier les modèles correspondant à notre problème et certifier l'outil CFD. Les résultats obtenus sont cohérents, décrivant le comportement hydrodynamique et thermique d'un lit fluidisé dense, en s'appuyant sur des données expérimentales, et sur un modèle analytique en lit fixe.

Cette étape de vérification est nécessaire à la fois pour la validation des modèles, pour prédire le caractère instationnaire du lit et l'adapter à la gazéification de la biomasse. Nous pourrions également développer, par des études paramétriques, des lois de comportement 3D pour des lits fluidisés denses à plus grande échelle.

Références

- [1] O. Simonin, H. Neau, « Simulation numérique de l'hydrodynamique et des transferts dans les réacteurs gaz-particules à lit fluidisé », *Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)*, France, 2009.
- [2] C. Sierra, « Instabilité en fluidisation gaz-solide: dynamique des lits denses et influence des conditions aux limites », *Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, UMR 7343, CNRS*, France, 2002.
- [3] K. K. Kuo, « Principles of combustion », *New York: John Wiley & Sons*, 1986
- [4] S. A. Morsi & A. Alexander, « An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems », *Department of Mechanical Engineering, University of Surrey Loughborough University of Technology*, 1971.
- [5] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, « A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies » *Geotechnique*. 29. 47-65. 1979.
- [6] S. Dan et al. « Numerical simulation of gas-particle flow with a second-order moment method in bubbling fluidized beds », *Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Illinois Institute of Technology, Chicago, USA*, 2010.
- [7] Xianfeng Fan, Zhufang Yang, David J. Parker, Brian Armstrong, « Prediction of bubble behaviour in fluidised beds based on solid motion and flow structure », *University of Birmingham, UK*, 2007.
- [8] X. Fan et al. « The effect of bed materials on the solid/bubble motion in a fluidised bed », *University of Birmingham, UK*, 2007.
- [9] R. Liang-wan, Z. Jie-min, « Improved DEM-CFD model and validation : a conical-base spouted bed simulation study », *Sun Yat-sen University, Guangzhou, China*, 2010.
- [10] X. Wang, X. Sun, « Effects of non-uniform inlet boundary conditions and lift force on prediction of phase distribution in upward bubbly flows with Fluent-IATE », *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Ohio State University, USA*, 2011.
- [11] N. Herzog et al. « A comparative study of different CFD-codes for numerical simulation of gas–solid fluidized bed hydrodynamics », *Brandenburg University of Technology Cottbus, Cottbus, Germany*, 2011.
- [12] O. Molerus, A. Burschka, S. Dietz, « Particle migration at solid surfaces and heat transfer in bubbling fluidized bed », *Erlangen University, Nürnberg, Germany*, 1994.
- [13] K. Pisters, A. Prakash, « Investigations of axial and radial variations of heat transfer coefficient in bubbling fluidized bed with fast response probe », *the University of Western Ontario, London, Ontario, Canada*, 2010.