



**HAL**  
open science

# Étude expérimentale et simulation de la ségrégation mécanique et thermique de billes millimétriques dans un séchoir de type tambour tournant

Aline Mesnier

► **To cite this version:**

Aline Mesnier. Étude expérimentale et simulation de la ségrégation mécanique et thermique de billes millimétriques dans un séchoir de type tambour tournant. Génie des procédés. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSE1046 . tel-02180891

**HAL Id: tel-02180891**

**<https://theses.hal.science/tel-02180891>**

Submitted on 11 Jul 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre NNT : xxx

## **THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**

opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 206**  
**Ecole Doctorale de Chimie de Lyon**

**Spécialité de doctorat** : Génie des procédés

Soutenue publiquement le 27/03/2019, par :

**Aline Mesnier**

---

# **Etude expérimentale et simulation de la ségrégation mécanique et thermique de billes millimétriques dans un séchoir de type tambour tournant**

---

Devant le jury composé de :

Arlabosse, Patricia	Professeure / RAPSODEE	Rapporteure
Falk, Véronique	Professeure des Universités / LRGP	Rapporteure
Briançon, Stéphanie	Professeure des Universités / LAGEPP	Examinatrice
Vacus, Pascal	Responsable industriel / Sanofi Pasteur	Examineur
Peczalski, Roman	Professeur des Universités / LAGEPP	Directeur de thèse
Vessot, Séverine	Professeure des Universités / LAGEPP	Co-directrice de thèse



# Remerciement

---

Pour ce long projet de trois ans, je tenais à remercier toutes les personnes qui ont été à mes côtés, que ce soit les proches, les scientifiques ou d'autres personnes dont nos chemins se sont croisés, chacun a une part importante dans sa réalisation. C'est pour cela que je tiens à remercier chacune de ces personnes pour leur aide ; quelle qu'elle soit.

Ce travail de thèse a été réalisé principalement au Laboratoire d'Automatique, de Génie des Procédés et de Génie Pharmaceutique (LAGEPP), UMR 5007 à l'université Claude Bernard Lyon 1. Je tiens à remercier la globalité des personnes de ce laboratoire, en particulier, la directrice Mme Stéphanie Briançon pour l'accueil au sein du laboratoire ainsi que Mme Nadia Chapel pour son accueil et sa réactivité.

Je tenais à remercier mes rapporteuses, Mme Véronique Falk et Mme Patricia Arlabosse d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit, ainsi que Mme Stéphanie Briançon d'avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance de thèse, merci à vous trois pour vos commentaires.

Je ne peux que remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, Mr Roman Peczalski, de m'avoir suivi durant ces trois années de travail, malgré quelques divergences, je tenais à vous remercier pour tous vos conseils scientifiques et votre ténacité. Mme Séverine Vessot-Crastes, merci d'avoir été toujours de bons conseils durant ces trois années.

Je tenais à remercier tout particulièrement, Mr Pascal Vacus, sans qui rien n'aurait pu être possible, merci d'avoir placé ta confiance en moi, de ton soutien, de tes conseils et de ton aide inestimable durant ces trois années et demie.

Durant ces trois années, il y a eu deux personnes qui ont été là durant les réunions et les corrections, qui n'ont pas de titre sur ce papier de thèse mais que je tiens grandement à remercier. Mr Julien Andrieu, qui a été présent depuis le début du projet et qui m'a grandement aidé particulièrement sur les corrections, ou par sa présence dans les congrès, merci pour tout ce que vous m'avez apporté. Ensuite Mme Claudia Cogné, arrivée en cours de route grâce à une merveilleuse stagiaire, tu as su apporter un vent de fraîcheur et de renouveau qui a fait beaucoup de bien au bout de deux ans sur le même sujet, alors je tenais à te remercier pour ta présence et tes conseils durant cette dernière année, tu m'as énormément aidé que ce soit scientifiquement ou moralement. Enfin, Mr Guilhem Mollon, merci pour tout ce que vous m'avez apporté comme connaissances sur les milieux granulaires, votre aide a été plus que précieuse.

Ces travaux n'auraient pas pu être réalisés sans l'immense aide de mes trois stagiaires que j'ai eu au fil des années. Ayoub Ait-Aariba, Emna Krid et Maroua Rouabah, qui ont effectué un excellent travail, chacun dans des domaines particuliers, ce travail n'aurait pas été aussi abouti sans vous.

Vient le tour de l'équipe technique du laboratoire, Mr Jean-Pierre Valour pour tous les moments où tu as soutenu mes décisions, Mr Sébastien Urbaniak, je te remercie pas pour tes blagues pourris mais merci de toute l'aide que tu m'as apporté et merci d'avoir d'avoir toujours le sourire, Mme Géradine Agusti, je peux te remercier pour toutes les fois où je suis venue discuter quand je n'en pouvais plus, tu as été la première personne à m'intégrer au sein de ce labo et ce n'était pas gagné alors merci pour tout ça et puis aussi un peu pour le coté

scientifique, et enfin Mr Quentin Lelong, merci pour tous les moments de rigolade, par contre je te remercie pas d'avoir parlé de nourriture chaque minute passé.

Je tenais aussi à remercier les personnes de Sanofi Pasteur, Mr David Jouquot, je ne te remercierais jamais assez pour ton aide et ta patience dans ce labo confiné, ainsi que ces discussions durant les moments d'attentes. Mr Bertrand Woinet, Tu as été là depuis le début et ta confiance et ton soutien ont été grandement bénéfique, merci d'avoir suivi ce projet de près comme de loin. Je tenais à remercier toutes les personnes que j'ai croisées à Sanofi Pasteur, Mr René Labatut qui m'a donné une chance, ainsi que toutes les personnes du K et du T5.

A tous mes co-bureaux, pour m'avoir supporté pensant trois ans, MERCI. Ceux qui sont partis et ceux qui restent, vous avez fait de ces trois ans, des souvenirs inoubliables, mention spéciale à Marouan., Marie-Thé et Pierrot, celui avec qui j'ai partagé entièrement cette thèse, vous savez pas à quel point nos discussions m'ont fait du bien, vive le G231.

Je tenais à remercier tous les autres doctorants et les permanents présents au sein du laboratoire, on a été comme une grande famille, merci de votre aide, de votre présence, de toutes les pauses qu'on a pu passer ensemble.

A mes amis, merci d'être toujours là malgré les années, mes plaintes et mon caractère, il se peut que je me sois plainte durant ces trois ans donc merci de votre écoute et de votre présence permanentes.

Et enfin, je tenais à remercier tout particulièrement ma famille, qui me soutiennent dans tous mes choix, mes parents Jean et Elisabeth ainsi que leur conjoint respectif, mon frère Thomas et sa femme Aurélie, merci d'avoir été là malgré les doutes. Enfin, cette thèse m'a aussi et surtout permis de rencontrer Alexis, qui m'a beaucoup soutenu dans les derniers mois difficiles, et pour cela j'en serais éternellement reconnaissante.

# Résumé

---

La problématique de l'homogénéité de traitement mécanique et thermique d'un lit particulaire bi-disperse en tailles ou en densités dans un tambour tournant horizontal a été abordée. Dans la première partie, le mélange des billes sphériques millimétriques dans un tambour de type 'tranche' a été observé expérimentalement à l'aide des maquettes originales et simulé numériquement à l'aide d'un code commercial de type DEM. En ajustant le coefficient de frottement entre les billes, un accord satisfaisant a été obtenu entre les résultats des simulations et des expériences. Le lit a été globalement caractérisé par l'indice de ségrégation radial, la répartition des billes dans la couche frontale et l'angle de talus dynamique. Des phénomènes importants de ségrégation radiale et axiale ont été mis en évidence. Une réduction très significative de l'indice de ségrégation radiale a été obtenue dans le cas des ailettes multiples et longues par rapport au cas avec peu d'ailettes courtes ou pas d'ailettes. Dans la deuxième partie, le chauffage des billes par contact avec la paroi périphérique du tambour a été simulé par la méthode DEM. Des lits mono-disperse, bi-disperse (comme dans la partie 1), et à dispersion gaussienne ont été considérés. Les indices de ségrégation mécanique et thermique ont été comparés pour les différents types de lits et différentes configurations d'ailettes. L'intensité de la ségrégation thermique a été renforcée, dans l'ensemble, par la ségrégation mécanique et a été la plus forte pour le lit bi-disperses en densités. L'augmentation de la hauteur et du nombre des ailettes a considérablement amélioré l'homogénéité thermique du lit et la vitesse globale de chauffage.

**Mots clés :** Tambour tournant, Lit granulaire disperse, Méthode DEM, Ségrégation, Transfert de chaleur

# Abstract

---

## **Experimental study and modeling of mechanical and thermal segregation of millimetric beads in a rotary drum dryer**

Product homogeneity issue during mechanical and thermal processing of a bi-dispersed bed with two particles' sizes or two particles' densities in a horizontal rotary drum was considered. In the first part, the mixing of milli-metric size spherical beads in a two-dimensional drum was simulated by means of a commercial discrete element software and optically observed in a specially designed laboratory scale device. The spatial distribution of the particles in the front bed section, the radial mechanical segregation index and the dynamic slope angle were analyzed. After adjusting the friction coefficient, the simulation results were close to the experimental ones. Important phenomena of radial and axial segregation have been highlighted. The radial segregation index was found to be significantly decreased by applying an important number of long baffles, while using few short baffles had practically no influence on segregation intensity. In the second part, the heating of the bed of spherical beads in a 2D drum with hot peripheral wall was simulated by means of the discrete element software. Mono-dispersed, gaussian-dispersed and bi-dispersed beds (same as in part 1) were considered. The mechanical segregation and the thermal segregation indexes were calculated for the different types of bed and for different baffles configurations. The thermal segregation was found to be generally enhanced by the mechanical segregation and reached its highest values for the bi-density bed. Increasing the number and the length of the baffles considerably improved the overall heating rate and the thermal homogeneity of the considered beds.

**Key words** : Rotary drum, Dispersed granular beds, DEM method, Segregation, Heat transfer

# Table des matières

---

<i>Remerciement</i> .....	<b>3</b>
<i>Résumé</i> .....	<b>5</b>
<i>Abstract</i> .....	<b>6</b>
<i>Table des matières</i> .....	<b>7</b>
<i>Liste des figures</i> .....	<b>10</b>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<b>15</b>
<i>Nomenclature</i> .....	<b>16</b>
<i>Introduction générale</i> .....	<b>18</b>
<i>Partie 1 : Etude de la ségrégation mécanique d'un lit bi-disperse de billes sphériques millimétriques mélangé dans un tambour tournant type 'tranche'</i> .....	<b>21</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>21</b>
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>22</b>
I. Introduction .....	22
II. Régime d'écoulement granulaire dans un tambour tournant.....	23
A) Régimes d'écoulement.....	23
B) Transitions de régime .....	25
C) Types de configuration des tambours cylindriques.....	26
III. Grandeurs caractéristiques de l'écoulement dans un tambour tournant .....	27
A) Mesure d'angles caractéristiques à différents régimes .....	27
B) Zone statique et zone mobile .....	28
C) Epaisseur de la zone mobile .....	29
IV. Ségrégation au sein du lit des particules.....	31
A) Mécanismes.....	31
B) Ségrégation Radiale .....	32
C) Ségrégation axiale.....	34
V. Conclusion .....	35
<b>MATERIELS ET METHODES</b> .....	<b>36</b>
I. Choix et caractérisation du produit .....	36
A) Propriétés et choix des billes.....	36
B) Granulométrie .....	39
C) Coefficient de frottement.....	40
II. Simulation par la méthode DEM.....	47
A) Méthodes DEM.....	47
B) Propriétés spécifiques à la méthode DEM .....	50



III.	Essais en tambour tournant .....	54
A)	Maquette de tambour tournant.....	54
B)	Acquisition et traitement d'images .....	58
C)	Problèmes rencontrés et solutions.....	60
IV.	Caractéristiques du lit granulaire .....	62
A)	Visualisation de la ségrégation.....	62
B)	Indices de ségrégation.....	63
C)	Angle de talus dynamique .....	66
D)	Fraction des particules ségrégées à la paroi .....	67
E)	Temps à la paroi.....	67
<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>		<b>68</b>
I.	Simulations préliminaires.....	68
A)	Visualisation de la ségrégation.....	69
B)	Indices de ségrégation.....	71
C)	Temps de contact des billes à la paroi.....	73
II.	Ségrégation mécanique sur le petit tambour – Comparaison entre expérimentation et simulation .....	79
A)	Lit bi-tailles .....	80
B)	Lit bi-densités.....	86
III.	Expérimentation sur les moyen et grand tambours .....	93
A)	Tambour de taille moyenne .....	93
B)	Grand tambour .....	103
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>105</b>
<b>Partie 2 : Etude de la ségrégation thermique d'un lit bi-disperse de billes sphériques millimétriques par chauffage en tambour tournant de type 'tranche' .....</b>		<b>106</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>		<b>106</b>
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>		<b>108</b>
I.	Introduction au séchage en tambour tournant .....	108
II.	Notion de séchage .....	109
III.	Transfert de chaleur au sein d'un lit granulaire agité .....	110
IV.	La méthode des éléments discrets appliquée au chauffage.....	112
V.	Coefficient d'échange thermique entre billes.....	116
<b>MATERIELS ET METHODES.....</b>		<b>117</b>
I.	Méthode DEM appliquée à la modélisation du transfert thermique au sein d'un lit granulaire agité de milli-billes.....	117
A)	Modèle de contact thermique selon l'approche DEM .....	118
B)	Modèle du transfert thermique au sein d'une bille .....	121
II.	Configurations étudiées et propriétés des matériaux .....	122
A)	Configurations simulées .....	122
B)	Propriétés thermo-physiques et mécaniques des matériaux et matériels utilisés.....	125

III.	Caractérisation thermique du lit granulaire.....	127
A)	Visualisation de la ségrégation mécanique et thermique.....	127
B)	Indices de ségrégation.....	128
C)	Températures moyennes du lit granulaire.....	129
IV.	Plan d'expériences.....	130
	<b>RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>131</b>
I.	Image thermique du lit.....	131
A)	Analyse de l'image thermique du lit. Etude de cas.....	131
B)	Images thermiques des différents lits en régime mécanique établi.....	135
II.	Comparaisons des résultats pour une configuration géométrique d'ailettes donnée avec différents types de lits.....	138
A)	Géométrie de tambour avec 4 petites ailettes (4PA).....	138
B)	Géométrie de tambour avec 8 grandes ailettes (8GA).....	144
C)	Géométrie de tambour sans ailette (OA).....	146
III.	Comparaison des indices de ségrégation entre tambours avec différentes configurations géométriques d'ailettes.....	148
A)	Lit bi-tailles.....	148
B)	Lit bi-densités.....	154
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>159</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>160</b>
	<b>Bilan des travaux.....</b>	<b>160</b>
	<b>Intérêt de l'étude.....</b>	<b>164</b>
	<b>Perspectives de l'étude.....</b>	<b>164</b>
	<b>Références.....</b>	<b>166</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>169</b>
	<b>ANNEXE 1 : Méthode de calcul pour le comptage de particules pour les simulations.....</b>	<b>169</b>
	<b>ANNEXE 2 : Calcul du nombre de billes nécessaires aux simulations.....</b>	<b>171</b>
	<b>ANNEXE 3 : Etapes pour le calcul de l'indice de ségrégation <math>I_s</math> à la paroi frontale à l'aide des codes Image J et Matlab.....</b>	<b>172</b>
	<b>ANNEXE 4 : Routine du calcul de l'<math>I_s</math> axiale.....</b>	<b>176</b>
	<b>ANNEXE 5 : Routine du calcul de du nombre de contact à la paroi.....</b>	<b>177</b>
	<b>Annexe 6 : Etude paramétrique.....</b>	<b>179</b>
	<b>Annexe 7 : Code Matlab utilisé pour obtenir l'IS thermique.....</b>	<b>180</b>
	<b>Annexe 8 : Validation du modèle thermique.....</b>	<b>183</b>
	<b>Annexe 9 : Calcul du nombre de Biot.....</b>	<b>190</b>

# Liste des figures

---

Figure 1 : Mesure des angles de talus en régime d'écoulement continu à surface libre en S [6]..	25
Figure 2 : Représentation schématique d'une vue axiale du tambour. La différence entre un tambour long (à gauche) et un tambour étroit (à droite) est illustrée. $L_p$ caractérise la largeur de matériau perturbé par les parois. [6] .....	26
Figure 3: Photo du tambour type tranche de diamètre 30 cm et de profondeur 4,2 cm avec un lit composé de billes de cellulose microcristalline et de son moteur. ....	26
Figure 4 : Mesures des angles caractéristiques en tambour tournant avec l'angle d'avalanche en bleu ( $\tau$ ), l'angle de repos en jaune ( $\sigma$ ) pour le régime intermittent et l'angle d'écoulement en vert ( $\rho$ ) pour le régime d'écoulement continu à surface plane .....	28
Figure 5 : Schéma représentant la zone mobile (M) et la zone statique (S) d'un lit en tambour tournant. Avec (a) : base de la zone d'écoulement, point autour duquel les particules tournent dans la zone statique. (b) : Point à la surface libre. La ligne h représente l'épaisseur de la zone mobile et relie a et b perpendiculairement à la surface libre au centre du tambour .....	29
Figure 6 : Schéma de tambour tournant représentant une ségrégation radiale (à gauche) et axiale (à droite) [16].....	32
Figure 7: Illustration des figures de ségrégation en tambour tournant pour des différences de taille (a), de densité (b) et de forme (c) [6] .....	33
Figure 8 : Illustration de l'apparition d'un noyau immobile de particules lors d'un remplissage supérieur à 50% [6].....	33
Figure 9 : Figure schématique représentant les différents types d'ailettes existants avec pour (a) des ailettes en S, pour (b) une ailette centrale à l'axe de révolution, pour (c) des ailettes concaves et pour (d) des ailettes droites à la paroi périphérique .....	34
Figure 10 : Illustration de simulation DEM (méthode des éléments distincts) après 100 tours d'un lit bi-disperse en taille avec un coefficient de frottement nul et une vitesse de 8 rpm .....	35
Figure 11 : Billes d'acétate de cellulose (1280 kg.m <sup>-3</sup> ) de petites tailles à gauche (2mm) et de grande taille à droite (3 mm) composant le lit bi-tailles .....	37
Figure 12 : Billes d'acétate de cellulose (1280 kg.m <sup>-3</sup> , 2mm) à gauche et de polypropylène (910kg.m <sup>-3</sup> , 2mm) à droite composant le lit bi-tailles .....	38
Figure 13 : Billes de cellulose microcristalline à gauche et billes de semoule de couscous à droite utilisées pour un lit poly-disperse en tailles .....	39
Figure 14 : Granulométrie des particules utilisées pour le petit et le moyen tambour .....	39
Figure 15 : Granulométrie des particules utilisées pour le grand tambour .....	40
Figure 16 : Répartition spatiale des billes à la paroi avant (vue de devant) pour les 3 conditions de frottement. ....	41
Figure 17: Répartition spatiale des billes au centre du tambour (vue du milieu) pour les 3 conditions de frottement. ....	41
Figure 18 : Répartition spatiale des billes à la paroi arrière (vue de l'arrière) pour les 3 conditions de frottement .....	41

Figure 19 : Mesure d'angles de talus avec des billes de polypropylène de 2mm .....	43
Figure 20 : Image du logiciel représentant un tas formé de billes d'AC de 2 mm avec un coefficient de frottement de 0,3 et la mesure d'angle. ....	45
Figure 21 : Figure illustrant la géométrie et les forces de 2 grains en interaction en DEM .....	48
Figure 22 : Vue de face de l'équipement d'un tambour tranche .....	54
Figure 23 : Vue des tambours de types tranches (2D) de différents diamètres (30 cm à gauche, 60cm à droite et 160cm au second plan) .....	55
Figure 24 : Schéma de dimensionnement des obturateurs d'ailettes.....	56
Figure 25 : Schéma des grandes ailettes pour petit et moyen tambour réalisées sur mesure.....	57
Figure 26 : Schéma des 10 possibilités de tambour grâce aux ailettes et aux obturateurs .....	57
Figure 27 : Photo du petit tambour tournant au remplissage à volume égal (4 ailettes de 4cm) .	58
Figure 28 : Appareil photo et équipement des tambours tournants .....	59
Figure 29 : Capture d'écran du logiciel Image J .....	60
Figure 30 : Image d'expériences en tambour tournant avec ou sans ajout de talc .....	61
Figure 31 : Photographie de la double ségrégation du lit et du talc .....	62
Figure 32 : Figure explicative des découpages du tambour pour le calcul de l'indice de ségrégation. Découpage (15x15x1) pour l'indice de ségrégation radiale sur la figure de gauche, et découpage (1x1x10) pour l'indice de ségrégation axiale sur la figure de droite. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux plans (x, y, z).....	64
Figure 33 : Graphe représentant l'indice de ségrégation en fonction de la longueur de la cellule	65
Figure 34 : Photographie d'une expérience d'un lit en tambour tournant analysée sous Image J pour la mesure d'angles de talus.....	66
Figure 35 : Répartition des billes dans des plans de coupe du tambour simulé pour un lit bi-disperse en taille avec des billes de 2 mm (bleues) et des billes de 3 mm (rouges) (6 rpm).....	69
Figure 36 : Répartition des billes dans des plans de coupes du tambour simulé pour un lit bi-disperse en densité avec des billes de densité 900kg/m <sup>3</sup> (bleues) et des billes de 1280 kg/m <sup>3</sup> (rouges) (6 rpm).....	70
Figure 37 : Indices de ségrégation pour les lits bi-disperses en taille en fonction des paramètres de la simulation .....	71
Figure 38 : Indices de ségrégation pour les lits bi-disperses en densité en fonction des paramètres de la simulation.....	72
Figure 39 : Evolution de l'indice de ségrégation en fonction du temps pour une simulation bi-tailles avec un taux de remplissage de 1/3 et 8 ailettes de 1 cm (6 rpm).....	73
Figure 40 : Répartition des billes en fonction de leur passage à la paroi dans une configuration de remplissage 1/4 et 4 ailettes de 4 cm .....	74
Figure 41 : Répartition des billes en fonction de leur passage à la paroi dans une configuration de remplissage 1/4 et 4 ailettes de 1 cm .....	75
Figure 42 : Fraction de billes ne passant pas à la paroi en fonction du temps (6 rpm) .....	75
Figure 43 : Fraction des 2 types de billes ne passant pas à la paroi en fonction du temps pour un lit bi-tailles (6 rpm) .....	76
Figure 44 : Fraction de billes ne passant pas à la paroi pour le lit bi-disperse en taille et le lit mono-disperse (6 rpm).....	77
Figure 45 : Nombre de billes ne passant pas à la paroi pour le lit bi-disperse en taille et le lit mono-disperse (6 rpm).....	77

Figure 46 : Nombre de particules passant ou non à la paroi périphérique au cours du temps (chaque minute) réparties par classe définissant le nombre de contacts (les classes les plus nombreuses sont entourées en rouge) pour un lit bi-disperse de remplissage 1/3 avec 4 ailettes de 4 cm. ....	78
Figure 47 : Image comparative de la face frontale du tambour avec un lit bi-disperse en taille, un taux de remplissage de un quart et 8 ailettes de 4 cm à 2 minutes de rotation. (3 rpm) .....	80
Figure 48 : Photographies de la face frontale du tambour tournant au cours des premières secondes de la rotation avec un lit bi-disperse en tailles, un remplissage d'un sixième et 8 ailettes de 1.5cm (3 rpm) .....	81
Figure 49 : Valeurs des Indices de ségrégation à la paroi lors des essais expérimentaux en tambour tournant (3 rpm).....	81
Figure 50 : Valeurs des Indices de ségrégation à la paroi à partir des essais de simulation .....	82
Figure 51 : Différents Is -entier, à la paroi en verre et à la paroi en acier- pour une simulation avec un remplissage de 1/4 et 8 ailettes de 4cm (3 rpm) .....	83
Figure 52 : Valeurs des fractions globales du noyau sur la face frontale à partir des essais expérimentaux (3 rpm).....	84
Figure 53 : Valeurs des fractions globales du noyau sur la face frontale à partir des simulations (3 rpm) .....	84
Figure 54 : Valeurs des angles de talus dynamique à partir des expérimentations (3 rpm) .....	85
Figure 55 : Valeurs des angles de talus dynamique à partir des simulations (3 rpm) .....	86
Figure 56 : Comparaison des images à la paroi pour un remplissage d'un sixième avec 8 ailettes de 1.5cm entre l'expérience et la simulation après 2 minutes de rotation (3 rpm) .....	87
Figure 57 : Photographies des premières secondes de la rotation du tambour tournant avec un lit bi-disperse en densités, un remplissage d'un sixième et 8 ailettes de 1.5cm (3 rpm) .....	87
Figure 58 : Valeurs des indices de ségrégation à la face frontale à partir des expériences .....	88
Figure 59 : Valeurs des indices de ségrégation à la face frontale à partir des simulations (3 rpm).....	89
Figure 60 : Valeurs des fractions globales de particules ségrégées près de la face frontale pour les essais expérimentaux (3 rpm) .....	90
Figure 61 : Valeurs des fractions globales sur la face frontale déduites des simulations (3 rpm) .	90
Figure 62 : Valeurs des angles de talus à partir des expériences sur maquette 2D (3 rpm) .....	91
Figure 63 : Résultats des angles de talus à partir des simulations (3 rpm) .....	91
Figure 64 : Photographies des premières secondes dans le tambour tournant moyen avec un lit bi-disperse en tailles, un remplissage d'un huitième et 12 ailettes de 2.5cm (3 rpm) .....	94
Figure 65 : Valeurs des indices de ségrégation à la paroi à partir des essais expérimentaux (3 rpm) .....	95
Figure 66 : Valeurs des fractions globales à la paroi avant à partir des essais expérimentaux (3 rpm) .....	97
Figure 67 : Valeurs des angles de talus à partir des essais expérimentaux (3 rpm).....	98
Figure 68 : Photographies des premières secondes de la rotation du tambour tournant avec un lit bi-disperse en densités, avec un taux de remplissage de 1/6 et muni de 12 ailettes de 2.5cm de largeur. (3 rpm).....	99
Figure 69 : Valeurs des indices de ségrégation des lits bi-tailles tirés des essais expérimentaux sur le moyen tambour (3 rpm) .....	100

Figure 70 : Valeurs des fractions globales des billes ségréguées à la paroi pour des lits granulaires bi-tailles à partir des essais expérimentaux avec le tambour moyen (3 rpm) .....	101
Figure 71 : Valeurs des angles de talus dynamique des lits bi-tailles à partir des essais expérimentaux sur le moyen tambour (3 rpm).....	102
Figure 72 : Photographie de la disposition du lit bi-disperse en tailles pour le grand tambour ..	103
Figure 73 : Photographie du mélange en tambour tournant soumis à un roulement à surface en S (3 rpm) .....	103
Figure 74 : Photographie du lit bi-disperse en taille dans le grand tambour avec un roulement continu à surface plane (1 rpm) .....	104
Figure 75 : Combinaison des différents modes de transferts de chaleur .....	109
Figure 76 : Transfert de chaleur au sein d'un tambour tournant avec radiation à gauche, convection au milieu et conduction à droite.....	110
Figure 77 : Transfert de chaleur dans le système des éléments thermiques de contact [31] .....	111
Figure 78 : Différentes images au cours du temps d'un lit de particules colorées en fonction de leur température. Le temps augmente de gauche à droite avec t=0, 3 et 9 secondes tandis que la taille des ailettes augmente du haut jusqu'en bas. [32] .....	113
Figure 79 : Evolution de la température moyenne (a) et de l'écart type de la température (b) en fonction du temps avec différents types d'ailettes.[32] .....	114
Figure 80 : Evolution de la température dans un tambour statique ou un tambour tournant avec différentes vitesses de rotation à t=25min. [33] .....	115
Figure 81 : Théorie de Hertz [36].....	119
Figure 82 : Comparaison d'une courbe gaussienne théorique avec la courbe gaussienne utilisée pour les simulations.....	123
Figure 83 : Simulation de l'évolution thermique (°C) d'un lit mono-disperse avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm).....	132
Figure 84 : Profils thermiques au sein d'un lit mono-disperse statique après 14 minutes de chauffage .....	133
Figure 85 : Image des forces compressives au sein d'un lit granulaire mono-disperse statique au bout de 14 minutes (3 rpm) .....	134
Figure 86 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit granulaire bi-taille avec tambour muni de 4 petites ailettes .....	135
Figure 87 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit bi-densités avec 4 petites ailettes (3 rpm) .....	136
Figure 88 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit gaussien avec 4 petites ailettes (3 rpm).....	137
Figure 89 : Evolution des valeurs des indices de ségrégation thermique pour tous types de lits avec une configuration de petites ailettes (3 rpm) .....	138
Figure 90 : Evolution des Indices de ségrégation mécanique de différents lits avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm).....	140
Figure 91 : Evolution des valeurs des températures moyennes pour tous les lits avec une configuration de tambour avec petites ailettes (3 rpm) .....	141
Figure 92 : Images des forces compressives pour le lit mono-disperse à gauche et le lit bi-densités à droite à 14 minutes. (3 rpm) .....	143

Figure 93 : Evolution des indices de ségrégation thermique et des indices de ségrégation mécanique pour les lits granulaires bi-tailles et bi-densités avec tambour muni de 8 grandes ailettes (3 rpm) .....	144
Figure 94 : Evolution des températures moyennes des lits granulaires bi-disperse en tailles et en densités avec une configuration de tambour muni de 8 grandes ailettes chauffées (3 rpm) .....	145
Figure 95 : Evolution des Indices de ségrégation thermique et mécanique pour les lits granulaires bi-densités et les lits bi-tailles avec une configuration de tambour sans ailettes (3 rpm) .....	146
Figure 96 : Profils de températures moyennes au sein des lits bi-densités et bi-tailles avec une configuration de tambour sans ailettes (3 rpm) .....	147
Figure 97 : Evolution des Indices de ségrégation mécanique et thermique avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes pour un lit granulaire bi-tailles (3 rpm).....	148
Figure 98 : Températures moyennes du lit granulaire bi-tailles avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes (3 rpm) .....	151
Figure 99 : Evolution des indices de ségrégation pour chaque type de population pour un lit granulaires bi-tailles avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm) .....	152
Figure 100 : Températures moyennes du lit granulaire bi-tailles en fonction de chaque type de simulation avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm).....	153
Figure 101 : Evolution des indices de ségrégation thermique et mécanique pour un lit bi-densités avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes (3 rpm) .....	154
Figure 102 : Températures moyennes des lits granulaires bi-densités avec différentes configurations de tambour (3 rpm).....	156
Figure 103 : Evolution des indices de ségrégation pour chaque type de population pour un lit granulaires bi-densités avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm) .....	157
Figure 104 : Températures moyennes pour chaque type de particules dans le lit bi-densités avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3rpm).....	158
Figure 105 : Image de la 1ère étape sous Image J "sélection et suppression de l'arrière-plan" ..	172
Figure 106 : Image de l'étape 2 sous Image J "réglages de l'échelle" .....	172
Figure 107 : Image de l'étape 3 sous Image J "seuillage de l'image » .....	173
Figure 108 : Image de l'étape 4 sous Image J "conversion » .....	174
Figure 109 : Image de l'étape 5 sous image j "Comptage des particules" .....	174
Figure 110 : Images thermiques de la simulation de Weigler en lit statique .....	185
Figure 111 : Représentation graphique de la simulation de Weigler et celle de notre étude en lit statique.....	185
Figure 112 : Images thermiques de la simulation de Weigler en lit agité. ....	186
Figure 113 : Représentation graphique de la simulation de Weigler et celle de notre étude en lit agité.....	187

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Régime d'écoulement en tambour tournant et leurs propriétés [4].....	24
Tableau 2 : Expression des paramètres caractéristiques des zones d'écoulement intervenant dans les modèles théoriques ou dans les mesures expérimentales [6].....	30
Tableau 3 : Propriétés des différentes billes pouvant être utilisées en tambour tournant, les billes sélectionnées sont en rouge, les valeurs avec * sont des valeurs mesurées .....	37
Tableau 4 : Indice de ségrégation radiale dans 3 couches du lit pour différentes conditions de frottement aux parois.....	42
Tableau 5 : Résultats des essais expérimentaux d'angles de talus avec différentes particules et différentes tailles et types de surface. (Unité : degré).....	44
Tableau 6 : Valeurs simulées des angles de talus naturel pour chaque type de billes en fonction du coefficient de frottement et comparaison aux valeurs expérimentales.....	46
Tableau 7 : Propriétés des matériaux utilisés pour les particules .....	50
Tableau 8 : Propriétés des matériaux utilisés pour le tambour .....	51
Tableau 9 : Coefficient de frottement entre les différents matériaux.....	51
Tableau 10 : Nombre de billes nécessaires en simulation .....	52
Tableau 11 : Nombres de particules nécessaire pour les simulations préliminaires .....	53
Tableau 12 : Dimensions des tambours tranches.....	55
Tableau 13 : Possibilité d'expériences grâce aux ailettes et aux obturateurs construits sur le petit et le moyen tambour .....	57
Tableau 14 : Plan de simulations des simulations préliminaires .....	68
Tableau 15 : Pourcentage total de billes ne touchant pas la paroi dans les différentes simulations et pour un lit bi-disperse en taille (2 et 3 mm). .....	73
Tableau 16 : Pourcentage total de billes ne touchant pas la paroi en fonction dans les différentes simulations et pour un lit bi-disperse en densité. ....	74
Tableau 17 : Plan d'expériences des essais expérimentaux et de simulation pour chacun des lits bi-disperse .....	79
Tableau 18 : Plan d'expériences des essais expérimentaux et de simulation pour chacun des lits bi-disperse .....	93
Tableau 19 : Nombre de billes nécessaires aux essais de simulation du transfert thermique ..	123
Tableau 20 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux.....	126
Tableau 21 : Coefficients de frottement statique solide-solide .....	126
Tableau 22 : Pas de temps et "Grid cells" pour chaque type de lits.....	127
Tableau 23 : Plan d'expériences des simulations réalisées .....	130
Tableau 24 : Nombre de contacts totaux au sein de tous les types de lits .....	142
Tableau 25 : Masse et densité unitaires moyennes des billes utilisées pour les expériences ...	169
Tableau 26 : Porosité externe des particules .....	170
Tableau 27 : Nombre de particules pour remplir le tambour .....	170
Tableau 28 : Etude paramétrique sur les paramètres les plus influents sur la vitesse de chauffage .....	179
Tableau 29 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux- Simulation Weigler.....	184
Tableau 30 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux – Simulation Vargas.....	188



# Nomenclature

---

## Lettres romaines

C	Fraction de particules dans le zone i	-
$\bar{C}$	Fraction moyenne des particules j dans tout le lit	-
Cp	Capacité thermique	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
D	Diamètre du tambour	m
d	Diamètre des particules	m
e	Coefficient d'élasticité	Pa
E	Module de Young	Pa
Fr	Nombre de Froude	-
F	Force	N
g	Accélération de la pesanteur	m.s <sup>-2</sup>
h	Epaisseur de la zone mobile	m
K	Conductance thermique	W.K <sup>-1</sup>
L	Nombre de zones découpées dans le lit	-
m	Masse	kg
N'	Nombre de particules de type j dans la zone i	-
N	Nombre total de particules présentes dans la zone i	-
n	Nombre totale de particules d'acétate de cellulose	-
p	Nombre de particules du même type	-
$\dot{Q}$	Flux thermique	W
q	Nombre de particules de polypropylène	-
R	Rayon du tambour	m
r	Rayon effectif d'une particule	m
Rc	Rayon de contact	m
T	Température	K
t	Temps	s
V	Vitesse	m.s <sup>-1</sup>
w	vitesse de rotation	tr.s <sup>-1</sup>

## Lettres grecques

$\alpha$	Coefficient de transfert de chaleur	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$\beta$	Coefficient d'amortissement	kg.s <sup>-1</sup>
$\delta$	Profondeur d'interpénétration	m
$\varepsilon$	Porosité du lit	-
$\theta$	Angle de talus	°
$\lambda$	Conductivité thermique	W.m <sup>-1</sup>
$\nu$	Coefficient de Poisson	-
$\Omega$	Vitesse de rotation angulaire du tambour	s <sup>-1</sup>

## Indices

i	Particule i
j	Particule j

## Acronymes

A	Ailettes
AC	Acétate de cellulose
DEM	Discrete element method
GA	Grandes ailettes
IS	Indice de ségrégation
ISA	Indices de ségrégation arrière
ISF	Indices de ségrégation frontale
ISG	Indices de ségrégation globale
ISM	Indices de ségrégation mécanique
IST	Indices de ségrégation thermique
MCC	Cellulose microcristalline
M&L	Marteau & Lemarie
PA	Petites ailettes
PAnc	Petites ailettes non chauffées
PP	Polypropylène

# Introduction générale

---

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'un partenariat industriel avec la société Sanofi Pasteur pour contribuer à la caractérisation et à la modélisation d'un procédé discontinu de séchage de microsphères congelées par sublimation-désorption en tambour tournant.

En effet, le procédé de sublimation-désorption statique en flacons posés sur une étagère présente souvent le risque d'induire des différences de traitement significatives au sein d'un même lot de produit, qui pourraient conduire à une variabilité des propriétés d'usage. Ces différences proviennent en partie du caractère aléatoire de la nucléation de la glace pendant la phase de congélation en flacons, qui peut s'étaler sur plusieurs heures en absence de déclenchement adapté, mais tout autant des difficultés à assurer des conditions identiques de transfert de chaleur pour tous les flacons, sous vide poussé.

Pour y remédier, le produit initialement liquide peut être congelé sous forme de microsphères qui sont ensuite soumises à un séchage en lit agité dans une enceinte sous vide poussé dont les parois sont chauffées, une agitation mécanique permettant d'assurer une meilleure homogénéité de traitement de l'ensemble du produit.

En présence d'un nombre très important de particules à sécher en même temps, le procédé de sublimation-désorption dynamique en tambour tournant doit pouvoir assurer un mélange et un traitement thermique plus rapide et plus homogène du lot entier de produit.

En pratique industrielle, la population des particules obtenues après congélation n'est pas parfaitement mono-disperse en taille, mais surtout la densité des particules évolue nécessairement en cours de sublimation ; l'impact de ces différences entre particules doit être maîtrisé. Un lit poly-disperse aura naturellement tendance à ségréger au cours du temps, les particules se séparant et se regroupant dans le volume du tambour selon leurs poids et leur taille. Notamment, il y aura accumulation des particules les plus petites et/ou plus denses au cœur du lit (Norouzi et al.,2015). De plus, le chauffage du lit particulaire dans un tambour tournant est assuré par la paroi latérale cylindrique et si le renouvellement des particules sur cette paroi n'est pas suffisant, une partie des particules risque d'être trop chauffée et une autre trop peu. Il est en fait souhaitable que chaque particule reçoive une quantité similaire de chaleur provenant de la paroi chauffante, la durée de traitement thermique étant similaire pour l'ensemble des particules.

Le contexte étant posé, il est important de préciser tout de suite que l'étude décrite dans ce mémoire ne concerne directement ni la sublimation-désorption, ni un produit organique congelé par atomisation en particulier, mais qu'elle porte sur le mélange rotatif et le chauffage par contact de billes sphériques en matière plastique synthétique. Il s'agit donc d'une étude essentiellement sur les aspects fondamentaux liés au procédé mentionné précédemment et non les aspects applicatifs, les études étant réalisées sur des matériaux modèles.

La problématique industrielle de ce travail est de limiter l'hétérogénéité de composition et de température au sein d'un lit poly-disperse de sphères millimétriques lors d'un chauffage par contact dans un tambour tournant. Le but pratique est d'identifier les effets de la taille et du

remplissage du tambour, mais aussi du nombre et de la hauteur des ailettes, qui doivent favoriser l'homogénéité du mélange et du traitement thermique.

Le mouvement et la composition du lit de particules impactent directement les transferts de chaleur au sein du lit et donc la distribution des températures et la cinétique thermique du lit. La problématique scientifique de ce travail est la synergie éventuelle entre les phénomènes de ségrégation mécanique et de ségrégation thermique pour différentes morphologie (modes de dispersion) du lit. L'influence de la morphologie et de la géométrie du système sur l'intensité de la ségrégation mécanique et thermique sera étudiée afin de déterminer les paramètres les plus influents.

Des nombreuses études ont été publiées d'une part sur le mélange en tambour tournant et notamment l'influence des ailettes sur l'intensité de la ségrégation mécanique dans les lits bidisperses (Watson et al, 2008 ; Bhattacharya et al., 2014), et d'autre part sur le chauffage en tambour tournant et l'influence de la dimension des ailettes et du tambour sur la cinétique thermique (Figuroa et al., 2010; Chaudhuri et al., 2010) Mais le lien entre la ségrégation mécanique et thermique n'a pas encore été analysé et établi dans la littérature. De plus, à notre connaissance, aucun résultat n'a été publié à ce jour concernant l'étude thermique des lits dispersés composés de particules de tailles et de natures différents. Par ailleurs, la partie expérimentale de cette étude a été réalisée pour un nombre de particules supérieur à celui utilisé dans les études expérimentales du mélange de particules solides déjà disponibles.

La modélisation et la simulation de l'écoulement et des transferts thermiques dans des lits agités de particules solides est complexe. L'approche macroscopique classique qui est celle du milieu continu équivalent, illustrée pour le séchage par contact par la méthode dite de 'pénétration' (Schlunder et Mollekopf, 1984), conduisent à des résultats globaux donnant des tendances moyennes sur l'ensemble du lit. Elles ne fournissent pas d'informations locales et ne permettent pas de s'assurer que toutes les particules ont eu le même parcours et la même histoire thermique. Afin de suivre chaque particule individuellement, la méthode des éléments discrets (en anglais 'discrete element method', en abrégé DEM) est indispensable. Cette méthode numérique permet de suivre chaque particule constituant le lit granulaire agité, de connaître sa position, sa vitesse et sa température à chaque instant de temps. Kwapinska et al. (2008) ont comparé les résultats obtenus par la modélisation 'continue' analytique et la modélisation 'discrète' numérique et ont montré un bon accord sur les tendances générales dans le cas du chauffage en tambour tournant. Cependant, la nécessité d'affiner le modèle rudimentaire de transfert thermique entre les particules de la méthode DEM dans sa version standard a été pointée.

Ce mémoire de thèse est structuré en une introduction, deux parties principales et une conclusion générale. Chaque partie principale comporte sa propre étude bibliographique, présentation des méthodes, analyse des résultats et conclusion.

La première partie du mémoire de thèse est dédiée à l'étude de la ségrégation mécanique d'un lit bi-disperse de billes sphériques millimétriques dans un tambour tournant type 'tranche'. Elle décrit d'abord les essais expérimentaux réalisés dans des maquettes de trois tailles différentes spécialement conçues permettant l'observation visuelle de la distribution des billes dans la

couche frontale du lit. Ensuite, elle présente les simulations réalisées par la méthode DEM à l'aide d'un code commercial et qui donnent accès aux données sur toute la profondeur du lit. Les résultats des expériences et de simulations sont comparés pour le tambour de petite taille. Les caractéristiques globales de la couche frontale du lit sont définies et calculées (indice de ségrégation mécanique, angle de talus dynamique, fraction des billes ségrégées) et permettent une comparaison aisée des résultats obtenus pour différentes morphologies du lit (bi-tailles ou bi-densités) et tailles du tambour, différents taux de remplissage, nombres ou longueurs d'ailettes.

La deuxième partie de ce travail de thèse porte sur l'étude de la ségrégation thermique (mais aussi l'étude comparée de la ségrégation mécanique et thermique) dans un tambour rotatif pour différentes populations de billes (dispersions bimodale, monomodale et gaussienne) et avec les mêmes matériaux et géométries que dans la partie précédente. L'étude est exclusivement basée sur la simulation par la méthode DEM, et plus particulièrement sur l'évolution simulée de l'indice de ségrégation thermique et de la température globale du lit. Les résultats sont présentés de manière à mettre en évidence la relation entre l'intensité de la ségrégation mécanique et de la ségrégation thermique, ainsi que l'influence de la géométrie du tambour et des ailettes sur l'homogénéité des températures au sein du lit et la cinétique globale de chauffage.

# Partie 1 : Etude de la ségrégation mécanique d'un lit bi-disperse de billes sphériques millimétriques mélangé dans un tambour tournant type 'tranche'

---

## INTRODUCTION

---

L'étude de l'écoulement des poudres a été réalisée dans le cadre d'un partenariat industriel avec Sanofi Pasteur. En effet ils ont développé un nouveau procédé de sublimation-désorption basé sur la sublimation-désorption dynamique en tambour tournant avec un lit agité. Le lit de particules qui est traité dans ce tambour tournant industriel n'est pas parfaitement mono-disperse car il existe dans ce lit des disparités de taille et de densités. Ce lit hétérogène aura donc tendance à se ségréger au cours du temps.

Le but de cette thèse est de mettre en évidence la ségrégation et d'étudier les conditions dans lesquelles elle peut être réduite. Pour ce faire, des simulations d'écoulement du produit, avec variations de différents paramètres, dans un tambour tournant vont être réalisées avec une méthode numérique couramment utilisée dans les études de milieux granulaires, la méthode des éléments discrets (notée DEM par la suite pour Discrete Element Method). Les résultats vont être comparés aux observations expérimentales effectuées dans des tambours (2D) de type tranches. Il s'agit dans tous les cas de tambours dont l'axe est horizontal.

Différents paramètres vont être étudiés sur le tambour tournant comme le taux de remplissage, les ailettes (nombre et hauteur) ou différentes compositions de particules. Des méthodes de caractérisations du lit ont été mises en place pour pouvoir, par exemple, analyser les images et comparer les simulations numériques aux essais expérimentaux.

Ainsi, la première partie de ce chapitre sera consacrée à une étude bibliographique sur l'écoulement de milieux granulaires en tambour tournant. Dans un premier temps, nous définirons les différents régimes d'écoulement, puis nous introduirons les grandeurs caractéristiques de ces régimes d'écoulement, et nous terminerons en expliquant les problématiques de ségrégation mécaniques.

Dans la deuxième partie, nous décrirons les matériels et méthodes utilisés dans cette étude : le choix des particules, les outils numériques, et les maquettes expérimentales de tambours tournants.

Enfin, la dernière partie est dédiée à l'évaluation de la ségrégation à différentes échelles et pour différents types de lits bi-disperses. Nous pourrions ainsi conclure sur les facteurs clés qui permettent de limiter les effets de ségrégation mécanique.

# ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Ce travail bibliographique est réalisé dans le cadre de cette thèse sur le sujet du séchage de microsphères en tambour tournant. Le premier objectif de notre étude est d'étudier les conditions d'obtention d'un mélange homogène de particules poly-disperses afin d'aboutir à un séchage homogène et uniforme de l'ensemble de ces particules. Pour ce faire, chaque particule doit avoir été en contact un temps suffisant avec la paroi périphérique du tambour tournant, car seule cette paroi fournit la chaleur de sublimation/désorption nécessaire aux changements de phase du solvant congelé (glace) ou adsorbé.

Le lit de particules qui va être traité lors du procédé industriel n'est pas parfaitement monodisperse, avec de la dispersion en taille mais aussi en densité. Cette dernière va notamment apparaître lorsque les particules vont perdre leur eau. Les différences de tailles ou de densités peuvent induire des phénomènes de ségrégation, c'est-à-dire la concentration de grains d'un type donné en un endroit donné. La ségrégation va nuire au séchage homogène de l'ensemble du lit. Le but de l'étude bibliographique est de répondre aux questions suivantes :

- Comment se déplacent les particules lors du mélange en tambour tournant ?
- Quels sont les mécanismes de la ségrégation ?
- Quels sont les paramètres influant sur la ségrégation ?
- Dans quelles conditions est-il possible d'éviter la ségrégation ?

## **I. Introduction**

Les matériaux granulaires se rencontrent sous différentes formes dans de nombreuses industries (matériaux, énergie, ciments, engrais, agroalimentaire, etc.) et notamment l'industrie pharmaceutique.

Les connaissances poussées sur le comportement rhéologique et physique de ces matériaux granulaires en lit mobile ou agité sont d'une grande importance pour la conception, l'optimisation et la conduite des divers types de séchoirs à tambour rotatif, fonctionnant en continu ou en discontinu et largement répandus dans ces industries.

Les matériaux granulaires agités en tambour tournant présentent une large gamme de régimes d'écoulement de la poudre avec des mécanismes de mélange et des phénomènes de ségrégation associés qui restent encore à ce jour partiellement identifiés ou mal maîtrisés. [1]

Les matériaux granulaires sujets aux agitations sont rencontrés dans beaucoup d'application dans le traitement des matériaux. [2]

## II. Régime d'écoulement granulaire dans un tambour tournant

### A) Régimes d'écoulement

Il existe plusieurs types de régimes d'écoulement d'un lit granulaire de particules contenues en tambour tournant, régimes qui sont fonction de la vitesse de rotation du tambour. L'écoulement se fait sur un lit de particules mobiles et potentiellement mobilisables pour l'écoulement. [3]

#### a. Régimes de glissement

Ces types de régimes se rencontrent à très faible vitesse de rotation ( $\omega < 1$  rpm) et à faibles taux de remplissage du tambour. Il existe 2 types de régime de glissement :

- *Régime de glissement à la paroi (Sliding)*

Le lit se comporte comme un seul bloc qui glisse constamment à la paroi en formant un petit angle de déflexion. (Tableau 1)

- *Glissement par à-coups (Surging)*

Ce régime apparaît lorsqu'il existe des frottements plus importants à la paroi, entraînant les particules qui vont s'accrocher sur la paroi en formant un angle de déflexion plus important. Les particules se comportent alors comme un seul bloc tantôt mobile tantôt statique : ce bloc va rester collé à la paroi jusqu'à former un certain angle critique qui lui permettra de glisser le long de celle-ci vers le fond du tambour jusqu'à reprendre sa place initiale.

#### b. Régimes de cascade

Ces régimes sont caractérisés par une circulation continue du lit de particules à l'intérieur du tambour tournant et sont observés lorsqu'il existe un coefficient de friction des particules sur la paroi suffisant. Dans la majorité des cas, le régime en écoulement continu est privilégié.

- *Régime intermittent ou d'avalanche (Slumping)*

Le lit s'élève dans le tambour jusqu'à atteindre un angle d'avalanche assez élevé créant une avalanche qui emporte une partie du lit avec elle. Ce régime apparaît lorsque la vitesse de rotation est faible et le coefficient de frottement statique élevé, le phénomène se répète jusqu'à l'arrêt complet de la rotation du tambour.

- *Régime d'écoulement continu à surface plane (Rolling)*

Ce régime apparaît lorsque la vitesse de rotation et le degré de remplissage deviennent plus élevés. Il est caractérisé par un large groupe de particules qui sont entraînées en bloc par les parois du tambour, jusqu'à atteindre un certain angle limite d'écoulement. A partir de cet angle, les particules forment une couche mobile à surface plane avant de redescendre vers le cœur ou le bas du lit.



C'est ce type de régime que l'on va cibler car il permet de réduire la ségrégation avec un lit polydisperse. Avec une vitesse de rotation du tambour comprise entre 2 et 6 rpm et un faible taux de remplissage (1/6), ce sera le régime le plus fréquemment rencontré au cours de nos études.

- *Régime d'écoulement à surface en S (Cascading)*

Ce régime d'écoulement à surface en S s'obtient en augmentant encore davantage la vitesse de rotation du tambour. Comme précédemment, la majorité du lit va être entraînée par les parois du tambour conduisant à la formation d'une arche, formation suivie d'un écoulement en cascade des particules pour former une surface supérieure de lit de forme en S.

### c. Régimes de cataracte

Ces régimes apparaissent aux grandes vitesses de rotations et avec des taux de remplissage élevés. Ces régimes sont rarement étudiés dans des cas de tambours tournants.

- *Régime de Cataracte (Cataracting)*

Lors de ce régime, le lit est entraîné par les parois du tambour, mais la vitesse est telle que certaines particules retombent en chute libre, avec des trajectoires aléatoires pour reformer le lit de particules en mouvement.

- *Régime centrifuge (Centrifuging)*

Lorsque le nombre de Froude (défini dans le paragraphe suivant) devient supérieur à 1 et que la vitesse atteint un seuil élevé, on obtient le régime centrifuge caractérisé par le fait que, sous l'effet de la force centrifuge, les particules sont plaquées contre la paroi périphérique du lit et ne peuvent plus s'écouler.

Un schéma décrivant de ces différents régimes est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Régime d'écoulement en tambour tournant et leurs propriétés [4]

Basic form	Slipping motion		Cascading ("tumbling") motion			Cataracting motion	
	Sliding	Surging	Slumping	Rolling	Cascading	Cataracting	Centrifuging
Schematic							
Physical process	Slipping		Mixing			Crushing	Centrifuging
Froude number Fr [-]	$0 < Fr < 10^{-4}$		$10^{-5} < Fr < 10^{-3}$	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$	$0.1 < Fr < 1$	$Fr \geq 1$
Filling degree f [-]	$f < 0.1$	$f > 0.1$	$f < 0.1$	$f > 0.1$		$f > 0.2$	
Wall friction coeff. $\mu_w$ [-]	$\mu_w < \mu_{w,c}$	$\mu_w \geq \mu_{w,c}$	$\mu_w > \mu_{w,c}$			$\mu_w > \mu_{w,c}$	
Application	no use		Rotary kilns and reactors; rotary dryers and coolers; mixing drums			Ball mills	no use

## B) Transitions de régime

Les paramètres qui caractérisent les transitions entre ces différents régimes sont, par ordre d'importance : le nombre de Froude, le taux de remplissage, le rapport diamètre du tambour sur diamètre des particules ( $D/d$ ) et les caractéristiques du milieu granulaire. Pour définir les limites des paramètres caractéristiques de chaque régime, le nombre de Froude est très souvent utilisé.

- Le nombre de Froude

Le nombre de Froude est défini par la relation suivante :

$$Fr = \frac{\Omega^2 R}{g} \quad (1)$$

Dans laquelle  $\Omega = 2\pi w$  représente la vitesse de rotation angulaire du tambour ;  $R$ , le rayon du tambour,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $w$  la vitesse de rotation du tambour.

Le nombre de Froude peut être modifié pour prendre en compte d'autres paramètres influant sur les transitions de régime :

- Le taux de remplissage
- Le rapport de diamètre du tambour sur le diamètre des particules :  $D/d$
- Les caractéristiques du milieu granulaire (coefficient de friction, différents angles, etc.)

### Transition entre le régime à surface plane et le régime à surface en S

Dans le cas de notre étude, nous sommes concernés plus particulièrement par le régime d'écoulement continu à surface plane. Cependant, dans notre domaine d'application, une transition vers le régime à surface en S peut avoir lieu. La transition entre ces deux régimes se produit lorsque les 2 angles  $\theta_{\min}$  et  $\theta_{\text{moy}}$  ne sont plus identiques [6] (Figure 1)

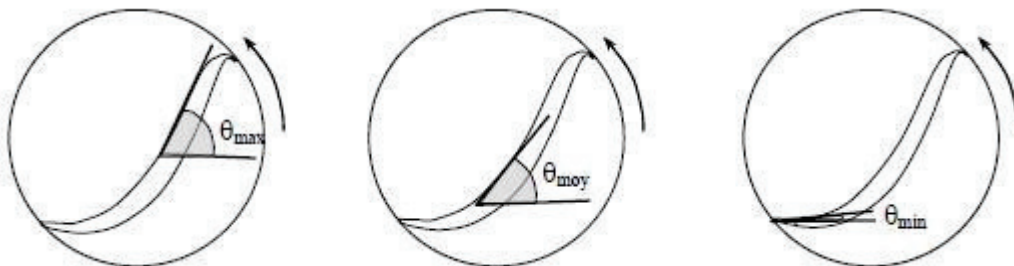


Figure 1 : Mesure des angles de talus en régime d'écoulement continu à surface libre en S [6]

La transition s'opère pour des vitesses de rotation du tambour comprises entre 1 et 5 rpm. Mais pour des billes de diamètre d'environ 500  $\mu\text{m}$  la transition entre ces deux régimes se produit à des vitesses de rotation d'autant plus faibles que la taille du tambour est grande.

## C) Types de configuration des tambours cylindriques

Deux types de tambour tournant ont fait l'objet d'études expérimentales dans l'état de l'art. Ils présentent chacun des avantages et des inconvénients. L'un va être appelé tranche ou tambour 2D et l'autre qui sera plus profond va être appelé tambour 3D.

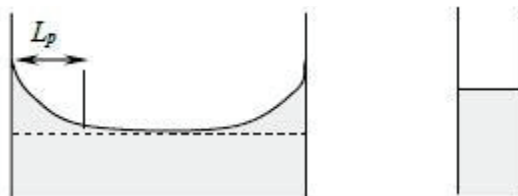


Figure 2 : Représentation schématique d'une vue axiale du tambour. La différence entre un tambour long (à gauche) et un tambour étroit (à droite) est illustrée.  $L_p$  caractérise la largeur de matériau perturbé par les parois. [6]

### a. Tambour 2D

Le tambour 2D a une géométrie cylindrique dont le diamètre est très supérieur à la profondeur. Il est très utilisé dans les études expérimentales puisqu'il permet de visualiser le mouvement des particules dans le plan diamétral et d'éviter le phénomène de ségrégation axiale. Toutefois, ce type de tambour 2D limite les études expérimentales à la ségrégation radiale seulement.

Cependant les effets de parois frontales ne sont pas toujours négligeables ; en effet il faut ajuster la distance entre les 2 parois frontales afin de minimiser autant que possible leur influence :

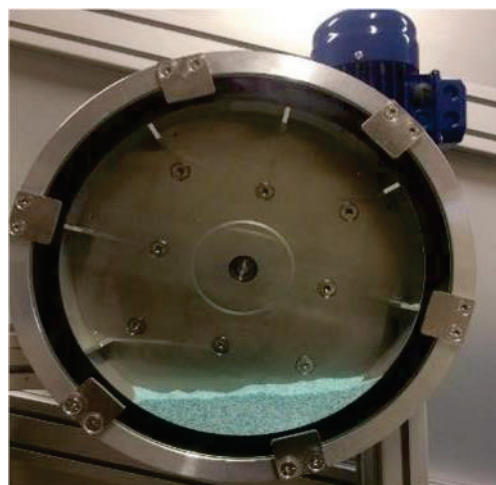
#### Influence des parois frontales

Il existe un écartement minimal qui équivaut à 20-30 diamètres de grains [6] ; en effet à cette distance, il n'y aura plus d'effet de parois et la mesure de l'angle d'écoulement sera identique dans le plan diamétral du tambour, le lit formera une surface plane entre les 2 parois.

Si l'écartement est inférieur à 20 fois le diamètre des billes ou supérieur à 30 fois le diamètre des billes, le lit ne formera pas une surface plane entre les 2 parois frontales mais suivra une courbe avec des valeurs d'angles d'écoulement plus élevées aux parois qu'au centre du tambour. Les mesures d'angle d'écoulement seront fortement majorées aux parois.

Notre étude sera réalisée avec un tambour tranche dont l'écartement entre les parois est de l'ordre de 20 fois le diamètre de billes. En effet nous avons des tranches de 4,2 cm d'épaisseur avec des diamètres de billes de 2 mm pour les expériences de référence.

Figure 3: Photo du tambour type tranche de diamètre 30 cm et de profondeur 4,2 cm avec un lit composé de billes de cellulose microcristalline et de son moteur.



## **b. Tambour 3D**

Un tambour 3D présente une profondeur supérieure à son diamètre et correspond typiquement aux tambours utilisés industriellement en séchage.

L'inconvénient de ce type de tambour 3D réside dans le fait que la ségrégation est bien plus complexe que dans le cas des tambours de type tranche (2D) puisqu'ils donnent lieu aux 2 types de ségrégation, axiale et radiale, qui sont d'autant plus difficiles à distinguer car elles se combinent.

## **III. Grandeurs caractéristiques de l'écoulement dans un tambour tournant**

Dans les études expérimentales et les travaux de simulations publiés dans la littérature, les différents auteurs ont essayé de décrire globalement les différents phénomènes rencontrés lors d'un écoulement d'un lit granulaire à l'aide de paramètres ou de grandeurs caractéristiques facilement mesurables.

### **A) Mesure d'angles caractéristiques à différents régimes**

Il existe 3 angles différents, représentés sur la figure 4, que l'on peut mesurer. Ces angles diffèrent en fonction des différents types de matériaux et ils sont utilisés pour caractériser les différents régimes d'écoulement.

#### **a. En régime intermittent :**

- *Angle d'avalanche*

C'est l'angle à partir duquel l'avalanche va se déclencher. L'angle d'avalanche est mesuré par rapport à l'horizontale.

- *Angle de repos*

A partir de l'angle d'avalanche, la surface libre se déstabilise et une avalanche se produit : l'écoulement se poursuit jusqu'à ce que la surface libre soit à un angle donné avec l'horizontale appelé angle de repos.

Les angles d'avalanche et de repos sont très sensibles à la répartition granulométrique et à la morphologie des particules.

## b. En régime d'écoulement continu :

On mesure l'angle d'écoulement ou angle cinétique c'est-à-dire l'angle au-delà duquel se produit une avalanche continue.

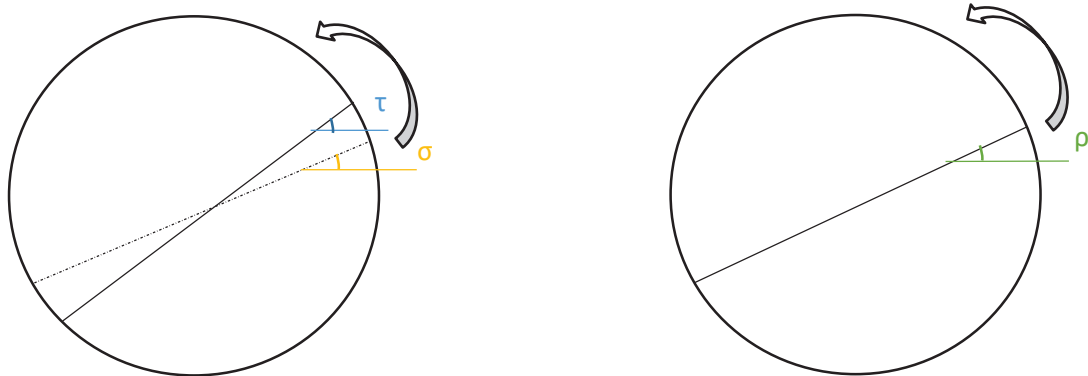


Figure 4 : Mesures des angles caractéristiques en tambour tournant avec l'angle d'avalanche en bleu ( $\tau$ ), l'angle de repos en jaune ( $\sigma$ ) pour le régime intermittent et l'angle d'écoulement en vert ( $\rho$ ) pour le régime d'écoulement continu à surface plane

## B) Zone statique et zone mobile

Dans le régime d'écoulement continu, il existe deux zones distinctes, la zone statique et la zone mobile.

- *Zone statique*

Il n'y a pas de mouvement relatif dans cette zone. Les particules tournent ensemble avec le tambour sur une trajectoire circulaire.

- *Zone mobile*

Cette zone se situe près de la surface libre du lit. Elle correspond à la partie du lit en écoulement continu et elle est alimentée par la zone statique. Les particules ont une trajectoire rectiligne parallèle à la surface libre du lit.

C'est dans cette zone que peut se produire la ségrégation, s'il en existe une, en raison du mouvement individuel de chaque particule. [7]

La limite entre ces 2 zones correspond à une couche mince à l'intérieur de laquelle les particules subissent un cisaillement très faible ; son épaisseur est d'environ 2,5 fois le diamètre des particules. [6]

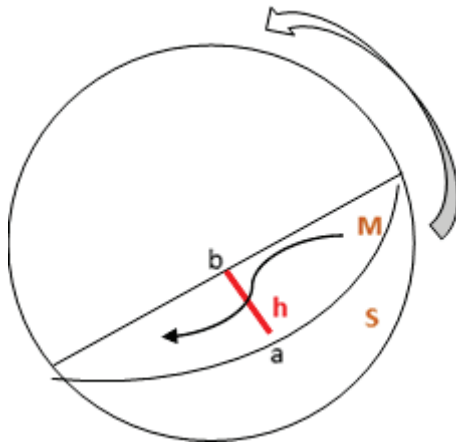


Figure 5 : Schéma représentant la zone mobile (M) et la zone statique (S) d'un lit en tambour tournant. Avec (a) : base de la zone d'écoulement, point autour duquel les particules tournent dans la zone statique. (b) : Point à la surface libre. La ligne h représente l'épaisseur de la zone mobile et relie a et b perpendiculairement à la surface libre au centre du tambour

### C) Epaisseur de la zone mobile

En tambour tournant, l'écoulement des particules dans la zone d'écoulement (Figure 5) se fait sur fond statique. La vitesse de rotation du tambour impose un débit que la zone d'écoulement absorbe en adaptant son épaisseur  $h$ , l'inclinaison de la surface libre  $\Theta$  ainsi que la vitesse moyenne  $V_{\text{moy}}$  des particules.

Il existe de ce fait un transfert de particules entre la zone statique et la zone mobile. Ce transfert augmente avec la vitesse de rotation du tambour. Pour absorber le flux de particules grandissant, l'épaisseur de la zone mobile, l'inclinaison de la surface libre et la vitesse moyenne des particules dans la zone mobile augmentent.

Cette épaisseur est corrélée essentiellement au diamètre et à la vitesse de rotation du tambour ainsi qu'au diamètre des particules. La plupart des nombreuses corrélations de la littérature sont rassemblées dans le Tableau 2 ci-contre :

Tableau 2 : Expression des paramètres caractéristiques des zones d'écoulement intervenant dans les modèles théoriques ou dans les mesures expérimentales [6]

Auteurs	$h$ : épaisseur de la zone d'écoulement au centre d'un tambour rempli à 50 %	$\gamma$ : gradient de vitesse $V_{max}$ : vitesse maximale des particules à la surface libre $V_{moy}$ : vitesse moyenne des particules au centre du tambour	Remarques
Rajchenbach (1990,1998) (expérimental) [5]	$h \propto \frac{R}{\left(\frac{g \sin \theta}{d}\right)^{1/4}} \Omega^{1/2}$ (en estimant $Q$ par $1/2 \Omega R^2$ )	$\gamma \propto 0.4 \sqrt{\frac{g \sin \theta}{d}}$	$\dot{\gamma}$ indépendant de $w$
Bonamy (2001) [9] (expérimental)	$h \approx \frac{R}{(g/d)^{1/4}} \Omega^{1/2}$	$\gamma \propto 0.6 \sqrt{\frac{g}{d}}$	$\dot{\gamma}$ indépendant de $w$
Rao (1991) [10]	$h = \frac{2 \sqrt{\frac{16}{15}} (g \sin \theta - \cos \theta \tan \theta_d) R}{\gamma}$	$\gamma = \frac{2 \sqrt{\frac{16}{15}} (g \sin \theta - \cos \theta \tan \theta_d) R}{h}$	$V_{moy} = \sqrt{\frac{16}{15}} aR$
Elperin (1998) [11]	$h \propto d^{2/5} R^{4/5} \Omega^{2/5}$ en prenant $\varepsilon \propto (d/R)$	$V_{moy} \propto \frac{R^{6/5} \Omega^{3/5}}{d^{2/5}}$ en prenant $\varepsilon \propto (d/R)$	$\Omega$ est un paramètre ajustable
Maske (1999) [12]	$h(x=0) \propto \sqrt{\frac{Q}{\gamma}} R$	$V_{moy} \propto h$ $\gamma = \text{constante}$	Hyp : profil linéaire, $\gamma$ : paramètre ajustable
Ding (2001) (expérimental) [8]	$h = \frac{l}{3\Lambda^2 + 1} \times \left[ \sqrt{6(1 - \Lambda^2)(3\Lambda^2 + 1)} \left( \frac{R^2}{2} \right) \right]$	$v_x = \frac{\Omega h}{1 - \Lambda^2} \left[ \Lambda^2 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right]$	$\Lambda = \alpha / h$ (Figure 84)
Alexander (2002) [13] (expérimental)		$v_{max} = R \Omega^{2/3} (g/d)^{1/6}$	$w < 30$ rpm

Certains auteurs considèrent que les échanges de particules entre la zone d'écoulement et la zone statique se font dans une zone d'échange d'une certaine épaisseur. Celle-ci serait délimitée par les 2 zones qui l'entourent et elle correspondrait à la ligne suivant laquelle les particules ont une vitesse non nulle par rapport à la paroi du tambour. [4] ; [14]

D'autres auteurs considèrent que cette zone d'échange est négligeable. [7] ; [9].

#### Influence des parois :

Selon Orpe et al [15], les parois frontales n'affectent pas la zone d'écoulement tandis que les valeurs des angles  $\gamma$  sont sensibles. Il semblerait aussi que les épaisseurs de la zone d'écoulement à la paroi et au centre du tambour soient peu différentes.

#### Influence des caractéristiques granulométriques :

Les caractéristiques granulométriques ou morphologiques des particules vont modifier les angles d'écoulement sans affecter l'épaisseur de la zone mobile.

### Influence du rapport D/d (diamètre du tambour sur diamètre des billes)

La hauteur de la zone d'écoulement va dépendre du rapport du diamètre du tambour sur le diamètre des particules.

On peut distinguer 2 cas [6] :

- ⇒  $47 < D/d < 600$  : la hauteur de la zone d'écoulement varie peu avec la vitesse de rotation, et ne dépasse pas 40 couches de billes.

Il y aura une stabilisation de l'épaisseur maximum de la zone d'écoulement comprise entre 25% et 50% de la hauteur de remplissage. Toutefois la stabilisation est observée entre 40 et 50% de la hauteur de remplissage lorsque l'intégralité du tambour est prise en compte et seulement de 25% lorsque l'observation se fait uniquement à la paroi.

Par exemple, pour un rapport D/d égal à 100, l'épaisseur de la zone d'écoulement se stabilise à une valeur approximativement égale à 1/3 de la hauteur de remplissage.

- ⇒ D/d élevés (895 à 7400) : la hauteur de la zone d'écoulement varie fortement avec la vitesse de rotation. Sa valeur est comprise entre 50 et 200 couches de particules et il n'y a pas de stabilisation.

## **IV. Ségrégation au sein du lit des particules**

Le mélange de 2 milieux granulaires constitués de particules de tailles différentes est particulièrement difficile, contrairement aux milieux liquides qui sont bien plus faciles à mélanger. En effet, cette opération peut aboutir à une ségrégation, car les particules de mêmes caractéristiques vont avoir tendance à se regrouper.

Cette ségrégation est induite par des différences de taille, de densité, de forme ou d'état de surface des particules qui impactent leur comportement en lit mobile. Elle consiste en une surconcentration locale de particules d'un type donné et elle conduit bien évidemment à une hétérogénéité globale du lit.

### **A) Mécanismes**

*NB : les mécanismes observés aux grandes vitesses de rotation ne sont pas considérés ici.*

- *Mécanismes de mélange*

Il existe plusieurs mécanismes de mélange des particules :

- *Par convection* : Les particules se déplacent en bloc lors de leur mise en mouvement
- *Par diffusion* : les particules subissent des chocs responsables du caractère aléatoire de leur déplacement ; ce mécanisme nécessite un apport extérieur d'énergie.
- *Par cisaillement* : Les particules sont brassées sous l'effet d'un effort mécanique.



- *Mécanismes de ségrégation*
- *Par percolation* : Les petites particules se glissent dans les interstices laissés par les grosses particules ce qui provoque la chute des petites particules vers le bas de l'écoulement sur un plan incliné.
- *Par convection* : Des vides se créent sous l'effet de vibrations lorsque les petites particules finissent par se glisser en dessous des grosses particules. Ce phénomène apparaît lors des transports de grains dans des camions.
- *Par trajectoires* : Si les particules sont lâchées sur un plan incliné rugueux, les plus grosses vont parcourir une plus grande distance que les plus petites qui ont plus de chance de rester piégées dans la rugosité du support.
- *Par élutriation* : Dans le cas des poudres fines, la vitesse de chute des petites particules est inférieure à la vitesse à laquelle l'air est chassé par les grosses particules.

Les deux mécanismes de ségrégation prépondérants régnant au sein d'un lit de particules dans un tambour tournant seraient les mécanismes par percolation et par trajectoires.

Pour le mélange en tambour tournant, il existe 2 types de ségrégation, la ségrégation radiale et la ségrégation axiale.

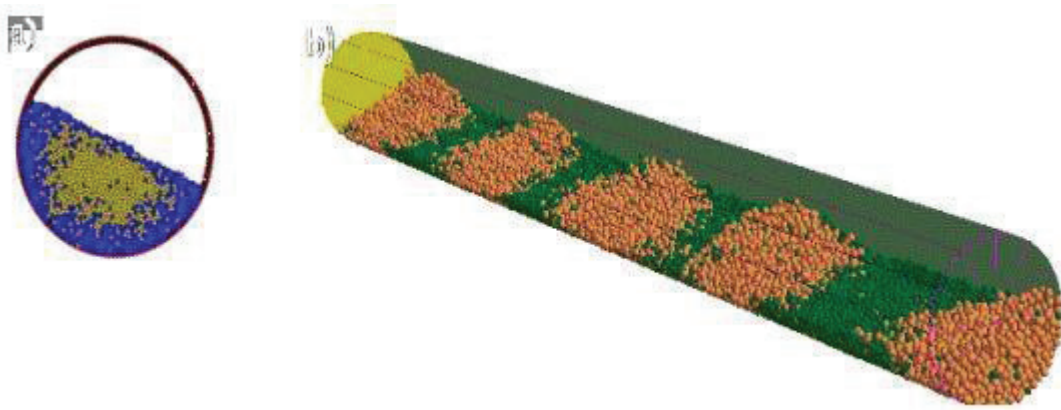


Figure 6 : Schéma de tambour tournant représentant une ségrégation radiale (à gauche) et axiale (à droite) [16]

## B) Ségrégation Radiale

La ségrégation radiale se produit dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation du tambour c'est-à-dire dans le plan transverse.

Elle se produit dans la zone en écoulement à la surface libre du lit.

- *Influence des caractéristiques des particules*

La ségrégation radiale se caractérise par la formation d'un noyau central composé des particules les plus petites ou les plus denses ou les plus lisses. Si le mélange est composé de grosses, denses et de petites particules peu denses, il y aura un mélange homogène.

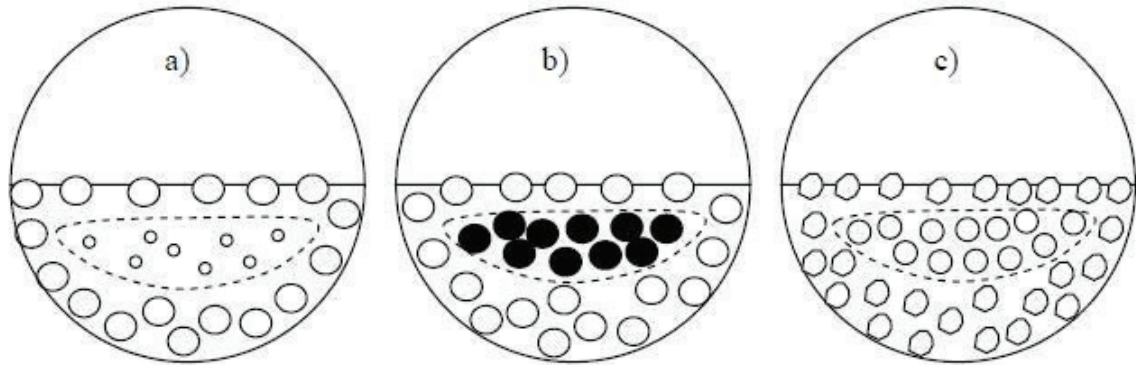


Figure 7: Illustration des figures de ségrégation en tambour tournant pour des différences de taille (a), de densité (b) et de forme (c) [6]

- *Influence de la hauteur de remplissage*

Pour un remplissage inférieur à 50%, le brassage est important et l'homogénéisation ou la ségrégation se font rapidement.

Pour un remplissage égal à 50%, le brassage est minimal et le mélange ou la ségrégation sont plus lents. Pour un remplissage supérieur à 50%, un noyau central de particules immobiles apparaît.

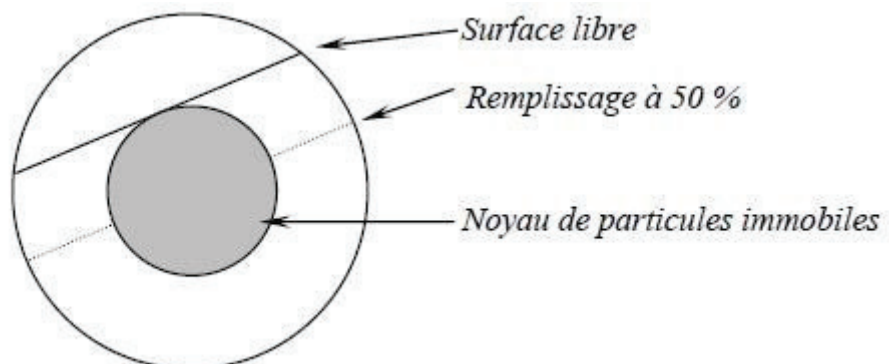


Figure 8 : Illustration de l'apparition d'un noyau immobile de particules lors d'un remplissage supérieur à 50% [6]

- *Influence de la vitesse de rotation du tambour*

*Cantelaube [17]* observe dans un tambour 2D que la ségrégation disparaît à partir d'une certaine vitesse (8 rpm) qui correspond à un régime d'écoulement à cataracte empêchant tout piégeage différentiel dans la zone d'écoulement. *Henein [3]* et *Dury et al [18]* montrent au contraire que la vitesse de ségrégation est d'autant plus rapide que la vitesse de rotation du tambour est élevée.

- *Influence des ailettes*

Les expériences et les simulations pour des lits bi-dispersés en taille ou en densité menées par *Vargas et al [19]* ont montré que les ailettes attachées à la paroi du tambour sont moins performantes que celles attachées à l'axe de révolution.

D'autre part, pour des mélanges bi-disperses en taille et en densité, ces auteurs ont montré que plus le nombre et la taille des ailettes augmentaient, plus la ségrégation diminuait.

En ce qui concerne la forme des ailettes, *Bhattacharya et al [20]* ont observé que les ailettes en S avaient une efficacité plus importante que les ailettes de forme rectangulaire.

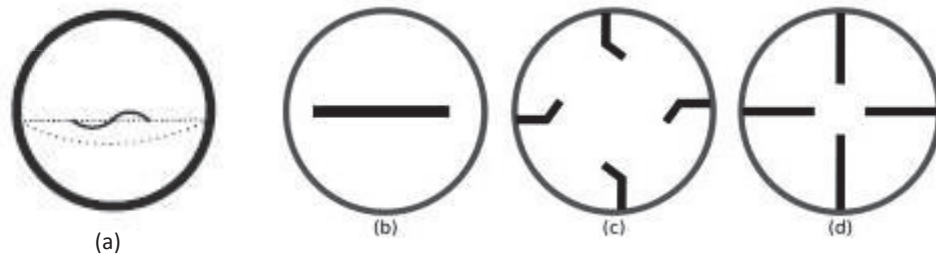


Figure 9 : Figure schématique représentant les différents types d'ailettes existants avec pour (a) des ailettes en S, pour (b) une ailette centrale à l'axe de révolution, pour (c) des ailettes concaves et pour (d) des ailettes droites à la paroi périphérique

### C) Ségrégation axiale

La ségrégation axiale se produit seulement avec les tambours 3D au bout de plusieurs centaines ou de milliers de tours de rotation du tambour.

Elle est caractérisée par l'apparition de bandes alternées constituées de composants purs suivant l'axe de rotation.

Les bandes apparaissent lorsque l'angle d'écoulement des petites particules est supérieur à l'angle d'écoulement des grandes particules.

Quand cette condition n'est pas vérifiée, les particules fines restent concentrées autour de l'axe du tambour au centre du tambour.

En effet la différence d'angle entraîne un gradient axial de la pente de la surface libre qui est à l'origine de l'écoulement différentiel des 2 types de particules suivant l'axe du tambour. Les grosses particules ont une mobilité plus grande que les petites particules et elles ont tendance à se diriger vers les zones à plus forte pente locale.

La ségrégation commence aux parois frontales du tambour.

Il y a divergence de conclusions entre les différents auteurs sur l'influence des conditions opératoires.

En effet, *Gupta et al [21]*, explique que le nombre de bandes va augmenter lorsque :

- La vitesse de rotation diminue
- La concentration en particules fines augmente

Tandis que *Hill et al [22]* démontre qu'il est possible de faire disparaître la ségrégation axiale en réduisant la vitesse de rotation du tambour. Cette vitesse de rotation va déterminer l'angle d'écoulement du lit granulaire en mouvement. Ces auteurs ont mis en évidence que la ségrégation axiale se produit quand il y a une différence d'angle d'écoulement entre le mélange et les seules grosses particules.

*Hill et al* ont constaté aussi que cette ségrégation résultait de la déstabilisation de la ségrégation radiale.

*Elperin et al [11]* ont observé qu'une ségrégation axiale se produisait plus facilement lorsque le tambour est rempli à 50% de son volume.

Enfin *Khosropour et al [23]* ont confirmé expérimentalement le fait que la ségrégation radiale était bien un précurseur de la ségrégation axiale. Elle débiterait donc aux parois, zones où les particules plus mobiles s'accumulent, puis se propagerait dans le milieu granulaire. Ces auteurs ont suggéré que le rapport  $D/d$  et les caractéristiques des parois jouent un rôle prépondérant sur l'apparition de cette ségrégation.

Selon *Cui et al [16]*, avec de très longs tambours, il existerait plusieurs types de ségrégation axiale. Ces types de ségrégations apparaîtraient en fonction du coefficient de frottement entre la paroi frontale et les particules ainsi qu'entre les particules entre elles. (Figure 10)

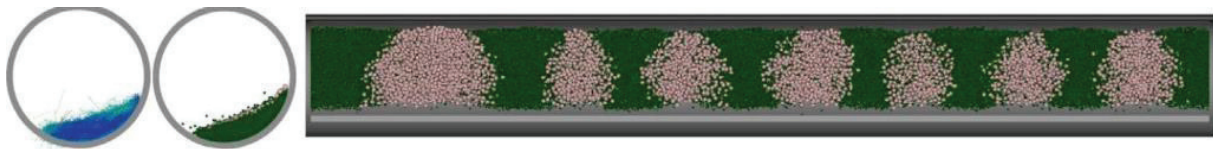


Figure 10 : Illustration de simulation DEM (méthode des éléments distincts) après 100 tours d'un lit bi-disperse en taille avec un coefficient de frottement nul et une vitesse de 8 rpm

## V. Conclusion

Au vu de cette étude bibliographique, nous avons choisi d'utiliser des tambours en tranche (2D) pour étudier la ségrégation radiale, en respectant un écart de 4,2 cm entre les 2 parois frontales pour éviter l'influence des parois. Cette étude expérimentale sera complétée par des simulations numériques avec la méthode DEM. Notre étude est faite avec différents taux de remplissage et une vitesse de rotation comprise entre 2 et 6 rpm, ce qui nous donne un régime d'écoulement en surface plane.

# MATERIELS ET METHODES

---

## I. Choix et caractérisation du produit

Il a d'abord fallu choisir quels types de particules utiliser pour les essais expérimentaux dans trois tambours tournants (un petit, un moyen et un grand). Les géométries des tambours sont présentées ultérieurement.

### A) Propriétés et choix des billes

Différents types de lits ont été étudiés dans cette étude : un lit bi-disperse en tailles, un lit bidisperse en densité et un lit poly-disperse en taille. Un choix a donc été effectué pour déterminer quelles sortes de billes allaient constituer nos lits. Il fallait que les billes choisies aient des propriétés proches de celles de notre partenaire industriel (appelés milli-sphères), particules de solution aqueuse congelées avec une densité voisine de 1.

Un premier choix de particules a été effectué pour faire des études de lit bi-disperse en taille et bi-disperse en densité sur le petit et moyen tambour.

Un second choix de particules a été réalisé pour faire des études de lits multi disperse en taille sur le grand tambour.

#### **Particules pour le petit tambour et le tambour moyen.**

Ce choix a été établi à partir de données de la littérature. Les propriétés des différents matériaux envisagés sont regroupées et comparées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés des différentes billes pouvant être utilisées en tambour tournant, les billes sélectionnées sont en rouge, les valeurs avec \* sont des valeurs mesurées

	$\rho$ (masse volumique) (kg/m <sup>3</sup> )	$\Theta$ (angle de repos Cinétique) (°)	$\gamma_m$ (angle de repos dynamique) (°)	Module de cisaillement	Module de Young (Gpa)	Coefficient de Poisson
Billes de verres	1560	28	32,7 ± 1,7	3,10 <sup>7</sup> kPa	72/55	0,21/0,25
Quartz	1570	32,4	36,8 ± 1,9			
Billes d'acier	7800				<b>210</b>	<b>0,3</b>
Acrylique (PMMA)	1180			1700 Mpa	1,8-3,1	0,4
Polyoxymethylene (POM)	1357			1050 Mpa	5,2	0,35
<b>Polypropylène (PP)</b>	<b>900</b>	<b>19*</b>		<b>300-500 Mpa</b>	<b>1,1 - 1,55</b>	
Silice	2203			31,2 Gpa	73,1	0,17
<b>Acétate de cellulose (AC)</b>	<b>1280</b>	<b>22,2*</b>		<b>0,86-1,47 Gpa</b>	<b>1,5 / 2,4 - 4,1</b>	<b>0,43/ 0,39</b>
PVC	1190			80 Mpa	0,02-0,05	0,38
<b>Millisphères</b>	<b>1000</b>	<b>28*</b>	<b>19 et 33*</b>			

Notre choix final s'est d'abord porté sur des billes d'acétate de cellulose car elles présentent des valeurs de densité, de rigidité et de dureté proches des valeurs ciblées avec les milli-sphères de notre partenaire industriel. De plus, elles présentent une bonne résistance à l'abrasion et elles ont été fréquemment utilisées par différents auteurs lors des simulations avec la méthode DEM. Le polypropylène présente une masse volumique (ou densité) intéressante (910 kg/m<sup>3</sup> contre 1280 kg/m<sup>3</sup> pour l'acétate de cellulose).

Le lit bi-disperse en tailles sera donc constitué de billes d'acétate de cellulose de diamètre moyen égal à 2mm (orange) et à 3 mm (noire) de même masse volumique présenté en Figure 11.

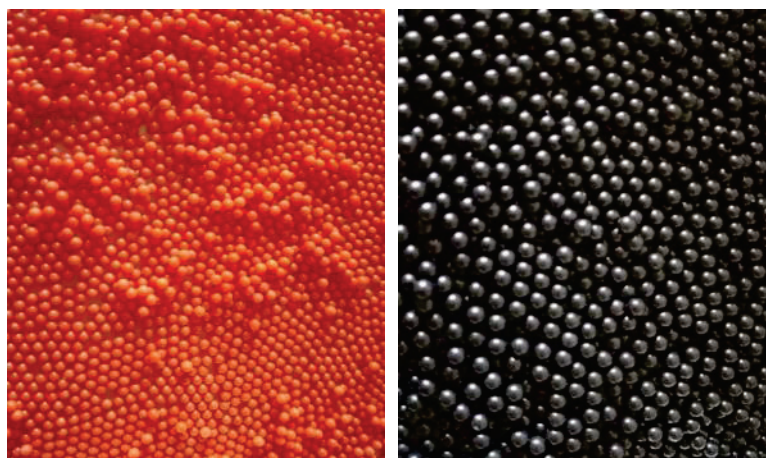
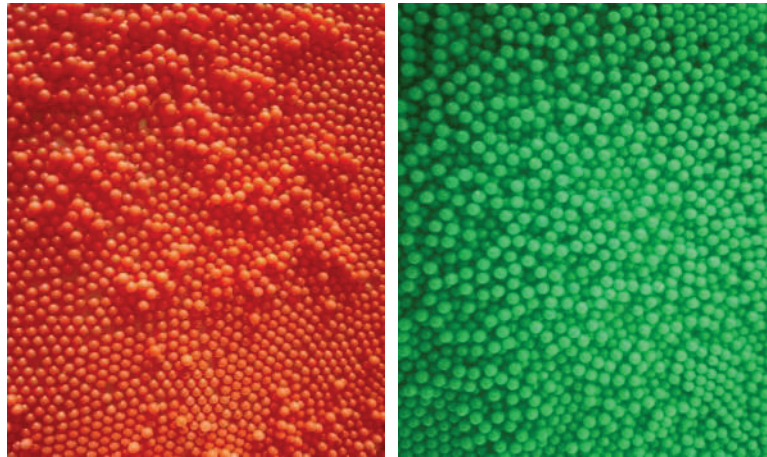


Figure 11 : Billes d'acétate de cellulose (1280 kg.m-3) de petites tailles à gauche (2mm) et de grande taille à droite (3 mm) composant le lit bi-tailles

Le lit bi-disperse en densité sera, quant à lui, composé de billes d'acétate de cellulose ( $1280\text{kg/m}^3$  et de couleur orange) et de billes de polypropylène ( $910\text{ kg/m}^3$  et de couleur verte) de taille 2 mm de diamètre représentées sur la Figure 12.



*Figure 12 : Billes d'acétate de cellulose ( $1280\text{ kg.m-3}$ , 2mm) à gauche et de polypropylène ( $910\text{kg.m-3}$ , 2mm) à droite composant le lit bi-tailles*

## Particules pour le grand tambour

Pour le grand tambour, il a fallu trouver des particules de tailles différentes, faciles à se procurer, faciles à utiliser et en quantité suffisante pour réaliser les expériences. En effet, il fallait plus de 5L de chaque type de particules.

Après différentes investigations, le lit du grand tambour a été finalement constitué de deux populations de particules de tailles différentes : (i) pour les particules de petites tailles, il s'agit de cellulose microcristalline de taille comprise entre 330 et 850  $\mu\text{m}$  dont les propriétés sont plus proches des particules modèle du partenaire industriel, et (ii) pour les particules de grosses tailles, des grains de semoule de taille comprise entre 800 et 2600  $\mu\text{m}$ , le but de ces choix de types de lit était d'observer la ségrégation au sein de lits multi dispersés. Les 2 types de particules choisies ont comme couleur respectives le blanc pour la cellulose microcristalline et le jaune pour la semoule, couleurs qui sont trop proches pour les distinguer même à l'œil nu avec de gros volumes. Les billes blanches de cellulose microcristalline ont donc été colorées en bleu au moyen d'un trempage dans une solution de bleu de méthylène, sans modifications des propriétés mécaniques. Le lit granulaire choisi est donc composé de petites particules bleues et de grosses particules jaunes comme représenté sur la Figure 13.

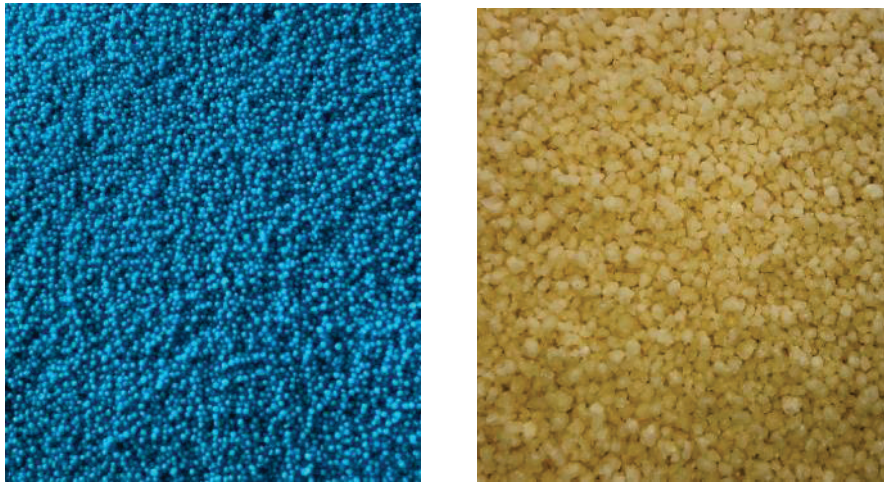


Figure 13 : Billes de cellulose microcristalline à gauche et billes de semoule de couscous à droite utilisées pour un lit poly-disperse en tailles

## B) Granulométrie

### Petit tambour et tambour moyen

Les particules d'acétate de cellulose et de polypropylène ont été caractérisées avec le granulomètre Mastersizer 3000 de Malvern en mode aéro (voie sèche).

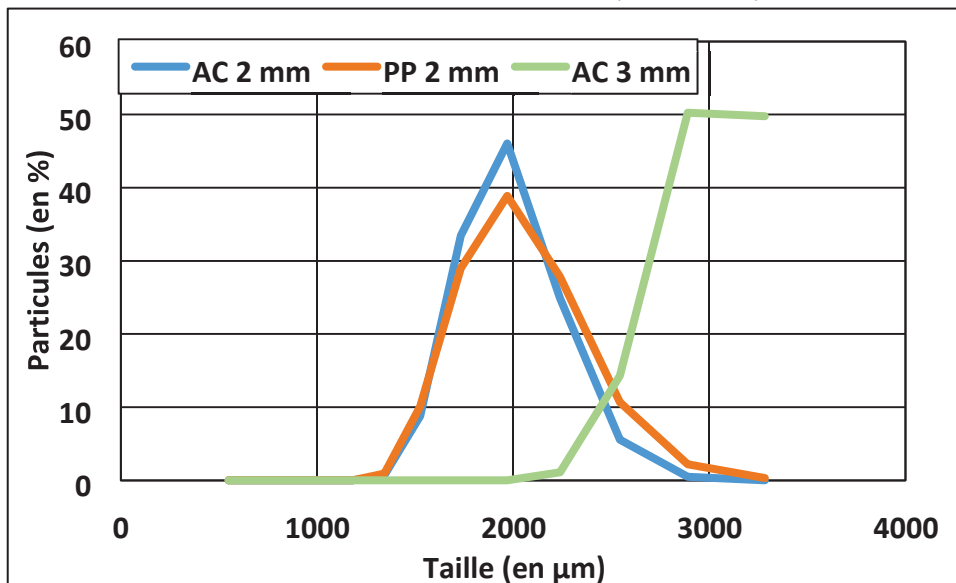


Figure 14 : Granulométrie des particules utilisées pour le petit et le moyen tambour

Les particules d'acétate de cellulose (AC) et de polypropylène (PP) ont un diamètre de 2 mm avec une dispersion faible tandis que les particules d'acétate de cellulose qui ont un diamètre de 3 mm ont été plus difficiles à observer car trop proche de la limite de détection du Mastersizer, c'est pour cela que la courbe est incomplète.



## Grand tambour

Deux types de semoule de couscous ont été testés à savoir, un couscous fin et un couscous moyen. Le couscous fin était trop proche en taille de la cellulose microcristalline et n'a donc pas été retenu. Le couscous moyen présentait par contre une taille supérieure à la taille des billes de la cellulose microcristalline.

Les particules retenues sont donc la cellulose microcristalline (MCC) et la semoule de couscous moyens car elles sont faciles à se procurer et à utiliser et ne présentent pas le même diamètre.

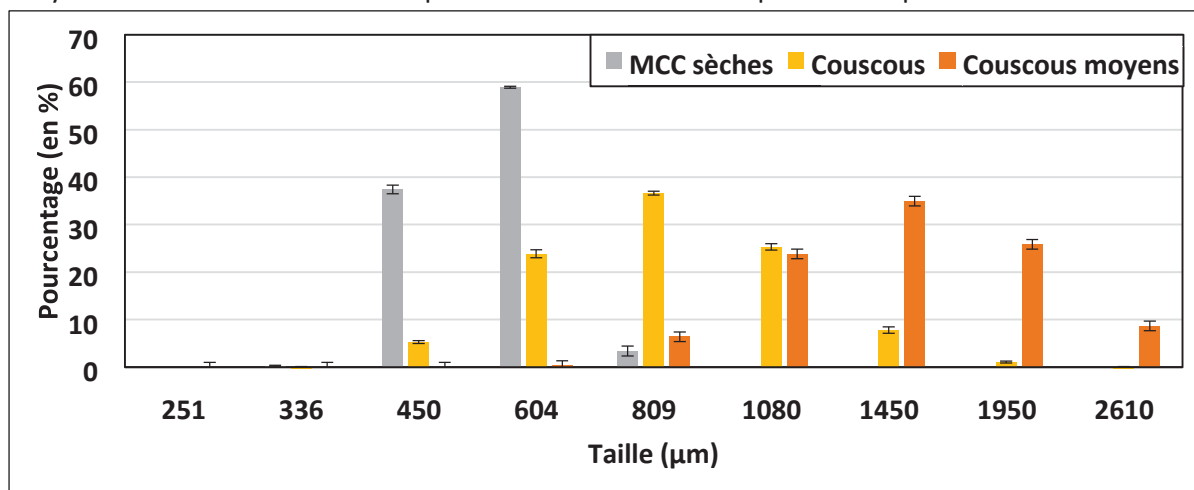


Figure 15 : Granulométrie des particules utilisées pour le grand tambour

## C) Coefficient de frottement

### Définitions

#### *Coefficient de frottement :*

Le coefficient de frottement (ou frottement statique) est une valeur scalaire utilisée pour représenter la force nécessaire pour qu'un objet, d'un matériau donné, inerte et au repos sur une surface connue, puisse être mis en mouvement. Il est défini comme le rapport de cette force normale à la surface appliquée à l'objet.

#### *Angle de talus naturel :*

Si on verse un matériau granulaire dénué de cohésion, sur un plan horizontal rugueux à partir d'une source ponctuelle, le matériau a tendance à s'organiser pour former une structure de géométrie conique. L'angle entre le plan et la génératrice de ce cône est appelé "angle de talus naturel". Cet angle est aussi défini comme l'angle maximal que peut supporter un matériau granulaire donné sans s'écouler. C'est une propriété intrinsèque du matériau, même si cette propriété est légèrement dépendante des conditions de "mise en tas", en particulier de la compacité de l'assemblage granulaire. Cet angle de talus naturel dépend essentiellement du coefficient de frottement entre les grains. C'est ce paramètre qui contrôle la stabilité des pentes naturelles et des talus artificiels.

## Influence du coefficient de frottement particules/parois

L'analyse bibliographique a souvent montré l'influence du coefficient de frottement sur l'écoulement. Dans notre cas, on peut distinguer quatre coefficients de frottement différents : (i) frottement billes/billes, (ii) frottement billes/paroi frontale avant (en verre), (iii) frottement billes/paroi frontale arrière (en acier), (iv) billes/paroi latérale.

Afin d'étudier l'influence du coefficient de frottement entre les billes et les parois sur la ségrégation, une étude numérique a été développée. Nous avons étudié la simulation d'un lit de particules bi-disperses en taille en faisant varier les valeurs des coefficients de frottement billes/paroi :

Etude 1 avec une même valeur de 0,3 de ce coefficient appliquée à toutes les parois (avant, arrière et latérale) (figure 16-1, 17-1, 18-1) ; Etude 2 avec une même valeur de 0,1 de ce coefficient appliquée à toutes les parois (figure 16-2, 17-2, 18-2) ; Etude 3 avec une valeur de 0,1 appliquée à la paroi avant et une valeur de 0,3 appliquée aux deux autres parois (figure 16-3, 17-3, 18-3). En effet, le coefficient de frottement, difficile à mesurer, est souvent un paramètre ajustable lors des simulations par la méthode DEM. L'application d'une valeur de ce coefficient égale à 0,1 sur la paroi frontale doit pouvoir représenter l'utilisation du verre, les autres parois étant en acier.

La couleur orange représente les billes de petite taille, la couleur grise les billes de grande taille.

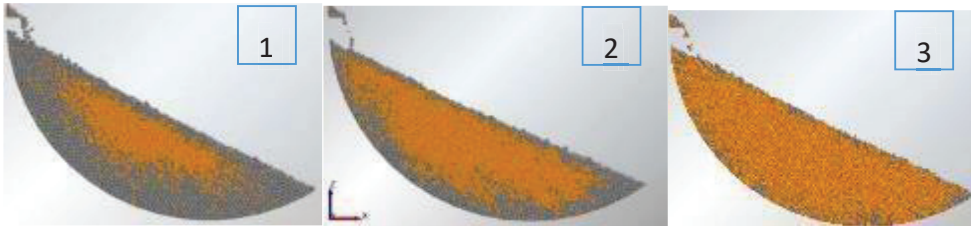


Figure 16 : Répartition spatiale des billes à la paroi avant (vue de devant) pour les 3 conditions de frottement.



Figure 17: Répartition spatiale des billes au centre du tambour (vue du milieu) pour les 3 conditions de frottement.

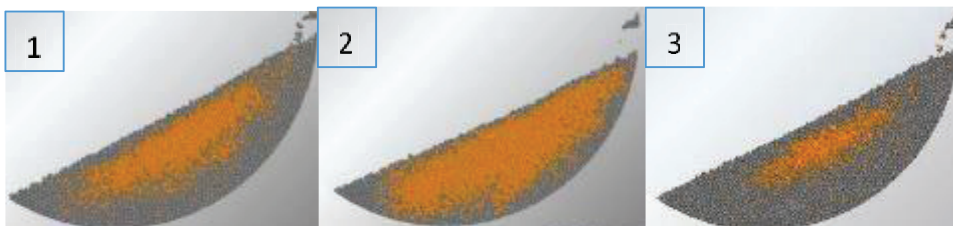


Figure 18 : Répartition spatiale des billes à la paroi arrière (vue de l'arrière) pour les 3 conditions de frottement

Les images des billes dans les couches en contact avec la paroi avant et arrière montrent clairement que le noyau central constitué de petites particules est nettement plus étendu lorsque le coefficient de frottement à la paroi est faible.

Pour quantifier la ségrégation d'un milieu granulaire, un indice de ségrégation a été défini. Il représente une somme d'écart quadratique entre la concentration locale des petites particules et leur concentration moyenne dans tout le lit. La définition de l'indice de ségrégation (noté  $I_s$ ) est approfondie par la suite (partie II B). Les valeurs des indices de ségrégation radiale (évalués uniquement sur l'épaisseur de la couche de billes au contact direct de la paroi) présentées dans le Tableau 4 confirment cette tendance.

Tableau 4 : Indice de ségrégation radiale dans 3 couches du lit pour différentes conditions de frottement aux parois

N° d'ordre	Coefficient de frottement billes-parois	$I_s$ radial paroi avant	$I_s$ radial centre du tambour	$I_s$ radial paroi arrière
1	0,3 sur toutes les parois	0,413	0,193	0,442
2	0,1 sur toutes les parois	0,251	0,315	0,32
3	0,1 sur la paroi avant et 0,3 pour les autres parois	0,059	0,209	0,522

Pour la simulation avec une valeur du coefficient de frottement de 0,1 sur toutes les parois, la valeur de l'indice de ségrégation est élevée mais constante dans la profondeur du tambour, ce qui conduit donc une forte ségrégation radiale mais pratiquement pas de ségrégation axiale. Pour la simulation avec une valeur du coefficient égale à 0,3 sur toutes les parois, la valeur de l'indice diminue au centre du tambour, ce qui conduit donc à une double ségrégation. Les résultats de la simulation avec un coefficient différent entre les parois avant et arrière confirment les tendances observées sur les vues aux parois. Par conséquent, les valeurs des coefficients de frottement à la paroi jouent un rôle important dans l'état de mélange d'un lit bi-disperse en tailles. En effet, à la paroi où le coefficient est le plus faible, il y a une accumulation des petites billes. Plus le coefficient de frottement est faible, plus le noyau central de particules ségrégées est important mais il reste toutefois uniforme le long du tambour.

La valeur du coefficient de frottement de 0,1 à la paroi en verre étant trop faible par comparaison avec les valeurs de nos expériences, nous avons effectué nos simulations avec une valeur du coefficient de frottement à la paroi en verre égale à 0,2, valeur qui s'est révélée concluante. Avec les parois en acier nous avons adopté une valeur du coefficient de frottement égale à 0,3

De plus, les valeurs du coefficient de frottement entre particules ont été vérifiées à l'aide des données expérimentales mesurées sur les angles de talus naturel de nos billes comme décrit dans le paragraphe suivant.

### Expériences de formation d'angles de talus naturel

Pour réaliser ces expériences, nous avons commencé par utiliser l'appareil d'Hosokawa [24]. Cette méthode utilise un entonnoir pour la formation du tas de particules, mais un problème est apparu avec nos billes d'acétate de cellulose et de polypropylène qui sont électrostatiques et qui ne formaient pas de tas conique. Une deuxième technique a donc été mise en œuvre à l'aide d'un bécher rempli de particules que l'on retournait rapidement sur une base plane de forme circulaire (Figure 19) pour former un tas. Cette méthode présente l'avantage d'éviter l'effet triboélectrique et de minimiser les charges électrostatiques. Cependant la mesure d'un angle de talus naturel dépend de la méthode de mise en tas de la poudre de sorte que les valeurs obtenues peuvent différer d'une méthode de mesure à l'autre.

Nous avons donc utilisé la technique du bécher retourné. Plusieurs types de billes (acétate de cellulose de trois diamètres différents, polypropylène et cellulose microcristalline) ont été testés. De plus, l'influence de la nature du matériau plan qui supportait le tas (acier ou verre), de sa rugosité (lisse ou recouvert de papier de verre) et du diamètre de la surface du tas en contact avec son support ont été étudiés. Les angles de talus ont été déterminés à l'aide d'un rapporteur (provenant de l'appareil d'Hosokawa); cet angle a été mesuré par rapport à l'horizontale comme on peut le voir sur la photo de la Figure 19:

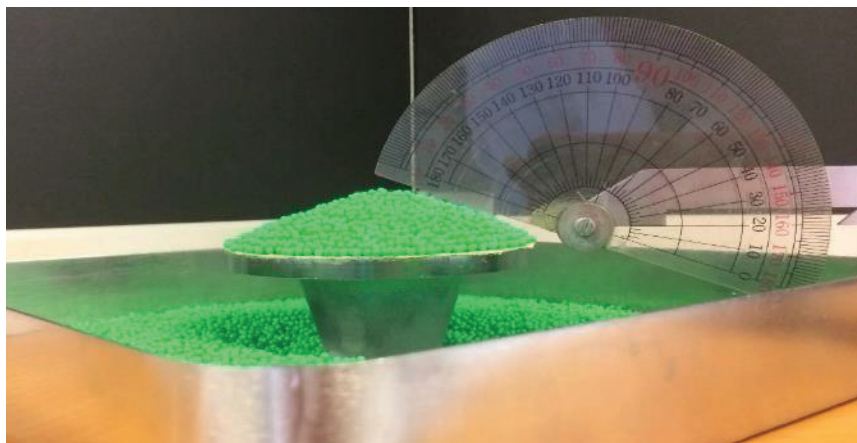


Figure 19 : Mesure d'angles de talus avec des billes de polypropylène de 2mm

Les résultats des expériences de formation de talus sont présentés dans le Tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5 : Résultats des essais expérimentaux d'angles de talus avec différentes particules et différentes tailles et types de surface. (Unité : degré)

Types de particules	Tailles	Support	Expérience	1	2	3	Moyenne	Moyenne totale	Ecart type
<b>AC</b>	1mm	5 cm	Lisse	22	21,5	24	22,5	<b>22,7</b>	1,02
			Papier verre 4	24	24	22	23,3		
			Papier verre 3	22	23	22,5	22,5		
		8 cm	Papier verre 4	24	22	23	23,0		
			Papier verre 3	22	23	21	22,0		
	2mm	11,5 cm	Papier verre 4	24	23	24	23,6		
	3 mm	11,5 cm	Lisse	22	21	23	22,0		
<b>MCC</b>	500 $\mu$ m	5 cm	Lisse	26	27	27	26,6	<b>27,0</b>	0,63
			Papier verre 3	27	28	27	27,3		
<b>PP</b>	2 mm	10 cm	Lisse	25	24	23	24,0	<b>23,6</b>	0,71
		12 cm	Lisse	24	23	23	23,3		
<b>Mélange AC et PP</b>	2 mm	10 cm	Lisse	20	22	19,5	20,5	<b>21,3</b>	1,32
		12 cm	Lisse	23,5	21	22	22,1		

La valeur moyenne de l'angle de talus pour l'acétate de cellulose est de 22,7 degrés pour l'acétate de cellulose, de 27,0 degrés pour la cellulose micro-cristalline, de 23,6 pour le polypropylène et enfin de 21,3 pour le mélange de particules acétate de cellulose et polypropylène.

Les dimensions des bases planes de forme circulaire ont été choisies en fonction de la taille des billes, afin que les billes les plus grosses ne forment pas un tas conique sur une surface trop petite ; dans certains cas il a fallu utiliser des diamètres plus grands. De plus, nous avons voulu vérifier si une différence d'état de surface avait une incidence sur les valeurs de l'angle de talus. Cependant les différences observées étaient trop faibles et non significatives pour pouvoir en tirer des conclusions fiables. Concernant l'acétate de cellulose, la taille des billes ne semble pas influencer les résultats expérimentaux obtenus.

## Simulations de talus naturels pour obtenir les coefficients de frottements

Les valeurs des coefficients de frottement ne sont pas directement déductibles des angles de talus expérimentaux pour un matériau donné. Il a donc fallu procéder par identification, c'est-à-dire en simulant la formation de talus pour plusieurs valeurs de ce coefficient de frottement jusqu'à retrouver les valeurs des angles de talus obtenues expérimentalement.

Pour ce faire, un plan de simulation de formation de talus a été mis en œuvre pour plusieurs valeurs des coefficients de frottement, à savoir : 0,3 ; 0,5 et 0,8. Les angles tirés des résultats graphiques des simulations ont été comparés aux mesures expérimentales d'angles de talus décrites ci-dessus.

Les simulations ont été réalisées dans les mêmes conditions que les études expérimentales avec les 2 types de billes (AC et PP). La simulation a été réalisée en 2 phases. Pendant la phase de remplissage, le logiciel génère instantanément l'ensemble des billes dans un cylindre représentant le béccher et un tassement par gravité s'opère. Ensuite, lors de la phase de formation du talus, les parois sont effacées, sauf sur une hauteur de 4mm (2 diamètres de billes) sur le bas, pour que les billes ruissellent et forment le cône du talus mais que le tas de billes ne s'effondre pas complètement. Un temps simulé de 3 secondes a été alloué à chaque phase.

L'angle de talus est ensuite mesuré graphiquement sur une coupe axiale du tas, à partir de l'image fournie par le logiciel EDEM, comme illustré sur la figure 20.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6 et sur la Figure 20.

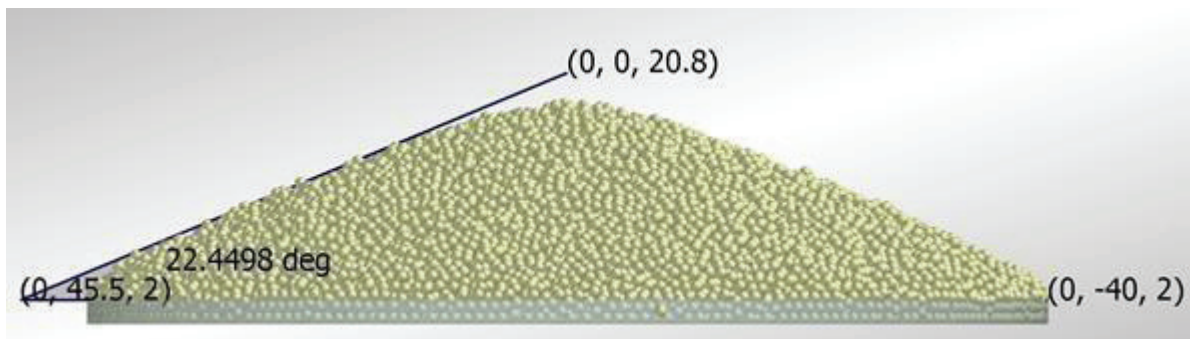


Figure 20 : Image du logiciel représentant un tas formé de billes d'AC de 2 mm avec un coefficient de frottement de 0,3 et la mesure d'angle.

Tableau 6 : Valeurs simulées des angles de talus naturel pour chaque type de billes en fonction du coefficient de frottement et comparaison aux valeurs expérimentales.

Coefficient de frottement	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	Expérimental
AC	/	/	22,5°	24,2°	/	25°	22,5°
Polypropylène	15,3°	19,3°	20,9°	21,6°	23,2°	/	23,6°
Mélange AC et PP	/	/	/	/	21,3°	23,3°	21,3

Trois valeurs différentes d'angles de talus ont été mesurées en fonction des valeurs des coefficients de frottement. Pour les billes d'acétate de cellulose la valeur d'angle obtenue de 22,45° pour une valeur du coefficient de frottement de 0,3 ; 24,2° pour une valeur de coefficient de frottement de 0,5 et 25° avec une valeur de 0,8. D'après nos essais expérimentaux, la valeur de l'angle de talus pour des particules d'acétate de cellulose est de 22,5° on en a donc déduit que c'est la valeur du coefficient de frottement égale à 0,3 qui est la plus cohérente avec notre valeur expérimentale d'angle de talus et qui sera donc retenue par la suite pour nos simulations.

Concernant les billes de polypropylène, 6 simulations ont été réalisées avec des valeurs du coefficient de frottement variant de 0,1 à 0,6. La valeur du coefficient de frottement de 0,2 nous a conduit à une valeur d'angle de talus de 19,3° tandis que la valeur déterminée expérimentalement est de 19,5° ; c'est donc cette valeur du coefficient de frottement que nous avons retenue par la suite pour nos modélisations.

Enfin, concernant le mélange de particules d'acétate de cellulose et de polypropylène, seulement 2 essais ont été réalisés, avec des valeurs des coefficients de frottement de 0,6 et de 0,8. L'angle mesuré sur la simulation avec un coefficient de frottement de 0,6 (21,25°) est proche de nos expériences de formation de talus naturel (21,33°), c'est donc cette valeur qui sera utilisée par la suite pour les simulations.

Il faudra donc ajuster les valeurs de ces coefficients pour la suite de nos simulations.

Les valeurs du coefficient de frottement identifiées à partir de ces mesures expérimentales correspondent au frottement entre des billes d'un matériau donné. Cependant, la valeur du coefficient de frottement des billes sur les parois du tambour n'est pas forcément la même.

## II. Simulation par la méthode DEM

Les simulations ont été réalisées avec le code commercial EDEM (DEM Solutions, Edinburgh, RU). Ce code est basé sur la méthode des éléments distincts (DEM – discrete element method) qui consiste à déterminer le mouvement individuel (trajectoire, vitesse) de chaque particule qui résulte de l'ensemble des interactions avec toutes les autres particules et les parois en contact avec cette particule.

### A) Méthodes DEM

Dans le cadre de la méthode DEM, l'équation de mouvement de Newton est appliquée à chaque grain. Le grain peut être soumis à des efforts de contact, à des efforts de frottement, de cohésion, d'agglomération etc. Pour une loi de contact inter-granulaire standard (intégré dans EDEM sous le nom 'Hertz-Mindlin'), ces efforts comprennent des raideurs de contact dans les directions normale et tangentielle, un effet d'amortissement dans les deux directions et un effet de frottement tangential.

L'équation [2] de la dynamique de chaque grain est donnée-ci-dessous où  $m_i$  représente la masse du grain ;  $x_i$  le vecteur position et la somme  $\sum F_i$ , la résultante des forces subies par ce grain :

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum F_i \quad (2)$$

L'effort normal de contact est la conséquence de la déformation élastique de la zone de contact. Les déformations restent en général négligeables devant la taille des particules solides en contact. Dans le cadre de la méthode DEM, le postulat est que les grains restent rigides et indéformables mais qu'ils ont la possibilité de s'interpénétrer légèrement. L'effort de contact est proportionnel à la profondeur de cette interpénétration ; c'est un effort répulsif qui tend à s'opposer à l'interpénétration. Le coefficient de raideur de cet effort est un paramètre qui dépend des propriétés élastiques des grains (module de Young, coefficient de Poisson) mais qui doit être corrigé par l'utilisateur de façon que l'interpénétration entre les grains reste limitée. De manière pratique, par le biais d'un ajustement des propriétés des grains (réduction de la valeur du module d'élasticité ou de cisaillement), on modifie le coefficient de raideur pour limiter l'interpénétration au centième ou au millième du plus petit diamètre des grains. Cependant, les propriétés des grains influent aussi fortement sur la valeur du plus petit pas de temps de calcul admissible. Un compromis doit donc être trouvé avec des valeurs ajustées en limitant l'interpénétration mais n'allongeant pas le pas de temps de base.

Pour tenir compte de la dissipation de l'énergie lors du contact des grains, la manière la plus simple est d'introduire un amortissement visqueux en parallèle de la raideur normale de contact, c'est-à-dire une force proportionnelle à la vitesse normale relative des grains. Le coefficient d'amortissement est normalement évalué à partir d'un paramètre empirique appelé coefficient de restitution. Ce dernier est en fait le rapport de la vitesse de séparation (après la collision) sur la vitesse d'approche (avant la collision) lors d'une collision des grains. Il peut être déterminé en mesurant la hauteur de rebond vertical d'un grain sur une paroi plane ou identifiée.



Dans la direction tangentielle de contact entre les deux grains, il est nécessaire de prendre en compte le frottement. Ce frottement impose une limite supérieure avant glissement à l'effort tangentiel, limite supposée proportionnelle à la valeur de l'effort normal. Le coefficient de frottement statique est un paramètre physique à mesurer ou à identifier. Il est par définition égal au rapport entre la force tangentielle capable de mettre en mouvement un grain (initialement immobile sur une surface ciblée), et la force perpendiculaire à cette surface appliquée à ce grain. La valeur de ce paramètre peut être identifiée à partir des essais de formation de talus naturel.

L'existence des efforts tangentiels induit la rotation des grains. Une équation de dynamique supplémentaire doit donc être résolue pour permettre d'évaluer les vitesses angulaires des grains. L'hypothèse simplificatrice sous-jacente est que les grains se touchent deux à deux en un seul point de contact, ce qui semble un peu en contradiction avec la notion de zone de pénétration définie ci-avant.

L'utilisation de la loi de contact DEM standard requiert donc d'identifier les propriétés élastiques des grains (avec des ajustements parfois nécessaires) pour évaluer les raideurs normale et tangentielle et deux paramètres empiriques liés à la dissipation d'énergie dans les directions normale (coefficient de restitution) et tangentielle (coefficient de frottement). Dans l'approche simplifiée appliquée dans le cadre de cette étude, la résistance au roulement, la cohésion entre les grains et leur agglomération ne sont pas prises en compte.

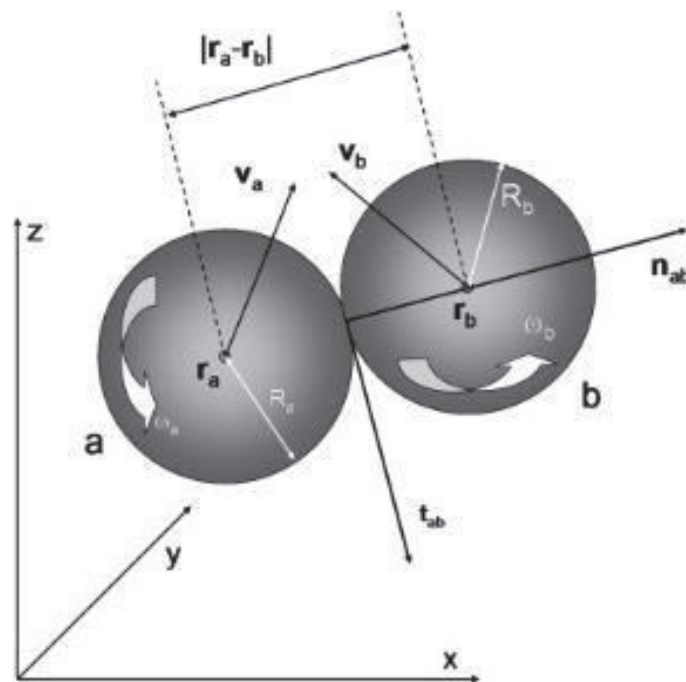


Figure 21 : Figure illustrant la géométrie et les forces de 2 grains en interaction en méthode DEM

La figure 21 ci-dessus illustre la géométrie considérée. Deux grains sphériques sont représentés par a et b comme indiqué ; leurs centres de gravité sont respectivement  $r_a$  et  $r_b$ , leurs vitesses de translation :  $v_a$  et  $v_b$ , tandis que leurs vitesses de rotation sont désignées par  $\omega_a$  et  $\omega_b$ , et est positive dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans un plan de coordonnées. Chaque disque a un rayon ( $R$ ), une masse ( $m$ ) et un moment d'inertie ( $I$ ). Deux vecteurs unitaires  $n_{ab}$  et

$t_{ab}$  perpendiculaires entre eux sont définis,  $n_{ab}$  étant dirigé selon la ligne reliant les centres de gravité.

Ces deux vecteurs permettent de décomposer la force s'exerçant au point de contact en une force normale et une force tangentielle (dite aussi de cisaillement) pour chaque contact entre particules.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel EDEM, de la société DEM solutions, basée à Edimbourg (Royaume-Uni). Notre choix s'est porté sur ce logiciel car il a une facilité d'utilisation que n'offrait pas le deuxième logiciel présélectionné (PFC de la société ITASCA, France). En effet, EDEM est un logiciel avec une interface utilisateur élaborée, pratique à prendre en main pour tous types d'utilisateurs. Par ailleurs, il permet d'étendre les fonctions de base avec des routines utilisateur que l'on peut ajouter. Cette possibilité va être exploitée pour rajouter un modèle de calcul pour la partie séchage.

Le logiciel nécessite de renseigner les valeurs des paramètres géométriques (dimensions, géométrie et matériaux de l'enveloppe), des particules (tailles, formes, masses, etc.), des modèles d'interactions (particules-enveloppe ; particules-particules) et la façon de générer les particules (nombre, débit, formation du lit initial, etc.).

Le modèle de contact utilisé pour toutes les simulations est celui de Hertz-Mindlin sans glissement ; ce modèle est réglé par défaut dans le logiciel EDEM (cf paragraphe précédent.).

## B) Propriétés spécifiques à la méthode DEM

### Propriétés des matériaux

Pour permettre de faire varier les propriétés mécaniques des billes, 2 matériaux granulaires ont été utilisés, en raison de leurs propriétés physiques différentes, à savoir l'acétate de cellulose et le polypropylène. Le lit de particules a été généré par le logiciel de manière aléatoire.

La liste des valeurs des coefficients et des propriétés utilisées pour les simulations est donnée ci-dessous ; ces valeurs sont données par le fournisseur de billes (M&L).

Tableau 7 : Propriétés des matériaux utilisés pour les particules

Propriétés	Acétate de cellulose		Polypropylène	Unités
Diamètre	2	3	2	mm
Volume d'une bille	$4,19.10^{-9}$	$1,41.10^{-8}$	$4,19.10^{-9}$	$m^3$
Masse d'une bille	$5,36.10^{-6}$	$1,8.10^{-5}$	$3,77.10^{-6}$	kg
Masse volumique du matériau	1280		910	$kg.m^{-3}$
Moment d'inertie	$2,14.10^{-12}$	$1,63.10^{-11}$	$1,5.10^{-12}$	$kg.m^2$
Coefficient de cisaillement G	$1.10^6*$		$1,10.10^6*$	Pa
Module de Young	2,8*		2,84*	MPa
Coefficient de poisson $\nu$	0,4	0,4	0,42	/

\* Le coefficient de cisaillement G est calculé automatiquement par le logiciel à partir du module de Young. Les valeurs des coefficients de cisaillement sont automatiquement ajustées, les valeurs de la littérature étant de  $0,64.10^9$  Pa pour les 2 types de matériaux. Cet ajustement a permis de diminuer le temps de simulation sans influencer le comportement dynamique des particules.

Le tambour qui a servi pour nos simulations est constitué d'un cylindre de 30 cm de diamètre et de 4,2 cm de profondeur, composé d'acier sur les parois périphérique et arrière et de verre sur la paroi avant. Des ailettes, droites et périphériques, sont apposées sur la paroi périphérique de longueur 1,5cm et 4cm (épaisseur de 4mm) et dont le nombre varie (0 ; 4 et 8). La vitesse de rotation du tambour est constante c'est-à-dire égale à 3 rotations par minute. Les propriétés des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Propriétés des matériaux utilisés pour le tambour

Dimension/Propriétés	Acier	Verre	Unités
Diamètre	30	30	cm
Profondeur	4,2	-	cm
Volume du tambour	$2,12 \cdot 10^{-3}$	-	$m^3$
Masse volumique	7800	2500	$kg \cdot m^{-3}$
Coefficient de cisaillement G	$7 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^{10}$	Pa
Coefficient de Poisson $\nu$	0,3	0,21	/

NB : Des simulations préliminaires (essentiellement présentées dans la partie I des résultats et discussions) ont été réalisées avec un tambour légèrement différent : la profondeur était de 3 cm, toutes les parois ayant les propriétés de l'acier.

## Interactions

Les valeurs des coefficients qui ont été saisies dans le logiciel EDEM sont pour la plupart issues de la littérature, car l'acétate de cellulose et le polypropylène sont des matériaux régulièrement utilisés dans des simulations DEM. Malheureusement, les valeurs de deux coefficients (frottement et roulement) ne sont pas connues et ont dû être déterminées expérimentalement.

Il y a 3 coefficients d'interaction dans le logiciel avec les valeurs suivantes :

- Le coefficient de restitution équivalent à 0,3
- Le coefficient de roulement équivalent à 0
- Le coefficient de frottement qui doit être ajusté.

Les valeurs des 2 premiers coefficients ont été utilisées pour toutes les interactions (supposées être identiques pour les contacts paroi-particule et particule-particule).

La valeur du coefficient de frottement a été ajustée pour chaque interaction ; il est donc spécifique pour chaque paire de matériaux et les différentes valeurs de ces coefficients sont résumées dans le Tableau 9 : Coefficient de frottement entre les différents matériaux.

Tableau 9 : Coefficient de frottement entre les différents matériaux

Matériaux \ Matériaux Billes	Géométrie		Billes	
	Verre	Acier	Acétate de cellulose	Polypropylène
Acétate de cellulose	0,2	0,3	0,3	0,6
Polypropylène	0,2	0,3	0,6	0,6

Les valeurs des coefficients de frottement lors des interactions particules-particules ont été mesurées grâce à la technique des angles de talus comme expliqué dans le paragraphe I.C.

Pour les valeurs des coefficients de frottement à la paroi, nécessaires pour la simulation numérique des interactions particules-parois, elles ont été identifiées sur le même principe à partir des essais sur les maquettes froides, durant lesquels le lit de particules a pu être observé à travers la face frontale transparente en verre. A partir de ces résultats expérimentaux, l'ajustement du coefficient de frottement par simulation a permis d'obtenir des résultats concordants et de fixer la valeur appropriée de ce coefficient.

Remarque : Initialement pour les simulations préliminaires, les valeurs des coefficients de frottement n'avaient pas encore été obtenues, elles avaient donc été arbitrairement fixées égales à 0,5 pour toutes les interactions, parois-particules ou particules-particules.

### Nombre de billes nécessaires

Le lit de particules est généré de façon aléatoire mais avec un nombre de particules donné pour chaque type. Il faut donc connaître le nombre de billes pour chaque configuration et chaque remplissage.

Le lit est composé en volume-volume c'est-à-dire que la moitié du volume du lit est composée d'un type de particules et l'autre moitié de l'autre type de particules. C'est le volume occupé par chaque fraction de type de particules, sans mélange initial, qui est pris en compte et non la concentration volumique en billes.

Des calculs s'appuyant sur des essais numériques ont été effectués pour connaître le nombre de billes nécessaires pour chaque configuration. Ces calculs sont présentés en annexe 1 et les résultats dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Nombre de billes nécessaires en simulation

Taux remplissage	Bi-tailles			Bi-densités		
	1/4	1/6	1/8	1/4	1/6	1/8
AC 3mm	16388	10847	8183	-	-	-
AC 2mm	55884	37332	27905	55884	37332	27905
PP 2mm	-	-	-	57381	36328	27154
Nombre total de particules	72272	48179	36088	113265	73660	55059

Les volumes à remplir pour chaque type de billes sont  $370,5\text{cm}^3$  pour un taux de remplissage de 1/4, de  $247,5\text{cm}^3$  pour un taux de remplissage 1/6 et  $185\text{cm}^3$  pour un taux de remplissage de 1/8.

A taux de remplissage égal, la masse du lit bi-densité est plus faible que la masse du lit bi-taille, en effet le lit bi-densité est composé à moitié de particules de polypropylène qui sont les plus légères.

Les fractions sont différentes suivant le type de lit :

- Pour le lit bi-disperse en tailles, la fraction en nombre des billes de 2 mm est égale à 0,773
- Pour le lit bi-disperse en densités, la fraction en nombre des billes d'acétate de cellulose est de 0,506 à cause d'une plus grande porosité externe.

Les fractions sont calculées en divisant le nombre de particules d'AC 2mm par le nombre total de particules dans le lit (lit bi-densité ou bi-taille).

Les simulations préliminaires portaient un nombre de particules différent, car le tambour était moins profond, 3cm au lieu de 4,2cm pour les simulations suivantes. Les calculs sont présentés en annexe 2 et les résultats sont regroupés dans le Tableau 11.

*Tableau 11 : Nombres de particules nécessaire pour les simulations préliminaires*

Taux remplissage	Bi-tailles		Bi-densités	
	1/3	1/4	1/3	1/4
AC 3mm	15986	12025	-	-
AC 2mm	53954	40585	53954	40585
PP 2mm	-	-	53954	40585
Nombre total de particules	69940	52610	107908	81170

### III. Essais en tambour tournant

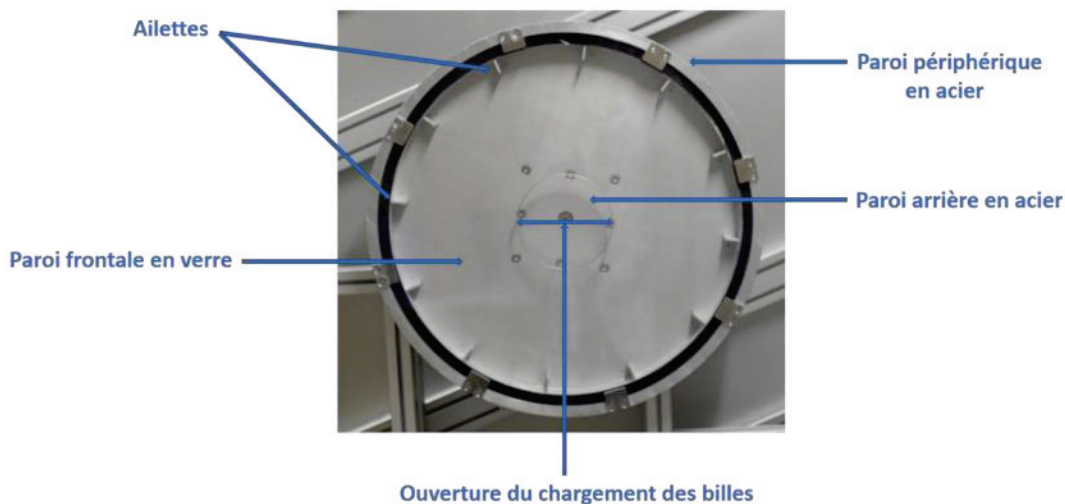
Les résultats des simulations ont été comparés aux résultats expérimentaux pour vérifier la validité et la cohérence du modèle EDEM et des valeurs des paramètres utilisés. Pour mener à bien l'étude expérimentale, trois maquettes de tambours tournants de type tranches ont été spécialement réalisées.

#### A) Maquette de tambour tournant

##### Dimensionnement du tambour tournant

Les tambours tournants ont été spécialement réalisés par la société Didatech (Fraisses, France) à partir d'un cahier des charges spécifique. Les tambours de type tranches ont été choisis de façon à pouvoir observer essentiellement la ségrégation radiale à la paroi frontale du tambour. Ils sont de type « tranche » c'est-à-dire que la profondeur est très inférieure au diamètre, il y a donc une faible épaisseur du lit de particules selon l'axe horizontal du tambour, rapporté à son diamètre.

Le cahier des charges préconisait, outre les dimensions, une paroi en verre résistante et transparente pour observer le mouvement des billes au sein du lit et une possibilité d'ajouter des ailettes de différentes tailles. En effet lors de nos essais de simulation, plusieurs types et plusieurs nombres d'ailettes ont été essayés ; les essais expérimentaux vont nous permettre de réaliser le même protocole. Notre tambour tranche est constitué entièrement en acier excepté la paroi frontale qui est en verre ou en plexiglass sur le grand tambour. Une photographie de l'équipement est présentée sur la Figure 22.



De plus, les matériaux choisis devaient permettre d'éviter les effets électrostatiques, car les billes d'acétate de cellulose sont fortement triboélectriques ; pour surmonter cette difficulté, l'intégralité de la structure a été reliée à la terre et les matériaux du tambour ont été traités pour limiter les phénomènes parasites de charge électrostatique. Les tambours sont montés sur des axes horizontaux reposant sur des paliers fixés sur une structure mécanique robuste et appropriée.

Il était nécessaire que les tambours de type tranches puissent tourner lentement dans une gamme de vitesse de rotation comprise entre 0 et 3 rpm (correspondant à la gamme utilisée dans le procédé industriel).

Ces vitesses de rotation nous ont permis de réaliser tous nos essais expérimentaux avec un régime d'écoulement continu à surface plane (Nombre de Froude :  $15 \cdot 10^{-3}$ ). Le mouvement lent des tambours et la qualité mécanique des paliers et des pièces mobiles ont permis d'éviter les vibrations qui auraient pu biaiser les observations.

Trois tambours tranches avec des diamètres différents ont été réalisés avec une profondeur unique de 4,2cm. Ces trois diamètres (30 cm, 60 cm et 160 cm) n'ont pas été pris au hasard mais ils correspondent aux diamètres de tambour tournants permettant d'étudier une extrapolation à l'échelle industrielle. Toutes les dimensions sont présentées dans le Tableau 12 et sur la Figure 23.

Tableau 12 : Dimensions des tambours tranches

		Petit	Moyen	Grand
Diamètre (cm)		30	60	160
Profondeur (cm)		4,2		
Volume (m <sup>3</sup> )		$2,97 \cdot 10^{-3}$	$11,88 \cdot 10^{-3}$	$84,45 \cdot 10^{-3}$
Nombre d'ailettes	Min	4	6	24
	Max	8	12	
Longueur d'ailettes (cm)	Min	1,5	2,5	3,5
	Max	4	5	



Figure 23 : Vue des tambours de types tranches (2D) de différents diamètres (30 cm à gauche, 60cm à droite et 160cm au second plan)



## Ailettes

Chaque tambour a été livré avec un lot d'ailettes amovibles, fixées à la paroi périphérique perpendiculairement à la paroi frontale et pouvant être retirées. Le petit tambour peut recevoir jusqu'à 8 ailettes de 1,5 cm et le tambour moyen jusqu'à 12 ailettes de 2,5 cm. Comme toutes les simulations ont été effectuées avec des nombres d'ailettes réduits, il a fallu fabriquer des obturateurs pour obturer les passages d'ailettes non utilisés lors des expériences correspondantes. De même, pour effectuer des simulations avec des hauteurs d'ailettes variables, supérieures à celles d'origine, il a fallu construire un jeu d'ailettes pour chacun des tambours.

Au total 8 obturateurs pour le petit tambour et 12 obturateurs pour le tambour moyen ont été fabriqués afin de tester les différentes configurations y compris un lit sans ailettes. La construction des obturateurs a été réalisée en tronçonnant une barre d'équerre de 4mm d'épaisseur. La seule différence existant entre les obturateurs du petit et du moyen tambour est la largeur de la coupe pour correspondre à la taille des ouvertures à obturer : 15mm pour le petit tambour et 25mm pour le tambour moyen présenté sur la Figure 24.

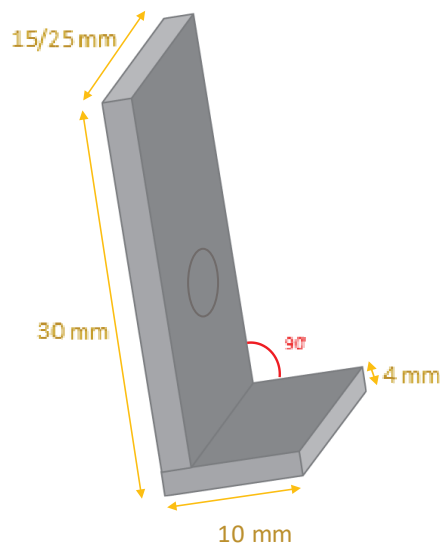


Figure 24 : Schéma de dimensionnement des obturateurs d'ailettes

Certaines simulations ayant été exécutées avec des ailettes plus longues (4cm de longueur pour le petit tambour et 5cm pour le moyen), elles ont donc été réalisées expérimentalement. Les contraintes de conception du tambour étant que l'accès se fasse par une ouverture au centre de la face avant en verre, il a fallu que les trous de fixation des ailettes aient des positions et des dimensions bien précises. Il a donc fallu les concevoir en 2 parties et les assembler lors de la mise en place, l'une se glissant par l'avant du tambour tandis que l'autre venant la bloquer par derrière. L'ailette fait 4 ou 5cm de longueur selon le type de tambour et 7 cm de largeur pour

qu'elle puisse dépasser du tambour afin d'être fixée à son point attache (Voir schéma en Figure 25).

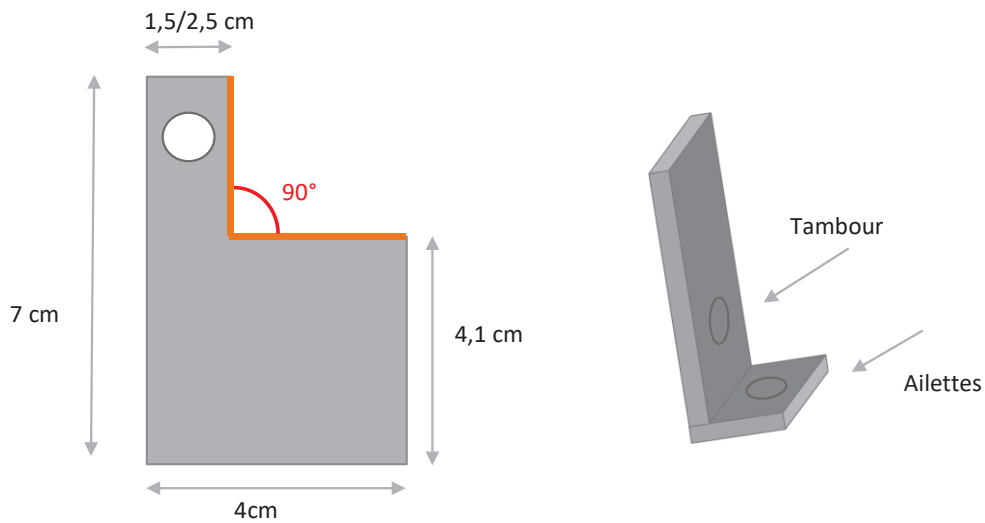


Figure 25 : Schéma des grandes ailettes pour le petit et le moyen tambour réalisées sur mesure

Grâce à la construction de ces obturateurs et de ces grandes ailettes, les possibilités d'expériences sont plus importantes. Toutes les possibilités sont résumées dans le Tableau 13, qui montre qu'il y en a 5 par diamètre de tambour.

Tableau 13 : Possibilité d'expériences grâce aux ailettes et aux obturateurs construits sur le petit et le moyen tambour

Nombre d'ailettes	Ailettes du petit tambour				Ailettes du moyen tambour					
	0	4	8	12	0	6	12			
Longueur d'ailettes (cm)	/	1,5	4	1,5	4	/	2,5	5	2,5	5

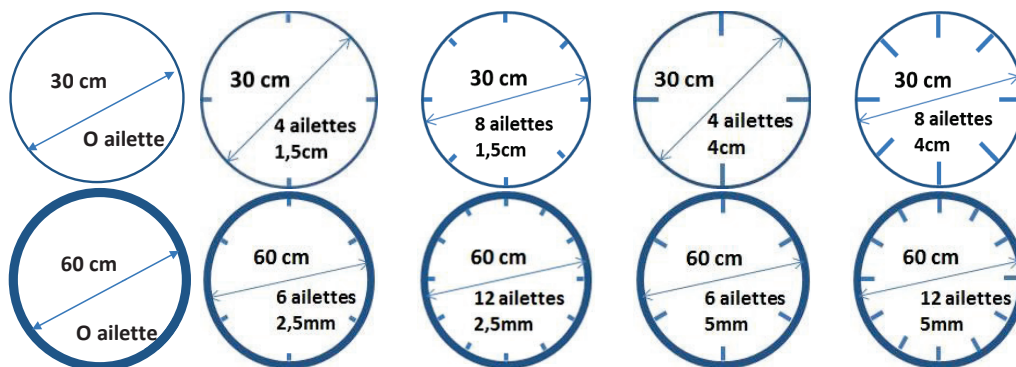


Figure 26 : Schéma des 10 possibilités de tambour grâce aux ailettes et aux obturateurs

## Fonctionnement

Le remplissage du tambour est effectué grâce à une ouverture au centre de la paroi frontale transparente dont le diamètre est respectivement de 8 cm pour le petit tambour et de 16 cm pour le moyen tambour. Pour empêcher la perte de particules en cours d'essais, cette ouverture est obturée grâce à un bouchon en élastomère. Le remplissage est compartimenté de part et d'autre d'une ailette préalablement placée en position verticale en bas du tambour tournant pour pouvoir reproduire les conditions initiales de démarrage et ainsi parvenir en pratique à une bonne reproductibilité de nos expériences (voir Figure 27).

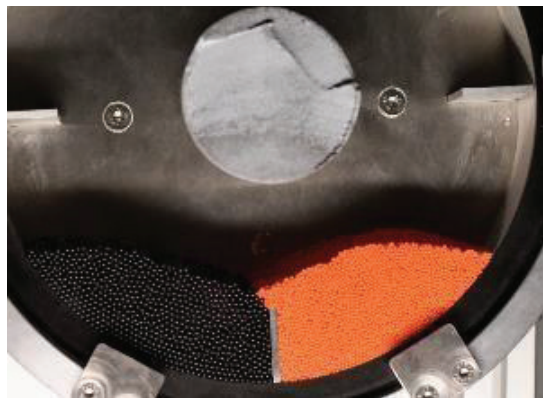


Figure 27 : Photo du petit tambour tournant au remplissage à volume égal avec 4 ailettes de 4cm

La vitesse de rotation des tambours de tous nos essais est comprise entre 0 et 3 tours par minute.

La vidange du tambour se fait en ouvrant une trappe située dans la paroi périphérique en acier puis en faisant tourner le tambour à faible vitesse de rotation jusqu'à ce que la trappe soit en position la plus basse afin que toutes les billes puissent être récupérées à l'aide d'un seau placé sous le tambour.

## B) Acquisition et traitement d'images

Lorsque le tambour tournant est en mouvement, une série de photos ou une vidéo sont prises grâce à un appareil photo. Ces photos sont ensuite traitées à l'aide d'un logiciel de traitement d'images afin de déterminer la ségrégation radiale présente dans le lit, ou plus précisément dans la monocouche de particules situées à la paroi frontale en verre du tambour et visualisées sur nos photographies.

### Matériel de photographie

La ségrégation du lit est suivie grâce à la prise d'images avec un appareil photo numérique de type reflex (Nikon D500) équipé d'un objectif à focale fixe de 50mm (c'est un objectif à petite focale pour une plus large zone d'étude), une ouverture réglée à F2.5 pour améliorer la netteté

de l'image et une sensibilité réglée à 8000 iso pour obtenir une image plus claire. L'appareil photo est posé sur un trépied à une distance de 1m du tambour. L'horizontalité est assurée grâce à un niveau à bulle et contrôlée à partir des paramètres de l'appareil.

La surface de l'écoulement doit être éclairée de façon uniforme pour les prises de vue. Malgré la grande ouverture de l'objectif de l'appareil, les éclairages naturels ou artificiels existants dans la zone se sont révélés insuffisants. Un tube fluorescent a donc été ajouté au plus près du tambour pour éclairer suffisamment le lit et obtenir des photos de qualité supérieure, nécessaire au traitement numérique ultérieur (Voir Figure 28)

Ces photos sont prises en série grâce à l'intervallomètre de l'appareil photo, d'abord toutes les 10 secondes pendant les 2 premières minutes puis toutes les 5 minutes durant 2h.

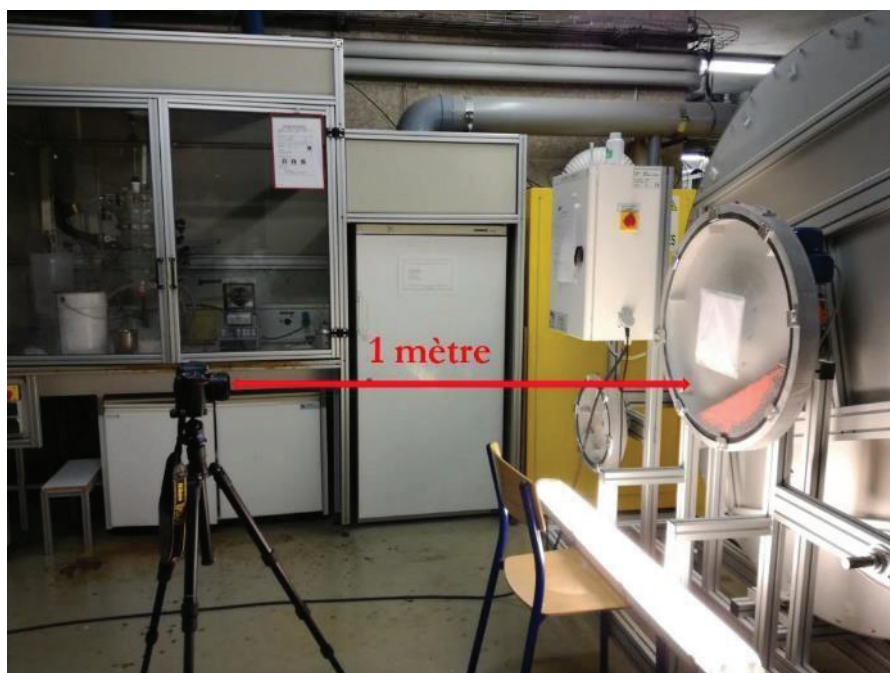


Figure 28 : Appareil photo et équipement des tambours tournants

## Logiciel Image J

Les images numérisées sont ensuite analysées à l'aide du logiciel Image J, pour déterminer l'angle d'écoulement du talus, l'indice de ségrégation et l'aire de surface du noyau de particules ségrégées, visibles à travers la paroi frontale transparente en verre.

Le logiciel utilisé pour l'analyse d'images, Image J, a été développé par le « National Institutes of Health » de Bethesda (Maryland, USA). Il est gratuit et disponible sur Internet avec le code source. Le programme est écrit en Java ce qui le rend facilement utilisable sur différents systèmes. Il est spécialisé pour le traitement d'image et permet de calculer la taille des particules ou de les séparer par couleurs pour ensuite déterminer la concentration de certaines particules sur une surface donnée. Ces images nous ont permis de comparer facilement nos résultats expérimentaux avec nos simulations.

Le but du travail sur ce logiciel est, dans un premier temps, de seuiller chaque image en couleur, pour obtenir 2 catégories de couleurs bien distinctes. Ensuite, les contours de chaque bille sont tracés pour déterminer le nombre et le type des billes présentes dans en contact avec la paroi frontale en verre du tambour (assimilable à une mono-couche de billes).

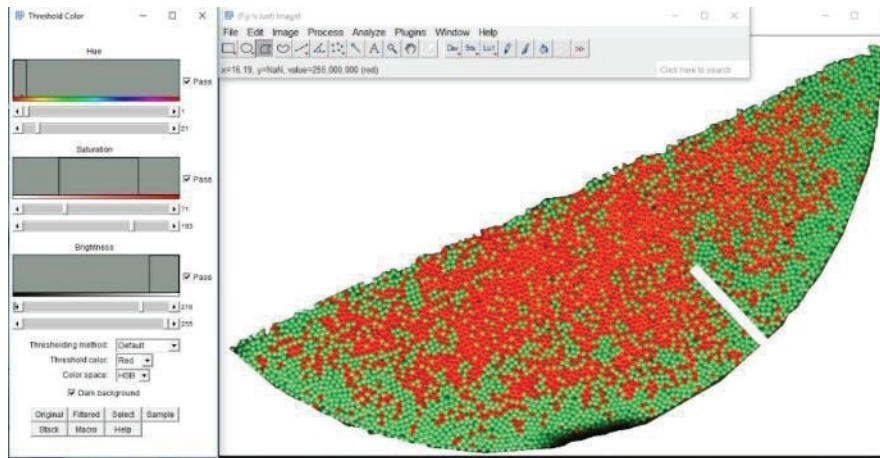


Figure 29 : Capture d'écran du logiciel Image J

Plusieurs étapes ont été indispensables pour traiter les images avec Image j. Il nous a d'abord fallu détourner la zone d'études puis régler l'échelle grâce à une distance connue dans l'image. Ensuite il a fallu seuiller l'image puis la convertir en niveaux de gris. La dernière étape étant le comptage des particules. Ces étapes sont expliquées en détails en annexe 3.

## C) Problèmes rencontrés et solutions

### Comptage des billes noires

Dans le cas d'un mélange bi-disperse en tailles, les petites billes choisies étaient de couleur orange et les grosses billes de couleur noire afin d'obtenir un bon contraste visuel. Les billes noires de 3 mm en acétate de cellulose ont été très difficiles à localiser avec Image J : en effet, de par leur couleur, elles se confondaient avec la paroi métallique du tambour ; de plus les images étant analysées en "niveaux de gris" lors du traitement d'image par le logiciel Image J, le contraste s'est révélé insuffisant. C'est pourquoi ce contraste a dû être amélioré par l'ajout d'un tube fluorescent comme seule source de lumière : les billes noires ont alors pu être repérées et comptabilisées grâce aux reflets du tube fluorescent qui apparaissaient sur les surfaces légèrement réfléchissantes de ces billes noires. C'est une solution qui a très bien fonctionné et dont les étapes sont décrites dans l'annexe 3.

Les autres billes, qu'elles soient vertes ou oranges, n'ont pas présenté de problème de ce genre et se démarquaient bien à la fois du fond et les unes des autres

## Problème d'effets électrostatiques

Les 2 types de billes composant le lit bi-disperse en densités (Acétate de cellulose et polypropylène) se sont révélées extrêmement triboélectriques : malgré la mise à la terre de l'appareil, elles s'aggloméraient sous forme de grappes.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour faire face à ce problème :

- Essai avec de la laque pour cheveux mais les billes se collaient entre elles
- Essai avec un brumisateur d'eau mais les billes devenaient trop humides et l'écoulement n'était plus continu.
- Essai avec de la vapeur d'eau : Une cocotte-minute a été reliée au tambour pour envoyer de la vapeur d'eau dans le lit. Cette expérience a fonctionné, mais l'impossibilité de contrôler automatiquement le débit de vapeur d'eau a rendu cette solution inexploitable, la vapeur arrivant par à-coups et les billes se collant aux parois.
- Essai avec du talc : Cette expérience a finalement été la plus concluante ; en effet l'écoulement des billes était toujours continu et les billes ne s'aggloméraient pas entre elles

Des essais avec ajout de talc ont été menés pour vérifier si cette solution était viable.

Différentes quantités de talc ont été testées durant ces essais afin de choisir la quantité optimale de talc à utiliser, cette dernière devant répondre à plusieurs critères (Figure 30) :

- Eliminer les effets électrostatiques
- Etre suffisante mais sans excès pour éviter un comportement atypique
- Ne pas modifier les propriétés d'écoulement continu du lit.

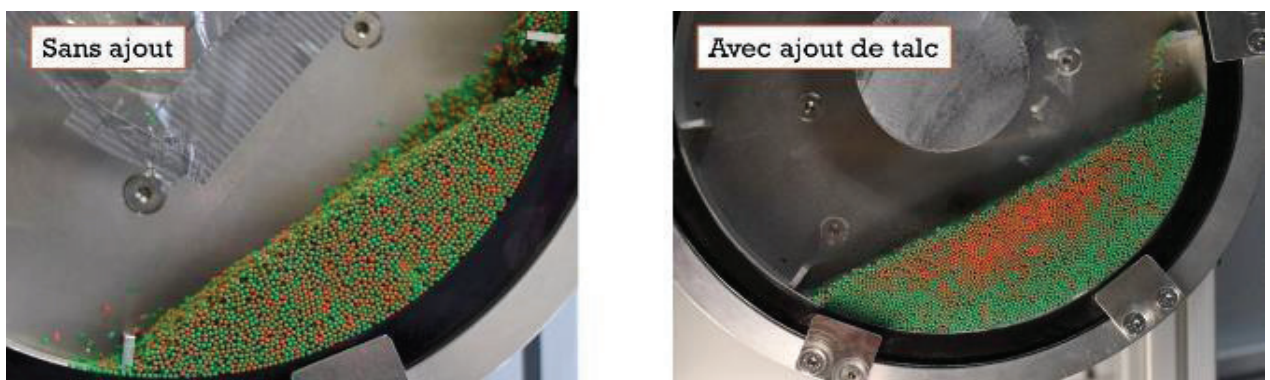


Figure 30 : Image d'expériences en tambour tournant avec ou sans ajout de talc

Un pourcentage de talc, variant de 0.2 à 2% du volume rempli, a été ajouté au lit bi-disperse en densité. Au-delà de 2%, on obtient une triple ségrégation (voir Figure 31), la ségrégation normale des billes du lit et une ségrégation additionnelle du talc qui forme un noyau au milieu du tambour. Il faut donc cibler un pourcentage maximum de talc de 1%.

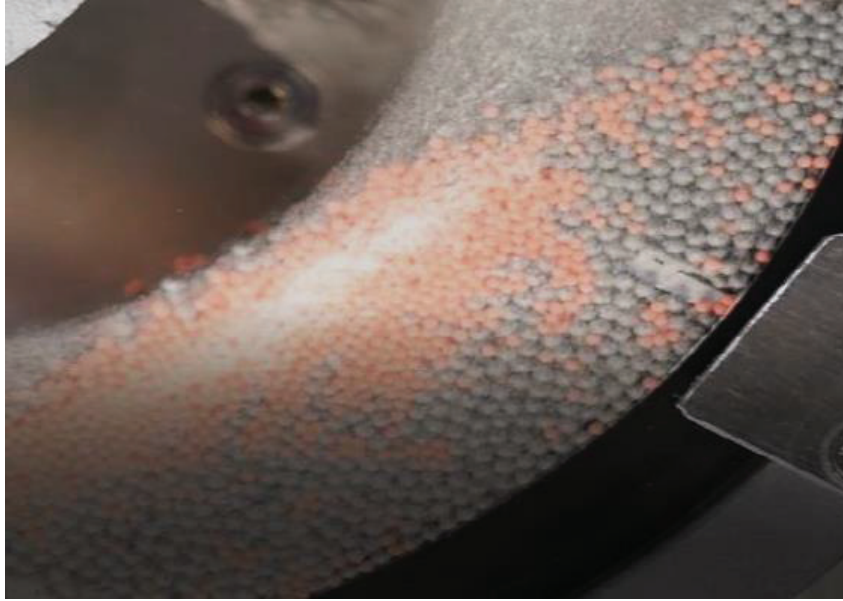


Figure 31 : Photographie de la double ségrégation du lit et du talc

#### **IV. Caractéristiques du lit granulaire**

Les données recueillies lors des simulations numériques et des expériences sur tambour tournant ont été analysées et comparées. Pour ce faire, la visualisation de la ségrégation est utile mais pas suffisante. Plusieurs caractérisations ont donc été mises en place pour valider les simulations et continuer l'analyse de ces données.

##### **A) Visualisation de la ségrégation**

A partir des données des simulations et des photographies des expériences, la répartition des billes au sein du lit a pu être observée.

Au cours des simulations préliminaires, quatre plans de coupe ont été effectués en partant de la paroi frontale jusqu'au centre avec un espacement de 5 mm, à savoir : un à la paroi, un à 5mm de la paroi, un à 5 mm du centre et un au centre du tambour.

Les photographies prises au cours des expériences montrent uniquement la répartition des particules à la paroi avant et elles seront donc comparées aux plans de coupe des simulations correspondantes.

Concernant les simulations, plusieurs coupes ont été réalisées afin d'observer la différence de ségrégation en fonction du matériau au contact des billes. Un plan de visualisation à chaque paroi, frontale et arrière, a été réalisé ainsi qu'un plan de coupe au milieu du tambour pour observer les différences de comportement du lit.

Les images de toutes les simulations ne sont pas présentées car qualitativement la répartition est sensiblement la même malgré des valeurs de paramètres différentes.

## B) Indices de ségrégation

Il existe différentes grandeurs qui peuvent être utilisées pour quantifier le degré de mélange ou de ségrégation d'un milieu granulaire. Nous avons choisi l'indice de ségrégation (IS) pour évaluer l'effet des ailettes et du remplissage sur la ségrégation des lits bi-disperses.

### Définitions

Initialement, les billes sont parfaitement mélangées par remplissage aléatoire lors des simulations. Ce lit de départ sert à calculer la valeur initiale d'IS ; dès la mise en rotation, la ségrégation augmente rapidement jusqu'à ce que l'indice de ségrégation atteigne un plateau.

L'indice de ségrégation est défini par la somme des écarts quadratiques entre la concentration locale d'une classe de billes et la concentration moyenne dans tout le lit pour cette classe et calculée sur le nombre de zones découpées dans le lit.

Sa formule est donnée par l'expression suivante :

$$ISM = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (C'_i - \langle C \rangle)^2} \quad (3)$$

Où  $C'_i$  représente la fraction en nombre d'un type de particules, d'une taille ou d'une densité spécifique dans la cellule  $i$  ( $C'_i = \frac{N'_i}{N_i}$  avec  $N'_i$  le nombre de particules d'une population présente dans la cellule  $i$  et  $N_i$  le nombre total de particule dans la cellule  $i$ ),  $\langle C \rangle$  la fraction moyenne d'un type de particules et  $L$  le nombre de cellules de taille égale.

Indice de ségrégation radiale : La ségrégation radiale se produit dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du tambour c'est-à-dire dans un plan transverse. L'indice de ségrégation radiale se calcule en divisant le diamètre du tambour en plusieurs volumes égaux.

Indice de ségrégation axiale : La ségrégation axiale se produit le long de l'axe de rotation du tambour ; pour calculer l'indice de ségrégation axiale, il faut découper le tambour en tranches selon la profondeur.

Pour les simulations préliminaires, une valeur de l'indice de ségrégation radiale et de l'indice de ségrégation axiale a été calculée.

Pour la comparaison entre les simulations et les expériences, différentes valeurs d'indices de ségrégation ont été calculées :

- une valeur d'indice de ségrégation global sur la totalité du lit, notée ISG,
- une valeur d'indice de ségrégation à la paroi frontale, seule paroi qui permet l'observation en essai expérimentale, notée ISF
- une valeur d'indice de ségrégation à la paroi arrière, notée ISA.



## Méthodes de calcul

Pour calculer cet indice de ségrégation, le tambour doit être découpé en petits volumes dont il faut déterminer la composition, c'est-à-dire la concentration respective des 2 types de particules.

Le découpage est différent selon le type de ségrégation étudié. En effet pour l'indice de ségrégation radiale, le découpage est fait dans le plan diamétral du tambour avec 15 éléments en longueur et 15 éléments en hauteur avec la même profondeur de 30mm, tandis que pour la ségrégation axiale, le découpage est fait dans la profondeur du tambour, c'est-à-dire qu'il est découpé en 10 tranches sur les 3 cm de profondeur du tambour (le calcul de la ségrégation ne s'est fait que sur les simulations préliminaires). Le principe de découpage est représenté sur la Figure 32.

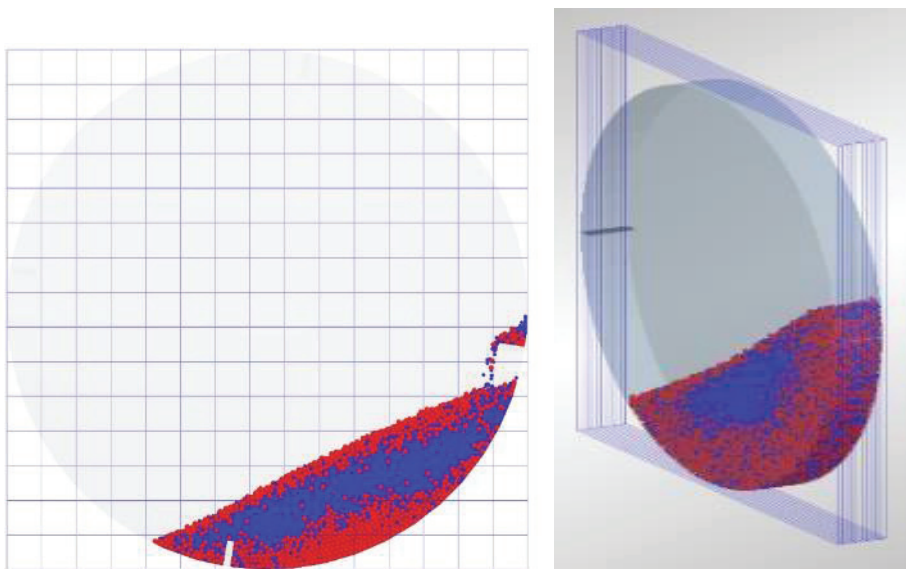


Figure 32 : Figure explicative des découpages du tambour pour le calcul de l'indice de ségrégation. Découpage (15x15x1) pour l'indice de ségrégation radiale sur la figure de gauche, et découpage (1x1x10) pour l'indice de ségrégation axiale sur la figure de droite. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux plans (x, y, z)

Pour les comparaisons entre les simulations et les expériences, le tambour a été divisé en parallélépipèdes de base carrée de 2cm de côté, selon un quadrillage de 15x15 cellules pour couvrir l'ensemble du diamètre de la tranche.

Deux autres valeurs d'indices de ségrégation sont calculées au contact de chacune des parois frontales, c'est-à-dire que le découpage dans la longueur et la largeur reste le même mais la profondeur est égale au diamètre d'une bille (3mm pour les billes les plus grosses) pour correspondre à la mince couche de particules visibles (de type mono-couche) à travers la paroi frontale. Les valeurs de l'indice de ségrégation à la paroi frontale, notées ISF, obtenues par simulation peuvent donc être comparées aux valeurs des indices expérimentaux obtenus après traitement des images prises à travers la paroi frontale de verre. Par ailleurs, les valeurs des indices globaux, notées ISG, et les valeurs des indices arrière, notées ISA, ont été utilisées pour observer le comportement du lit uniquement avec les simulations numériques.

Les données extraites des simulations sur EDEM sont ensuite traitées avec un code Matlab pour calculer les valeurs des indices de ségrégation à chaque pas de temps. En effet les données sont extraites à chaque pas de temps de 2 secondes puis toutes les valeurs d'indices sont calculées et stockées, pour une durée totale de 2 minutes. La valeur des différents indices calculés à 2 minutes a été comparée aux valeurs obtenues à partir des expériences sur maquette.

Une fois extraites du logiciel EDEM, ces données sont analysées et traitées avec le logiciel Matlab à l'aide d'une routine écrite par notre collaborateur G. Mollon du laboratoire LAMCOS (INSA Lyon) et présentée en annexe 4.

Pour obtenir les données expérimentales, les photographies sont traitées sous Matlab comme indiqué au le paragraphe précédent. Puis un code Matlab est appliqué pour identifier dans quelle partie du tambour se trouve chaque particule. (Voir annexe 3)

### Optimisation des volumes d'études pour le calcul de l'indices de ségrégation

Une étude a été réalisée pour connaître l'influence de la taille des cellules sur la qualité de l'indice de ségrégation. En effet, il faut optimiser le volume des cellules, donc la dimension des carrés de la grille utilisés pour le calcul de l'indice de ségrégation. La taille des cellules ne doit être ni trop petite, car le nombre de billes par cellule ne pourrait alors prendre que trop peu de valeurs (concentration variant sur trop peu de paliers), ni trop grande car le nombre de cellules serait alors insuffisant pour une bonne analyse spatiale (indice de ségrégation prenant des valeurs très moyennées au sein de chaque cellule).

L'impact de la dimension des carrés est illustré sur la Figure 33. L'intervalle de taille acceptable a été fixé entre 0,5 et 3 cm de côté pour les tailles de billes et de lits étudiés. Pour rappel le tambour a un diamètre de 30cm avec les billes de 2 ou de 3mm de diamètre.

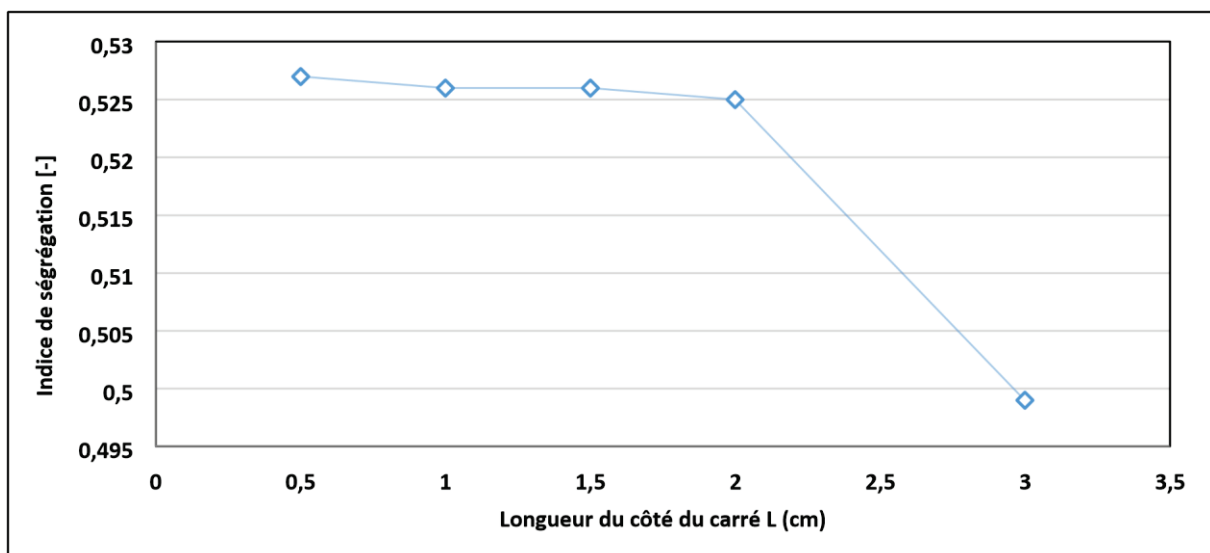


Figure 33 : Graphe représentant l'indice de ségrégation en fonction de la longueur de la cellule

L'indice de ségrégation diminue significativement (chute d'environ 5% en passant de 2 à 3 cm) lorsque l'on augmente trop la taille des carrés de la grille, alors qu'il apparaît stable quand cette taille se situe entre 0,5 et 2 cm (moins de 0,5% de variation entre 0,5 et 2 cm). Le choix a été fait d'utiliser des carrés de 2cm de côté pour calculer l'indice de ségrégation car c'est la plus grande surface pour laquelle on n'observe pas d'évolution. La grille de travail choisie est donc de 15 par 15 carrés de 2cm de côté, centrée sur l'axe et avec une profondeur variable selon l'indice recherché, mais qui ne devrait pas être découpée pour les simulations numériques en mailles de profondeur supérieure à une valeur qui reste à déterminer.

### C) Angle de talus dynamique

L'angle d'écoulement est l'angle que fait la surface libre du matériau en mouvement avec l'horizontale lorsque le régime d'écoulement est continu à surface plane. C'est un paramètre qui permet de caractériser le comportement dynamique du lit granulaire.

Il existe une fonction sous Image J qui permet de mesurer un angle (fonction « Angle tools ») ; il suffit de tracer une droite horizontale puis une droite confondue avec la surface du lit et le logiciel donne l'angle automatiquement (fonction « Measure »). La même fonction existe aussi sous EDEM ; elle permet de mesurer des angles manuellement ou en sélectionnant une particule. Ces mesures ont été répétées trois fois, à différents endroits du lit, afin d'obtenir une valeur plus représentative.

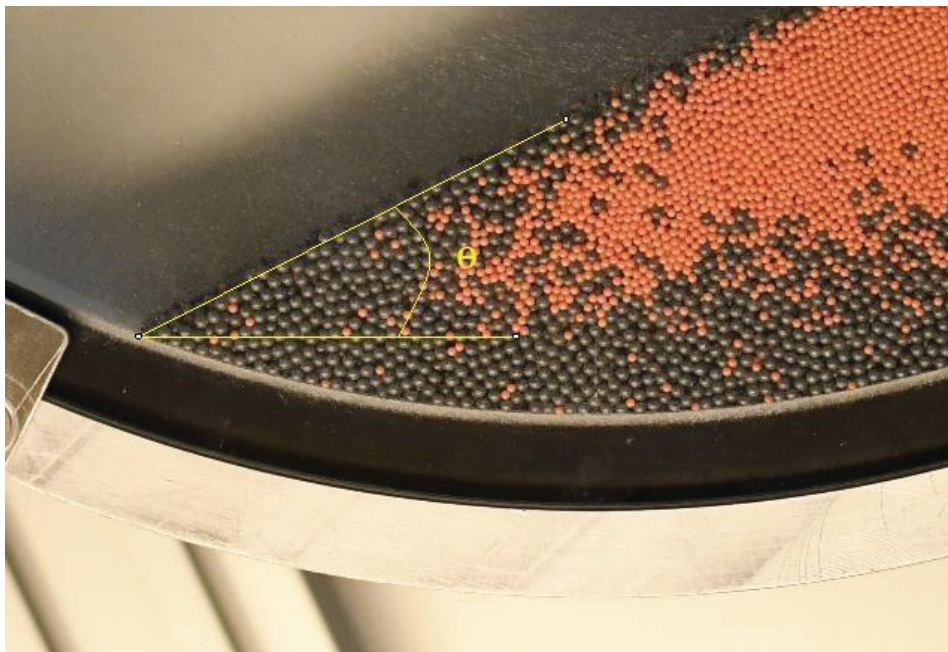


Figure 34 : Photographie d'une expérience d'un lit en tambour tournant analysée sous Image J pour la mesure d'angles de talus

## D) Fraction des particules ségréguées à la paroi

La fraction globale des particules ségréguées du noyau est définie comme la fraction occupée par le noyau central d'une classe de billes donnée (de tailles ou de densités différentes) par rapport à la surface totale du lit dans une coupe frontale (Eq 3).

$$Fg \frac{N_j}{N} \quad (4)$$

*N<sub>j</sub> : Nombre de billes de type j dans la mono-couche frontale*

*N : Nombre total de billes dans la mono-couche frontale*

Le calcul de la fraction globale est basé sur la détection des différentes billes présentes dans la couche frontale du lit. Les tableaux utilisés pour le calcul des valeurs de l'Is servent aussi pour le calcul de la fraction globale puisque l'on dispose alors du nombre total de billes dans cette couche.

## E) Temps à la paroi

Les particules ont chacune une trajectoire aléatoire et unique au sein du lit. Cependant, dans le contexte de notre étude, il est souhaitable que toutes les particules aient eu un temps de contact similaire avec la paroi périphérique car c'est la paroi chauffante lors du séchage. Il faut donc connaître le nombre de fois que chaque particule touche la paroi pour en déduire le temps qu'elle y passe.

Pour ce faire, un code Matlab spécifique a été écrit par G. Mollon. Ce code calcule la position de chaque bille à l'intérieur du tambour pour savoir si cette bille est en contact avec la paroi à l'instant t. Ces calculs nécessitent 5 séries de données, extraites du modèle avec le logiciel EDEM, qui sont les positions x, y et z de chaque particule (position du centre de la particule), son numéro (car chaque particule a un numéro d'identification propre) et son diamètre (pour le cas du lit bi-disperse en taille). Le code permet de connaître le nombre de fois que chaque particule passe en contact avec la paroi.

Cette caractéristique du lit n'est présentée que dans le cas des simulations préliminaires car les expériences ne donnent une information que sur la paroi frontale en verre. Ce code est présenté en annexe 5.

# RESULTATS ET DISCUSSIONS

## I. Simulations préliminaires

L'un des objectifs de notre étude est de tenter de diminuer le plus possible la ségrégation au sein du lit de particules en modifiant les paramètres géométriques du tambour tournant. Des simulations préliminaires ont été effectuées pour étudier l'influence de ces paramètres sur la ségrégation d'un lit bi-disperse en taille ou en densité.

Deux types de lits bi-disperses ont été étudiés, un lit bi-disperse en taille et un lit bi-disperse en densité. Ce lit est constitué au départ d'un mélange supposé parfait par remplissage aléatoire et simultané des 2 fractions. Le lit est divisé en 2 volumes égaux, constitués chacun d'un type donné de particules.

Les paramètres qui sont étudiés dans notre plan d'expériences de simulations sont :

- Le lit bi-disperse : Tailles ou densités
- Le taux de remplissage :  $\frac{1}{3}$  ou  $\frac{1}{4}$
- Le nombre d'ailettes à la paroi périphérique : 4 ou 8
- La longueur des ailettes : 1 ou 4 cm

En effet, d'après la bibliographie, l'intensité de la ségrégation dépend du nombre et de la présence ou non d'ailettes et du taux de remplissage du tambour. En faisant varier ces 3 paramètres, un par un, et en prenant en compte que l'on doit étudier 2 lits bi-disperses, on obtient 16 simulations ; toutefois 12 simulations ont seulement été réalisées, car pour le lit bidisperse en densité, la simulation avec 8 ailettes n'était pas justifiée.

Tableau 14 : Plan de simulations des simulations préliminaires

Remplissage	Lit bi tailles								Lit bi-densités			
	1/3				1/4				1/3		1/4	
Nombre d'ailettes	4		3		4		8		4		4	
Longueur d'ailettes	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4

Le temps de simulation pour ces 12 essais a été fixé à 40 secondes (à 6 rpm) car la ségrégation a pu être déjà observée au bout de 4 tours de tambours. Après analyse de la totalité des simulations, il nous a semblé intéressant d'observer ce qui se passait en augmentant le temps de simulation. Nous avons donc réalisé une simulation avec un lit bi-disperse en taille (taux de remplissage à  $\frac{1}{3}$  et 4 ailettes de 4 cm) avec un temps fortement augmenté, jusqu'à 6 minutes.

Une autre simulation a été effectuée avec un lit mono-disperse (billes de 2 mm ; taux de remplissage à  $\frac{1}{3}$  et 4 ailettes de 4 cm) car il nous fallait une simulation supplémentaire, principalement pour servir de base de comparaison.

## A) Visualisation de la ségrégation

A partir des données tirées de ces simulations, on peut observer la répartition des billes au sein du lit. Quatre plans de coupe perpendiculaires à l'axe ont été étudiés, le premier au centre du tambour, le deuxième à 5 mm du centre du tambour, le troisième à 5 mm de la paroi frontale et le dernier à la paroi frontale. Les coupes à l'intérieur du tambour ont été réalisées une fois que l'on a découvert que l'indice de ségrégation augmentait peu. On a donc décidé de vérifier si ce que l'on constatait à la paroi reflétait l'ensemble du volume.

Les résultats présentés correspondent aux simulations avec un taux de remplissage de 1/3, avec 4 ailettes de 1 cm et pour un temps de simulation de 40 secondes. Les images tirées de toutes les simulations ne sont pas présentées dans ce mémoire car qualitativement, elles reflètent sensiblement les mêmes évolutions malgré des valeurs des paramètres différents.

Pour le lit bi-disperse en taille :

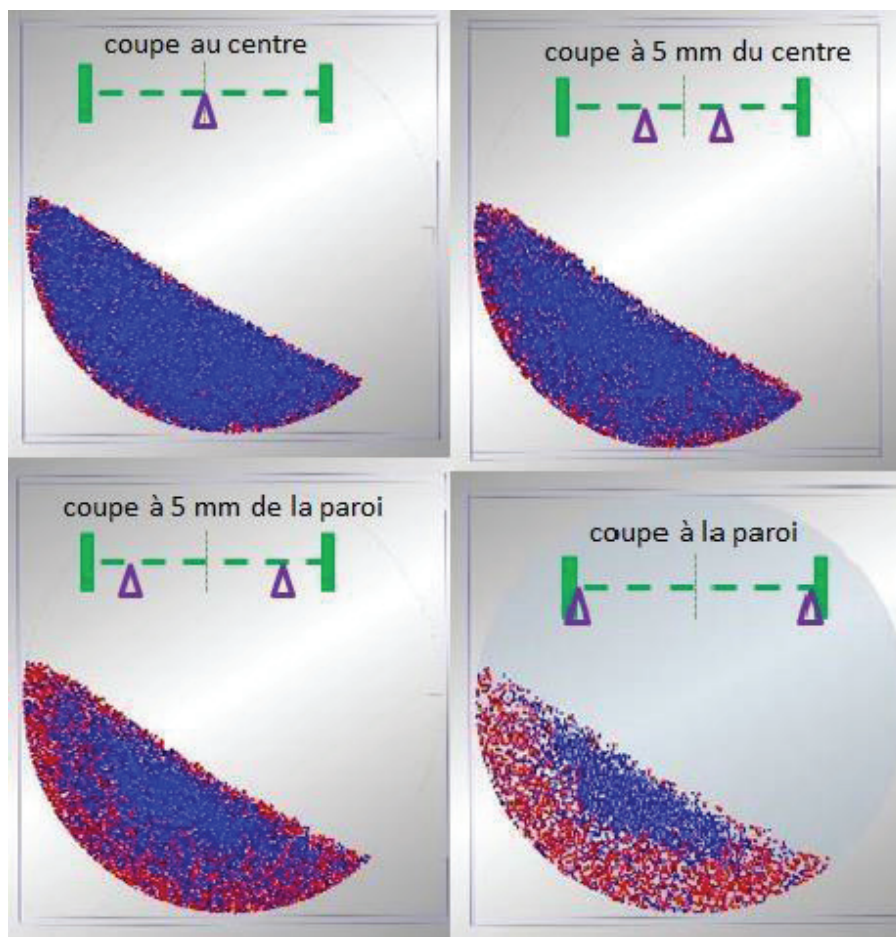


Figure 35 : Répartition des billes dans des plans de coupe du tambour simulé pour un lit bi-disperse en taille avec des billes de 2 mm (bleues) et des billes de 3 mm (rouges) (6 rpm)

On peut voir sur la Figure 35 que le lit bi-disperse en taille subit une double ségrégation, axiale et radiale. En effet, on peut observer que les petites billes bleues forment un noyau central dans la quasi-totalité du tambour et restent ségrégées aux extrémités de l'axe, tandis que les billes les plus grosses sont repoussées en périphérie.

Pour le lit bi-disperse en densité :

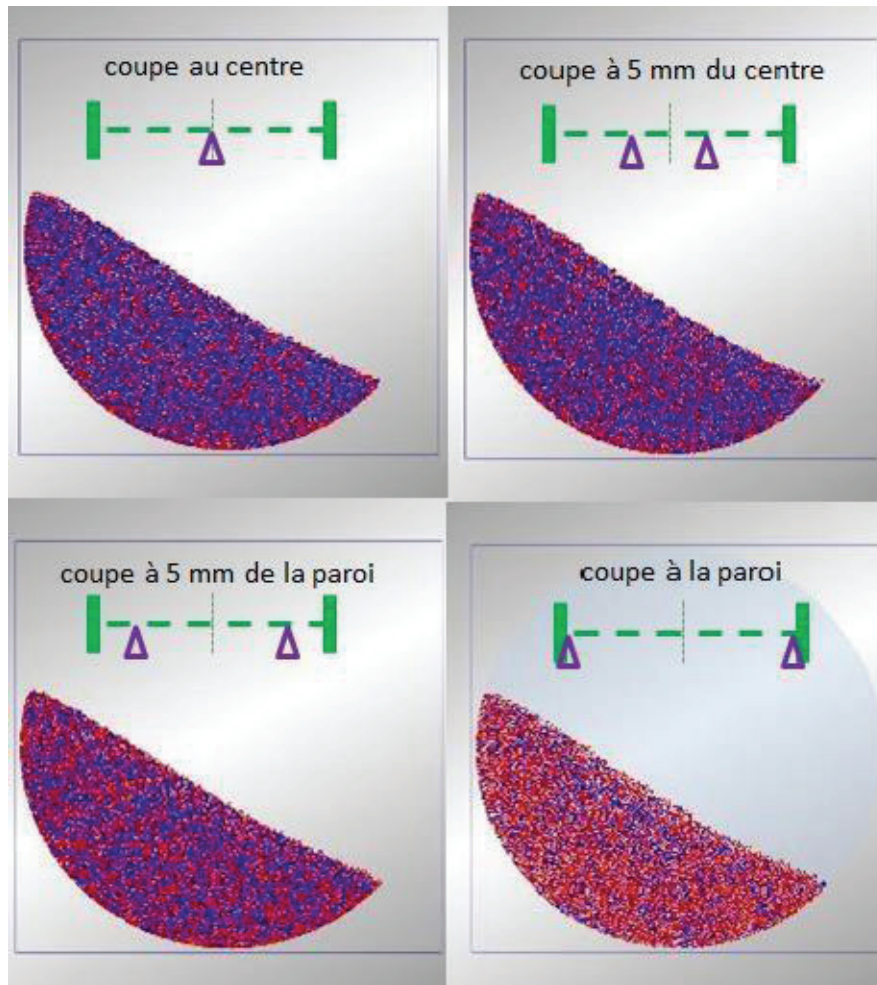


Figure 36 : Répartition des billes dans des plans de coupes du tambour simulé pour un lit bi-disperse en densité avec des billes de densité 900kg/m<sup>3</sup> (bleues) et des billes de 1280 kg/m<sup>3</sup> (rouges) (6 rpm)

On peut constater que la ségrégation radiale sur la simulation d'un lit bi-disperse en densité est moins visible que précédemment, la ségrégation axiale est légèrement plus marquée. En effet les billes plus denses se déplacent préférentiellement vers les parois frontales.

Ces résultats confirment nos observations après avoir calculé les indices de ségrégation, c'est-à-dire qu'il existe deux phénomènes de ségrégations, l'une axiale et l'autre radiale malgré l'utilisation d'un tambour de type tranche. Pour le lit bi-disperse en taille, ces deux ségrégations sont plus marquées tandis que pour le lit bi-disperse en densité, seule la ségrégation axiale est significative.

Comme nous avons remarqué que la ségrégation apparaît déjà nettement au bout de 40 secondes, nous avons voulu vérifier le comportement du lit avec un temps de simulation plus long. L'une des simulations (taux de remplissage à 1/3 et 4 ailettes de 4 cm) a été prolongée pendant 6 minutes de rotation.

Les images des billes dans les coupes à l'intérieur du tambour montrent très peu de changement pendant les 6 minutes de simulation. En effet, la répartition spatiale des billes est visuellement toujours très similaire.

Cependant, même si les images semblent visuellement figées, cela ne veut pas dire que les particules sont statiques, elles gardent un comportement aléatoire mais elles restent localisées, au centre par exemple.

Les parois latérales influent donc beaucoup sur la répartition des billes, mais ce phénomène pourrait avoir été amplifié par une valeur trop élevée du coefficient de frottement entre les billes et la paroi.

## B) Indices de ségrégation

Les résultats du calcul des valeurs des indices de ségrégation sont présentés dans la Figure 37 pour le lit bi-disperse en taille avec 4 ou 8 ailettes et 2 niveaux de remplissage, 1/3 et 1/4 :

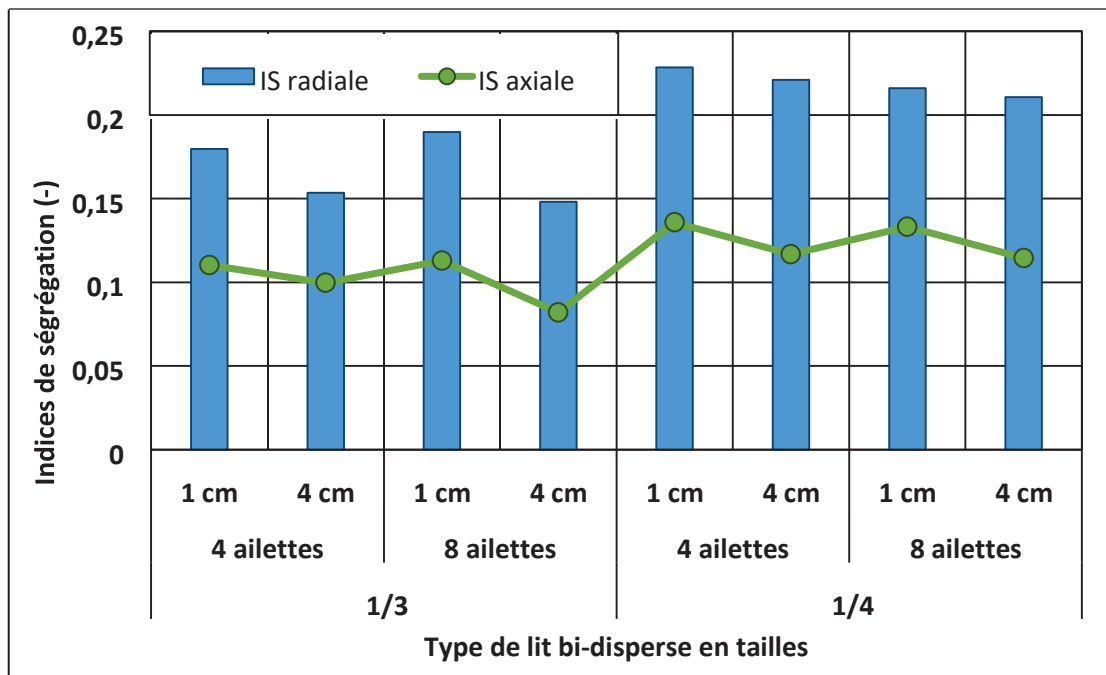


Figure 37 : Indices de ségrégation pour les lits bi-disperses en taille en fonction des paramètres de la simulation

Pour le lit bi-disperse en taille, on observe que les valeurs des indices de ségrégation radiale sont significativement plus élevées que les valeurs des indices de ségrégation axiale pour toutes les configurations. La ségrégation s'établit donc systématiquement plus perpendiculairement à l'axe qu'axialement. Les valeurs des indices de ségrégation les plus faibles ont été calculées pour une simulation avec un taux de remplissage de 1/3 et 8 ailettes de 4 cm tandis que les valeurs des indices de ségrégation les plus élevées ont été calculées pour un taux de remplissage de 1/4 et 4 ailettes de 1cm.



Par comparaison au cas précédent, la valeur de l'indice de ségrégation radiale apparaît beaucoup plus faible, d'où l'intérêt d'un découpage selon l'axe et du calcul de la valeur de l'Is axial pour une analyse plus détaillée, malgré la faible largeur du tambour tranche.

Pour le lit bi-disperse en densité :

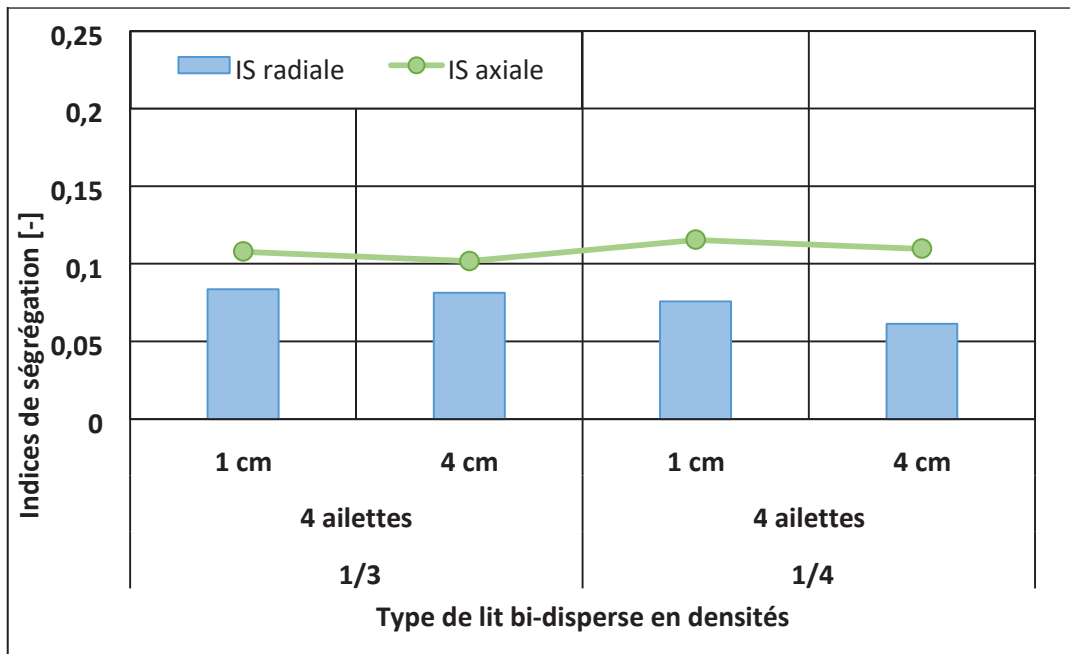


Figure 38 : Indices de ségrégation pour les lits bi-disperses en densité en fonction des paramètres de la simulation

Pour le lit bi-disperse en densité, on observe que la valeur de l'indice de ségrégation axiale est plus élevée que la valeur de l'indice de ségrégation radiale. C'est-à-dire que le lit bi-disperse en densité a plus tendance à se ségréger axialement que radialement.

En comparant les deux types de lits, on observe que la valeur de l'indice de ségrégation axiale reste peu différente lors d'un remplissage au 1/3, mais il faut souligner qu'il augmente pour le remplissage au 1/4. La différence majeure entre les deux catégories de lits porte sur les valeurs de l'indice de ségrégation radiale, qui sont beaucoup plus basses pour le lit bi-disperse en densité que pour le lit bi-disperse en tailles et changent peu entre les configurations des ailettes.

Les valeurs des indices de ségrégation ont aussi été suivies en fonction du temps pour connaître leur évolution et surtout leur valeur maximale (ou de plateau). Voir Figure 39 ci-dessous.

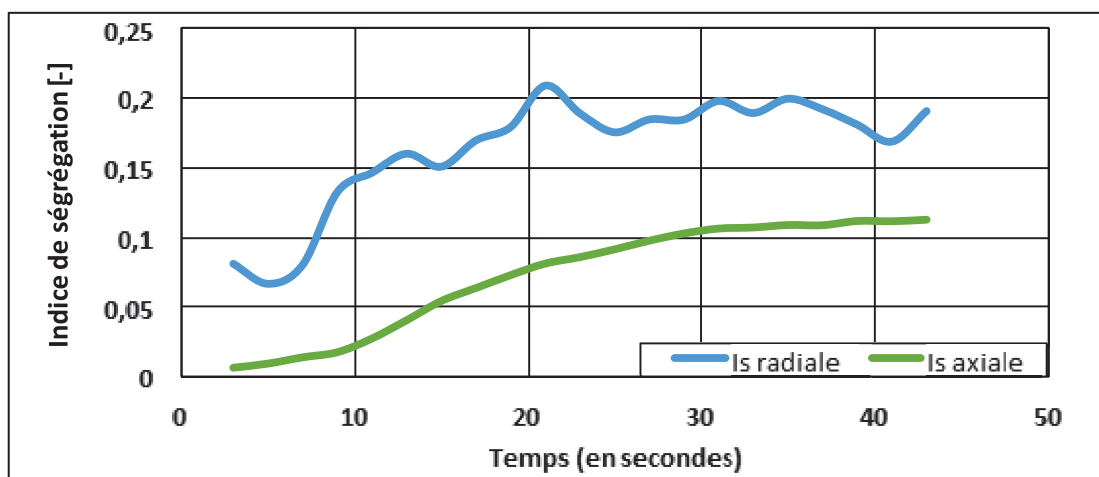


Figure 39 : Evolution de l'indice de ségrégation en fonction du temps pour une simulation bi-tailles avec un taux de remplissage de 1/3 et 8 ailettes de 1 cm (6 rpm)

On observe que les valeurs des indices de ségrégation atteignent rapidement un « plateau » et que la répartition spatiale des zones de ségrégation est vite stabilisée, puisqu'il suffit de 2 tour complets de tambour (en 20 secondes à 6 rpm) pour atteindre un plateau pour la ségrégation radiale et de 4 tours complets (en 40 secondes à 6 rpm) pour stabiliser la ségrégation radiale. Mais ce n'est pas parce que la valeur de l'indice de ségrégation est stable.

### C) Temps de contact des billes à la paroi

Les résultats du traitement des données des simulations sont présentés ci-dessous, ils correspondent à 40 secondes de simulation à 6 rpm, c'est-à-dire 4 tours complets. Dans un premier temps, on s'intéresse principalement au nombre de particules n'ayant pas touché la paroi périphérique du tambour.

Pour le lit bi-disperse en taille :

Tableau 15 : Pourcentage total de billes ne touchant pas la paroi dans les différentes simulations et pour un lit bi-disperse en taille (2 et 3 mm).

Taux de remplissage	Nombre d'ailettes	Largeur d'ailettes	Pourcentage de particules ne touchant pas la paroi
1/3	4	1	41%
		4	84%
	8	1	85%
		4	83%
1/4	4	1	83%
		4	82%
	8	1	83%
		4	81%

On peut remarquer que le pourcentage moyen de billes ne touchant pas la paroi est de  $83\% \pm 2\%$  si l'on exclut la première simulation. En effet, la différence entre cette simulation qui présente un pourcentage de billes ne touchant pas la paroi de 41% et les 7 autres reste toujours inexpliquée.

Pour les lits bi-disperses en densité :

Tableau 16 : Pourcentage total de billes ne touchant pas la paroi en fonction dans les différentes simulations et pour un lit bi-disperse en densité.

Taux de remplissage	Nombre d'aillettes	Largeur d'aillettes	Pourcentage de particules ne touchant pas la paroi
1/3	4	1	42%
		4	86%
1/4	4	1	82%
		4	34%

On peut voir qu'il y a 2 tendances qui s'opposent, puisque 2 simulations présentent un pourcentage élevé de billes ne touchant pas la paroi tandis que 2 autres simulations présentent moins de 50% de billes qui ne touchent pas la paroi. Ce grand écart reste toujours incompris à ce jour, car il n'est apparemment corrélé ni aux taux de remplissage ni au nombre d'aillettes.

La question s'est posée de savoir quel était le pourcentage de petites billes et de grosses billes dans ces pourcentages totaux des billes n'ayant pas touché la paroi. Pour chaque simulation, une différence a donc été faite entre les deux types de billes. Un seul exemple de ces simulations pour chaque type de lit est présenté ci-dessous car les résultats varient peu entre eux.

Pour le lit bi-disperse en taille :

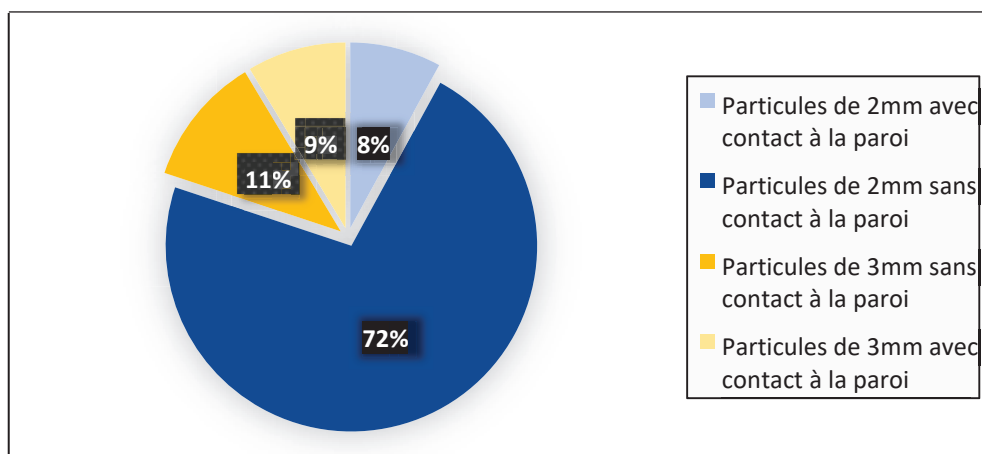


Figure 40 : Répartition des billes en fonction de leur passage à la paroi dans une configuration de remplissage 1/4 et 4 ailettes de 4 cm

On observe qu'une majorité (77%) de petites billes n'est jamais passée à la paroi périphérique tandis qu'une grande partie des grosses billes y est déjà passée. On rappelle, comme précisé

dans le paragraphe Matériels et Méthodes, que les billes de deux types ont été mélangées à volume égal, donc avec un nombre de billes sensiblement différent pour chaque type.

Pour le lit bi-disperse en densité :

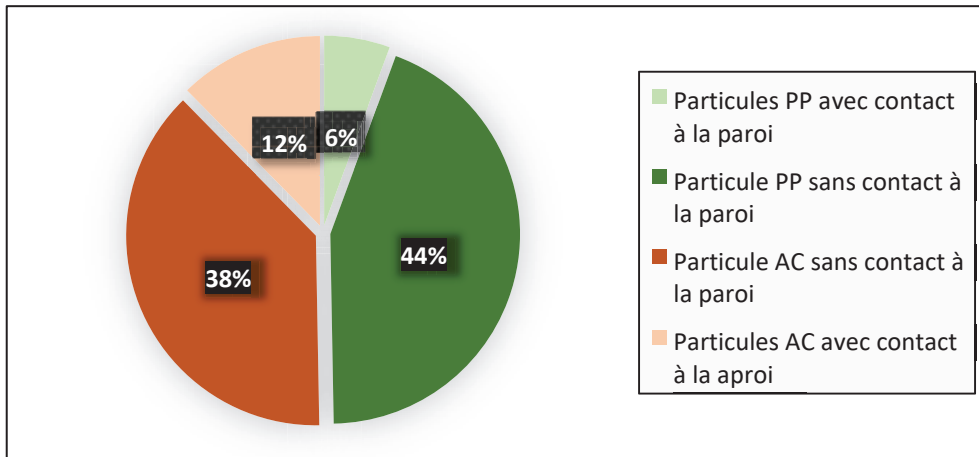


Figure 41 : Répartition des billes en fonction de leur passage à la paroi dans une configuration de remplissage 1/4 et 4 ailettes de 1 cm

On observe que la répartition des billes passant à la paroi est à peu près équivalente pour les deux densités. Cela prouve que le lit bi-disperse en densité ne présente pas de ségrégation radiale.

Une simulation d'un lit bi-tailles (1/3 de remplissage, 4 ailettes de 4 cm, lit bi-taille) a été prolongée jusqu'à 6 minutes pour étudier l'évolution du pourcentage de particules ne touchant pas la paroi, en fonction du temps.

Les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous (Figure 42)

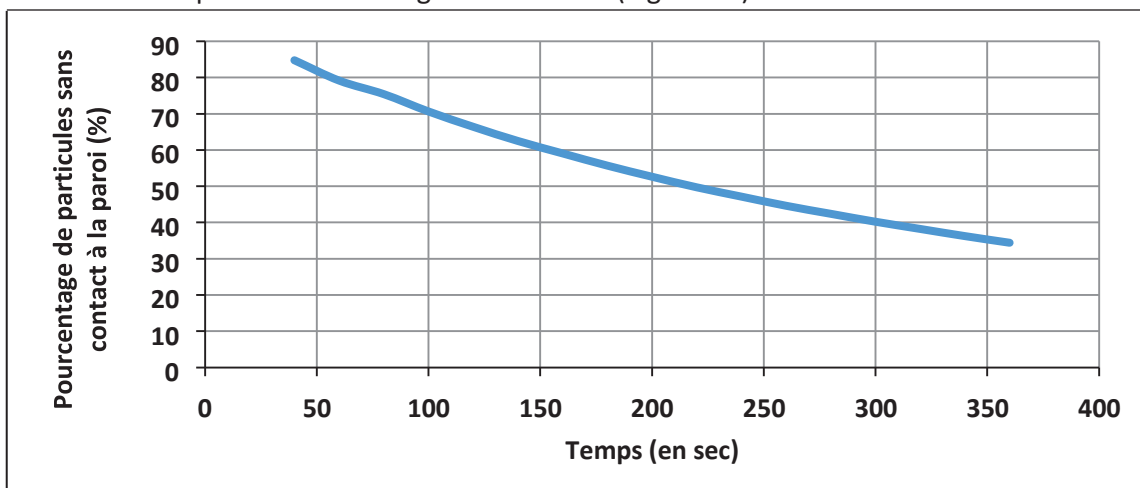


Figure 42 : Fraction de billes ne passant pas à la paroi en fonction du temps (6 rpm)

On peut voir que le nombre de billes ne passant pas à la paroi décroît de façon exponentielle. Plus de 50% des billes ont eu au moins un contact avec la paroi au bout de 220 secondes, tandis qu'au bout de 6 minutes seulement 36% du total des particules n'étaient jamais passées à la paroi. Cela nous prouve que malgré l'empêchement d'accès des petites particules aux parois

périphériques par les grosses particules, il y a quand même un certain renouvellement, et les petites billes ne restent pas tout le temps coincées dans le noyau du lit.

En ce qui concerne la part de petites billes et de grosses billes ne passant pas à la paroi, comme prévu, les particules de 3 mm ont bien plus de contacts avec la paroi que les particules de 2mm. On peut voir ce résultat sur le graphe de la Figure 43.

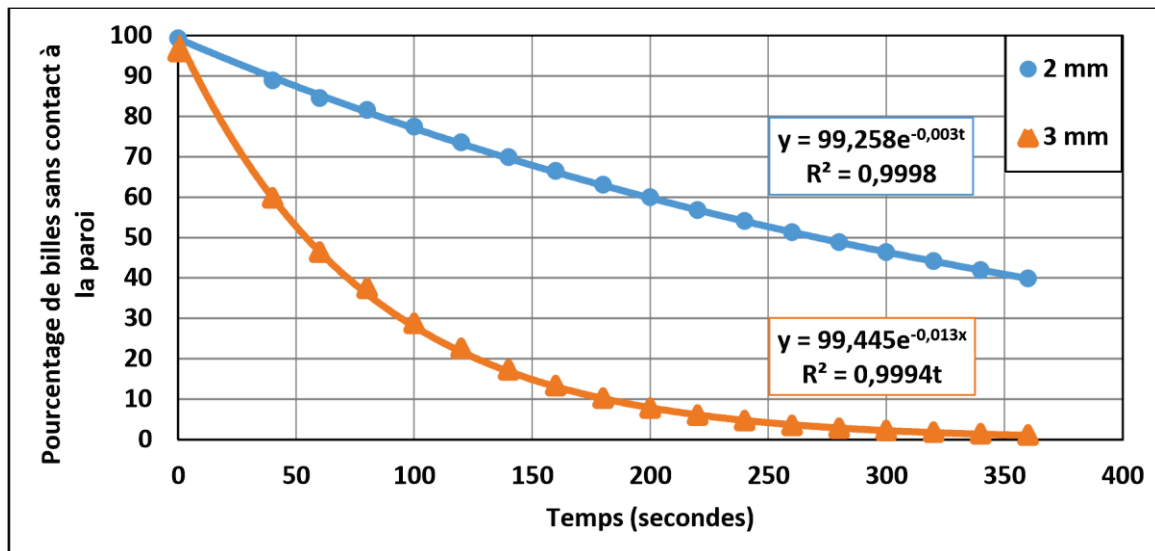


Figure 43 : Fraction des 2 types de billes ne passant pas à la paroi en fonction du temps pour un lit bi-tailles (6 rpm)

Les 2 courbes, orange et bleue, sont des courbes de tendances exponentielles et les équations correspondent aux équations des courbes de tendances. Elles ont été choisies comme exponentielles car les valeurs de  $R^2$  étaient meilleures pour des courbes exponentielles que linéaires, en effet on remarque que les valeurs de  $R^2$  sont très proches de 1, de plus toutes les courbes dans cette partie de temps à la paroi sont exponentielles. Les 2 types de billes passent à la paroi de manière exponentielle, mais la décroissance de la courbe pour les billes de 3 mm est bien plus importante, car elles sont repoussées vers la paroi sous l'effet de la ségrégation, et il est donc normal qu'elles passent bien plus souvent à la paroi. Plus de 99% des billes de 3mm sont passées à la paroi au bout de 6 minutes contre 58% des billes de 2 mm.

Ces résultats d'un lit bi-tailles (billes de 2mm ou 3 mm) ont été comparé avec les résultats de la simulation du lit mono-disperse avec les mêmes paramètres, c'est-à-dire 1/3 de remplissage et 4 ailettes de 4 cm mais avec uniquement des billes de 2 mm. Il faut comparer les 2 types de lits pour confirmer que les plus grosses billes empêchent les plus petites d'accéder à la paroi.

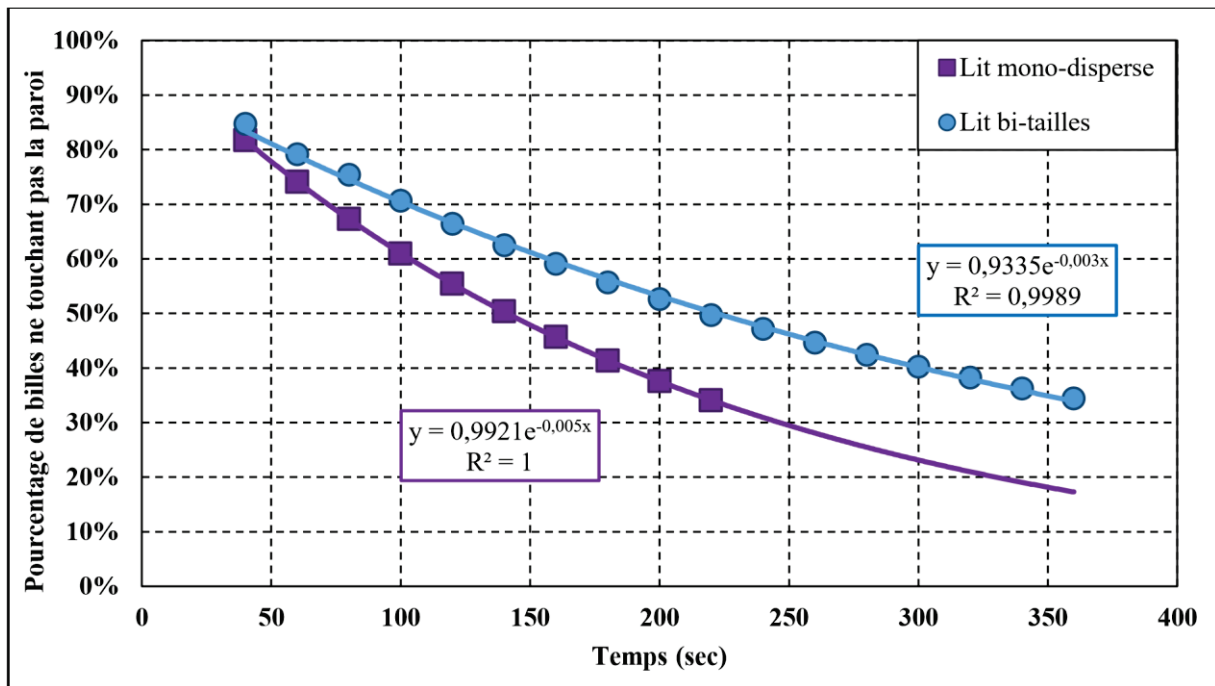


Figure 44 : Fraction de billes ne passant pas à la paroi pour le lit bi-disperse en taille et le lit mono-disperse (6 rpm)

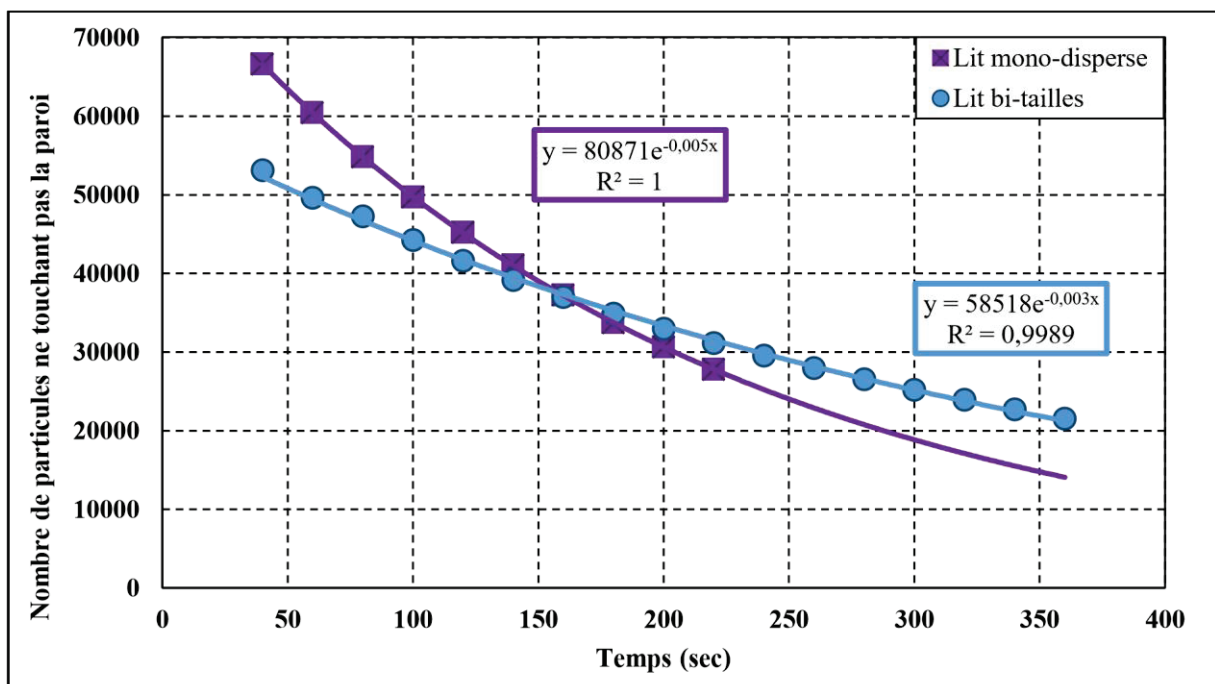


Figure 45 : Nombre de billes ne passant pas à la paroi pour le lit bi-disperse en taille et le lit mono-disperse (6 rpm)

La simulation pour le lit mono-disperse, effectuée seulement pour 180 secondes de rotation (18 tours), montre que la décroissance du nombre de billes touchant la paroi est bien plus rapide. En effet, malgré le fait qu'il y ait plus de billes au total, le pourcentage de billes n'ayant pas encore eu de contact avec la paroi décroît plus rapidement, car pour un lit mono-disperse, toutes les billes accèdent à la paroi sans formation d'un quelconque noyau.

La courbe pour le lit mono-disperse a un très bon coefficient de détermination ( $R^2$ ), la simulation n'a donc pas été prolongé jusqu'à 6 minutes pour éviter un temps de simulation particulièrement long.

Un calcul du nombre de contacts à la paroi en fonction du temps a été effectué pour toutes les particules. Les résultats sont regroupés par classes correspondant au nombre de contacts qu'a eu une particule avec la paroi périphérique et sont présentés dans la figure 46.

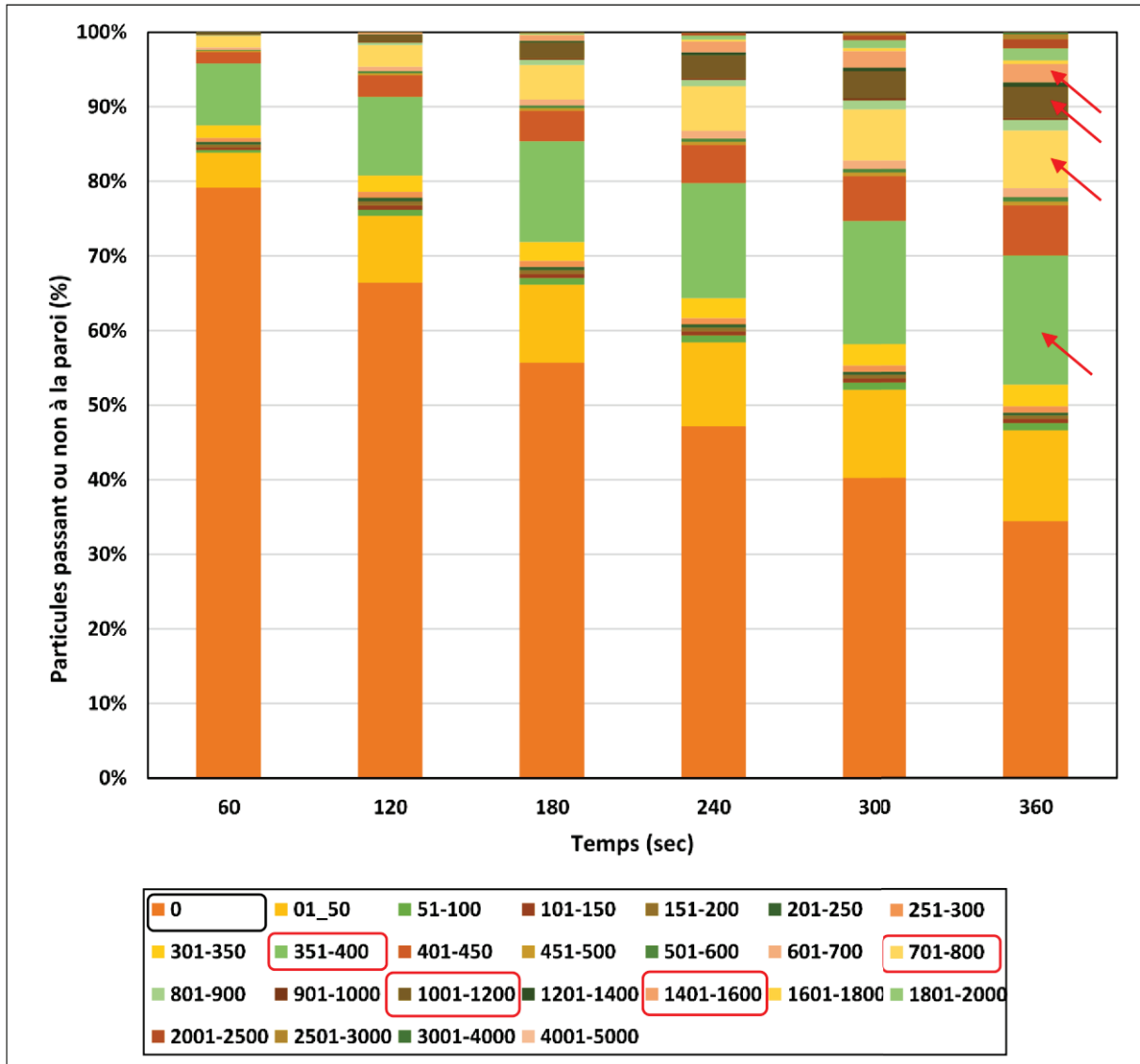


Figure 46 : Nombre de particules passant ou non à la paroi périphérique au cours du temps (chaque minute) réparties par classe définissant le nombre de contacts (les classes les plus nombreuses sont entourées en rouge) pour un lit bi-disperse de remplissage 1/3 avec 4 ailettes de 4 cm.

Sans compter la classe 0 des particules qui n'ont pas été en contact avec la paroi, forcément très majoritaires au départ (80% environ), les classes où les particules sont les plus nombreuses sont les classes entourées en rouge, la classe 351-400 ; la classe 701-800 ; la classe 1001-1200 ; et enfin la classe 1401-1600. Ces 4 classes correspondent finalement au nombre de contacts qu'une particule aura avec la paroi périphérique entre 2 passages dans le talus dynamique, c'est à-dire qu'une particule touchera la paroi 351 à 400 fois lors de son passage à la paroi périphérique. Ce temps, qui est le temps de contact entre une particule et la paroi périphérique, est donc compris

entre 3,5 et 4 secondes (en effet un pas de temps de calcul EDEM est égal à 0,001 secondes) en effet une particule mettra ce temps là pour passer du bas du talus dynamique jusqu'en haut du lit tout en gardant sa position avec un contact avec la paroi. Cela correspond à un cinquième de tour de tambour tournant et pour ce cas le tambour a un remplissage d'un tiers.

En conclusion, on remarque qu'un noyau central de petites particules se forme dans les lit bidisperse en taille comme le confirment les valeurs des indices de ségrégation et le temps passé à la paroi périphérique où les particules les plus grosses sont majoritaires. On observe donc une ségrégation radiale plus importante que la ségrégation axiale, du fait de l'existence d'un noyau central de petites particules, et même s'il existe un renouvellement significatif de ces particules.

Pour le lit bi-disperse en densité, on observe principalement une ségrégation axiale avec une concentration des particules les plus denses sur les parois frontale et arrière du tambour.

## **II. Ségrégation mécanique sur le petit tambour – Comparaison entre expérimentation et simulation**

L'étude d'écoulement des poudres a été réalisée avec 2 types de mélange, un lit bi-disperse en tailles (billes de même densité, mais de tailles différentes) et un lit bi-disperse en densité (billes de même taille, mais de densités différentes). Pour chaque type de mélange, 15 configurations ont été testées.

Les différents paramètres modifiables au cours de ces essais sont :

- Le type de lit : bi-disperse en taille ou en densités
- Le taux de remplissage : 1/8, 1/6 et 1/4
- La longueur des ailettes : 1,5 cm ou 4 cm
- Le nombre d'ailettes : 0, 4 ou 8.

Pour chaque type de lit, les paramètres des essais réalisés sont récapitulés sur le Tableau 17 :

*Tableau 17 : Plan d'expériences des essais expérimentaux et de simulation pour chacun des lits bi-disperse*

Taux de remplissage	1/8			1/6			1/4			
Nombre d'ailettes	8	4	0	8	4	0	8	4	0	
Longueur des ailettes	1,5	4	1,5	4	1,5	4	1,5	4	1,5	4

Chaque essai débute avec un lit parfaitement compartimenté pour assurer la répétabilité tandis qu'en simulation le lit est généré aléatoirement et donc « aléatoirement » mélangé.



## A) Lit bi-tailles

Les résultats obtenus avec les essais expérimentaux ont été comparés aux résultats des simulations pour ce qui concernait les images des faces frontales, les indices de ségrégation, les fractions globales du noyau sur la face frontale et les angles d'écoulements.

Le lit bi-disperse en tailles est composé de 2 types de particules d'acétate de cellulose de diamètre moyen égal à 2 mm ou à 3 mm. Les billes les plus petites sont de couleur orange tandis que les billes les plus grosses sont de couleur noire. Le remplissage a été supposé distribué de manière aléatoire pour la simulation alors qu'il était compartimenté, c'est-à-dire réparti de part et d'autre d'une ailette, pour les essais expérimentaux.

### a. Visualisation de la ségrégation

Les images de la face frontale montrent un noyau de petites particules (orange) situé au centre du tambour, noyau que l'on retrouve aussi bien avec les essais expérimentaux qu'avec les simulations. Les billes les plus grosses (noires), se trouvent rejetées à la périphérie du lit. Nous n'avons pas pu observer ce qui se passe près de la face arrière du tambour qui est une paroi métallique opaque. Mais les simulations numériques montrent que les billes noires s'accumulent davantage près de cette paroi que près de celle en verre. La Figure 47 permet de comparer visuellement la ségrégation des billes, soit par simulation, soit pour les essais avec les billes réelles, pour un taux de remplissage de 1/4 d'un tambour muni de 8 ailettes de 4cm.



Figure 47 : Image comparative de la face frontale du tambour avec un lit bi-disperse en taille, un taux de remplissage de un quart et 8 ailettes de 4 cm à 2 minutes de rotation. (3 rpm)

On peut constater un bon accord visuel entre ces 2 images, avec un noyau central de petites particules bien présent dans chaque cas malgré la présence et la taille des ailettes - ici 8 ailettes de 4cm - qui devraient pourtant favoriser le mélange.

Une série de photos (Figure 48 ci-après) montre bien la mise en place rapide de ce noyau de ségrégation durant les premières secondes de la rotation, chaque photo a été prise avec un intervalle de 10 secondes et le noyau est déjà formé au bout de seulement 20 secondes de rotation. Ces résultats expérimentaux sont inchangés lorsque les billes sont compartimentées à l'inverse, c'est-à-dire les plus grosses à gauche et les plus petites à droite.

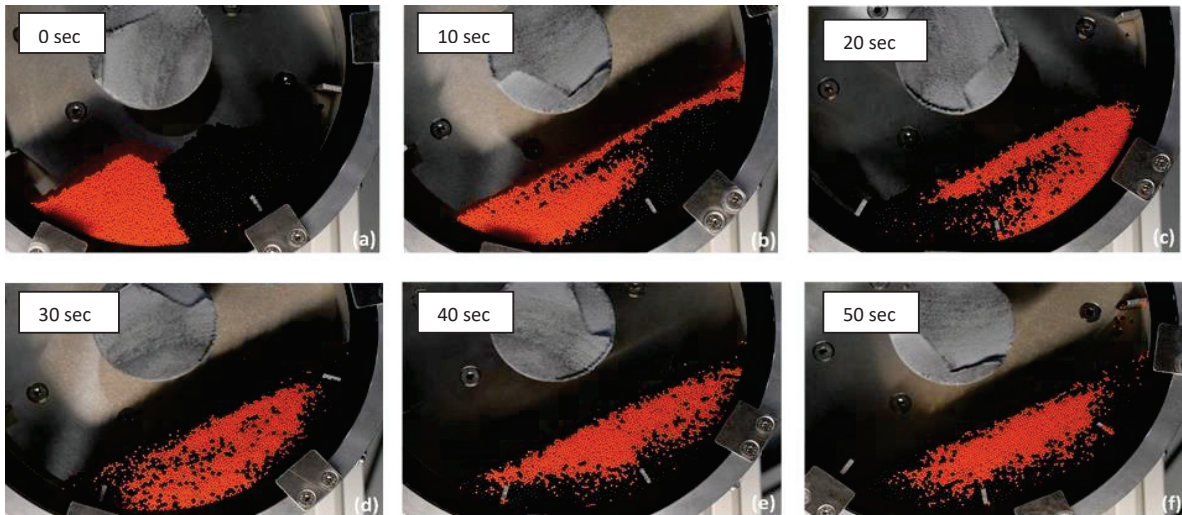


Figure 48 : Photographies de la face frontale du tambour tournant au cours des premières secondes de la rotation avec un lit bi-disperse en tailles, un remplissage d'un sixième et 8 ailettes de 1.5cm (3 rpm)

## b. Indices de ségrégation

Les valeurs des indices de ségrégation ont été calculées à la paroi frontale et rapportées sur la totalité de la composition du lit. Pour un lit bi-disperse en tailles, la concentration totale volumique moyenne des particules de 2mm est de 0,504. Les valeurs des indices de ségrégation tirées des expériences sont regroupées sur la figure 49 ci-dessous.

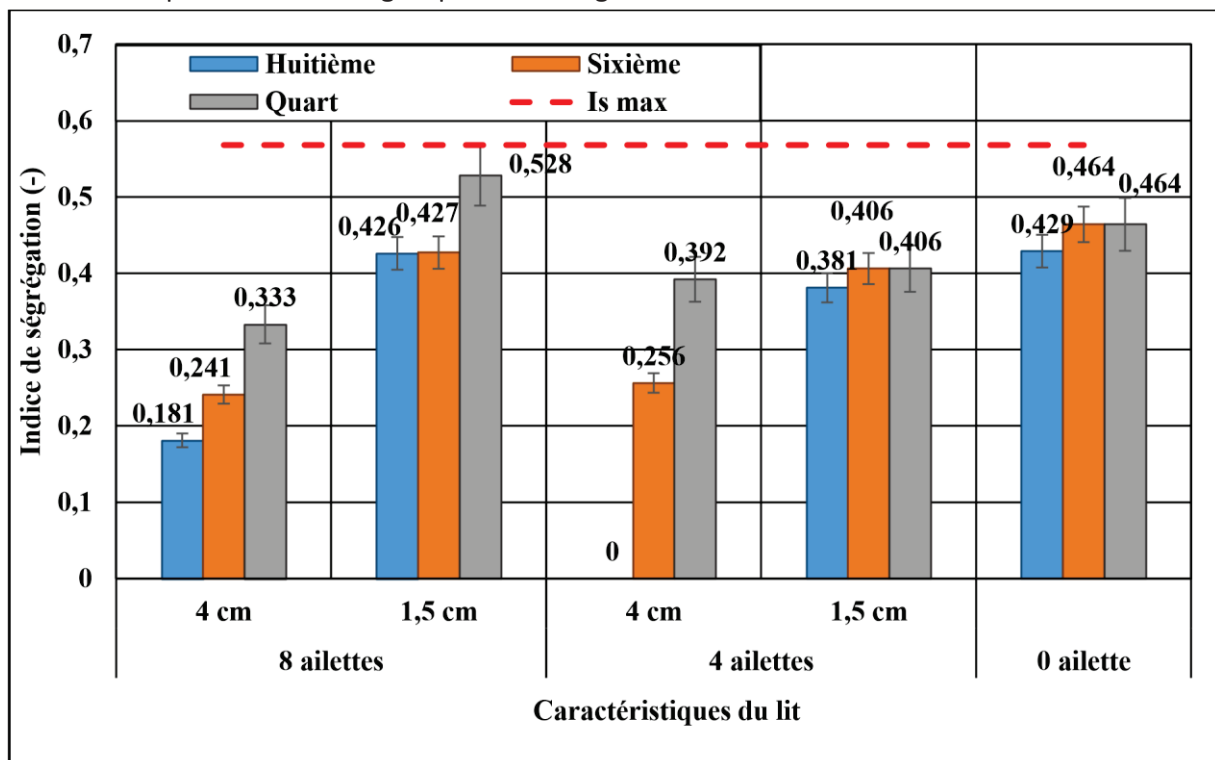


Figure 49 : Valeurs des Indices de ségrégation à la paroi lors des essais expérimentaux en tambour tournant (3 rpm)

NB : On observe sur les simulations ainsi que sur les expériences d'un lit granulaire au sein d'un tambour tournant sans ailettes, que le lit ne glisse pas à la paroi. En l'occurrence, aucun glissement n'a été constaté dans aucune de nos simulations et expériences.

Les essais avec un taux de remplissage de 1/4 ont conduit aux valeurs des indices de ségrégation les plus élevées, tandis que les essais avec un taux de remplissage de 1/8 ont conduit aux valeurs des indices de ségrégation les plus faibles. En ce qui concerne l'influence des ailettes, on peut constater que plus les ailettes sont grandes, plus les valeurs des indices de ségrégation sont faibles et, de plus, le nombre d'ailettes n'a pas d'influence significative sur les valeurs des indices de ségrégation.

L'indice de ségrégation maximal a été calculé pour un lit complètement ségrégué, c'est-à-dire quand chaque volume des deux types de billes est compartimenté. Rapportée à la moyenne globale, la valeur de l'indice de ségrégation maximal pour le lit bi-disperse en tailles est de 0,568.

Le mélange le plus homogène possible a été obtenu avec les grandes ailettes et le plus petit taux de remplissage possible.

Les simulations ont conduit aux résultats qui sont présentés sur la Figure 50.

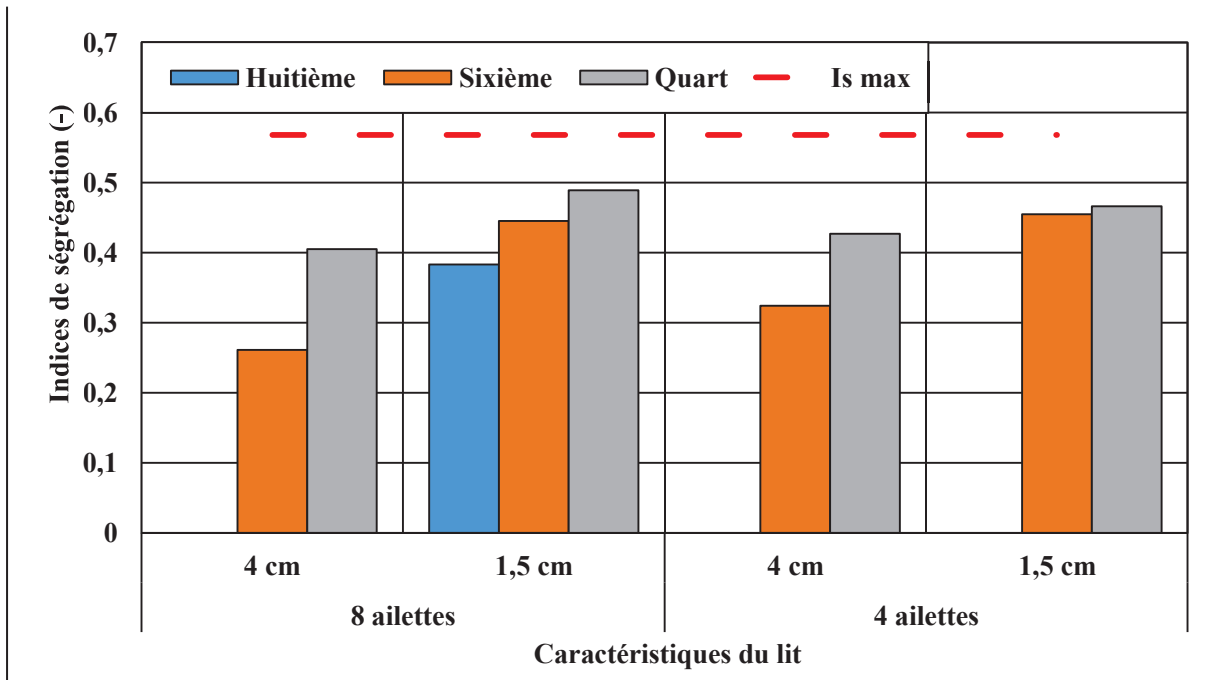


Figure 50 : Valeurs des Indices de ségrégation à la paroi à partir des essais de simulation (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation obtenus par simulations près de la face frontale en verre sont du même ordre de grandeur que les valeurs des indices de ségrégation près de face frontale en verre déduits des expériences avec notre tambour tranche 2D. Les valeurs des indices de ségrégation des simulations sont bien comprises dans la barre d'erreur des valeurs des indices de ségrégation déduites des expériences.

Les valeurs des indices de ségrégation obtenues à partir des simulations précédentes ont été calculées uniquement près de la face frontale (ISF) afin de pouvoir les comparer aux valeurs des indices de ségrégation expérimentaux. D'autres valeurs d'indices de ségrégation, notés IS, ont été calculées comme les indices près de la paroi en acier (ISA) ou l'IS global du lit entier (ISG).

Pour rappel toutes les valeurs de ces indices de ségrégation sont rapportées à la concentration moyenne théorique du lit (voir 2.IV.B).

Le graphe ci-dessous donne un exemple des valeurs de ces 3 indices pour la même simulation avec un taux de remplissage égal à 1/4 et un tambour muni de 8 ailettes de 4cm de hauteur, c'est-à-dire pour la même configuration que celle qui correspond aux images présentées dans la Figure 47.

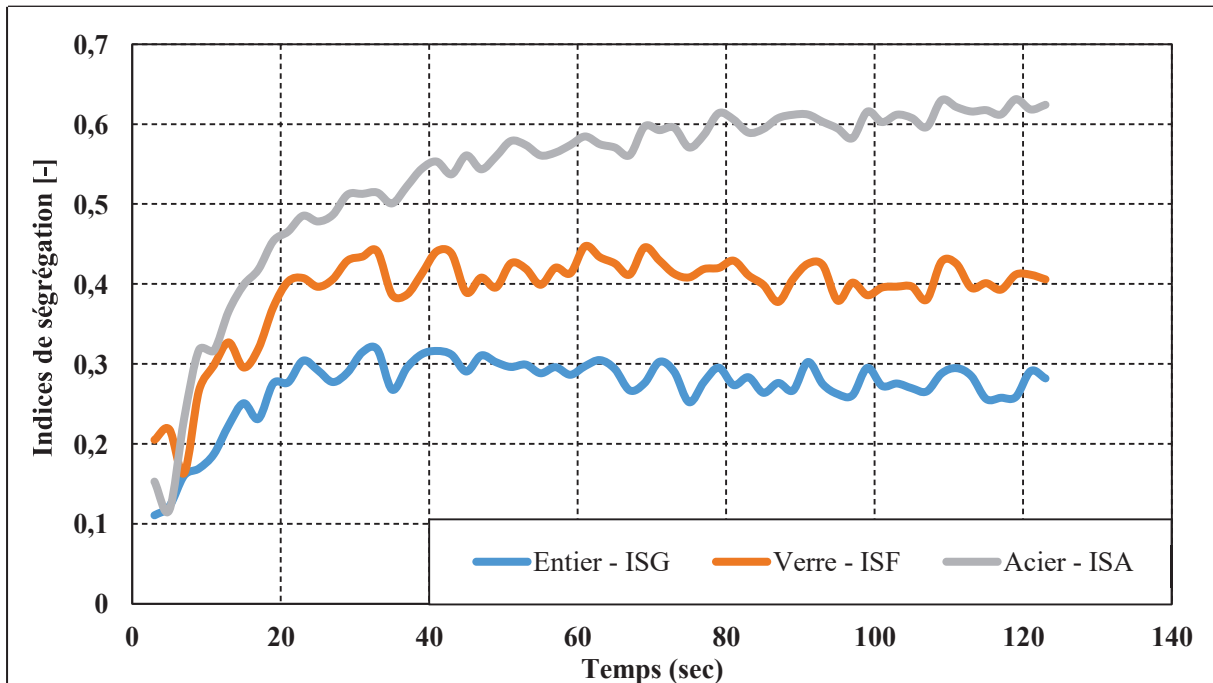


Figure 51 : Différents Is -entier, à la paroi en verre et à la paroi en acier- pour une simulation avec un remplissage de 1/4 et 8 ailettes de 4cm (3 rpm)

La valeur de l'indice de ségrégation près de la paroi en acier est la plus élevée, vient ensuite la valeur de cet indice près de la paroi en verre puis celle pour le lit entier. La valeur de l'ISA est en constante augmentation puisque de plus en plus de billes noires s'accumulent près de cette paroi. Il est à noter que cette valeur est plus élevée que la valeur maximale de l'indice de ségrégation maximale car celle-ci a été calculée essentiellement avec des grosses billes. (En effet, le calcul de ces indices de ségrégation se fait sur une largeur de 3mm et est rapporté au lit entier. Si cette tranche est composée uniquement de grosses billes, la valeur maximale de l'indice serait de 0,78 tandis que si la tranche était composée uniquement de petites billes, elle serait au maximum de 0,22.) Les valeurs de ces indices de ségrégation à la paroi en verre et pour le lit entier atteignent leur maximum après 40 secondes environ puis diminuent légèrement durant la fin de la simulation. Les oscillations dans la lecture des indices de ségrégation sont dues à la lecture de la grille qui est fixe.

### c. Fraction de billes ségréguées à la paroi

La fraction globale du noyau indique la présence plus ou moins majoritaire d'un type de billes près de la paroi comparée à leur concentration moyenne au sein du lit. Toutes les fractions sont calculées par rapport aux billes les plus petites de diamètre moyen égal à 2mm. C'est donc la résultante du nombre de petites particules rapporté à l'ensemble des particules et visibles à la face frontale du tambour. Il faut souligner que les particules sont équivalentes en volume introduit mais non en concentration ou en nombre. (Voir partie : 2.IV.Fraction des particules ségréguées à la paroi)

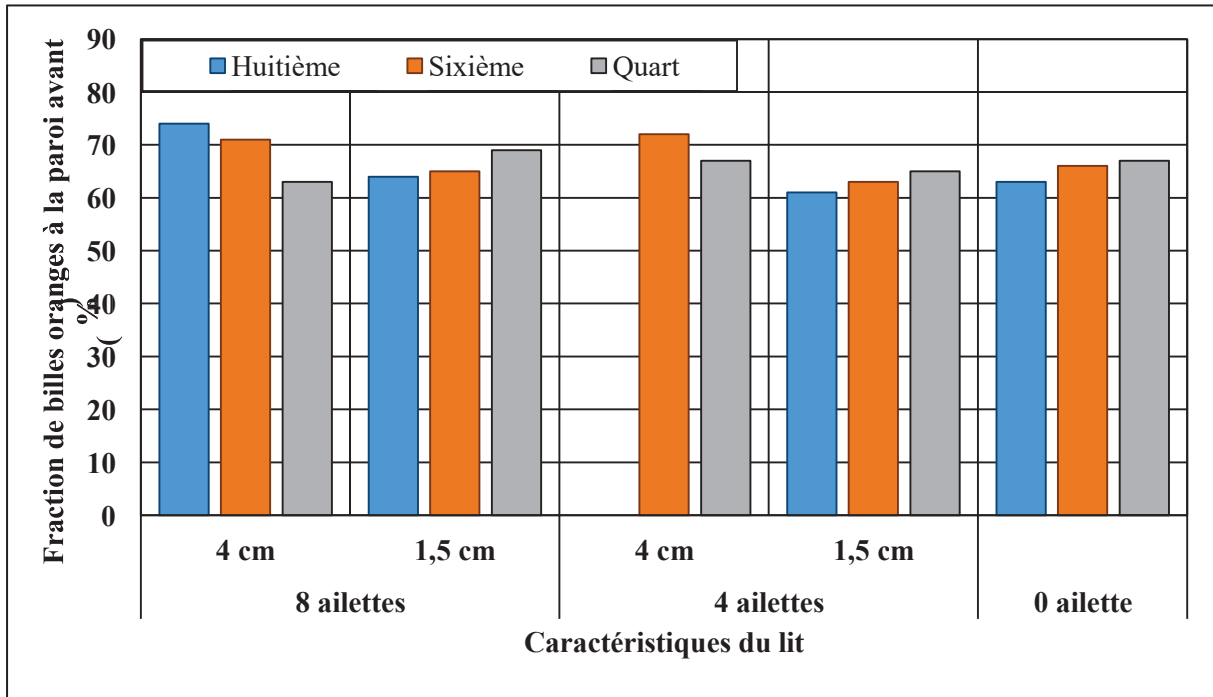


Figure 52 : Valeurs des fractions globales du noyau sur la face frontale à partir des essais expérimentaux (3 rpm)

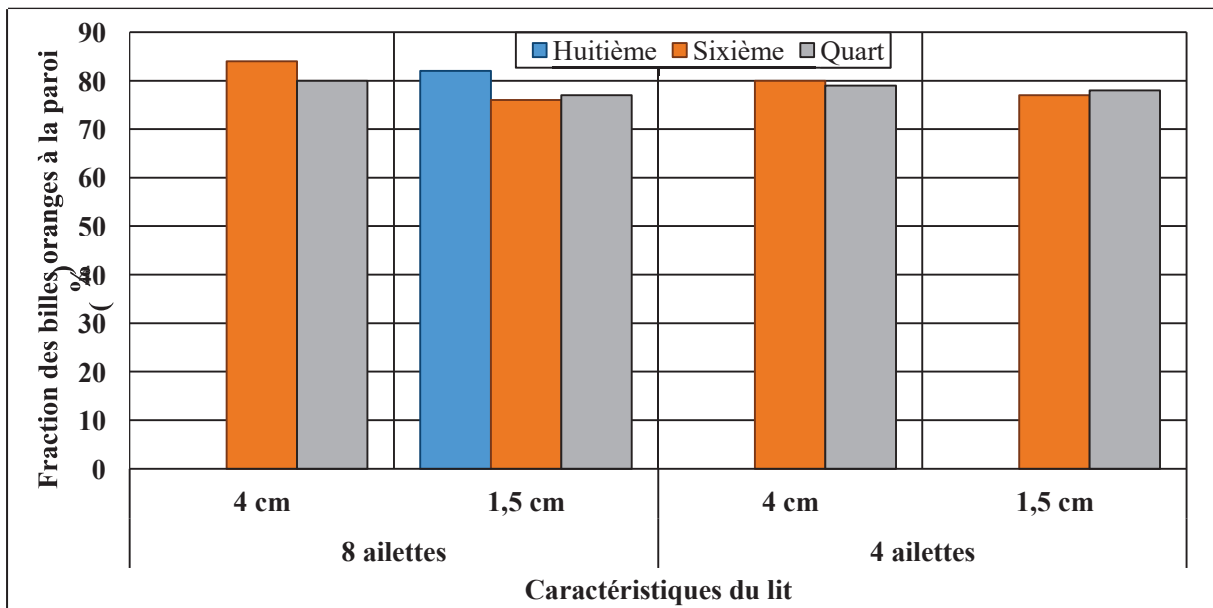


Figure 53 : Valeurs des fractions globales du noyau sur la face frontale à partir des simulations (3 rpm)

Dans tous les cas, il y a davantage de petites particules avec les simulations qu'avec les expériences, probablement que lors des simulations, la périphérie du lit est composée principalement de grosses particules tandis que lors des expériences, il y a certainement davantage de petites particules qui viennent se glisser dans la zone périphérique du lit, même si cela n'est pas apparent sur les photos.

Le nombre d'ailettes a peu d'impact sur la fraction des particules à la paroi mais les résultats avec des petites ailettes et sans ailettes sont sensiblement les mêmes. Cependant, ces résultats sont inversés avec les grandes ailettes, c'est-à-dire que dans cette configuration les taux de remplissage les plus faibles conduisent à des valeurs de taux de ségrégation les plus élevées, légèrement supérieures aux valeurs obtenues avec des petites ailettes ou sans ailette.

#### d. Angles de talus dynamique

L'angle de talus dynamique permet de vérifier l'écoulement continu à surface plane du lit.

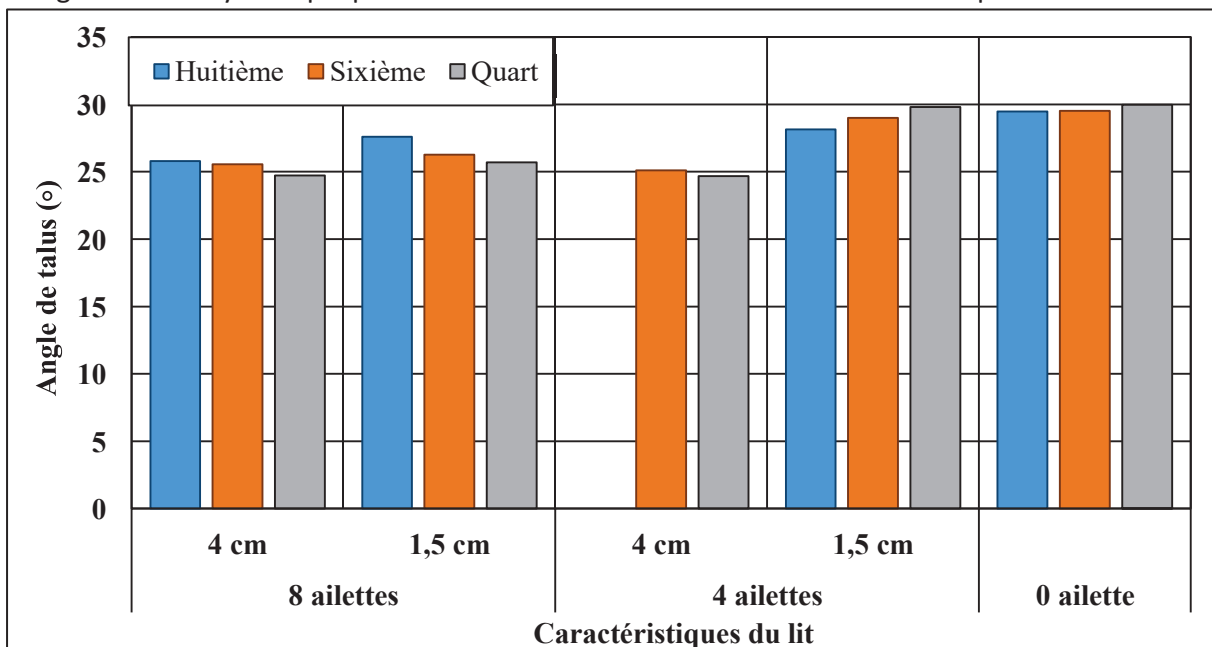


Figure 54 : Valeurs des angles de talus dynamique à partir des expérimentations (3 rpm)

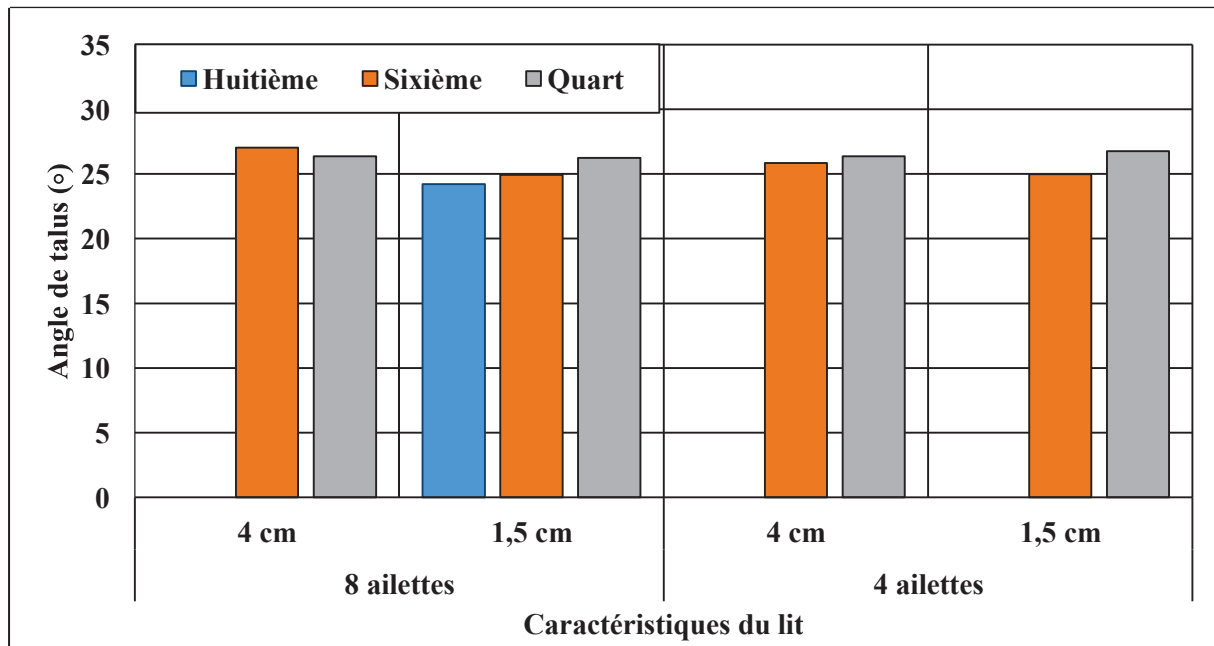


Figure 55 : Valeurs des angles de talus dynamique à partir des simulations (3 rpm)

Les valeurs des angles de talus sont comprises entre 24° et 29°. Il n'est pas possible d'établir de corrélation avec les taux de remplissage ou la taille des ailettes et les valeurs des angles mesurés. En effet toutes les valeurs des angles de talus sont comprises dans un intervalle assez étroit qui est dans la marge d'erreur de nos mesures. En conclusion, les petites particules forment un noyau central au milieu du tambour tandis que les particules les plus grosses s'accumulent à la périphérie du tambour ainsi que près de la paroi en acier.

## B) Lit bi-densités

Les simulations du lit bi-disperse en densités n'ont été effectuées que pour une seule configuration. En effet, pour les différentes configurations précédemment étudiées avec le lit bidisperse en tailles, les temps nécessaires pour effectuer les simulations étaient considérables. Nous avons donc préféré réaliser toutes les simulations avec une seule configuration de 8 ailettes de 1,5 cm.

### a. Visualisation de la ségrégation

Les particules les moins denses sont celles en polypropylène, de couleur verte et les particules les plus denses sont celles en acétate de cellulose de couleur orange.

Les images obtenues par simulation et les photos résultant des expériences sur notre maquette froide ont été comparées et sont présentées sur la Figure 56 ci-après.

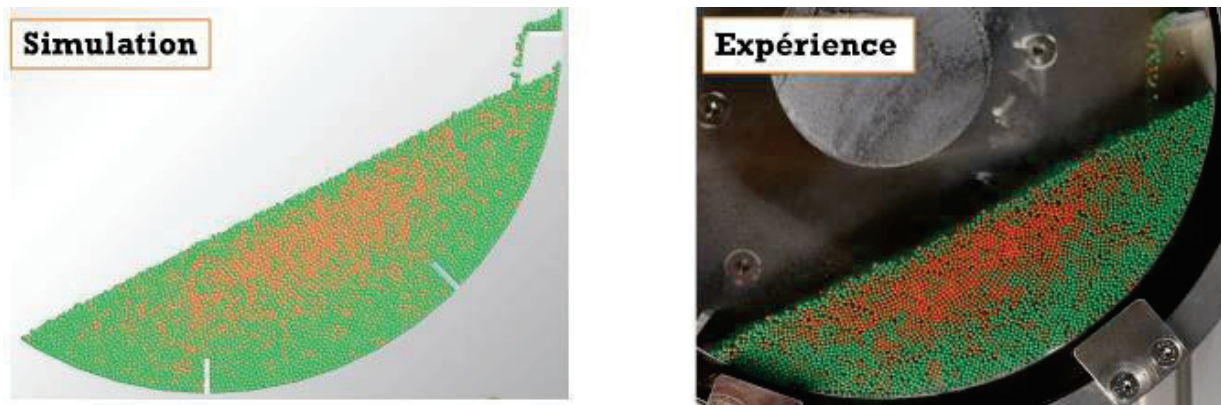


Figure 56 : Comparaison des images à la paroi pour un remplissage d'un sixième avec 8 ailettes de 1.5cm entre l'expérience et la simulation après 2 minutes de rotation (3 rpm)

Ces images présentent de larges similitudes, avec un noyau de particules les plus denses au centre du tambour tandis que les particules les moins denses sont rejetées à la périphérie du tambour.

La Figure 57 présente une autre série de photographies obtenues lors d'essais expérimentaux montrant bien la ségrégation au sein d'un lit bi-disperse en densités avec un intervalle de 10 secondes entre chaque prise des clichés photographiques.

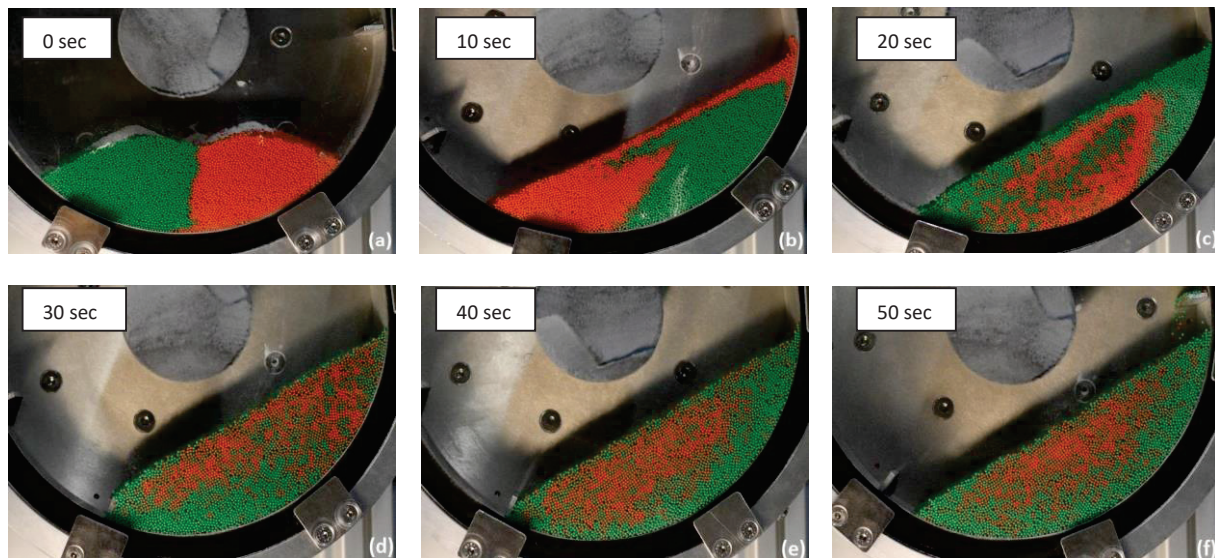


Figure 57 : Photographies des premières secondes de la rotation du tambour tournant avec un lit bi-disperse en densités, un remplissage d'un sixième et 8 ailettes de 1.5cm (3 rpm)

On observe bien la formation d'un noyau de particules denses au centre du tambour avec le même délai qu'avec un lit bi-disperse en tailles, mais ce noyau central de billes plus denses est bien moins ségrégué que le noyau observé avec un lit bi-tailles, dû à la présence beaucoup de billes vertes à l'intérieur du noyau central, même s'il reste de couleur majoritairement orange. C'est ce qui va être vérifié avec les valeurs des indices de ségrégations calculées et présentées dans la partie qui suit.



## b. Indices de ségrégation

Les valeurs des indices de ségrégation obtenues soit à partir des essais expérimentaux soit à partir des simulations sont présentées et comparées sur la Figure 58 ci-dessous.

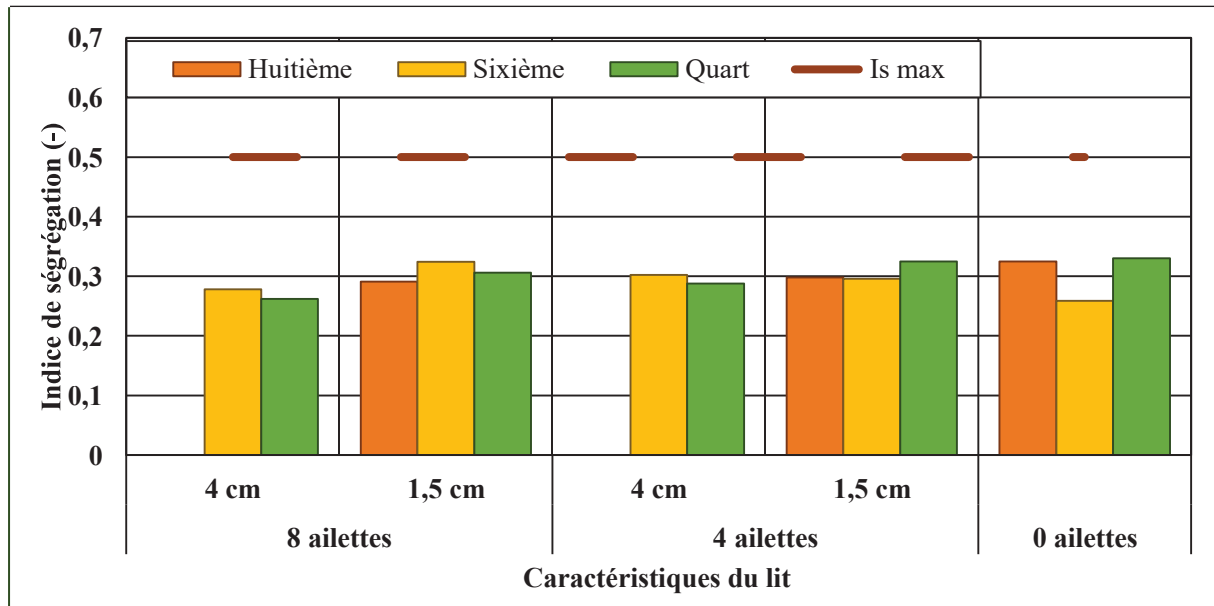


Figure 58 : Valeurs des indices de ségrégation à la face frontale à partir des expériences (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation se situent entre 0,26 et 0,33, les valeurs les plus faibles correspondant au lit avec une configuration de 8 ailettes de 4cm et les plus élevées avec un tambour sans ailettes et un taux de remplissage égal à 1/4. Plus les ailettes sont grandes, plus les valeurs des indices de ségrégation sont faibles. La valeur limite en pointillé de couleur marron correspond à la valeur maximale que l'indice de ségrégation au sein du lit peut atteindre (voir IIA). Les résultats de nos essais expérimentaux montrent que cette valeur maximale notée, Is max, est loin d'être atteinte.

Par ailleurs, on constate que le taux de remplissage n'exerce qu'une faible influence sur les valeurs des indices de ségrégation avec des lits bi-densités.

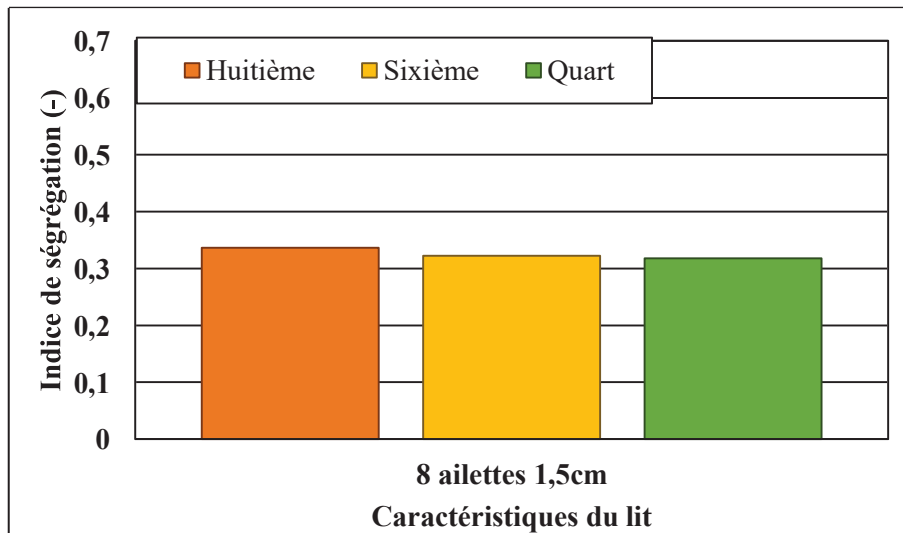


Figure 59 : Valeurs des indices de ségrégation à la face frontale à partir des simulations (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation résultant des simulations sont légèrement plus élevées que celles obtenues à partir des essais expérimentaux exception faite avec le taux de remplissage de 1/6 ; on peut aussi remarquer que la valeur obtenue pour un taux de remplissage de 1/4 se situe dans la barre d'erreur de nos résultats.

Les valeurs des indices de ségrégation obtenues soit par simulation soit par expérience avec notre tambour 2D sont, de manière générale, en assez bon accord, mais étant donné que nos résultats sont assez peu nombreux, nous ne pouvons pas en tirer des conclusions fiables et définitives. De plus, il est à remarquer que les valeurs de ces Indices de ségrégation concernent uniquement la zone située près de la paroi frontale en verre.

Les valeurs des indices de ségrégation obtenues avec les lits bi-disperse en densités sont inférieures aux valeurs obtenues avec les lits bi-disperses en tailles dans la zone près de la paroi frontale, ce que confirment nos résultats de visualisations de la ségrégation présentés précédemment.

### c. Fraction de billes ségréguées à la paroi

Ce sont les fractions des particules les plus lourdes, représentées sur la Figure 60, (couleur orange) qui se concentrent au centre du tambour

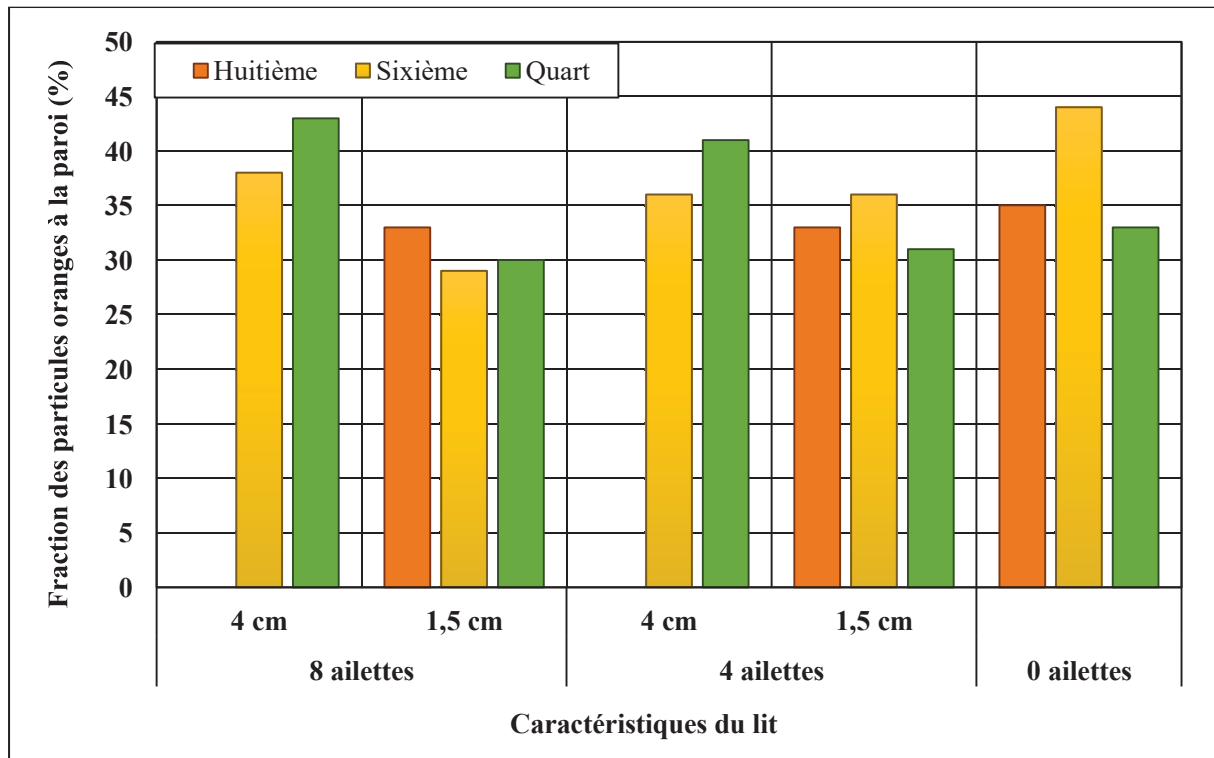


Figure 60 : Valeurs des fractions globales de particules ségréguées près de la face frontale pour les essais expérimentaux (3 rpm)

On peut constater sur cette même Figure 61 que les ailettes de 4cm conduisent à la formation d'un noyau de particules lourdes plus important qu'avec les ailettes de 1.5cm.

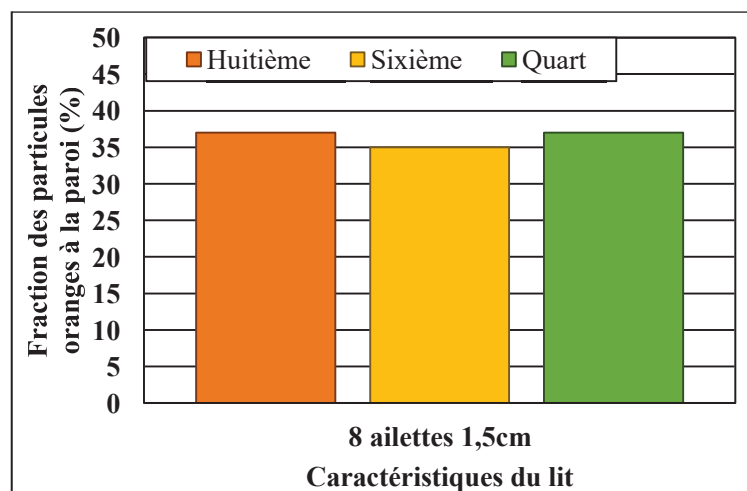


Figure 61 : Valeurs des fractions globales sur la face frontale déduites des simulations (3 rpm)

On constate que les valeurs des fractions de particules ségréguées à la paroi obtenues à l'aide des simulations (figure 61) sont relativement proches de celles obtenues à partir des expériences

(figure 60, dans les mêmes conditions de 8 ailettes de 1,5cm), ce qui confirme les observations faites précédemment.

Comme le lit est constitué avec des volumes égaux de chaque classe de particules, il devrait y avoir autant de particules de chacun des 2 types. Ce n'est pas le cas puisque le graphe de la Figure 60 montre que les particules les plus légères restent préférentiellement près de la paroi ce qui provoque une ségrégation au sein du lit du tambour tournant.

#### d. Angles de talus dynamique

L'angle de talus dynamique permet de vérifier l'écoulement continu du lit granulaire à sa surface plane.

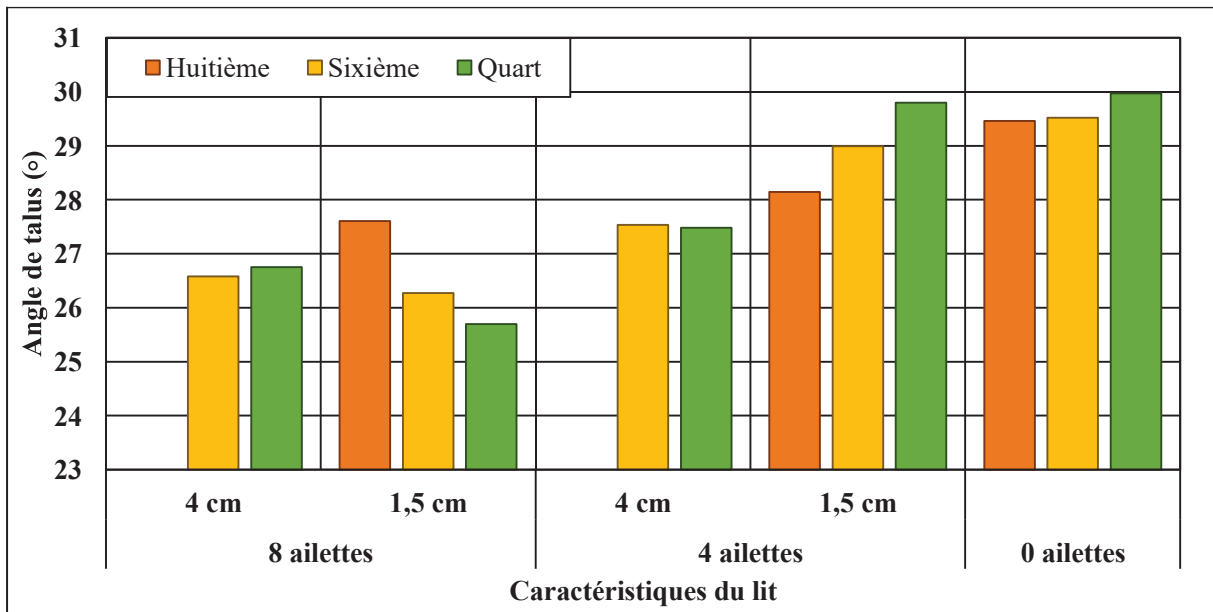


Figure 62 : Valeurs des angles de talus à partir des expériences sur maquette 2D (3 rpm)

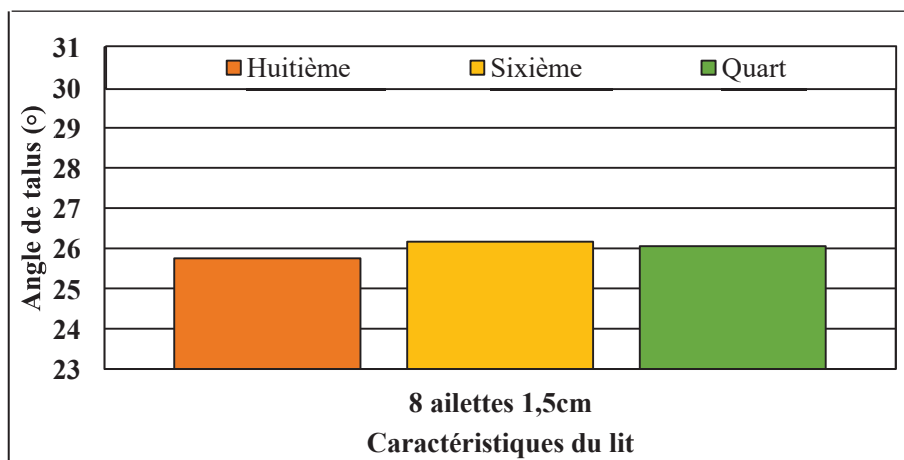


Figure 63 : Résultats des angles de talus à partir des simulations (3 rpm)

Les valeurs des angles de talus sont comprises entre  $24,4^\circ$  et  $30^\circ$  et on n'observe pas de réelle corrélation entre le taux de remplissage ou la taille des ailettes en fonction des valeurs des angles de talus dynamiques mesurées. En effet, toutes les valeurs des angles sont comprises dans un intervalle assez étroit correspondant à la marge d'erreur de nos mesures.

En conclusion, l'utilisation d'ailettes plus nombreuses et/ou plus larges peut permettre d'obtenir un effet favorable pour réduire le phénomène de ségrégation, caractérisé dans nos conditions par la formation d'un noyau quasi statique des particules les plus lourdes au centre du tambour.

### III. Expérimentation sur les moyen et grand tambours

L'étude d'écoulement des poudres dans le tambour moyen a porté sur 2 types de mélange, à savoir, un lit bi-disperse en tailles (billes de même densité, mais de tailles différentes) et un lit bidisperse en densité (billes de même taille, mais de densités différentes). Pour chaque type de mélange, 15 essais ont été réalisés.

Les influences des paramètres suivants ont été étudiées pour l'ensemble de nos essais :

- Le type de lit : bi-disperse en taille ou en densités
- Le taux de remplissage : 1/8, 1/6 et 1/4 - La longueur des ailettes : 2,5 ou 5cm - Le nombre d'ailettes : 0, 6 ou 12.

Pour chaque type de lit, ces paramètres d'essais sont regroupés sur le Tableau 18 ci-dessous :

*Tableau 18 : Plan d'expériences des essais expérimentaux et de simulation pour chacun des lits bi-disperse*

Taux de remplissage	1/10			1/8			1/6			
Nombre d'ailettes	12	6	0	12	6	0	12	6	0	
Longueur des ailettes	2,5	5	2,5	5	2,5	5	2,5	5	2,5	5

Lors de nos expériences en tambour 2D, suite à des soucis de répétabilité, nos essais expérimentaux ont commencé à partir d'un lit parfaitement compartimenté.

#### A) Tambour de taille moyenne

##### a. Lit bi-tailles

##### Visualisation de la ségrégation

Les photographies du lit avec le tambour moyen tournant rempli à un taux de remplissage de 1/6 avec 12 ailettes de 2.5cm sont présentées ci-dessous (Figure 64). Les photographies ont été prises dès les premières secondes à un intervalle de 10 secondes entre deux photos.

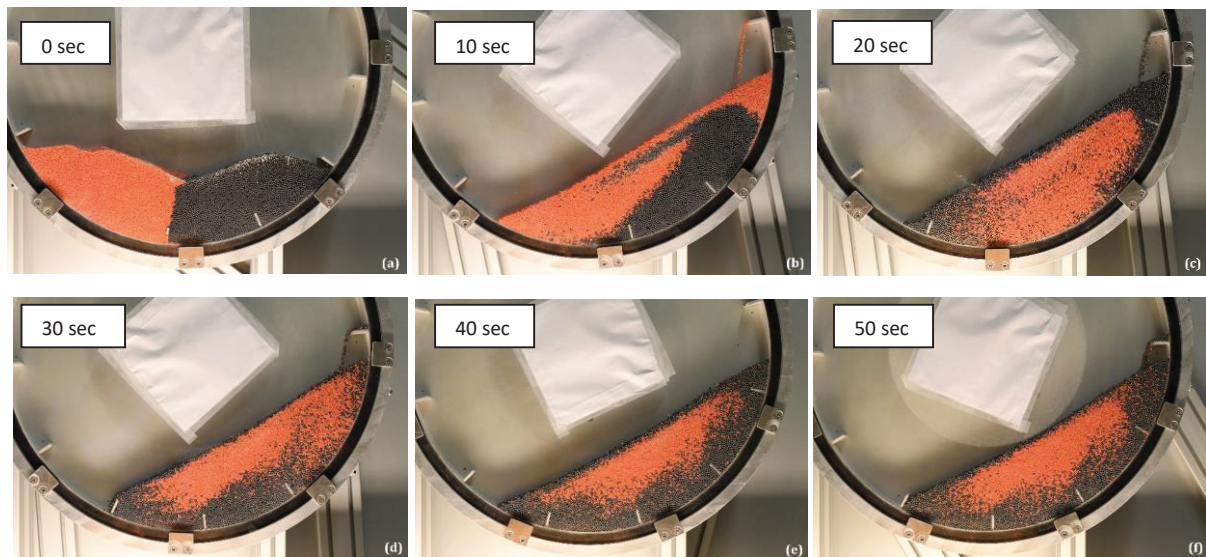


Figure 64 : Photographies des premières secondes dans le tambour tournant moyen avec un lit bi-disperse en tailles, un remplissage d'un huitième et 12 ailettes de 2.5cm (3 rpm)

Un noyau de petites particules oranges se forme au centre du tambour tournant moyen comme avec le petit tambour et il n'y a pas de différences visuelles très significatives avec les observations précédentes. Les petites particules forment un noyau au centre du tambour, près de la paroi frontale tandis que les grosses particules sont repoussées vers la paroi périphérique.

Les caractéristiques de comportement du lit que nous allons présenter par la suite vont permettre de juger si les conclusions et les tendances observées avec le petit tambour restent inchangées avec un tambour de plus grand diamètre, ici un tambour moyen.

## Indices de ségrégation

Les essais en tambour moyen ont duré plus longtemps qu'avec le petit tambour. Puisque nous n'avons pas de contraintes de temps de simulation, les valeurs des indices de ségrégation ont été calculées après 2 minutes puis les expériences ont été étendues jusqu'à 2 heures. Nous avons constaté que les valeurs des indices de ségrégation calculées après 5 et 10 minutes de rotation du tambour ne variaient déjà plus par rapport à celles calculées après 2 minutes.

Ces résultats sont présentés sur l'histogramme de la Figure 65 ci-dessous.

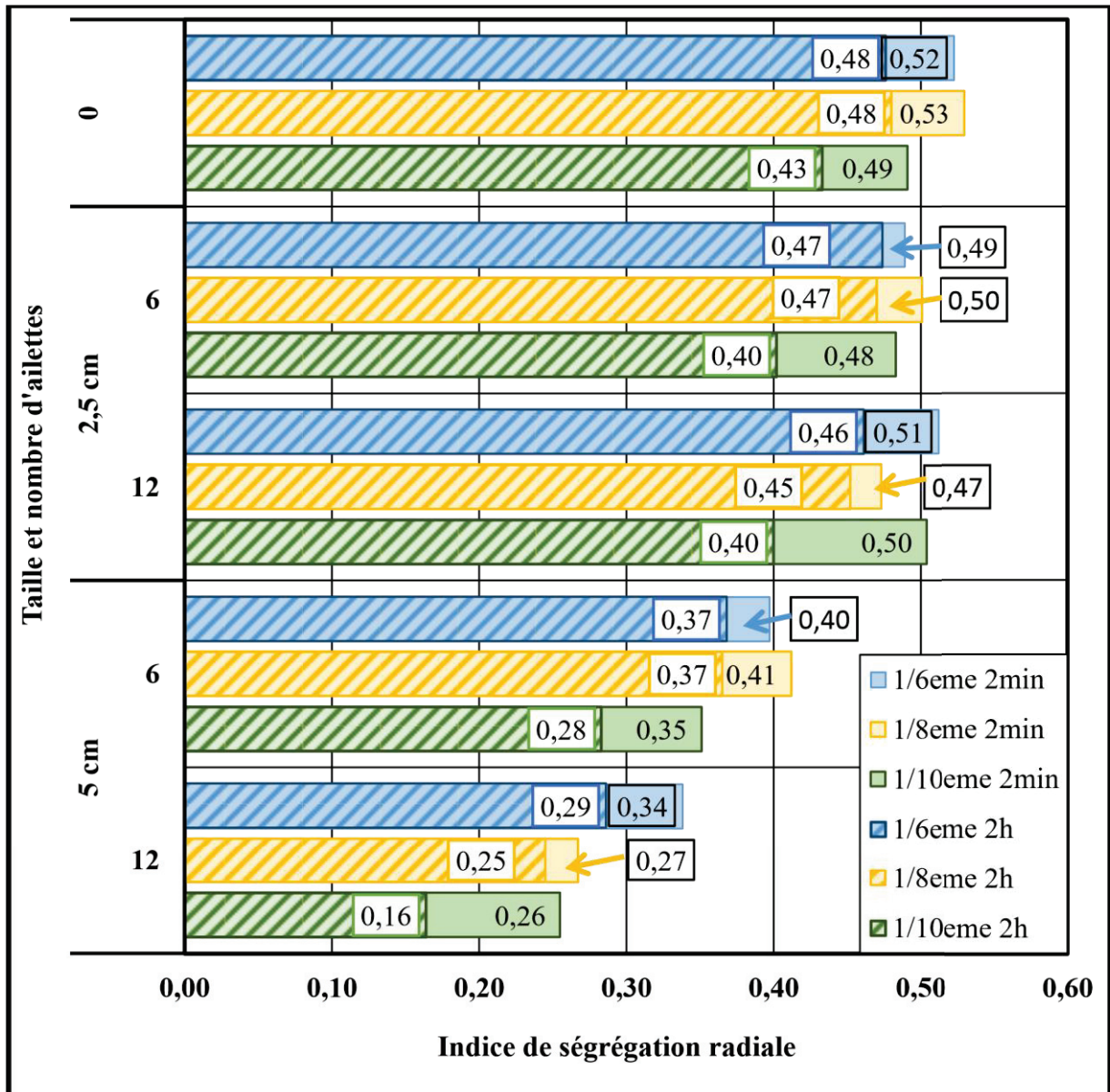


Figure 65 : Valeurs des indices de ségrégation à la paroi à partir des essais expérimentaux (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation au bout de 2 minutes de rotation du tambour sont toutes supérieures aux valeurs des indices de ségrégation après 2h, ce qui correspond à une réduction significative de la ségrégation près de la paroi frontale.



La taille des ailettes exerce aussi une influence sur la ségrégation puisque les valeurs des indices de ségrégation les plus faibles sont ceux obtenues avec les ailettes les plus larges ; par contre il y a peu de différence sur les valeurs de l'indice de ségrégation entre des configurations avec de petites ailettes ou sans ailette.

Le nombre d'ailettes a aussi son importance puisque les valeurs d'indice les plus faibles ont été obtenues avec un tambour muni d'un nombre élevé de grandes ailettes -12 ailettes de 5cm – configuration qui favorise de manière efficace le mélange des particules et qui fait disparaître le noyau central de petites particules. Avec les petites ailettes, la différence observée entre une configuration de tambour à 6 ou à 12 ailettes est trop faible pour en tirer une conclusion fiable. Ainsi, les petites ailettes ne semblent pas apporter une influence directe sur la ségrégation de sorte que l'on peut conclure que de trop petites ailettes par rapport au diamètre du tambour ne sont pas utiles pour s'affranchir ou même réduire la ségrégation.

Concernant l'influence du taux de remplissage du tambour, on a constaté que le taux de remplissage le plus bas correspond à la valeur de l'indice de ségrégation la plus faible, exception faite du lit muni de 12 ailettes de 2.5cm. Les différences sur les valeurs des indices de ségrégation obtenues avec des taux de remplissage 1/6 et 1/8 sont trop faibles pour en conclure, de manière fiable, que le taux de remplissage exerce une influence significative sur la ségrégation.

### **Fraction de billes ségrégées à la paroi**

Ces fractions sont définies par le rapport au nombre de billes d'un type donné (dites ségrégées), sur le nombre total de billes dans la monocouche près de la paroi, billes qui sont visibles et dont la couleur orange les rend facilement identifiable sur la photographie du lit granulaire prise à travers la face transparente en verre du tambour

Les résultats expérimentaux concernant ces fractions de billes dites ségrégées sont présentés à l'aide des histogrammes de la Figure 66.

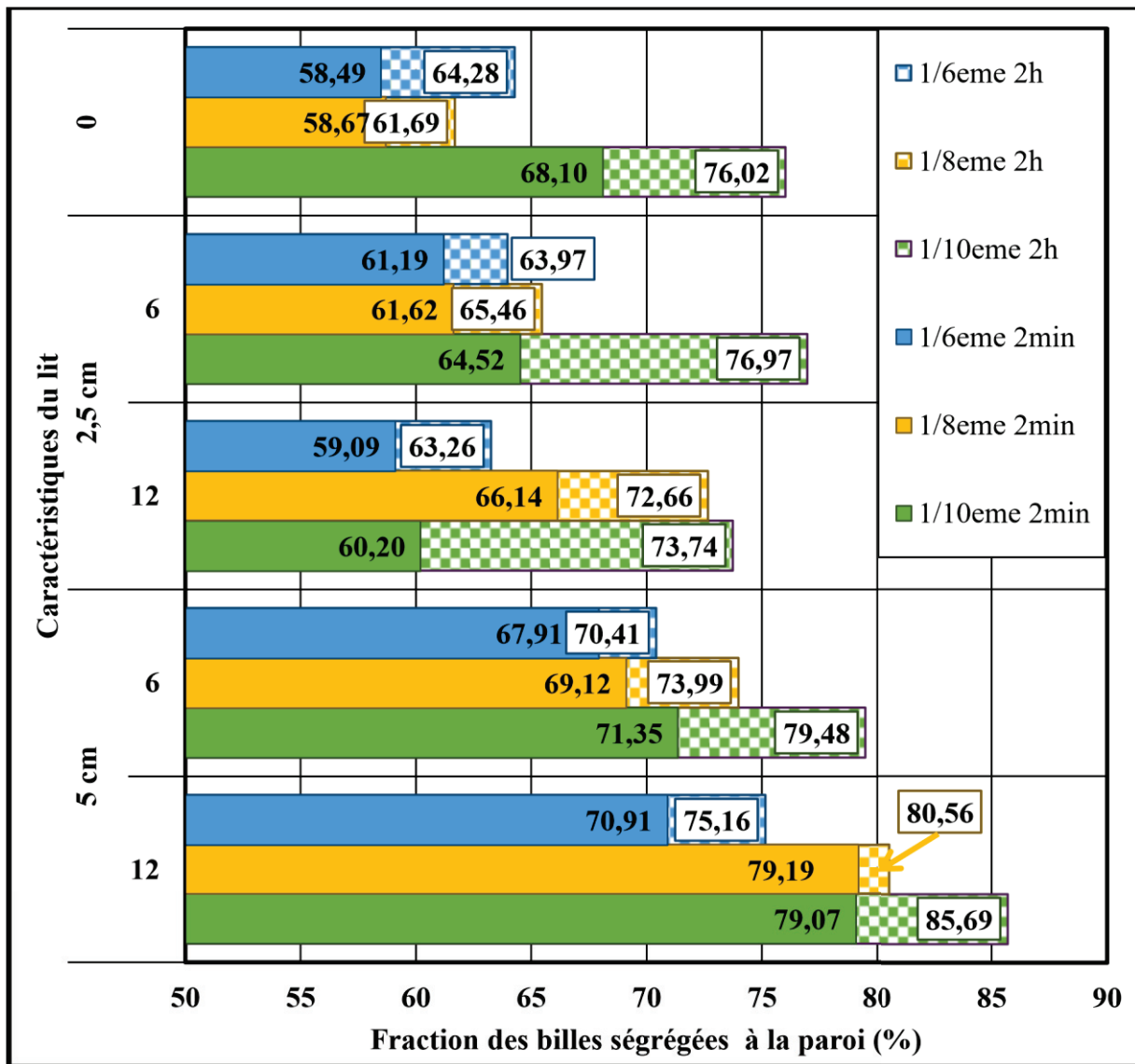


Figure 66 : Valeurs des fractions globales à la paroi avant à partir des essais expérimentaux (3 rpm)

Les valeurs des fractions de billes de chaque catégorie dans la zone près de la paroi sont dans un ordre inversé par rapport aux valeurs des indices de ségrégation, en effet plus la fraction à la paroi est grande plus l'IS est faible.

On constate que les valeurs de toutes ces fractions des billes ségrégées sont comprises entre 58% et 86%, et que leurs valeurs au bout de 2 minutes sont toujours inférieures aux valeurs observées au bout de 2 heures.

Les fractions à la paroi les plus élevées ont été obtenues avec une configuration de tambour muni de 12 ailettes de 5cm tandis que les valeurs les plus faibles ont été observées avec les taux de remplissage les plus élevés avec un tambour sans ailettes ou avec un petit nombre de petites ailettes.

## Angles de talus dynamique

Les valeurs expérimentales des angles de talus dynamiques sont présentées dans la Figure 67 ci-dessous

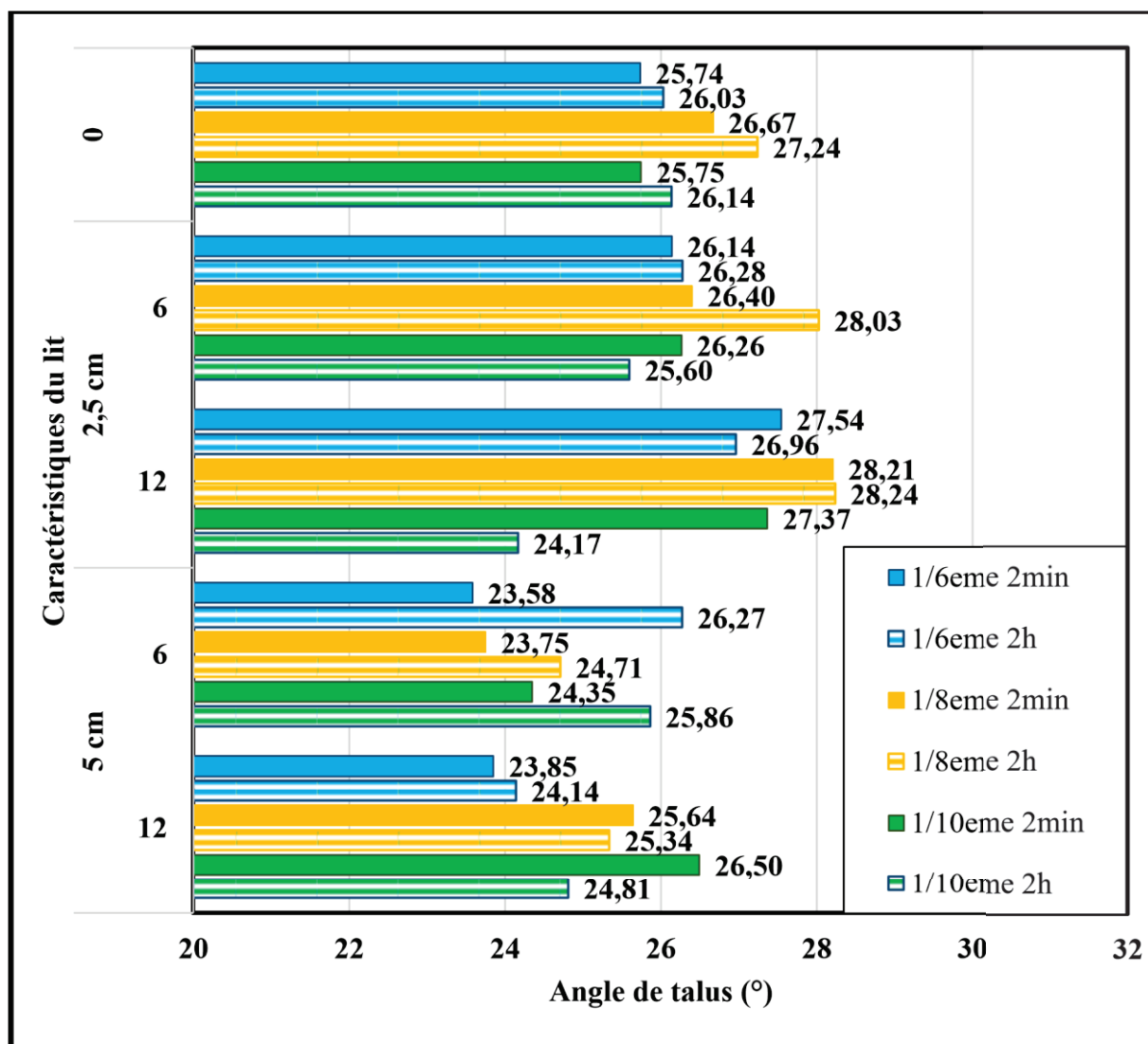


Figure 67 : Valeurs des angles de talus à partir des essais expérimentaux (3 rpm)

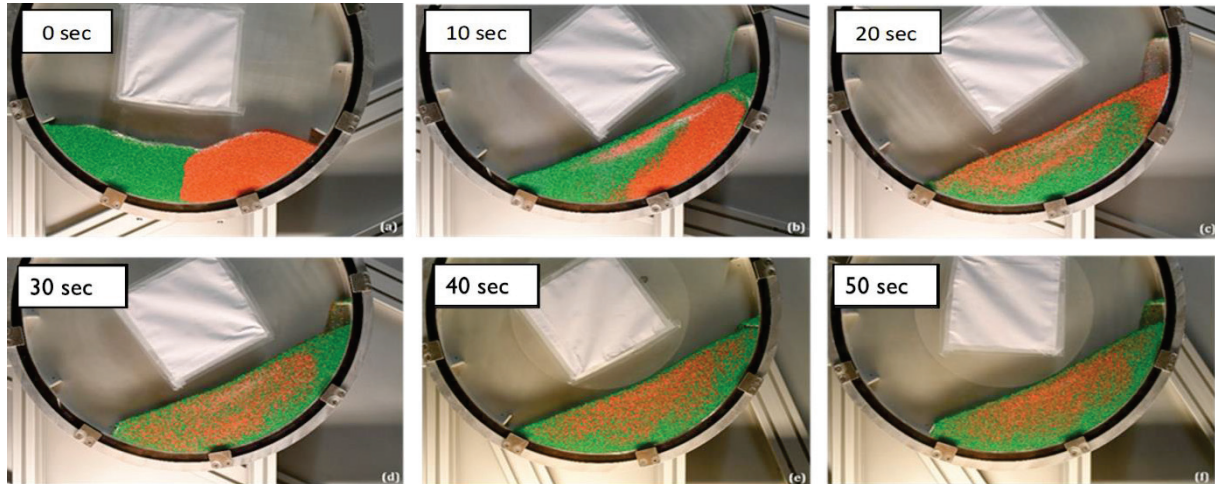
Les valeurs des angles de talus dynamiques les plus faibles correspondent à une configuration de tambour avec des ailettes de 5cm tandis que les valeurs des angles de talus les plus élevées correspondent à une configuration de tambour avec 12 ailettes de 2,5cm.

Ces valeurs, qui sont toutes situées dans la marge d'erreurs de nos mesures, varient en fonction du temps de sorte qu'il est impossible d'en dégager une tendance générale d'évolution en fonction des paramètres expérimentaux.

## b. Lit bi-densités

### Visualisation de la ségrégation

Les photographies du lit granulaire après les premières secondes de rotation de notre tambour moyen muni de 12 ailettes de 2.5cm et avec un taux de remplissage de 1/6 sont présentées ci-dessous (Figure 68). Les photographies ont été prises avec un intervalle de 10 secondes entre chaque photo.



*Figure 68 : Photographies des premières secondes de la rotation du tambour tournant avec un lit bi-disperse en densités, avec un taux de remplissage de 1/6 et muni de 12 ailettes de 2.5cm de largeur. (3 rpm)*

Les photographies du lit bi-disperse en densités montrent la formation d'un noyau au centre du tambour de particules denses (les billes oranges), comme avec le petit tambour, tandis que les billes les moins denses ont plus tendance à être repoussées vers la périphérie du tambour.

Cependant ce noyau central est moins étendu et moins homogène que ceux observés avec un lit granulaire bi-disperse en tailles.

## Indices de ségrégation

Les valeurs des indices de ségrégation pour un lit granulaire bi-disperse en densités sont présentées sur la Figure 69 ci-dessous. Comme pour le lit granulaire bi-tailles, les valeurs de ces indices ont été calculées après 2 minutes puis au bout de 2 heures de rotation du tambour.

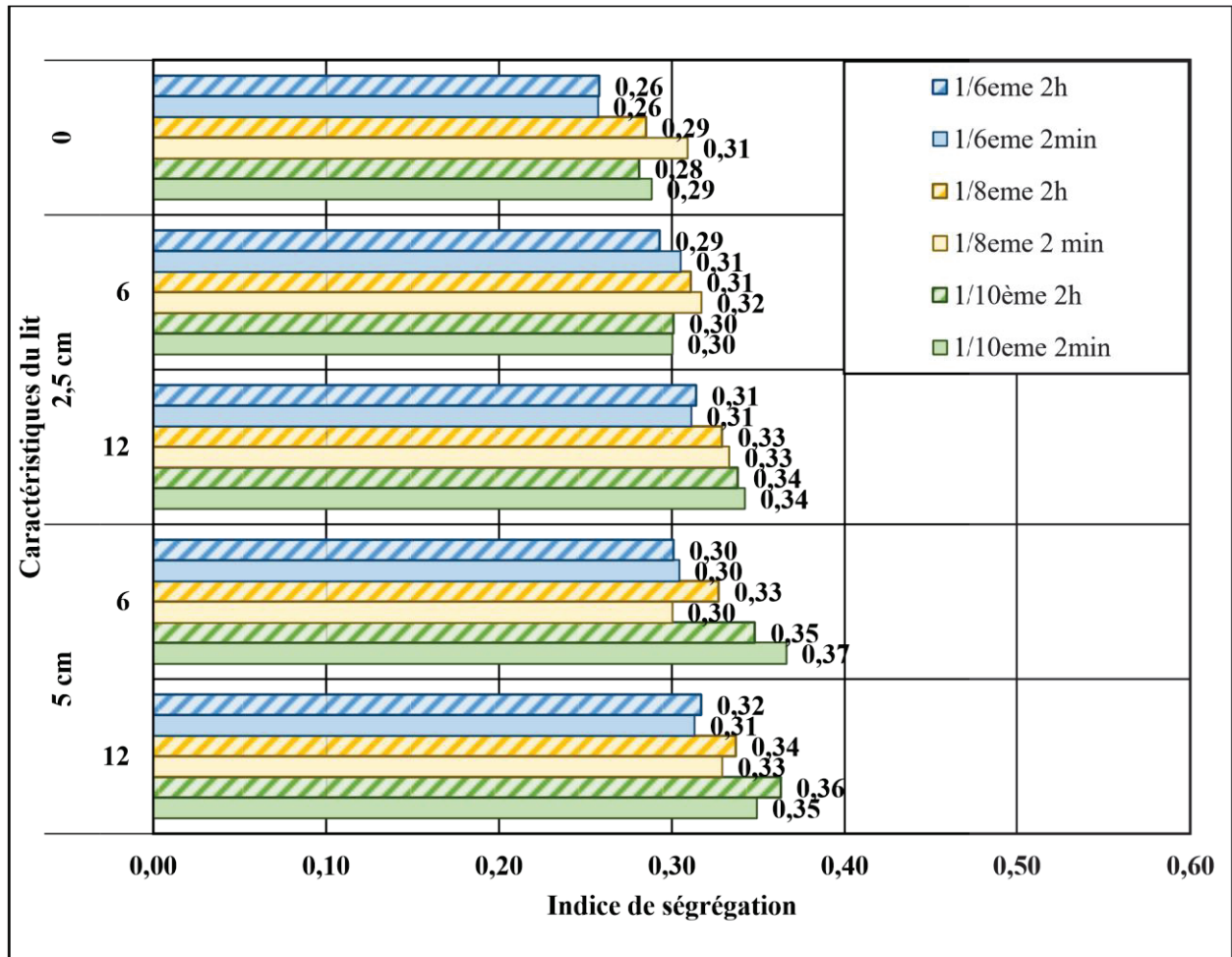


Figure 69 : Valeurs des indices de ségrégation des lits bi-tailles tirés des essais expérimentaux sur le moyen tambour (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation des lits granulaires bi-disperses en densités sont bien plus homogènes que celles observées avec les lits bi-disperses en tailles. De plus, ces valeurs ne varient pas significativement en fonction du temps, de sorte que les différences observées ne permettent pas de conclure à un changement des taux de ségrégation en fonction du temps.

Dans l'ensemble, les valeurs les plus faibles des indices de ségrégation sont observées avec un tambour sans ailette tandis que les valeurs les plus élevées sont observées avec un tambour muni d'ailettes de 5cm de large mais ces valeurs restent toutefois relativement proches.

Par ailleurs, la valeur du taux de remplissage joue un rôle important dans l'apparition du phénomène de ségrégation. Nos résultats expérimentaux montrent que les valeurs des indices de ségrégation diminuent lorsque les taux de remplissage augmentent, les valeurs les plus faibles correspondant au taux de remplissage de 1/6.

## Fraction de particules ségréguées à la paroi

Les valeurs des fractions des billes ségréguées à la paroi pour le tambour moyen sont présentées ci-dessous sur la Figure 70.

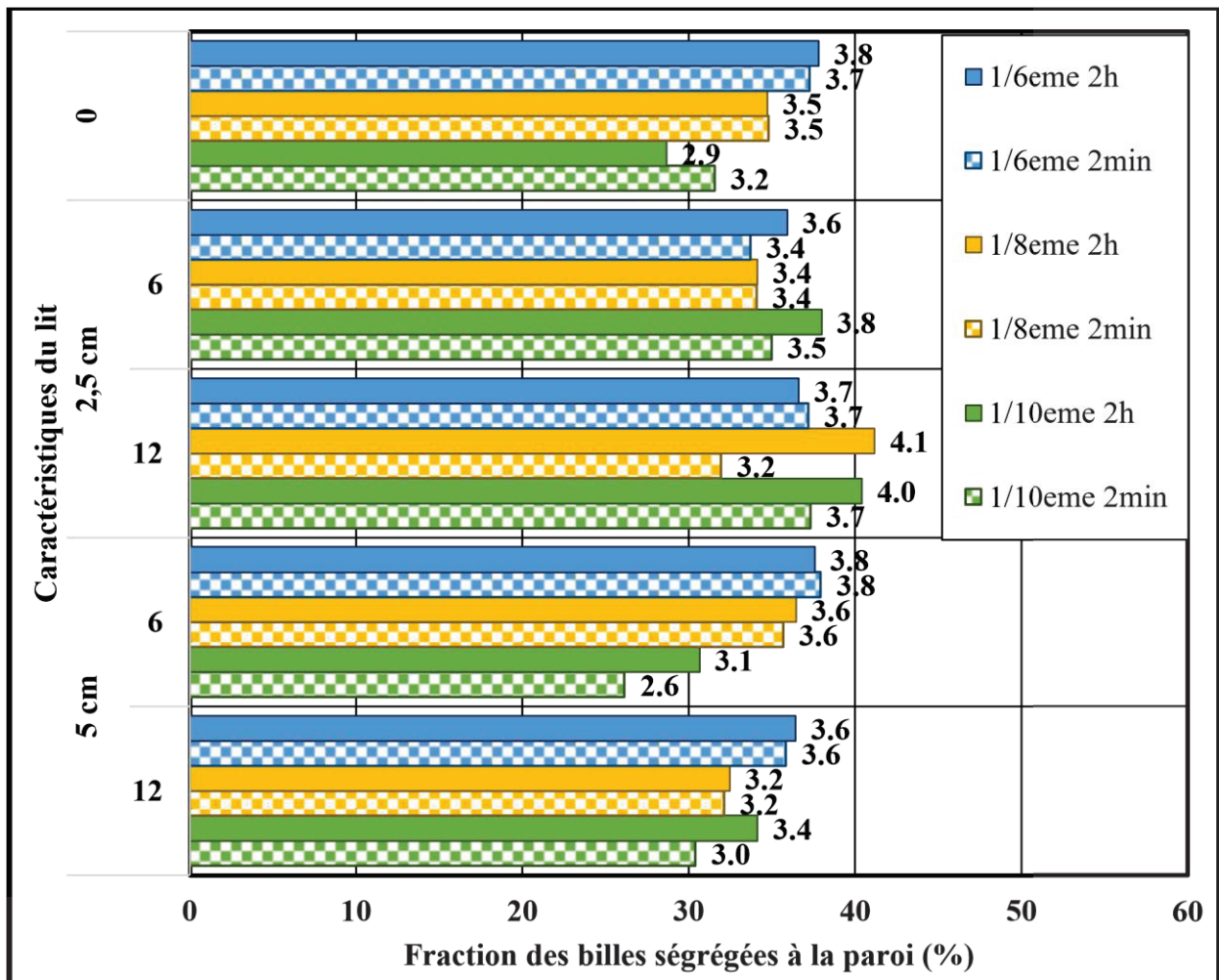


Figure 70 : Valeurs des fractions globales des billes ségréguées à la paroi pour des lits granulaires bi-tailles à partir des essais expérimentaux avec le tambour moyen (3 rpm)

Les valeurs des fractions de billes ségréguées à la paroi augmentent avec les taux de remplissage d'un tambour d'ailettes de 5 cm de largeur ou sans ailettes.

Comme pour les indices de ségrégation, les valeurs des fractions des billes ségréguées à la paroi sont relativement constantes en fonction du temps car nous n'avons pas observé de variations entre 2 minutes et 2 heures de rotation du tambour.

De plus, on observe que l'influence des conditions opératoires, sur la fraction de billes ségréguées à la paroi, reste globalement faible de sorte que des tendances et des conclusions fiables sont difficiles à énoncer.

## Angles de talus dynamique

Les résultats des valeurs des angles de talus pour un lit bi-disperse en densités avec un tambour moyen sont présentés ci-dessous (Figure 71)

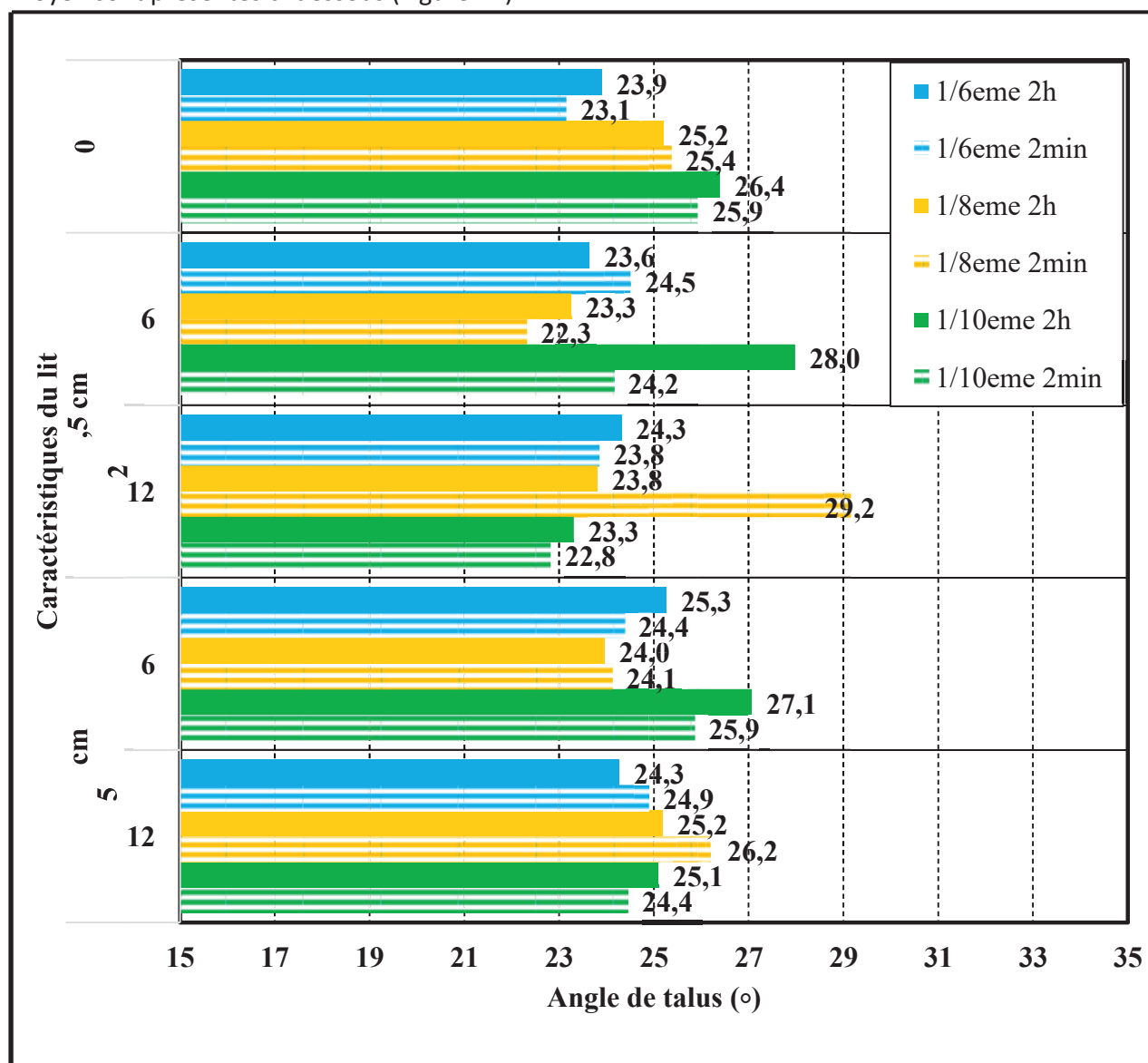


Figure 71 : Valeurs des angles de talus dynamique des lits bi-tailles à partir des essais expérimentaux sur le moyen tambour (3 rpm)

Les angles de talus dynamiques sont généralement plus élevés avec des ailettes de largeur égale à 5 cm.

Pour les essais avec 6 ailettes et pour les deux hauteurs d'ailettes retenues, les valeurs de l'angle de talus dynamique (appelées parfois angle découlement) diminuent en passant d'un taux de remplissage de 1/10 à 1/8 puis augmente en passant d'un taux de remplissage 1/8 à 1/6.

La valeur de cet angle de talus ne varie pas ou peu avec les conditions opératoires de sorte qu'une tendance générale est difficile à dégager.

## B) Grand tambour

Le grand tambour a été rempli avec des particules de semoule de couscous (jaune) et de cellulose microcristalline (MCC en bleu) de manière compartimentée comme visualisé sur la Figure 72. Les billes de MCC ont été colorées en bleu à l'aide du bleu de méthylène pour bien le distinguer de la semoule de couscous. Les particules les plus grosses sont jaunes tandis que les plus petites sont colorées en bleus. Ces particules se rapprochent de celles que Sanofi utilise pour leurs essais ; en effet, elles sont poly-dispersées bien que les deux groupes aient des tailles moyennes différentes. Ces expériences ont pour but de vérifier les phénomènes de ségrégation d'un lit poly-disperse avec de plus grandes installations.

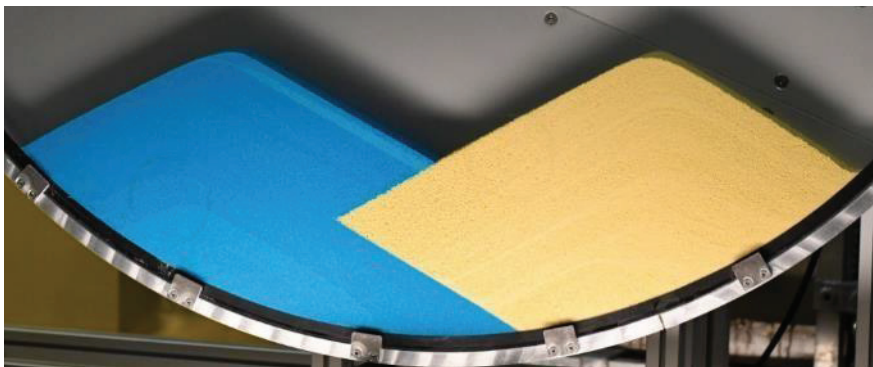


Figure 72 : Photographie de la disposition du lit bi-disperse en tailles pour le grand tambour

Le grand tambour a tourné à la même vitesse que le petit et le moyen tambour, c'est-à-dire à 3rpm. Cependant, le lit n'était pas le même que précédemment car le diamètre de tambour étant plus grand et la taille des particules plus petites que précédemment, le nombre de Froude ayant changé entre les différentes expériences. Notre lit granulaire présentait un comportement d'écoulement avec une surface en S comme le montre la photo ci-après (Figure 73).

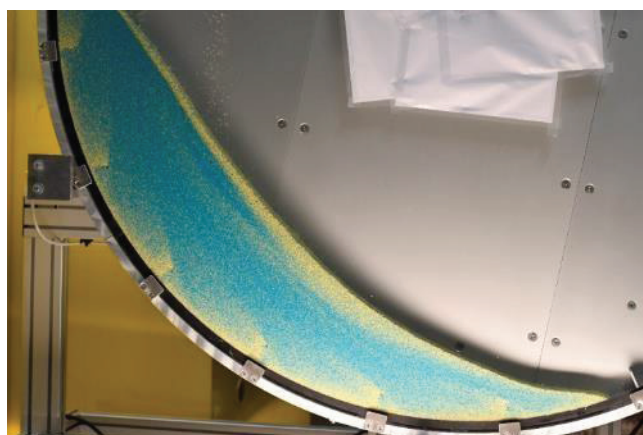


Figure 73 : Photographie du mélange en tambour tournant soumis à un roulement à surface en S (3 rpm)

Il a donc été décidé de diminuer la vitesse de rotation du grand tambour pour revenir à un régime d'écoulement à surface plane. La vitesse de rotation de ce grand tambour a donc été fixée à 1 rpm.



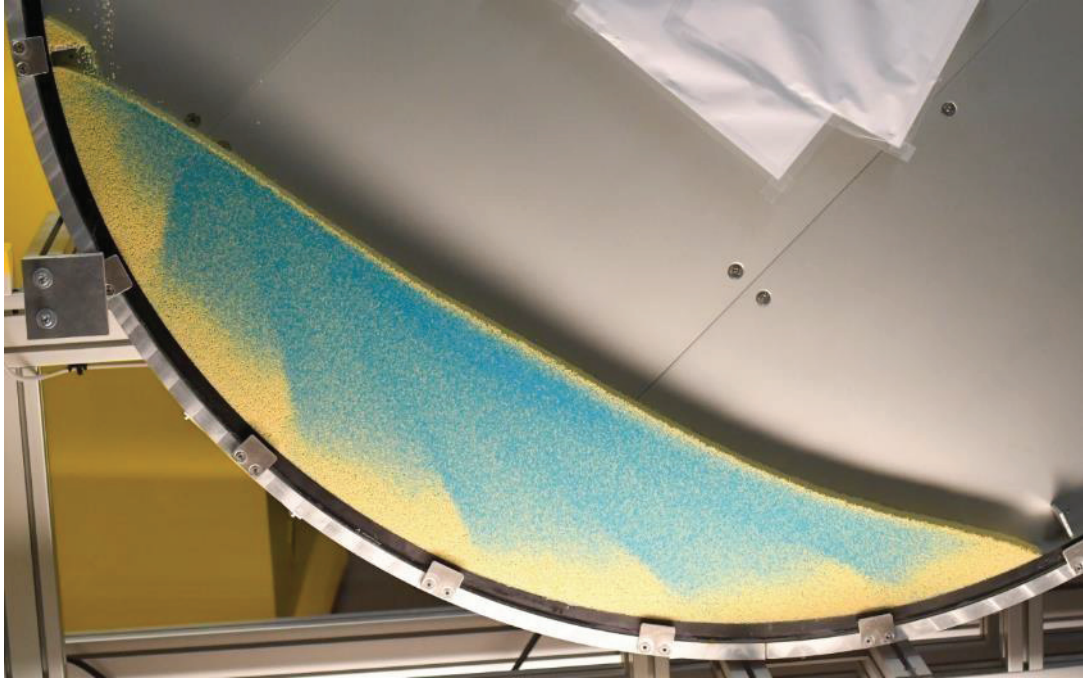


Figure 74 : Photographie du lit bi-disperse en taille dans le grand tambour avec un roulement continu à surface plane (1 rpm)

Cette photographie du grand tambour fait apparaître une forte ségrégation des particules au sein du lit granulaire en mouvement. En effet, on peut constater que les particules les plus grosses sont rejetées à la périphérie du lit granulaire près de la paroi périphérique du tambour tandis que les plus petites particules se sont concentrées au centre du tambour.

Les ailettes qui sont petites (3.5cm) par rapport au diamètre du tambour (160 cm) ont un effet non négligeable sur la structure du lit puisque les amas de particules jaunes visibles sur la photo correspondent à la présence d'une ailette.

Les particules les plus petites forment un noyau central très étendu mais non homogène, en effet le noyau est de couleur dominante bleu mais contient toutefois des particules jaunes en quantité moins importante. Cependant, il existe des parties dans le lit où la couleur bleue est plus marquée comme à la surface supérieure et mobile du lit, où bien à l'intérieur du lit granulaire.

Cette expérience prouve que, quelle que soit la nature des billes une partie des particules les plus grosses sont repoussées à l'extérieur du lit, près de la paroi périphérique du tambour, tandis que les plus petites particules se rassemblent au milieu du tambour pour y former un noyau central.

## CONCLUSION

---

L'écoulement des billes sphériques dans un tambour tournant cylindrique de type tranche a été étudié dans une maquette spécialement conçue pour cette étude.

Des essais expérimentaux ont été réalisés avec 3 tailles de tambour, deux types de lits, différents taux de remplissage, différents nombres d'ailettes et différentes hauteurs d'ailettes pour observer l'influence de chacune de ces conditions sur la ségrégation.

D'un point de vue numérique, un modèle d'écoulement de milieux granulaires en tambour tournant a été développé. Une étude préliminaire a permis d'étudier l'influence du coefficient de frottement particules/parois, et d'ajuster le coefficient de frottement particules/particules à des données expérimentales.

De plus, les essais de simulation ont pu être comparés directement aux résultats expérimentaux, d'une part qualitativement en utilisant des populations de particules colorées, et d'autre part quantitativement en mesurant les indices de ségrégation et les angles de talus. On a conclu à une bonne adéquation entre le modèle et l'expérience pour les différentes configurations testées.

Il existe une ségrégation radiale et axiale même pour des tambours de types tranches (2D), les lits bi-disperses en tailles forment un noyau central de petites particules mais la ségrégation radiale est plus faible alors que sur les lits bi-disperses en densités, le noyau de particules denses est moins homogène mais la ségrégation axiale est marquée, les particules les moins denses sont repoussées à la périphérie du lit granulaire au voisinage de la paroi périphérique du tambour.

A cause de la ségrégation radiale, les petites particules passent moins de temps à la paroi que les grosses particules.

Les valeurs des indices de ségrégation obtenues montrent que la hauteur des ailettes exerce une influence significative sur la ségrégation. En effet plus les ailettes sont grandes, moins il y a de ségrégation mais de trop petites ailettes par rapport au diamètre du tambour sont inefficaces sur la qualité du mélange au sein du lit granulaire. Le nombre d'ailettes n'a qu'une incidence très relative sur la ségrégation des particules.

Le taux de remplissage exerce aussi une influence sur la ségrégation : plus le taux de remplissage est faible, plus la ségrégation est faible.

Les lits bi-disperses en densités et bi-disperses en tailles se comportent différemment vis-à-vis du phénomène de ségrégation. De plus, à la paroi frontale avant, la ségrégation est plus marquée pour un lit bi-tailles que pour un lit bi-densités.

La ségrégation diminue avec la durée de mise en rotation mais le diamètre des tambours n'a que peu d'influence sur la ségrégation au sein de la couche granulaire.

# Partie 2 : Etude de la ségrégation thermique d'un lit bi-disperse de billes sphériques millimétriques par chauffage en tambour tournant de type 'tranche'

---

## INTRODUCTION

---

Le premier chapitre de cette thèse était dédié à l'étude de la ségrégation mécanique de différents lits de particules en tambour tournant en faisant varier les principaux paramètres du système tels que le type de lit, le nombre ou la taille des ailettes ou encore le taux de remplissage du tambour. Les principaux résultats de cette étude ont montré la présence d'une ségrégation mécanique significative avec les particules les plus petites ou les plus denses qui ont généré un noyau central au cœur du lit tandis que les plus légères ou les plus grosses ont tendance à être repoussées vers la paroi. Dans ce second chapitre, nous présentons les résultats de la suite de cette étude qui concerne le comportement thermique de ces systèmes de particules avec les mêmes configurations. En particulier pour savoir s'il existe une ségrégation thermique, corrélée ou non à cette ségrégation mécanique.

La modélisation et la simulation de phénomènes de transfert rencontrés au sein de lits agités de particules solides constituent des problématiques complexes. L'approche macroscopique classique et l'approche du milieu continu équivalent conduisent à des résultats globaux donnant des tendances moyennes mais ne fournissent pas d'informations locales qui peuvent être indispensables avec des produits très fragiles et thermosensibles tels que ceux du secteur pharmaceutique. En effet, il est indispensable d'éviter des différences de traitement physique, trop importantes entre les particules individuelles, notamment de traitement thermique, différences pouvant conduire à des hétérogénéités de propriétés d'usage ou d'efficacité thérapeutique.

Au cours du séchage des lits granulaires, l'agitation du milieu est très souvent associée à un chauffage par contact de sorte que le mouvement et la rhéologie du lit de particules influencent directement les transferts de chaleur et de masse au sein du lit en mouvement, et, par conséquent, le séchage global de la poudre.

Plusieurs auteurs ont publié des études avec des matériaux granulaires mono-dispersés en rotation portant sur les vitesses de mélange et de chauffage avec différents types de matériaux, différents niveaux de remplissage et différentes configurations de séchoirs (types, nombres et largeur d'ailettes, etc.) ou différentes conductivités thermiques des matériaux. Différents articles seront étudiés dans l'étude bibliographique. Cependant, à notre connaissance, aucun résultat n'a été publié à ce jour concernant les lits dispersés composés de particules de matériaux de tailles et de natures différentes. Il s'agit ici d'un problème majeur car les matériaux industriels réels,

même s'ils sont soigneusement contrôlés avant transformation, sont toujours légèrement polydisperses.

Le mélange en lit rotatif de particules solides imparfaitement mono-dispersées entraîne inévitablement une ségrégation mécanique, c'est-à-dire une accumulation des particules les plus petites et/ou les plus denses pour former un noyau situé au cœur du lit.

Au cours de notre étude expérimentale, nous avons déterminé les indices de ségrégation radiale avec différents taux de remplissage des tambours et avec différents nombres et hauteurs d'ailettes. Par ailleurs, l'indice de ségrégation axiale est influencé par le coefficient de frottement des particules à la paroi, à l'avant et à l'arrière du tambour. Par conséquent, ces hétérogénéités spatiales du lit (radiales et axiales) conduisent à des hétérogénéités thermiques car les profils de température au sein de chaque bille et au sein de la couche granulaire en mouvement dépendent de leurs trajectoires et surtout du nombre de contacts avec les particules voisines et la paroi chauffante.

Le but de cette étude était d'abord de montrer, d'une part, l'influence du type de dispersion de la population de billes (mono-dispersée, gaussienne-dispersée et bi-dispersée) et, d'autre part, de la configuration des ailettes (sans ailettes, ailettes courtes ou longues) sur l'homogénéité thermique et la cinétique de chauffage global du lit lors du mélange et du chauffage dans un tambour tournant. Ensuite, le second objectif était d'étudier l'impact de la ségrégation mécanique sur la ségrégation thermique dans les lits bi-dispersés de milli-billes sphériques. L'analyse de nos résultats expérimentaux était basée sur la méthode de simulations dite DEM (discrete element method) appliquée au transfert de chaleur au sein de différents lits granulaires en tambour rotatif de type " tranche " (presque bidimensionnel), comme ceux présentés précédemment dans la première partie.

# ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## I. Introduction au séchage en tambour tournant

Le séchoir rotatif est un dispositif expérimental largement utilisé dans l'industrie pour le séchage de nombreux matériaux granulaires, par exemple le séchage du sel, des boues, les déchets avant l'incinération, la réactivation des catalyseurs, etc. [25] En effet, son principal avantage est de pouvoir fonctionner en continu dans une très large gamme de conditions opératoires comme les températures élevées, sous des vides très poussés, etc. Ainsi, la mise au point et le développement de ce type de procédé sont relativement simples, le régime d'écoulement stationnaire et continu pouvant être aisément obtenu. [6]

Il existe deux types de configuration géométrique de tambour : la configuration en 2D ou la configuration en 3D.

Un tambour bidimensionnel (lit mince dit "2D") permet de visualiser les hétérogénéités radiales au sein du matériau granulaire en mouvement, mais présente un problème d'effet de bouts qui augmente l'angle de talus aux parois latérales perpendiculaires à l'axe. Il est toujours préférable de travailler avec une configuration tridimensionnelle (lit profond dit "3D") pour étudier les ségrégations axiales. [6]

L'homogénéité du mélange au sein du tambour tournant est un critère qualitatif important pour assurer l'uniformité des critères de qualité du produit sec final [25]. Elle dépend de nombreux paramètres présentés dans l'étude bibliographique du chapitre 1 sur l'écoulement des poudres en tambour tournant. La qualité du mélange au sein du milieu granulaire dans le tambour rotatif détermine non seulement l'état de ségrégation mécanique des particules mais aussi le transfert de chaleur, d'une part, entre les particules elles-mêmes et, d'autre part, entre le lit granulaire et la paroi.

L'utilisation de la méthode DEM appliquée à l'analyse du transfert thermique permet, par rapport aux méthodes continues, d'obtenir de nouvelles informations, tant sur le comportement d'une particule unique, que sur la distribution de température au sein du lit de particules. En effet, si les études thermiques expérimentales à grandes échelles sont rares, la température du lit peut être mesurée expérimentalement à l'aide de thermocouples ou de capteurs judicieusement placés, mais il est impossible expérimentalement de suivre la température de chaque particule en continu. Ainsi, ces simulations sont un bon moyen de prédire l'évolution de la température de chaque particule en étudiant le transfert de chaleur au sein de l'ensemble du lit granulaire dans différentes configurations géométriques de tambours tournants. [26]

## II. Notion de séchage

Le séchage est une opération unitaire complexe de séparation qui consiste à éliminer un solvant (généralement de l'eau) par changement de phase (évaporation) afin d'obtenir un produit sec plus stable et plus léger, plus facile à conserver, à transporter ou à mettre en œuvre à l'état de poudre. Dans le cas où ce solvant est congelé (glace), ce dernier est éliminé par sublimation et on parle alors de lyophilisation qui est le plus souvent réalisée sous vide poussé et à très basse température pour les produits pharmaceutiques très fragiles ou thermosensibles (vaccins ; sérums ; protéines pharmaceutiques ; alicaments ; probiotiques ; etc.). Le séchage couple deux phénomènes de transports, le transfert de chaleur et le transfert de matière, accompagné de transformations physico-chimiques. Il nécessite toujours un apport d'énergie important qui correspond aux valeurs élevées des enthalpies de vaporisation ou de sublimation [27], [28].

En fonction du mécanisme prédominant de transfert de chaleur, le séchage peut être classé en trois catégories [28] :

- Séchage direct ou séchage par convection.
- Séchage indirect, par contact ou séchage par conduction.
- Séchage radiatif, par absorption de rayonnements (infrarouges, micro-ondes)

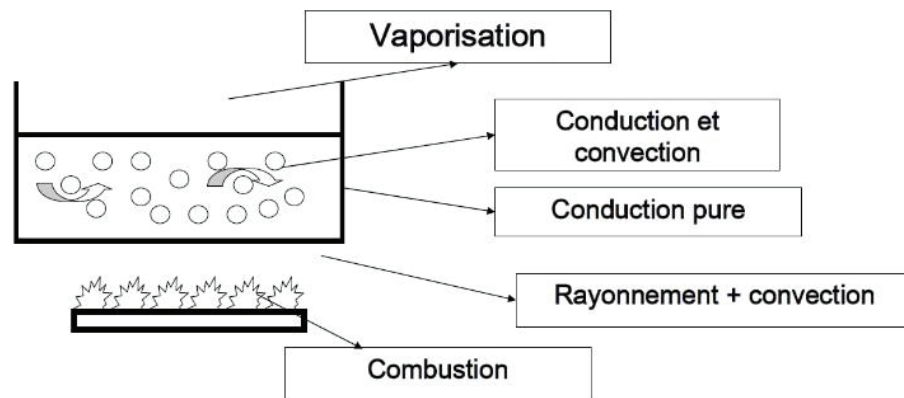


Figure 75 : Combinaison des différents modes de transferts de chaleur

La cinétique du séchage d'un matériau donné dépend de deux types de paramètres :

- Les conditions physiques opératoires (température, pression)
- Les propriétés du matériau (nature ; forme ; structure et texture interne ; etc.)

Le type de séchage fréquemment utilisé dans les appareils à tambour est le séchage indirect par contact. Il peut être réalisé en l'absence de gaz inertes, ce qui permet d'économiser de l'énergie et de respecter l'environnement par rapport à d'autres méthodes de séchage.

Le séchage indirect par contact ne nécessite pas de chauffage des composants inertes (gaz) et la chaleur d'évaporation peut être en partie récupérée par recompression mécanique de la vapeur d'eau produite. Dans un type de séchoir à chauffage par contact direct, la chaleur doit être transférée d'une surface chaude ou d'un émetteur de rayonnement à un lit de particules stationnaire ou agité mécaniquement. Pour analyser, modéliser et optimiser ce type de procédé de séchage, la connaissance des mécanismes et des phénomènes de transfert de chaleur à la paroi et au sein d'une couche granulaire est fondamentale. Ces processus ne pouvant pas être

analysés expérimentalement avec précision, les modèles mathématiques permettent de décrire le processus de façon adaptée. [27]

Pour notre étude, le mode de transfert de chaleur par conduction, étant le mode dominant, a été adopté.

### **III. Transfert de chaleur au sein d'un lit granulaire agité**

Le chauffage d'un lit de particules peut être réalisé selon les trois mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur connus, à savoir :

- La conduction après contact entre une surface chauffante et le lit.
- La convection avec un fluide intermédiaire en mouvement.
- Le rayonnement provenant d'un émetteur de rayonnement.



*Figure 76 : Transfert de chaleur au sein d'un tambour tournant avec radiation à gauche, convection au milieu et conduction à droite*

Dans les tambours tournants, le transfert de chaleur peut se faire par conduction, par convection et par radiation, et potentiellement par frottement entre les particules. [26] Dans le contexte de notre étude, nous ne considérons que la conduction entre les parois et le lit de particules ainsi que le contact entre les particules à l'intérieur du lit granulaire.

Le chauffage par contact sous vide poussé est largement utilisé dans l'industrie pharmaceutique pour sécher des produits granulaires sensibles à l'oxygène et à la température.

C'est ce cas qui nous intéresse (vide poussé) pour lequel nous n'avons pris en compte que le mode de transfert de chaleur par conduction à travers le lit de particules et par contact à la paroi (Partie matériels et méthodes).

Ce mode de séchage d'un lit de particules agité par contact sous vide a d'abord été étudié de manière macroscopique par Schundler et Mollekopf [29] pour un matériau granulaire noncohésif et mono-dispersé.

Le calcul de flux thermique entre la paroi et le lit est basé sur l'existence d'une première résistance thermique interfaciale pour caractériser l'échange entre la surface chauffante et la première couche de particules en contact avec cette paroi, qui constitue la première zone de transfert de chaleur vers le lit de particules. Une deuxième résistance thermique, de particule à particule est introduite pour représenter le flux thermique au cœur du lit. Elle varie en fonction du temps.

Le problème fondamental du transfert de chaleur de la paroi vers le lit agité mécaniquement est généralement traité par des modèles continus, en particulier par le modèle de pénétration (PM).[27]

Ce modèle de pénétration considère le lit de particules comme un corps semi-fini. Il découpe le processus de chauffage des particules en une séquence de phases de pénétration et de phases de mélange subséquentes. [30]

Pendant le temps de contact fictif, noté  $t_R$ , la couche en contact direct avec la paroi chauffée absorbe la chaleur de façon transitoire. L'hypothèse d'un milieu semi-continu et la description de la mécanique des matériaux granulaires par un seul paramètre empirique, réduit la précision et limite les possibilités d'application d'un tel modèle continu.

C'est pour ces raisons que plusieurs chercheurs ont adopté la méthode des éléments discrets. Cette méthode permet d'évaluer des paramètres de calcul qui ne sont pas accessibles avec le modèle de pénétration.

Ces deux modèles ont été étudiés par Kwapinska et al. 2008 [30] qui a simulé le chauffage d'un lit de particules en contact avec la paroi d'un tambour rotatif avec la version thermique de la méthode des éléments discrets. Les résultats de ces simulations ont été comparés par cet auteur avec l'approche du milieu semi-continu avec le modèle de pénétration.

Feng et al. [31] ont présenté une évaluation de l'exactitude de l'analyse des éléments discrets en comparant avec la méthode des éléments finis. Le champ de température à l'intérieur de chaque particule a été calculé grâce à la résolution du problème de transfert de chaleur par la condition limite de Neumann pour les contacts entre particules voisines.

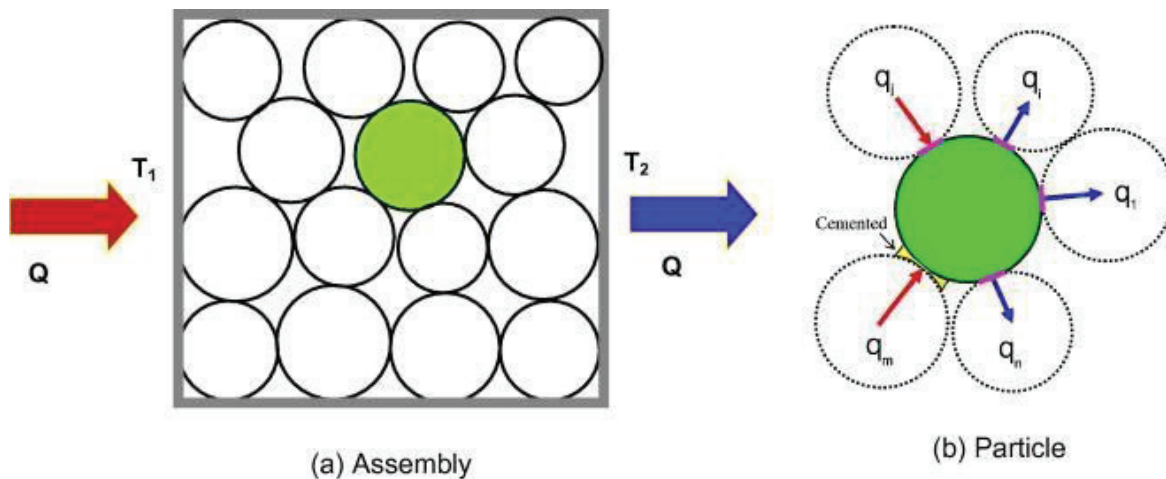


Figure 77 : Transfert de chaleur dans le système des éléments thermiques de contact [31]

En conclusion de ces études, l'analyse des distributions de température confirme l'adéquation de la DEM thermique pour évaluer certaines influences ce qui n'est pas toujours possible avec le modèle de pénétration. C'est pourquoi la méthode dite DEM thermique a été préférée pour nos recherches étant donné la contribution significative qu'elle apporte pour modéliser les procédés mettant en œuvre des milieux granulaires avec chauffage par contact à la paroi.



## **IV. La méthode des éléments discrets appliquée au chauffage**

La méthode des éléments discrets ou DEM (Discrete Element Method) est une méthode de calcul numérique qui prend en considération toutes les interactions de chaque particule avec son environnement.

La DEM permet, par exemple, de calculer le mouvement d'un grand nombre de particules et les changements qui en résultent sur leurs propriétés (températures, positions, etc.). Ces particules peuvent être pulvérulentes, granulaires ou irrégulières et possèdent les propriétés intrinsèques nécessaires à la modélisation des phénomènes choisis, en plus de différences de tailles et de formes. [1]

Ces dernières années, la méthode DEM s'est développée vers différents domaines d'application, concernant principalement la mécanique et la thermique des milieux granulaires (procédés de mélange et de transport, procédés en lit fluidisé, etc.). Il existe aujourd'hui différents logiciels basés sur la méthode des éléments discrets comme le logiciel commercial EDEM que l'on a utilisé dans notre étude.

Comme hypothèse préalable, le lit est supposé constitué d'éléments individuels fermés. Ces éléments individuels peuvent avoir des formes et des propriétés différentes et/ou variables au cours du temps. [28]

Plusieurs chercheurs ont utilisé une approche basée sur la méthode DEM thermique pour simuler le chauffage d'un lit de particules mono-disperses, dans des appareils rotatifs (tambours tournants). Chaque étude traite indépendamment l'effet de plusieurs paramètres qui peuvent influencer le chauffage de ces particules.

Citons l'étude menée par Chaudhuri et al. 2010 [32] qui se sont intéressés à l'écoulement, au mélange, et aux transferts de chaleur et de matière au sein d'un calcinateur rotatif. Deux types de matériaux ont été utilisés pour leurs expériences et leurs simulations par la méthode DEM, avec de la poudre d'alumine et des pastilles cylindriques de silice qui ont fait l'objet d'une étude paramétrique, en faisant varier leurs propriétés ainsi que la vitesse de rotation du calcinateur. Les résultats expérimentaux ont montré que la vitesse de rotation n'avait pas un grand impact sur le transfert de chaleur et que le matériau qui présentait la conductivité thermique la plus élevée (alumine) avait tendance à se réchauffer plus rapidement ce qu'ont confirmé les simulations.

Leurs simulations ont confirmé leurs observations pour différentes configurations d'ailettes dans le calcinateur, comme dans le cas de l'augmentation du nombre d'ailettes et son influence sur le lit de particules (Figure 78).

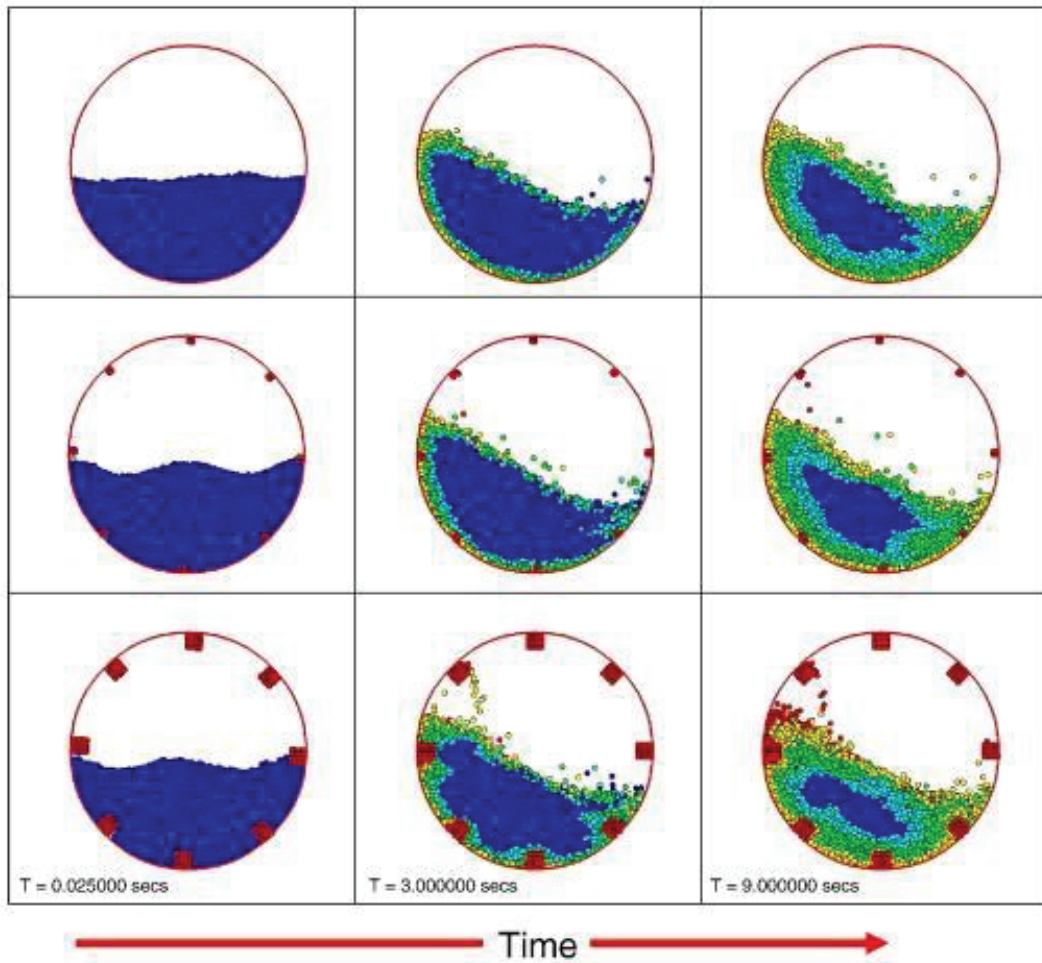


Figure 78 : Différentes images au cours du temps d'un lit de particules colorées en fonction de leur température. Le temps augmente de gauche à droite avec  $t=0, 3$  et  $9$  secondes tandis que la taille des ailettes augmente du haut jusqu'en bas. [32]

Ces résultats ont montré que le noyau central de particules diminuait avec l'augmentation du nombre d'ailettes chauffées. Ces auteurs ont ensuite fait les mêmes simulations avec des ailettes non chauffées puis ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus avec des ailettes chauffées dans les mêmes configurations. Ils ont observé que les ailettes chauffées augmentaient largement la vitesse de montée en température du lit.

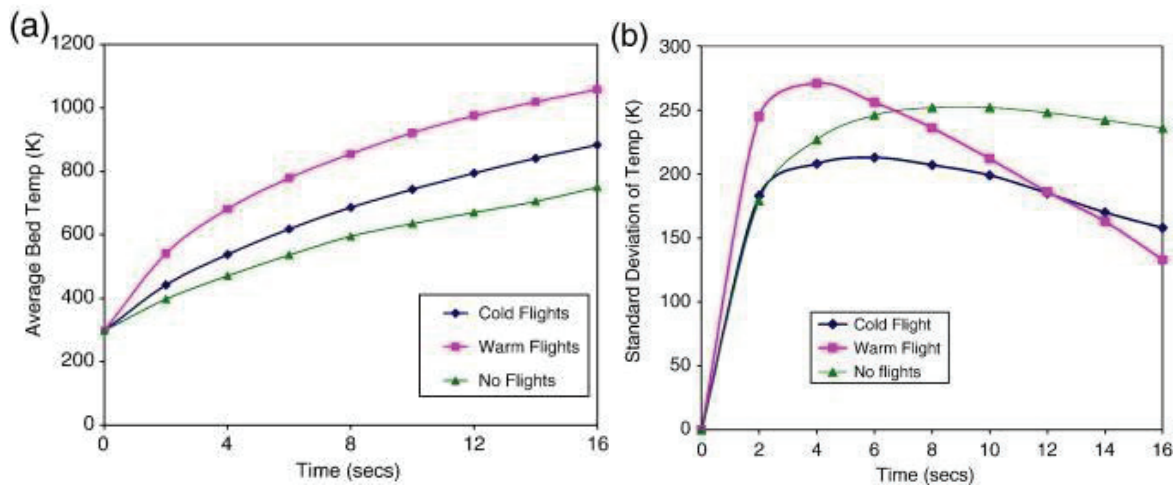


Figure 79 : Evolution de la température moyenne (a) et de l'écart type de la température (b) en fonction du temps avec différents types d'ailettes.[32]

Ils ont ainsi pu en conclure que ces dispositifs augmentaient le transfert de chaleur au sein de la couche granulaire et, contribuaient largement à l'amélioration de l'uniformité thermique au sein du lit.

Dans une autre publication, Figueroa et al. 2010 [2] ont étudié la cinétique de chauffage d'un milieu granulaire dans un tambour rotatif, en fonction de la vitesse de rotation et du taux de remplissage et pour différentes formes de sections transversales du tambour (circulaire, carrée et elliptique).

L'indice de ségrégation mécanique a été calculé pour différents tambours, dont une partie a été marquée pour les suivre comme traceurs. La variation de la concentration des traceurs dans un certain nombre d'échantillons a été utilisée comme moyen pour quantifier la qualité du mélange.

Ils ont montré que la valeur de l'indice de ségrégation, IS, diminue asymptotiquement jusqu'à une valeur correspondant à un mélange parfait. Au fur et à mesure que le transfert de chaleur s'effectue, à l'intérieur de l'enceinte, la position radiale des particules est repérée en fonction de leur couleur initiale : d'une part l'ensemble des particules dans le noyau du tambour (loin de la zone chauffée) et d'autre part l'ensemble des particules dans la zone périphérique chauffée ayant été marqués chacun d'une couleur. Cela a permis d'étudier l'évolution des profils thermiques au sein du lit.

Des simulations réalisées à trois vitesses de rotation (5rpm, 10rpm, 15rpm) et trois taux de remplissage du tambour (0,50 – 0,37 – 0,25) ont montré que les évolutions des profils de température dans le milieu granulaire au sein du tambour dépendaient significativement de ces deux paramètres.

Ces mêmes résultats ont aussi montré que des vitesses de rotation élevées pouvaient avoir un effet négatif sur la cinétique de chauffage. En effet, quand le temps de contact entre particules devient trop court, cette étape du transfert de la source de chaleur aux parois du tambour vers l'ensemble du lit granulaire devient limitante.

Récemment, Komossa et al. 2015 [33] et Emady et al. 2016 [26] ont utilisé la méthode DEM thermique afin de modéliser et de simuler le transfert thermique à travers un lit de particules dans un tambour tournant.

En particulier, Emady et al [26] ont étudié les effets de la conductivité thermique de différents matériaux ainsi que de la vitesse de rotation du tambour sur le transfert de chaleur, pour un taux de remplissage, un diamètre et une taille de particules fixés.

Komossa et al. [33] ont simulé l'évolution des profils de température au sein d'un milieu granulaire dans un tambour statique et dans un tambour tournant pour différentes vitesses de rotation. Ces auteurs ont constaté que plus le tambour tournait rapidement plus le cœur de particules au centre du tambour était chaud tandis qu'en milieu granulaire statique, le cœur de particules restait froid.

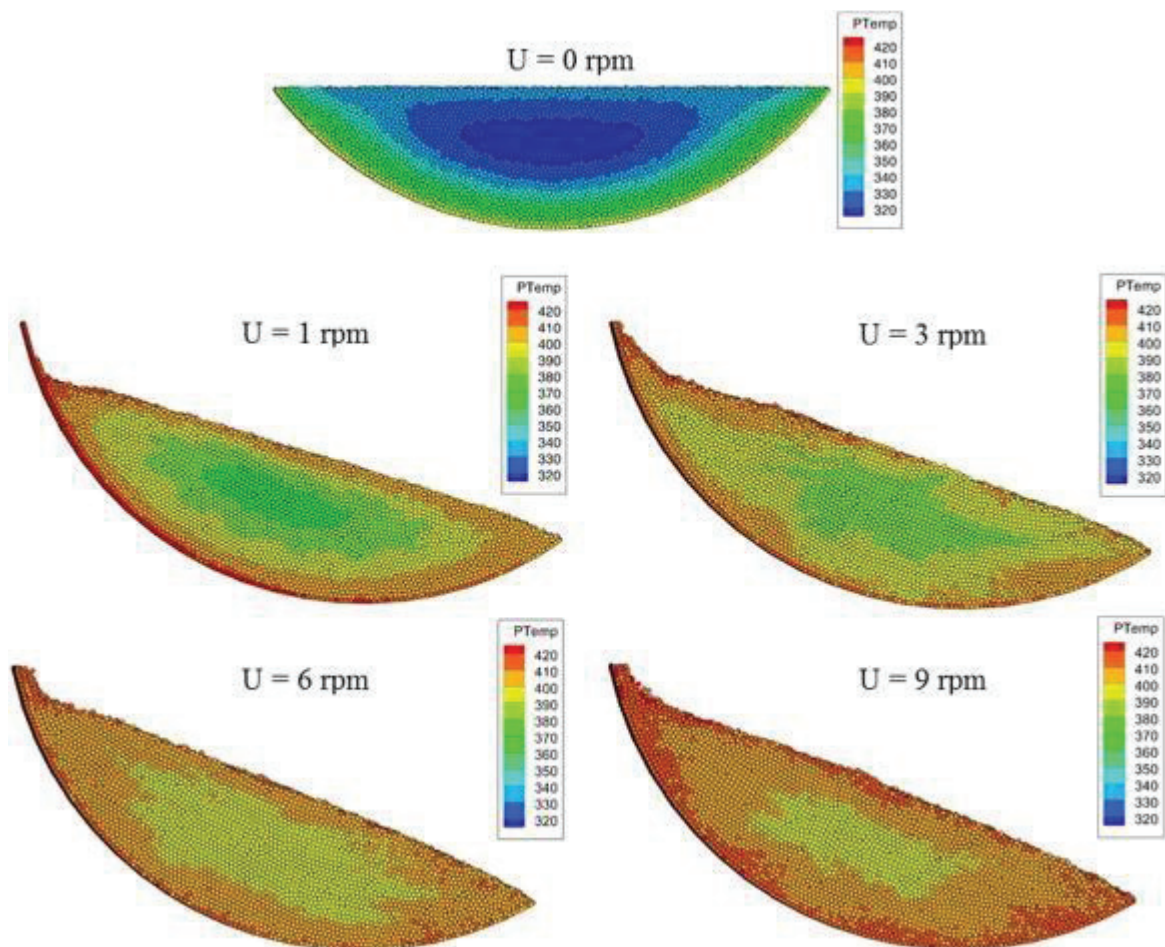


Figure 80 : Evolution de la température dans un tambour statique ou un tambour tournant avec différentes vitesses de rotation à t=25min. [33]

Cet examen de la littérature conduit aux conclusions suivantes vis-à-vis de la sensibilité du transfert de chaleur en milieu granulaire agité : le transfert de chaleur entre les parois du tambour et le matériau de traitement n'est pas très sensible à la vitesse de rotation du tambour

pour les matériaux à faible conductivité. Cependant la sensibilité du transfert de chaleur à la vitesse de rotation augmente avec la conductivité des particules et réciproquement. Ceci a été expliqué à partir de la distribution des températures des particules qui augmente avec leur conductivité thermique.

Pour finir, Gui et al. 2015 [34] ont utilisé la DEM thermique pour simuler l'évolution des cinétiques de chauffage (profils thermiques) à travers un lit granulaire dans un tambour tournant à géométrie particulière (tambour non circulaire avec 3 à 7 bosses). Shi et al. 2008 [35] ont utilisé la même méthode mais en présence d'un gaz interstitiel (en air ambiant ou sous vide).

## V. Coefficient d'échange thermique entre billes

Dans sa publication la plus récente, Tsotsas (2019) [39] compare trois modèles thermiques de contact.

- Modèle 1 : conduction thermique dans la phase solide uniquement
  - Le coefficient d'échange entre les billes et donné par :  $h^{ij} = \frac{\lambda_{bille} R_{cont}}{2\pi R_{bille}^2}$
  - Cette équation est basée sur la conduction thermique en régime permanent et exclusivement dans la phase solide. Elle décrit le contact thermique solide/solide entre 2 billes sphériques qui se sont légèrement déformées (aplaties) à l'interface. Elle sert de modèle de base dans EDEM.
- Modèle 2 : conduction thermique dans la phase gaz uniquement

Ce modèle est l'exact contraire du premier. Les billes ne se touchent pas (leurs surfaces sont à une distance égale au libre parcours moyen des molécules de gaz) et le transfert thermique s'opère exclusivement par conduction dans la phase gaz entourant les billes.

- Le coefficient d'échange entre les billes et donné par : insérer l'équation 12 de la publication.
- Modèle 3 : conduction thermique dans les deux phases

Ce modèle est une combinaison ou un compromis entre les deux précédents et il permet en plus de tenir compte du type d'empilement des billes.

- Le coefficient d'échange entre les billes et donné par :  $h^{ij} = \frac{\pi \lambda_{lit}}{6(1-\varepsilon)D_{bille}}$
- Cette équation montre le lien direct entre le coefficient de transfert entre billes et la conductivité thermique effective du lit statique ( $\lambda_{lit}$ ), la porosité du lit ( $\varepsilon$ ) et le diamètre de la particule. La conductivité effective du lit statique intègre l'arrangement géométrique des billes et tous les phénomènes de transfert

thermique dans un lit granulaire sauf la convection. Elle peut être mesurée ou calculée approximativement.

## MATERIELS ET METHODES

---

### **I. Méthode DEM appliquée à la modélisation du transfert thermique au sein d'un lit granulaire agité de milli-billes**

Les simulations d'agitation et de chauffage par contact de milli-billes ont été réalisées avec le logiciel commercial EDEM 2017 (DEM Solutions, Edinburgh, UK). Ce logiciel est basé sur la méthode des éléments discrets (DEM pour Discrete Elements Method), un outil très puissant utilisé de plus en plus pour étudier et développer des procédés granulaires solides. Dans le cadre de la méthode DEM, chaque particule du lit granulaire est considérée comme distincte et possède une série de propriétés individuelles, comme sa propre trajectoire et sa propre vitesse (voir partie 1). Les interactions particules-particules et particules-paroi chauffante du séchoir sont vérifiées et les propriétés individuelles des particules, par exemple la vitesse ou la trajectoire, sont mises à jour à chaque pas de temps. L'hypothèse principale de la modélisation DEM est de considérer ces particules comme des corps solides rigides (indéformables) mais ayant la capacité de s'interpénétrer sur une très faible épaisseur pendant leurs contacts. La diminution résultante de la distance entre les centres de deux particules adjacentes est appelée la profondeur d'interpénétration ou chevauchement. C'est une variable fondamentale qui est directement reliée à la force normale de contact (interaction) entre les particules et à la rigidité mécanique des particules et qui sert également de base de l'évaluation de la conductance thermique entre les particules. En effet grâce à l'interpénétration des particules, la température des milli-billes va pouvoir évoluer en fonction du nombre de contact entre les particules ou bien avec la paroi chauffée. Les équations du modèle thermique sont décrites dans les sections suivantes.

Le modèle numérique est basé sur les hypothèses suivantes :

- 1- Le gaz interstitiel est négligé.
- 2- Les propriétés physiques comme la capacité thermique, la conductivité thermique et le module de Young sont considérées comme constantes.
- 3- A chaque pas de temps de la simulation, la température est uniforme au sein de toute la particule. ( $Bi < 0,1$ , Annexe 9)
- 4- Les températures des parois et des ailettes sont constantes dans le temps.

## A) Modèle de contact thermique selon l'approche DEM

### a. Rappel sur la méthode DEM appliquée à la mécanique des poudres.

Pour comprendre le modèle thermique utilisé dans la méthode DEM, il faut bien comprendre le modèle mécanique utilisé. Cette méthode est présentée dans le chapitre 1, des rappels seront présentés ci-dessous avec les équations principales.

La détermination de la position et de la vitesse d'une particule  $i$  est donnée par la solution temporelle de la seconde loi de Newton pour le mouvement de translation et de rotation d'un corps solide, définie par l'équation suivante :

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \sum_j \vec{F}_{ij} + m_i \vec{g} \quad (5)$$

Où  $m_i$  représente la masse de la particule  $i$ ,  $\vec{x}_i$  son vecteur de position,  $\vec{F}_{ij}$  le vecteur des forces résultantes de toutes les interactions avec les particules ( $j$ ) voisines et la géométrie du tambour et le vecteur  $\vec{g}$  la gravité

Pour cette étude, le modèle de contact de Hertz-Mindlin a été utilisé (ce modèle est une option dans le logiciel EDEM). Dans ce modèle, l'interaction mécanique particules-particules impose la force d'impact normale et la force de friction tangentielle donnée par la loi de Coulomb et implique un coefficient dépendant du matériau. Cette force normale, entre deux particules  $i$  et  $j$ , est exprimée au moyen de la loi de comportement viscoélastique non linéaire suivante :

$$F_{ij} = e \delta_{ij}^{3/2} - \beta v_{ij} \quad (6)$$

Avec :

$$\frac{1}{e} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (7)$$

Où  $e$  représente le coefficient d'élasticité effectif,  $\beta$  le coefficient d'amortissement,  $\delta$  l'interpénétration entre les deux particules  $i$  et  $j$ ,  $\nu$  le coefficient de Poisson,  $v_{ij}$ , la vitesse relative des 2 particules et  $E$  le module de Young.

La force tangentielle maximale est quant à elle estimée à partir de la loi de Coulomb, ce qui nécessite la connaissance du coefficient de frottement.

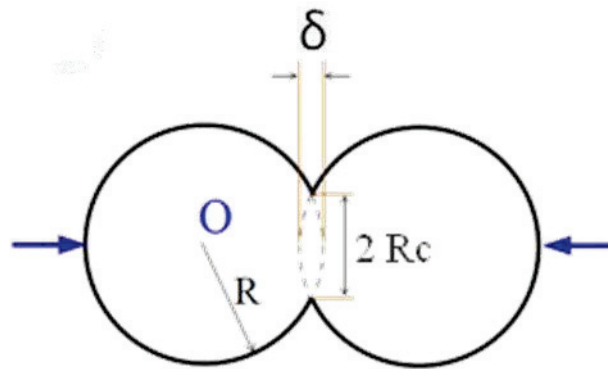


Figure 81 : Théorie de Hertz [36]

Le modèle de Hertz est basé sur de nombreuses hypothèses [37] :

- La surface de contact entre les deux particules est continue.
- Les déformations sont petites et élastiques.
- Les matériaux des objets sont isotropes et homogènes.
- Les dimensions des corps sont beaucoup plus grandes que celles de la surface de contact.

Le modèle de contact normal de Hertz est typiquement utilisé dans tous les problèmes qui traitent des particules sphériques en contact.

Pour mieux expliquer le comportement élastique des grains en contact, le modèle de contact normal de Hertz a été étendu par Mindlin [38] pour mesurer le contact tangentiel entre deux sphères sous contrainte de cisaillement.

## **b. Modèle de DEM appliqué à la description du transfert thermique**

Le modèle de contact de Hertz-Mindlin combiné au transfert de chaleur par conduction est le modèle adopté pour l'ensemble des modélisations. Il permet de calculer le flux de chaleur échangé par chaque particule avec les autres particules en contact avec elle. La méthode DEM appliquée aux phénomènes de transfert de chaleur représente une grande avancée et un puissant outil pour l'analyse des phénomènes thermiques rencontrés dans les procédés industriels de séchage des matériaux solides dispersés, en couche stationnaire ou en lit agité.

Dans les systèmes de tambours tournants, plusieurs phénomènes élémentaires de transfert de chaleur entre les particules ou avec la paroi coexistent, à savoir la conduction thermique directe solide-solide, la conduction et la convection au sein du fluide interstitiel et le rayonnement de surface. Dans cette étude, la convection et le rayonnement ont été négligés, puisque nous avons observé que la conduction directe particules-particules domine largement en raison du rapport élevé entre la conduction thermique du solide et la conduction thermique du gaz interstitiel et en raison des températures de surface modérées.



Ces phénomènes de conduction thermique sont décrits par la loi classique de Fourier. Comme précédemment dit, deux particules en contact s'interpénètrent jusqu'à une profondeur qui dépend de leur dynamique et de leurs propriétés mécaniques. Une solution analytique existe pour décrire le contact entre deux particules sphériques lisses et élastiques et une petite surface de contact à l'aide du paramètre  $R_c$  qui est le rayon du cercle résultant du chevauchement des deux particules. On peut alors en déduire que la conductance thermique entre le centre d'une particule et le centre de l'autre particule adjacente, s'exprime par la relation suivante :

$$\boxed{K_{ij} = 2\lambda_{ij}R_c = 2\lambda_{ij}\sqrt{R_{ij}}\sqrt{\delta_{ij}}} \quad (8)$$

Où  $r_{ij}$  représente le rayon équivalent,  $\delta_{ij}$ , la profondeur d'interpénétration définie ci-après et  $\lambda_{ij}$  est la conductivité thermique équivalente, qui est la moyenne harmonique des conductivités thermiques des deux particules définie par la relation suivante :

$$\lambda_{ij} = 2 \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j} \quad (9)$$

Le modèle d'interaction mécanique le plus simple (c'est-à-dire la forme de base du modèle de Hertz où la composante d'amortissement de la force normale n'est pas prise en compte) a été adopté à des fins de simulation thermique, et la profondeur d'interpénétration de « Hertz » spécifique a été évaluée par la relation :

$$\boxed{\sqrt{\delta_{ij}^{He}} = \frac{1}{\sqrt{R_{ij}}} \left[ \frac{3F_{ij}R_{ij}}{4E_{ij}} \right]^{1/3}} \quad (10)$$

Où  $e_{ij}$  représente le coefficient apparent d'élasticité particules-particules défini par la relation :

$$\frac{1}{e_{ij}} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \quad (11)$$

Où  $E_i$  représente le module de Young de la particule  $i$  et  $\nu_i$  le coefficient de Poisson de la particule  $i$ .

Ce modèle de contact thermique est loin d'être très précis et ne peut être considéré que comme une première approximation. Dans cette étude, seules les tendances qualitatives générales de la ségrégation mécanique et thermique des particules ont été recherchées au détriment d'une plus grande précision quantitative.

## B) Modèle du transfert thermique au sein d'une bille

### a. Bilan thermique de la particule $i$ sans changement de phase

On considère une bille  $i$  à la température uniforme  $T_i$  en contact avec une autre bille  $j$  ou avec la paroi chauffante à la température uniforme  $T_j$ . On suppose que la bille est suffisamment petite pour que sa température interne soit uniforme et que sa masse ne subisse pas de changement de phase.

Le flux thermique de conduction entre la particule  $i$  et soit la particule  $j$  ou soit l'une des parois du tambour s'exprime alors par la relation suivante :

$$\dot{Q}_{ij} = K_{ij} (T_j - T_i) \quad (12)$$

Où  $T_i$  et  $T_j$  représentent les températures des particules  $i$  et  $j$  à un pas de temps donné et  $K_{ij}$  la conductance thermique entre les centres des deux particules adjacentes.

Le flux total transféré vers ou à partir d'une particule donnée  $i$  est la somme des flux thermiques échangés avec toutes les particules adjacentes  $j$  ou une paroi. Le bilan énergétique thermique sur une seule particule s'écrit alors :

$$\sum_j Q_{ij} = m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} \quad (13)$$

Où  $C_{p_i}$  représente la capacité thermique massique de la particule  $i$ .

L'intégration en fonction du temps de cette équation fournit ensuite les profils thermiques en fonction du temps de la particule  $i$

Ainsi le temps de chauffage pour atteindre une température donnée est directement proportionnel à la capacité thermique de la particule et inversement proportionnel à la somme des flux de chaleur échangés avec les particules ou avec les parois environnantes.

### b. Limite du modèle de transfert thermique entre les billes

Il existe une limite à ce modèle de transfert thermique entre particules. En effet, dans notre modèle simplifié, lors du calcul des conductances thermiques entre les billes, nous avons tenu compte uniquement de la conduction directe de solide à solide en négligeant les mécanismes de convection et de radiation. De plus, ce modèle de conduction thermique est basé sur le modèle mécanique d'Hertz-Mindlin qui repose sur un mécanisme d'interpénétration simple. En effet, Tsotsas [39] a souligné et démontré récemment l'existence d'un mécanisme de convection et de rayonnement dans le cas du transfert thermique à travers la phase de fluide interstitielle d'un milieu granulaire et il propose de déterminer un coefficient global d'échange entre les particules à partir de la conductivité thermique effective du lit. En effet il introduit un compromis entre le

modèle de contact thermique et le modèle de conduction en créant un troisième modèle où le coefficient de transfert de chaleur entre les particules,  $\alpha_{app}$ , est défini de la manière suivante :

$$\alpha_{app} = \frac{\pi}{6(1-\varepsilon)} \frac{\lambda_{bed}}{d} \quad (14)$$

Où  $\varepsilon$  représente la porosité du lit,  $\lambda_{bed}$  la conductivité thermique effective du lit et  $d$  le diamètre moyen des particules.

## **II. Configurations étudiées et propriétés des matériaux**

Dans le chapitre 1 de cette étude, nous avons démontré qu'il existait une ségrégation mécanique et que les billes les plus lourdes et les plus petites forment un noyau au centre du lit à l'intérieur du tambour tournant. Dans cette partie, un modèle thermique est ajouté et nous allons vérifier si cette ségrégation mécanique exerce une influence significative sur le chauffage du lit. Pour ce faire, nous avons examiné plusieurs configurations ou géométries de lit qui sont présentées dans les paragraphes ci-dessous.

### **A) Configurations simulées**

Afin de démontrer le lien entre la ségrégation mécanique (étudié dans le chapitre 1) et la ségrégation thermique, des simulations ont été réalisées avec quatre lits de particules différentes en acétate de cellulose de 3 mm de diamètre. Nos simulations ont commencé avec un taux de remplissage de 1/6 mais étant donné le temps nécessaire pour ces simulations, il a été décidé de réduire ce taux à 1/8<sup>ème</sup>. Les différentes configurations de lits granulaires retenues étaient :

- Lit mono-disperse : constitué uniquement de particules de 3 mm de diamètre en acétate de cellulose. Ce lit sert de base de référence pour l'étude des ségrégations mécaniques et thermiques des autres configurations de lits.
- Lit bi-tailles : composé uniquement de particules en acétate de cellulose mais avec des tailles différentes, les plus petites billes de 2 mm de diamètre et les plus grosses de 3mm de diamètre. Ces deux types de billes ont été introduits à volume égal versé dans le tambour, c'est-à-dire qu'en nombre il y avait beaucoup plus de petites particules que de grosses particules.
- Lit bi-densités : composé uniquement de particules de 3 mm de diamètre mais de matériaux différents. En effet, la moitié du lit était composée de billes en polypropylène tandis que l'autre moitié était composée de billes en acétate de cellulose. Les deux

ensembles de particules présentait un volume équivalent identique car elles avaient le même diamètre. Toutefois, ces 2 matériaux présentait des densités différentes, le polypropylène étant plus léger que l'acétate de cellulose (Tableau 19).

- Lit à dispersion normale en tailles (gaussienne) : avec une taille moyenne de particules de 3 mm de diamètre (acétate de cellulose) et un écart type de 1/3 mm, ce qui donnait un lit composé à 98% en nombre de particules présentant un diamètre compris entre 2 et 4mm.

Le nombre de billes nécessaires à ces essais est précisé dans le tableau ci-dessous :

Tableau 19 : Nombre de billes nécessaires aux essais de simulation du transfert thermique

	Mono-disperse	Bi-densité	Bi-taille	Dispersion gaussienne
Acétate de Cellulose (□ 2mm)	-	-	27905	-
Acétate de Cellulose (□ 3mm)	16366	8183	8183	
Polypropylène (□ 3mm)	-	8055	-	-
Acétate de cellulose (□ 3□1mm)				16366
<b>Total</b>	<b>16366</b>	<b>16238</b>	<b>36088</b>	<b>16366</b>

Pour le lit à dispersion normale, le nombre de billes a été fixé à 16366 comme pour le lit monodisperse ; en effet, malgré les deux tailles différentes, certaines billes ayant 2mm de diamètre et d'autres 4 mm de diamètre, le volume total était équivalent à un lit mono-disperse de billes de 3 mm de diamètre. Il y avait donc le même nombre de particules. La courbe gaussienne utilisée pour la simulation a été comparée à la courbe théorique issue de loi normale pour des diamètres de billes de 3 mm, comme présenté sur la Figure 82 :

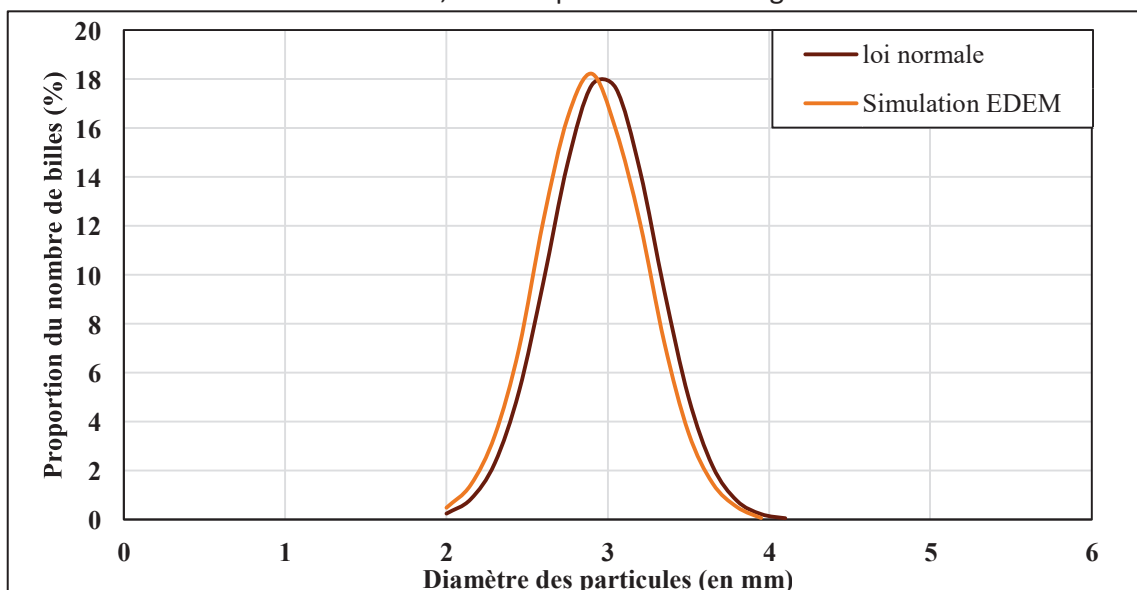


Figure 82 : Comparaison d'une courbe gaussienne théorique avec la courbe gaussienne utilisée pour les simulations

On peut observer un très léger décalage entre les deux courbes, décalage qui reste minime puisque le diamètre moyen des billes du lit était de 2.97mm. Pour créer ce lit sous le logiciel EDEM, nous avons utilisé des diamètres de billes de 3mm avec l'aide du paramètre « mean » de 1 et un paramètre de « std deviation » de 0.11 en prenant comme base le rayon des particules moyennes. Les termes « mean » et le « standard déviation » correspondent à des ratios que l'on ramène au diamètre moyen des billes du lit souhaité, c'est pour cela que nous avons un paramètre de « std deviation » de 0.11 puisque nous voulions une déviation de 0.33 ( $0.33/3 = 0.11$ ).

Quatre lits ont été utilisés tout au long de cette étude. Le lit mono-disperse, composé d'un seul type de billes sert de base de référence pour les autres lits : en effet ce lit ne possède pas de ségrégation mécanique puisque la population des billes est mono-disperse. Nous pourrions donc avoir un indice de ségrégation thermique et des moyennes de températures de références (ces 2 notions seront présentées dans la section III). Le lit bi-tailles et le lit bi-densités sont deux lits qui ont déjà été étudiés au chapitre 1. Ces deux lits génèrent une ségrégation mécanique, de sorte que ces simulations permettront d'observer l'influence de la ségrégation mécanique du lit sur une possible ségrégation thermique, et, de plus, d'observer le comportement de ces 2 configurations de lit par rapport au lit de référence. Enfin un lit à dispersion normale a aussi été étudié, puisque les poudres rencontrées dans l'industrie pharmaceutique ne sont pas disperses mais présentent une large dispersion de particules avec des diamètres et des densités différentes de sorte que notre lit à distribution gaussienne de tailles de particules nous sert à se rapprocher le plus possible des lots de poudres rencontrés dans de l'industrie pharmaceutique.

Nous avons décidé ensuite d'examiner l'influence de la géométrie du tambour sur les cinétiques de chauffage et les profils thermiques au sein du lit. Tous les lits ont été simulés dans un tambour de 30cm de diamètre et de 4,2cm d'épaisseur (les matériaux utilisés seront présentés dans la section suivante II.2).

Plusieurs configurations de tambours ont été examinées, à savoir :

- Tambour sans ailettes
- Tambour avec 4 petites ailettes droites de 1,5 cm équidistantes. - Tambour avec 8 grandes ailettes droites de 4cm équidistantes.

Dans certains cas, les ailettes étaient chauffées tandis que dans d'autres elles ne l'étaient pas. La configuration de référence était le tambour équipé de 4 petites ailettes équidistantes. Le plan d'expériences ainsi retenu est présenté en détails dans la partie IV de ce chapitre.

Grâce à toutes ces configurations, l'objectif a été de déduire l'influence des ailettes sur le chauffage d'un lit et sur la ségrégation thermique.

## B) Propriétés thermo-physiques et mécaniques des matériaux et matériels utilisés

Les simulations ont été réalisées sur une station de travail DELL (T7910) avec 10 cœurs (Intel xeon E5-2660v3). Le pas de temps maximum utilisé était de 40% du pas de temps de Rayleigh, défini comme le temps pris par une onde de cisaillement pour se propager à travers les particules. La grille de simulation basée sur le rayon de la plus petite particule a été définie sur une longueur de  $5R_{min}$ , le logiciel utilisant cette grille pour détecter chaque contact dans chaque cellule. Les modèles de contact sont ceux de « Hertz-Mindlin with heat conduction model », en ajoutant « temperature update » pour les interactions entre particules, mais il faut aussi ouvrir une routine d'utilisation, en dehors du logiciel appelé « Heat conduction for geometry », dans lequel il faut définir, pour les billes, la capacité thermique et la conductivité thermique et pour la géométrie de l'enceinte, la température et la conductivité thermique.

Le tambour de type tranche est constitué, comme dans l'étude mécanique d'une paroi frontale en verre et de parois arrière et périphérique en acier. Il a un diamètre de 300mm et une profondeur de 42mm. La vitesse de rotation a été maintenue constante et fixée à 3rpm pour tous nos essais, ce qui correspond à une rotation très lente, souvent rencontrée dans les procédés de séchage des poudres pharmaceutiques relativement fragiles en séchoir tournant.

La température initiale des particules a été fixée à 25°C tandis que la paroi périphérique chauffante, y compris parfois les ailettes, a été fixée à 50°C. Cette différence de température de 25°C correspond aux conditions expérimentales des essais expérimentaux de séchage réalisés chez Sanofi Pasteur.

Les différents paramètres mécaniques et thermiques des particules et du tambour sont regroupés dans le Tableau 20.

La plupart des valeurs sont issues de la littérature ou fournies par les fabricants (Marteau et Lemarié, Sorbiers, France pour l'acétate de cellulose et CIMAP, Paris, France pour le polypropylène).

Les valeurs des conductivités thermiques et des modules d'élasticité utilisés pour les simulations n'étaient pas les valeurs vraies afin de réduire les temps de calcul. Une étude paramétrique [Tableau 28 en Annexe 6 : Etude paramétrique] a été réalisée pour connaître les paramètres les plus influents sur la vitesse de chauffage ainsi que la vitesse d'avancement des calculs lors des simulations. On a donc fait varier la conductivité thermique, la capacité thermique massique et le coefficient de restitution des particules ainsi que le pas de temps de calcul. On a alors constaté qu'en prenant une conductivité thermique des billes plus importante ( $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) au lieu de  $0,36 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) on gagnait beaucoup en vitesse de chauffage et en vitesse de simulation. Par exemple 1,55 secondes en 30 minutes de calcul au lieu de 0,88 secondes pour 0,653°C gagnés au lieu de 0,281°C.

Les propriétés des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 20 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux

<b>PARTICULES</b>	<b>Propriété</b>	<b>Unités</b>	<b>AC</b>	<b>PP</b>
	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	1280	910
	Coefficient de Poisson	[-]	0,4	0,42
	Module d'élasticité	[MPa]	2,8*	2,84*
	Module de cisaillement	[MPa]	1*	1*
	Conductivité thermique	[W/(m.K)]	1*	1*
	Capacité thermique massique	[J/(kg.K)]	1200	1700
	Coefficient de frottement au roulement	[-]	0,01	0,01
	Coefficient de restitution	[-]	0,3	0,3
<b>TAMBOUR</b>			<b>Acier</b>	<b>Verre</b>
	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	7800	2500
	Coefficient de Poisson	[-]	0,3	0,21
	Module d'élasticité	[GPa]	182	94,3
	Module de cisaillement	[GPa]	70	39
	Conductivité thermique	[W/(m.K)]	15	0,93
	Capacité thermique massique	[J/(kg.K)]	502	/
	Coefficient de frottement au roulement	[-]	0	0,01
	Coefficient de restitution	[-]	0,3	0,3

\*Les données avec un astérisque sont les données que l'on a modifiées pour accélérer le temps de simulation. Le module de cisaillement a été modifié dès le chapitre 1. La conductivité thermique a été modifiée pour accélérer la vitesse de chauffage des particules car ces matériaux ont des conductivités thermiques très faible (0,36 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour l'AC et 0,22 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour le PP).

Les valeurs des coefficients de frottement statique identifiées par ajustement aux données expérimentales ont été présentées dans le chapitre 1. Elles sont rappelées dans le Tableau 21 ci-dessous :

Tableau 21 : Coefficients de frottement statique solide-solide

	<b>Particule</b>			
	<b>Acier</b>	<b>Verre</b>	<b>AC</b>	<b>PP</b>
<b>AC</b>	0,3	0,2	0,3	0,6
<b>PP</b>	0,3	0,2	0,6	0,6

Les valeurs des différents pas de temps et les tailles de cellules dites « grid cells » pour chaque simulation sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 22 : Pas de temps et "Grid cells" pour chaque type de lits

Type de lit	Time step	GRID CELL
<b>Mono-disperse</b>	$8,95 \times 10^{-5}$ .[s]	4 R min
<b>Dispersion normale</b>	$6,48 \times 10^{-5}$ .[s]	4 R min
<b>Bi-densités</b>	$6,01 \times 10^{-5}$ .[s]	4R min
<b>Bi-tailles</b>	$5,37 \times 10^{-5}$ .[s]	4R min

### III. Caractérisation thermique du lit granulaire

Pour mesurer et quantifier l'intensité de la ségrégation thermique et mécanique, plusieurs caractérisations ont été nécessaires. La visualisation des ségrégations mécanique et thermique au sein du lit, les indices de ségrégation correspondants et enfin les températures moyennes des lits sont présentées dans la suite de ce paragraphe.

#### A) Visualisation de la ségrégation mécanique et thermique

Le logiciel de simulation permet d'avoir une image précise de l'état du lit à un temps  $t$ , ce qui permet de visualiser facilement l'évolution des profils thermiques au sein du lit et, par la suite, d'établir une comparaison entre les différentes configurations de lit étudiées ; de plus, cette comparaison se fait aussi bien entre images colorées en fonction de la température des billes qu'en fonction du volume des billes. Ainsi, deux couleurs, noires et blanches, ont été attribuées pour visualiser la ségrégation mécanique, tandis qu'une palette de 9 couleurs a été choisie pour visualiser la ségrégation thermique, car celle-ci nécessite une finesse plus importante. La couleur bleue est la plus froide tandis que la couleur rouge est la plus chaude, avec par ordre croissant bleu, vert, jaune, orange et rouge. Les images sont enregistrées en 600 dpi avec une échelle 300mmx300mm.



## B) Indices de ségrégation

Afin de caractériser globalement et macroscopiquement la distribution géométrique (ségrégation mécanique) et la distribution de température (ségrégation thermique) dans chaque type de lit des indices statistiques de ségrégation ont été utilisés.

### a. Rappel sur l'indice de ségrégation mécanique, ISM

Pour rappel l'indice de ségrégation mécanique est défini par l'équation suivante :

$$\text{ISM} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (C'_i - \langle C \rangle)^2} \quad (15)$$

Où  $C'_i$  représente la fraction en nombre d'un type de particules, d'une taille ou d'une densité spécifique dans la cellule  $i$  ( $C'_i = \frac{N'_i}{N_i}$  avec  $N'_i$  le nombre de particules d'une population présente dans la cellule  $i$  et  $N_i$  le nombre total de particule dans la cellule  $i$ ),  $\langle C \rangle$  la fraction moyenne d'un type de particules et  $L$  le nombre de cellules de taille égale.

Pour le lit bi-tailles, l'ISM a été calculé pour des particules d'AC de 2mm ; pour le lit bi-densités, l'ISM a été calculé pour des billes d'AC et enfin pour le lit gaussien, l'ISM a été calculé pour les particules de diamètre inférieur à 3mm. L'ISM a été calculé avec un code Matlab qui est présenté en annexe du chapitre 1.

### b. Indices de ségrégation thermique, IST

L'indice de ségrégation thermique, noté IST, représente globalement la distribution des températures des particules par rapport à la température moyenne. Le tambour ne sera pas divisé en cellules contrairement à ce qui a été fait pour l'indice ISM.

Il s'apparente donc simplement à l'écart type des températures des particules au sein du lit.

$$\text{IST} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \langle T \rangle)^2} \quad (16)$$

Où  $T_i$  représente la température d'une particule parmi les particules qui constituent l'ensemble du lit,  $T$  la température moyenne de toutes les particules et  $N$  est le nombre total de particules.

Cet indice est défini généralement pour des lit mono-disperses comportant un seul type de particules (taille et densité égale). Pour le cas de lits bi-disperses en taille ou en densité, un indice de ségrégation thermique par population peut être défini comme suit :

$$\text{IST}' = \sqrt{\frac{1}{P-1} \sum_{j=1}^P (T'_j - \langle T \rangle)^2} \quad (17)$$

Où  $T'_j$  représente la température d'une particule parmi les  $P$  autres particules de même type,  $T$  la température moyenne de toutes les  $N$  particules et  $P$  est le nombre de particules de même type.

Pour une même simulation, on obtiendra donc plusieurs indices qui vont évoluer en fonction du temps, un indice de ségrégation mécanique uniquement pour les lits disperses, et un indice de ségrégation thermique pour toutes les simulations. L'indice de ségrégation thermique pourra se subdiviser en deux sous-indices dans le cas d'une simulation avec un lit bi-disperse pour évaluer la ségrégation thermique en fonction d'une population donnée.

Les valeurs des indices de ségrégation ont été calculées sous Matlab à partir des données extraites d'EDEM (code en annexe 2).

## C) Températures moyennes du lit granulaire

Les températures moyennes pour les lits bi-disperses ont été calculées au moyen d'expressions tirées de bilans d'énergie établis pour les différents lits, ce qui nous donne des températures moyennes pondérées pour chaque type de lit. Plusieurs moyennes ont été utilisées, une moyenne globale sur l'ensemble du lit et une autre moyenne en prenant en compte chaque type de particules.

### a. Températures moyennes de l'ensemble du lit

Les températures moyennes ou globales de l'ensemble du lit ont été utilisées pour déterminer la vitesse de chauffage du lit entier.

Pour le lit bi-densités, la formule suivante a été utilisée :

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_i^n m_{AC} C_{p_{AC}} T_{AC}^i + \sum_j^q m_{PP} C_{p_{PP}} T_{PP}^j}{\sum_i^n m_{AC} C_{p_{AC}} + \sum_j^q m_{PP} C_{p_{PP}}} \quad (18)$$

Où :  $T$  représente la température moyenne,  $n$  est le nombre de particules d'acétate de cellulose (AC),  $q$  est le nombre de particules de polypropylène (PP),  $m$  est la masse des particules d'AC et de PP,  $C_p$  est la chaleur massique des particules d'AC et de PP et  $T_{AC}^i$ ,  $T_{PP}^j$  les températures des particules  $i$  d'AC et  $j$  de PP.

Pour le lit bi-tailles, la formule utilisée suivante était plus simple car il y a seulement un seul type de particules :

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_i^p m_{AC} C_{p_{AC}} T_{AC}^i}{\sum_i^p m_{AC} C_{p_{AC}}} \quad (19)$$

Où  $\langle T \rangle$  représente la température moyenne,  $p$  le nombre total de particules d'AC et  $T_{AC}^i$  la température de la particule  $i$ .

Cette dernière équation (17) est aussi utilisée pour les lits mono-disperse et gaussien, en effet ils n'ont qu'un seul type de particules qui est l'AC.

## b. Températures moyennes par type de particules

Les températures moyennes pour chaque type de particules ont aussi été calculées.

Les températures moyennes des billes d'AC ont été calculées grâce à l'équation 20. Pour un lit bi-disperse en tailles, il a été nécessaire de séparer les petites particules des grosses particules pour avoir une température moyenne par type de particules.

Les températures moyennes des billes de PP sont calculées grâce à l'équation suivante :

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_i^p m_{PP} C_{pPP} T_{PP}^i}{\sum_i^p m_{PP} C_{pPP}} \quad (20)$$

Où  $\langle T \rangle$  représente la température moyenne,  $p$  le nombre total de particules de PP et  $T_{PP}^i$  la température de la particule  $i$ .

Ainsi, nous avons pu calculer différentes températures moyennes définies précédemment et observer quelles configurations de lits ou quel type de particules chauffent les plus vite.

## IV. Plan d'expériences

Les simulations ont été réalisées pour 4 types de lits granulaires et 3 configurations de tambour selon un plan d'expériences présenté ci-dessous :

Tableau 23 : Plan d'expériences des simulations réalisées

Lit		Bi-tailles				Bi-densités				Gaussien	Mono-disperse
Reference		0A	4PA	4PAnc	8GA	0A	4PA	4PAnc	8GA	4PA	4PA
Ailettes	Nombre	0	4	4	8	0	4	4	8	4	4
	Hauteur		1,5	1,5	4		1,5	1,5	4	1,5	1,5
	Chauffées		Oui	Non	Oui		Oui	Non	Oui	Oui	Oui

(PA : petites ailettes ; PAnc : petites ailettes non chauffées ; GA : grandes ailettes)

10 configurations différentes ont donc été simulées et les résultats obtenus sont présentés et analysés dans la suite de ce paragraphe. Plusieurs comparaisons ont été faites, d'une part, entre les différentes géométries et, d'autre part, en fonction du type de lit granulaire.

# RESULTATS ET DISCUSSION

---

Les essais pour l'étude de la ségrégation thermique ont été réalisés avec le modèle thermique implanté dans EDEM. Nous avons essayé de vérifier cette méthode dite thermique à l'aide de résultats de la littérature pour des problèmes résolus.

Nous avons exécuté des simulations dans les mêmes conditions et nous avons pu comparer nos résultats avec les résultats publiés, numériques et/ou expérimentaux.

Les 2 cas suivants ont été considérés :

- 1- Le transfert de chaleur dans un lit de particules sphériques de 4 mm de diamètre, statique et agité, dans un tambour tournant, étudié par Weigler 2010 [40].
- 2- Le transfert de chaleur à travers une monocouche de particules sphériques, de 3 mm de diamètre placées entre 2 plaques planes horizontales, avec une charge mécanique de 5 Kg sur la plaque du dessus, étudié par Vargas et al. 2002 [41]

Les résultats de ces validations sont présentés en annexe 8.

Nos propres résultats ont été comparés aux résultats des simulations réalisées par Weigler. On a pu constater qu'il y existait un écart important entre notre courbe et celle de Weigler pour les billes chaudes et un petit écart pour les billes froides. On peut dire que nous avons un pourcentage de fractions de billes chaudes dans nos simulations assez importantes par rapport à cette publication.

L'accord entre nos résultats et ceux de Vargas n'a donc été démontré que qualitativement.

Par conséquent, nous avons admis que la validation de nos simulations n'a pas été satisfaisante et qu'il reste donc à trouver une autre comparaison plus concluante.

## **I. Image thermique du lit**

Les images des profils thermiques au sein des différentes configurations de lits ainsi que la comparaison avec les images mécaniques nous ont permis d'étudier le comportement thermique des différents types de lit ainsi que l'influence visuelle de la ségrégation mécanique sur la ségrégation thermique. Pour commencer, nous allons présenter une analyse des profils thermiques en fonction du temps puis les profils des différents lits au bout d'un temps de 10 minutes avec une comparaison avec les images des profils mécaniques.

### **A) Analyse de l'image thermique du lit. Etude de cas**

Une simulation de l'évolution des profils thermiques qui traduit la ségrégation thermique au cours des 14 minutes de simulations est présentée dans la Figure 83, avec une image toutes les 2 minutes :

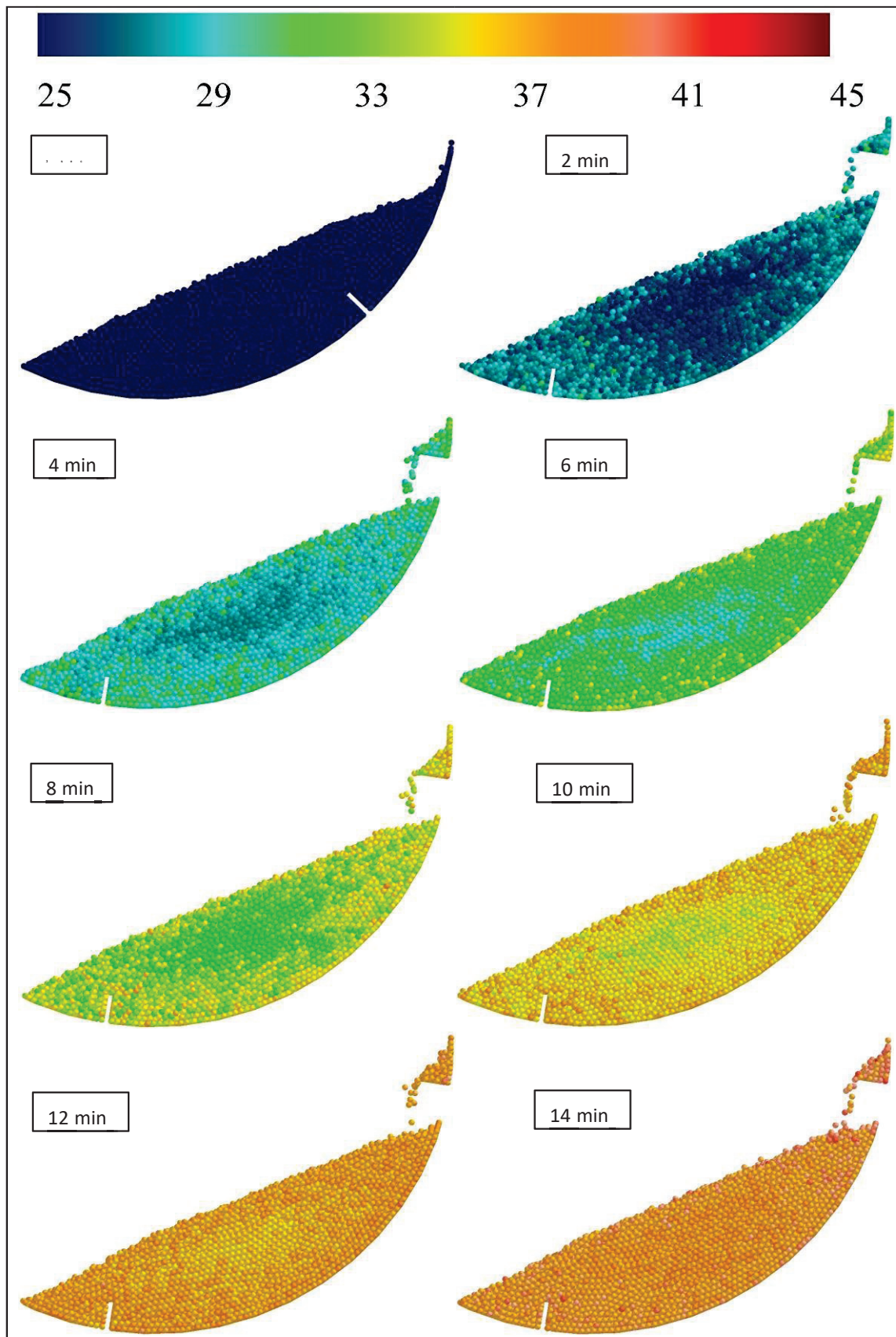


Figure 83 : Simulation de l'évolution thermique (°C) d'un lit mono-disperse avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm)

Le lit mono-disperse est le lit de référence car il est composé uniquement de billes d'AC de 3mm de diamètre. On observe un noyau froid au cœur du lit, noyau dont le volume diminue au cours du temps. Les particules les plus chaudes sont rejetées vers la paroi périphérique chauffée. La température du lit s'homogénéise au cours du temps, puisque le gradient de température est bien plus important après 2 minutes qu'après 14 minutes où nous n'observons plus de noyau central froid. Le fait que le tambour soit tournant accélère très certainement cette homogénéisation, les particules se réchauffant entre elles grâce à l'augmentation de leurs contacts.

Ensuite, nous avons aussi réalisé la même simulation avec un lit statique dont les résultats sont présentés sur la figure 84 ci-dessous.

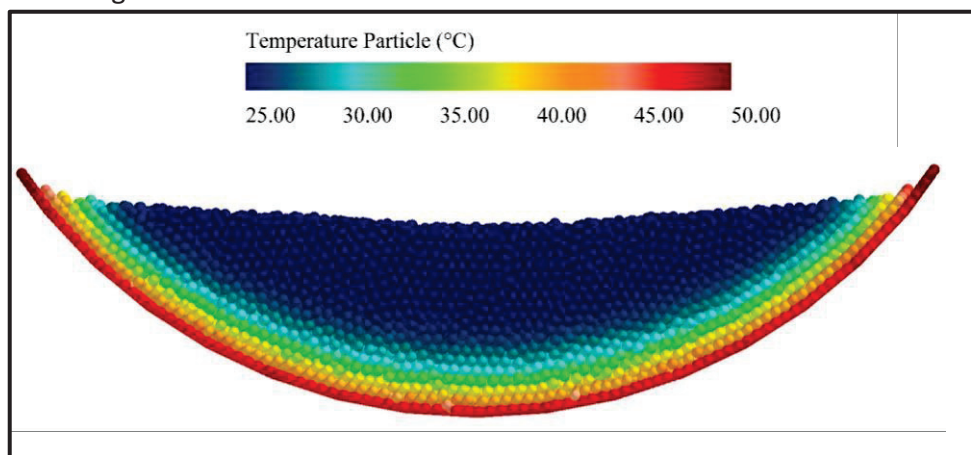


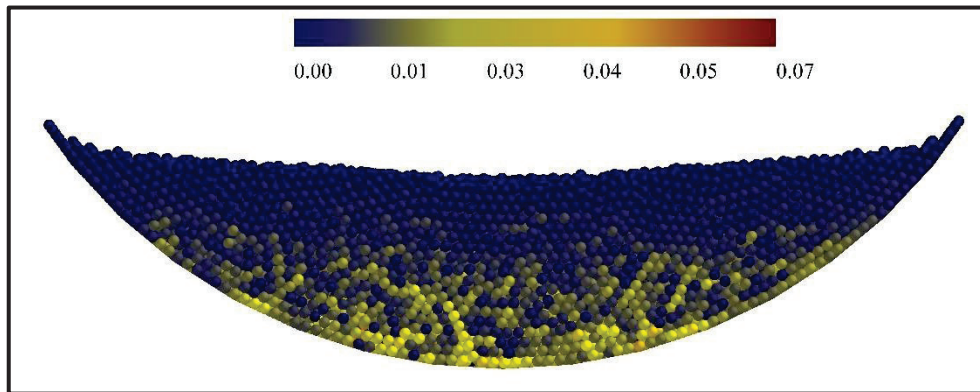
Figure 84 : Profils thermiques au sein d'un lit mono-disperse statique après 14 minutes de chauffage

On constate visuellement une grande différence entre les profils thermiques dans le tambour tournant et les profils obtenus avec dans le tambour statique. En effet, au bout de 14 minutes, le lit en mouvement est pratiquement homogène thermiquement, contrairement au lit statique, les écarts de température restent très importants, la couche de particules au voisinage de la paroi étant pratiquement à 50°C tandis que le cœur du lit est resté à 25°C. Comme on pouvait s'y attendre, on visualise bien que le transfert de chaleur par convection est beaucoup plus efficace que le transfert par conduction.

Par ailleurs, on peut remarquer que les particules de la couche supérieure du lit, situées près de la paroi chauffante, qui ne forment qu'une monocouche en contact avec la paroi du tambour, sont bien les plus chaudes. En effet, elles reçoivent la chaleur de la paroi mais ne peuvent pas la diffuser à d'autres particules par conduction ce qui les conduit à une température plus élevée, les autres modes de transfert de chaleur par échange avec le gaz ou par rayonnement n'étant pas pris en compte.

On peut aussi remarquer qu'il y a plus de couches de couleurs différentes au centre du lit (8 couches) qu'aux extrémités (6 couches), ce qui signifie que la chaleur diffuse un peu plus efficacement au centre. Cet effet peut s'expliquer par la construction du modèle de transfert thermique. En effet, plus le lit est épais, plus la force compressive sur les billes inférieures est élevée et plus la conduction thermique entre ces billes augmentent (cf l'expression de la conductance thermique  $K_{ij}$  définie à l'équation 4). Cette différence locale de pression a pu être

confirmée par la représentation graphique des forces compressives fournie par EDEM et présentée dans la Figure 85 :



*Figure 85 : Image des forces compressives au sein d'un lit granulaire mono-disperse statique au bout de 14 minutes (3 rpm)*

Les particules jaunes sont celles qui subissent une force compressive importante. On remarque que les particules situées au fond du lit sont celles qui subissent le plus ces forces compressives de sorte que cette partie basse est celle où les flux de chaleur sont les plus importants.

## B) Images thermiques des différents lits en régime mécanique établi

Le lit mono-disperse n'ayant pas de ségrégation mécanique n'est pas abordé dans cette partie.

Les profils thermiques des lits bi-tailles, bi-densités et gaussien sont présentés, après 10 min de chauffage initial qui permet d'atteindre un régime déjà bien établi. Les images des profils thermiques sont présentées avec une échelle adaptée à chacun d'eux afin de mieux visualiser les gradients thermiques au sein du milieu granulaire.

### a. Lit bi-tailles

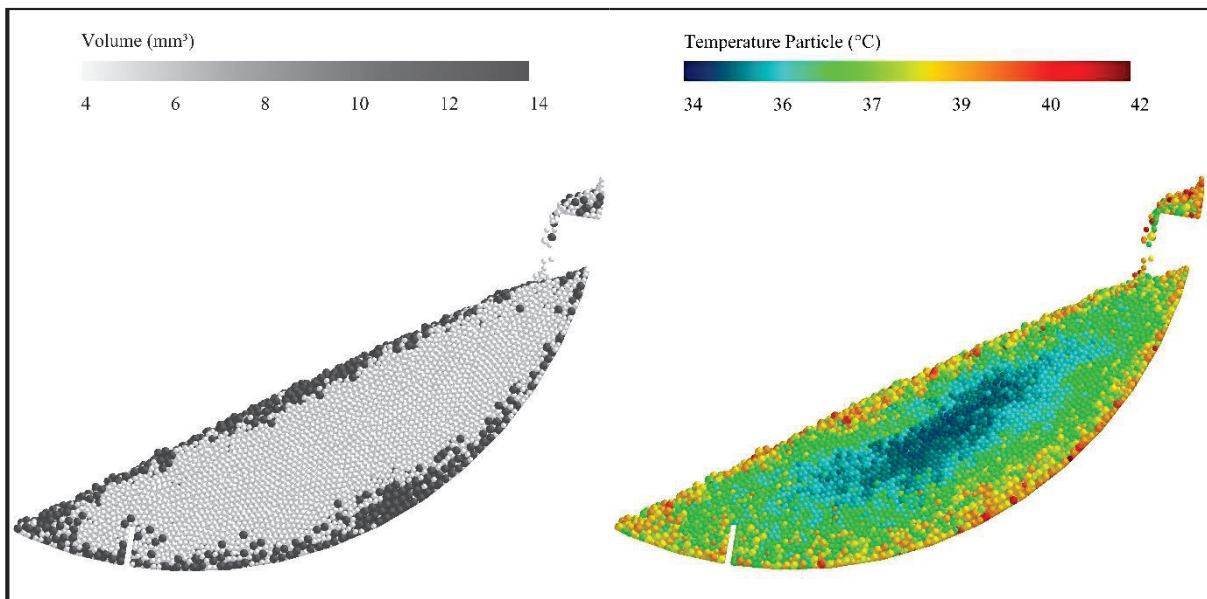


Figure 86 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit granulaire bi-taille avec tambour muni de 4 petites ailettes

Les petites particules de 2 mm sont de couleurs blanches tandis que les grosses particules de 3 mm sont de couleurs gris foncé. La ségrégation mécanique est très importante puisque la majorité des petites particules se retrouvent au cœur du lit comme le montre l'image à la paroi frontale en verre, tandis que les grosses particules restent en périphérie, mais aussi à la paroi arrière (ce que l'image présentée ne permet pas de voir).

En parallèle, l'examen des profils thermiques au sein du lit permet de corroborer l'impact thermique de la forte ségrégation mécanique, puisque les particules au centre du lit sont majoritairement les plus froides (en bleu sur l'image) tandis que celle à la paroi latérale sont plus chaudes (en jaune et rouge).

On constate aussi sur cette image que les plus grosses particules sont majoritairement les plus chaudes. Mais cette dichotomie n'est pas complète, puisque des petites particules circulent malgré tout à travers les grosses particules jusqu'à la paroi périphérique et atteignent aussi une température élevée.



Il existe donc un lien de cause à effet visible entre la ségrégation mécanique et ségrégation thermique. Cependant, il s'agit là d'une observation purement qualitative et non quantitative qui sera précisée plus loin dans ce mémoire (Résultats et discussion, II).

## b. Lit bi-densités

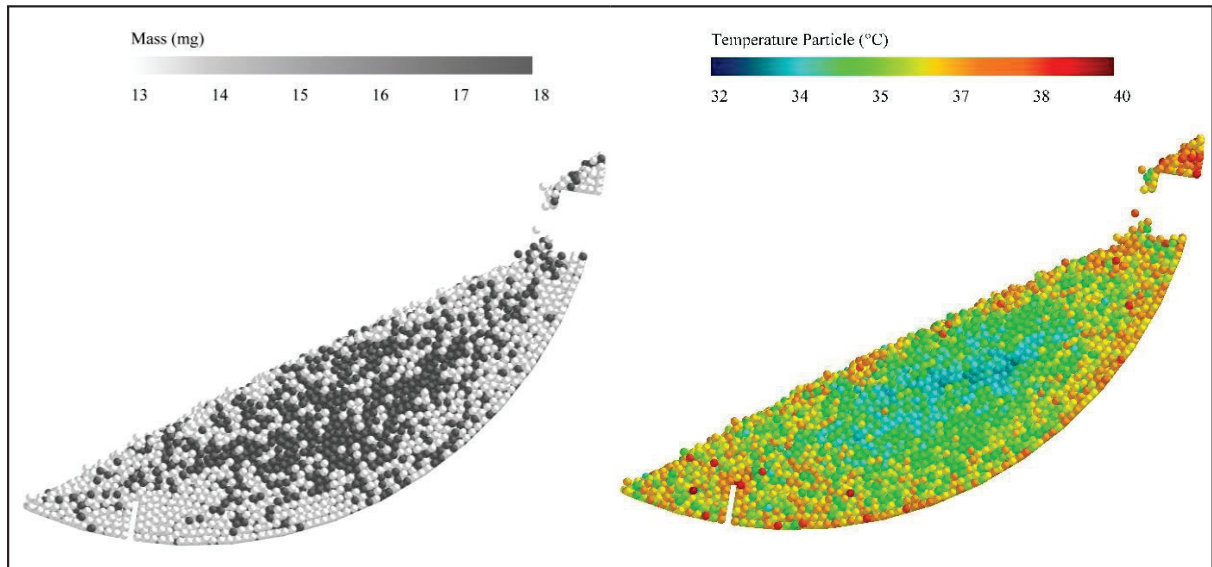


Figure 87 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit bi-densités avec 4 petites ailettes (3 rpm)

Les particules d'AC, qui sont les plus denses, ont été représentées en gris foncé sur l'image de gauche tandis que les particules de PP, les moins denses, ont été représentées en blanc. On constate que les particules les plus denses ont tendance à se regrouper au centre du lit alors que les particules les plus légères sont localisées beaucoup plus au voisinage de la paroi. Cette ségrégation mécanique est cependant bien moins marquée que pour le lit bi-tailles précédent, puisque l'on observe tout de même un meilleur mélange que sur la figure 86.

Concernant les profils thermiques, on observe un noyau central de particules plus froides - en bleu sur l'image précédente - tandis que les particules les plus chaudes - en rouge - sont celles qui sont situées près de la paroi périphérique du tambour

Il existe donc un cœur de particules d'AC froides au sein du lit, tandis que les particules de PP sont plus chaudes et rejetées à la paroi périphérique du tambour.

### c. Lit gaussien

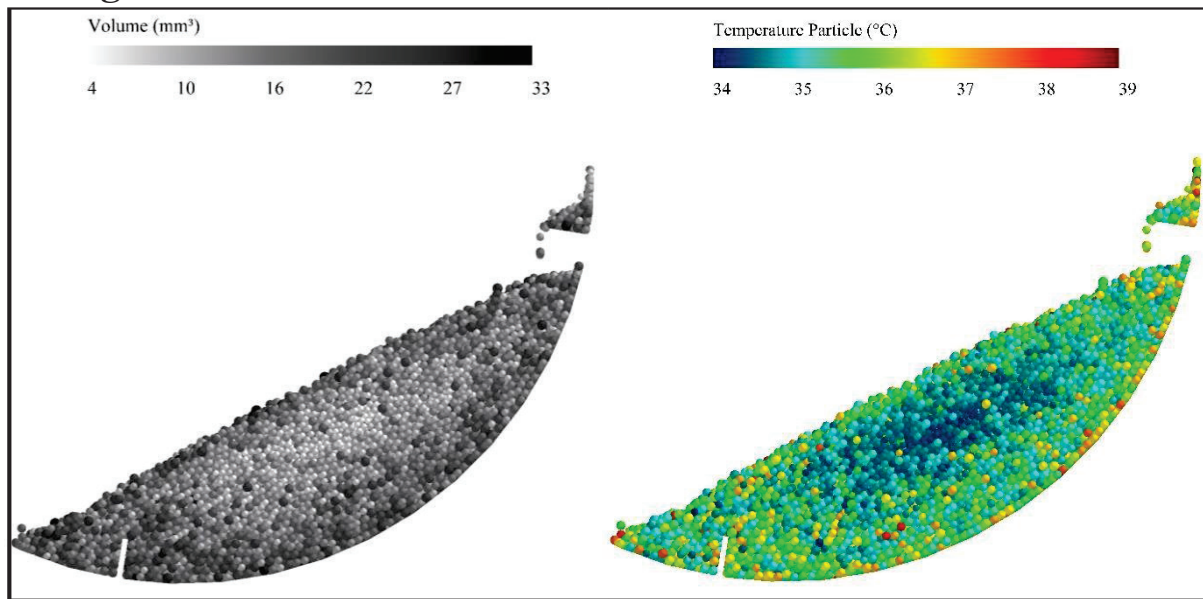


Figure 88 : Images de la ségrégation mécanique à gauche et thermique à droite d'un lit gaussien avec 4 petites ailettes (3 rpm)

Sur l'image de ségrégation mécanique (à gauche) on peut voir que les particules les plus petites, (en gris clair) sont regroupées au cœur du lit tandis que les particules les plus grosses (en foncé) restent en périphérie, soit sur le talus, soit proches de la paroi du tambour. Cependant la ségrégation est moins marquée qu'avec les lits bi-disperses.

Concernant les profils de température, le lit granulaire présente un cœur froid en son centre tandis que les particules plus chaudes sont majoritairement à la paroi périphérique. Le cœur froid est donc composé de petites particules, comme dans le cas du lit granulaire bi-taille.

Par conséquent, il existe donc un lien de cause à effet, entre les ségrégations mécanique et thermique, puisqu'on retrouve les plus petites particules ou les plus denses au centre du tambour, ce qui conduit à un cœur froid puisque ces particules ont moins accès à la paroi chauffante. Dans la partie suivante nous allons présenter les résultats de vitesse de chauffage et les profils thermiques au sein des différentes configurations de lit étudiées pour confirmer notre hypothèse.

## II. Comparaisons des résultats pour une configuration géométrique d'ailettes donnée avec différents types de lits

### A) Géométrie de tambour avec 4 petites ailettes (4PA)

La simulation avec 4 petites ailettes de 1,5cm de hauteur (4PA) constitue notre cas de référence. En effet les 4 lits ont tous été simulés avec cette configuration de base, soit pour un lit bi-tailles soit pour un lit bi-densités, qui ont chacun fait l'objet d'un essai avec des ailettes non chauffées (nc). Les résultats de ces simulations sont présentés de manière globale sous la forme des indices de ségrégation thermique (IST), mécanique (ISM) et des températures moyennes

#### a. Indices de ségrégation thermique

Les évolutions des valeurs des indices de ségrégation thermique pour chaque configuration sont présentées sur la Figure 89 :

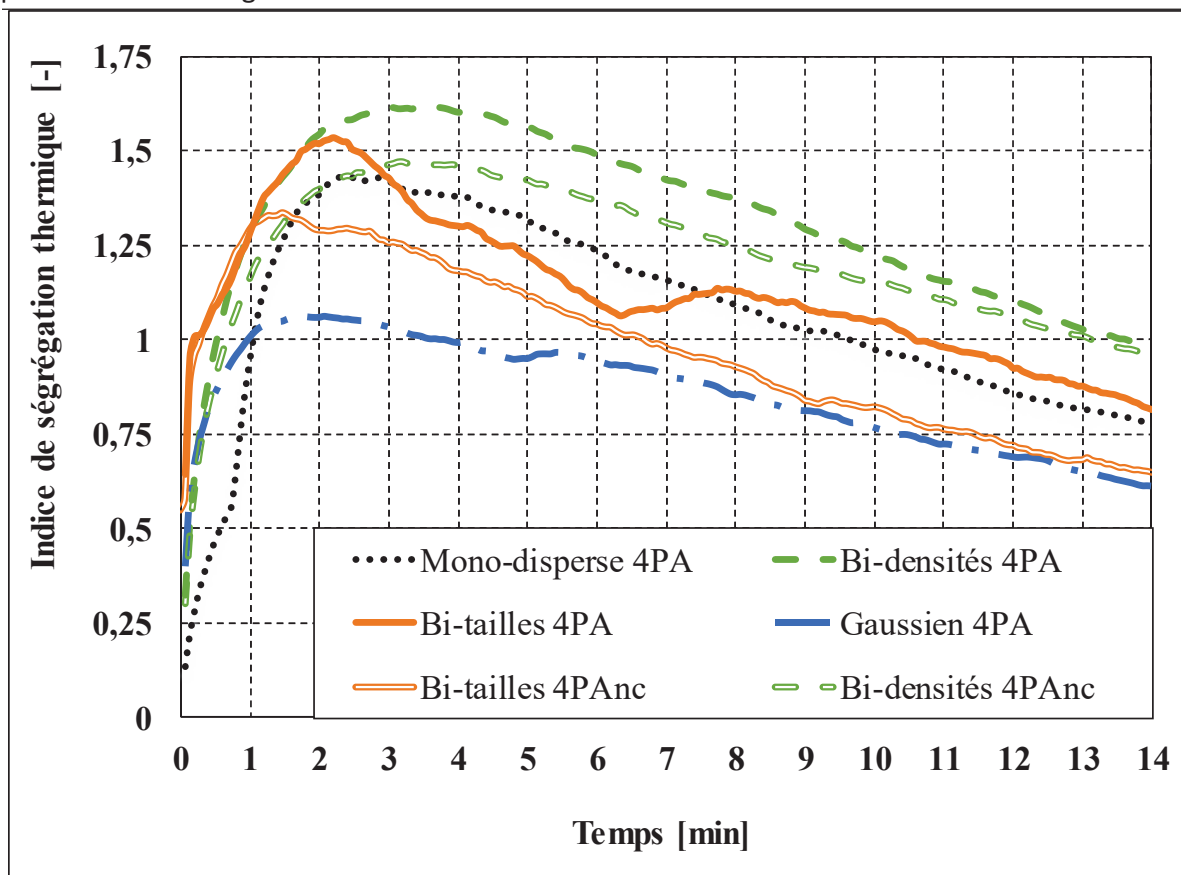


Figure 89 : Evolution des valeurs des indices de ségrégation thermique pour tous types de lits avec une configuration de petites ailettes (3 rpm)

Les valeurs de ces **indices de ségrégation thermiques (IST)** permettent de caractériser la distribution des températures des particules à travers l'ensemble du lit, ce qui permet de quantifier la ségrégation thermique au sein du lit. Les valeurs d'IST les plus élevées ont été

observées pour le lit bi-densité tandis que les valeurs d'IST les plus faibles sont observées pour le lit gaussien. Cela veut dire que le lit bi-densité présentait de plus grandes hétérogénéités thermiques que les autres lits étudiés. Les valeurs faibles de l'indice de ségrégation IST pour le lit gaussien peuvent s'expliquer par une redistribution des billes poly-dispersées de manière uniforme, c'est-à-dire que les plus petites billes occupent les espaces situées entre les plus grosses billes ce qui augmente le tassement du lit et réduit sa porosité effective et, par conséquent, augmente aussi la conductivité thermique apparente du lit. En effet plus le tassement est important plus il y a de contacts et d'interpénétrations entre les particules, augmentant donc le transfert thermique au sein du lit granulaire. Une autre explication possible des valeurs élevées de l'IST pour le lit bi-densités est que la configuration du lit bi-densités présente la plus forte ségrégation mécanique parmi toutes les configurations de lits étudiés.

Le lit mono-disperse et le lit bi-densités sont tous deux composés uniquement de particules de 3mm et ne subissent donc pas l'effet d'élutriation que l'on rencontre avec les 2 autres lits. Par contre, les valeurs d'IST du lit bi-densités sont bien plus élevées que pour le lit mono-disperse, ce qui peut s'expliquer par l'absence de ségrégation mécanique au sein du lit mono-disperse avec une meilleure homogénéisation des particules et de moins grandes hétérogénéités thermiques au sein du lit.

A l'exception du lit bi-tailles, toutes les valeurs d'IST augmentent durant les 1 à 3 premières minutes selon les configurations des lits, puis ces valeurs d'IST décroissent plus lentement. On peut donc distinguer 2 périodes dans l'évolution des valeurs d'IST : une première période de 2 à 3 minutes pendant laquelle les valeurs d'IST augmentent assez rapidement pour atteindre un maximum, puis une seconde période pendant laquelle les valeurs d'IST diminuent lentement et presque linéairement pour s'annuler lorsque toutes les billes sont parvenues à la même température, l'ensemble du lit tendant à l'homogénéité thermique de l'ensemble du lit.

Les valeurs des IST du lit bi-tailles sont très particulières car elles augmentent très rapidement durant la première période, mais ne sont pas linéaires durant la deuxième. Ce point sera développé plus loin lors de la comparaison entre les différentes configurations des lits bi-tailles étudiées.

Enfin, on constate que les lit munis d'ailettes chauffées présentent des valeurs d'indices de ségrégation TSI plus élevées que celles observées avec des lits munis d'ailettes non chauffées, ce qui peut s'expliquer simplement par le fait que certaines billes vont se loger à la jonction entre la paroi périphérique chauffante et les ailettes chauffantes, ce qui peut conduire à leur surchauffe. Ces billes auront donc des températures bien plus élevées que celles de l'ensemble du lit, ce qui augmentera la ségrégation thermique. On peut donc en déduire que les ailettes non chauffées vont améliorer l'homogénéité thermique au sein du lit.

## b. Indices de ségrégation mécanique

Les indices de ségrégation mécaniques observés avec 3 différents lits sont présentés sur la Figure 90 ci-dessous, le lit mono-disperse n'étant constitué que d'un seul type de particules, il ne présente donc pas de ségrégation mécanique.

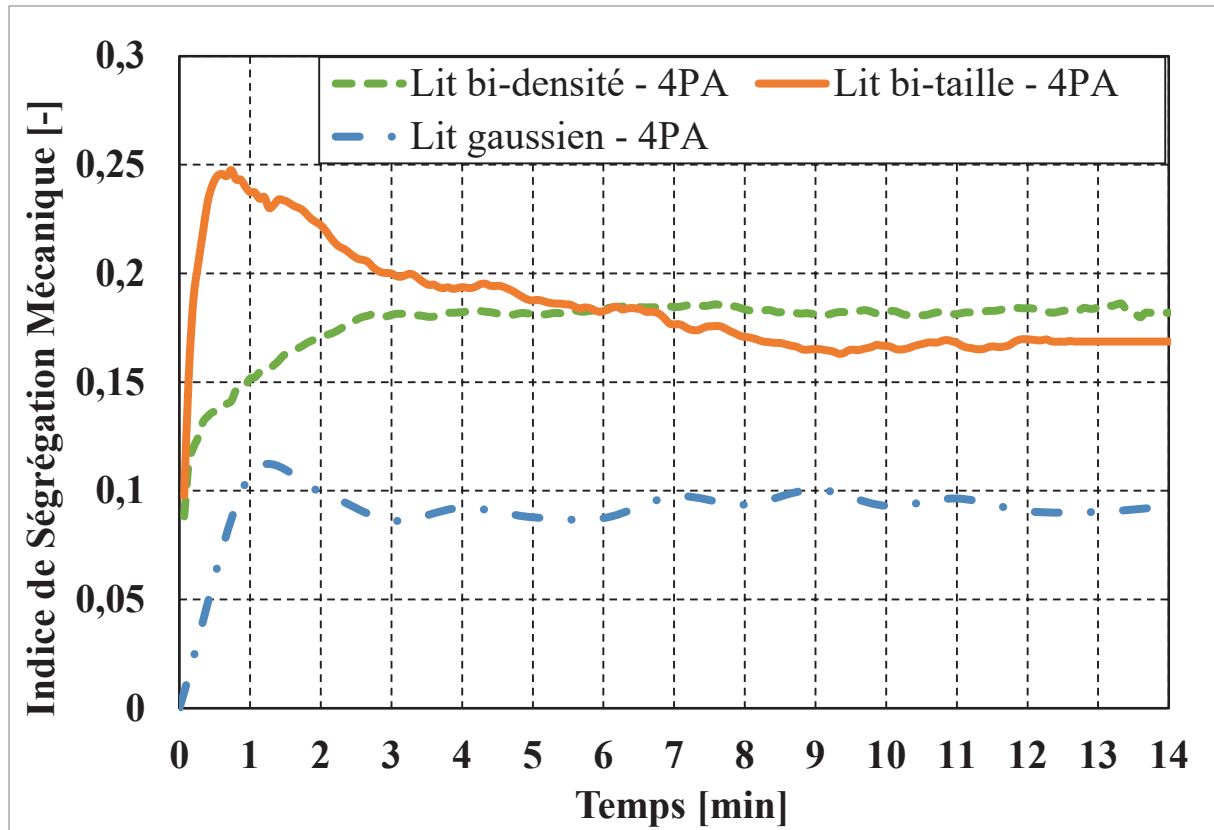


Figure 90 : Evolution des Indices de ségrégation mécanique de différents lits avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm)

On remarque que le lit gaussien et le lit bi-tailles présentent les mêmes tendances, c'est-à-dire qu'il y a d'abord une augmentation de l'indice de ségrégation puis une diminution pour tendre finalement vers un plateau. L'indice de ségrégation mécanique « ISM » du lit bi-densités ne passe pas par un maximum et il atteint son plateau directement. Le temps pour atteindre ce plateau varie en fonction des configurations de lits (entre 3 et 9 min), les lits gaussiens et bidensités atteignant rapidement leur plateau (3min) tandis que le lit bi-tailles met 9 minutes avant d'arriver ce plateau final. Les valeurs d'ISM pour le lit gaussien sont les plus faibles. En effet, il est calculé en fonction d'une population de particules de diamètres inférieurs à 3mm, les plus petites particules vont donc se loger au milieu des grosses particules et favoriser les échanges avec elles. La valeur de l'indice de ségrégation mécanique ISM du lit bi-tailles augmente fortement au début de la période de simulation mais la valeur de son plateau final se situe légèrement en dessous de la valeur d'ISM du lit bi-densité.

### c. Températures moyennes du lit

Les températures moyennes du lit pour chaque configuration de lit sont calculées par le logiciel EDEM et présentées sur la figure 91 :

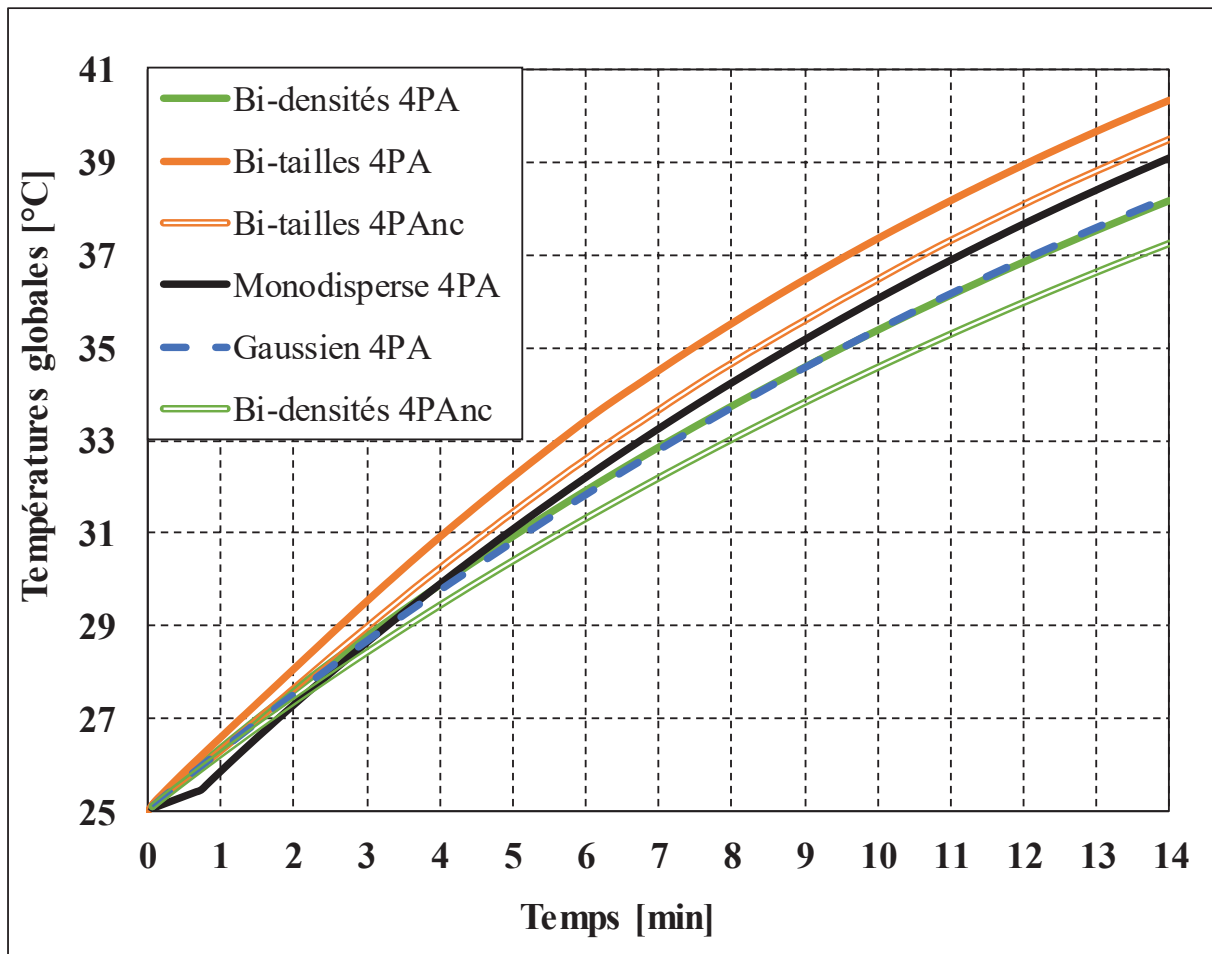


Figure 91 : Evolution des valeurs des températures moyennes pour tous les lits avec une configuration de tambour avec petites ailettes (3 rpm)

En ce qui concerne les températures moyennes présentées sur la Figure 91, on observe que la vitesse de chauffage est plus élevée pour le lit bi-taille que pour tous les autres lits. Les températures moyennes pour les lits bi-densités et pour le lit gaussien sont très proches. En effet, ces deux lits sont tous les deux constitués de billes de diamètre moyen de 3 mm ce qui signifie que la dispersion de taille des billes ne semble pas améliorer la vitesse de chauffage alors qu'un mélange de deux populations de billes de tailles différentes, comme le lit bi-tailles, par exemple, augmente la vitesse de chauffage.

Malgré le fait qu'il y ait davantage de petites billes que de grosses dans le lit bi-tailles et que les petites particules vont préférentiellement dans le cœur froid du lit, le lit bi-tailles est celui qui présente la vitesse de chauffage la plus élevée. Une explication possible est que les petites particules remplissent les espaces laissés par les grosses particules, ce qui augmente le nombre de contacts entre les particules et entre les particules et la paroi et, in fine, augmente la vitesse de chauffage.

Les vitesses de chauffage des lits aux ailettes chauffées et des lits aux ailettes non chauffées sont relativement proches. En effet, la vitesse de chauffage d'un lit avec des ailettes non chauffées est toujours inférieure à celle d'un lit muni d'ailettes chauffées mais la différence est le plus souvent plus faible que celle observée entre 2 lits de configurations différentes. Pour la vitesse de chauffage, le type de lit granulaire (bi-densités ou bi-tailles) est donc plus important que la configuration du tambour.

On peut aussi observer que le lit mono-disperse présente une vitesse de chauffage plus élevée que le lit bi-densités, alors qu'ils contiennent tous les deux le même nombre de particules de 3 mm de diamètre, mais le lit bi-densité contient une moitié de particules en polypropylène. Une explication possible à cet écart est que le lit mono-disperse, qui contient des particules lourdes présente un tassement des particules plus important que le lit bi-densité avec un nombre de contacts et des forces de contact plus importantes. Nous avons estimé que le lit bi-densités, à chaque pas de temps, présentait en moyenne 3000 contacts de moins sur l'ensemble du lit que le lit mono-disperse. Comme les particules sont chauffées par la paroi mais aussi par le contact des unes aux autres, en diminuant le nombre de contact des billes, on va aussi diminuer sa vitesse de chauffage (voir Tableau 24).

Tableau 24 : Nombre de contacts totaux au sein de tous les types de lits

Nombre de contacts	Totaux	Particules/Particules	Particules/Paroi périphérique
<i>Bi-taille</i>	90000	-	-
<i>Bi-densité Mono-disperse</i>	38500	35500	1100
	41000	38500	1020

On observe que le lit bi-tailles est celui qui a le plus grand nombre de contacts, cela s'explique par le fait qu'il y a beaucoup plus de particules au sein de ce lit. Ensuite le lit mono-disperse, étant composé uniquement de billes d'AC qui sont les plus lourdes, présente des fortes forces compressives au sein du lit, qui augmentent la conductivité du lit et donc la vitesse de chauffage, comme le montre l'image du lit de la figure 92. Pour finir, le lit bi-densités est le lit qui présente le moins de contacts, les particules étant moins denses de sorte que le lit est moins tassé, les forces compressives plus faibles ainsi que la vitesse de chauffage comme le montre de l'image de la figure 92 présentée ci-dessous :

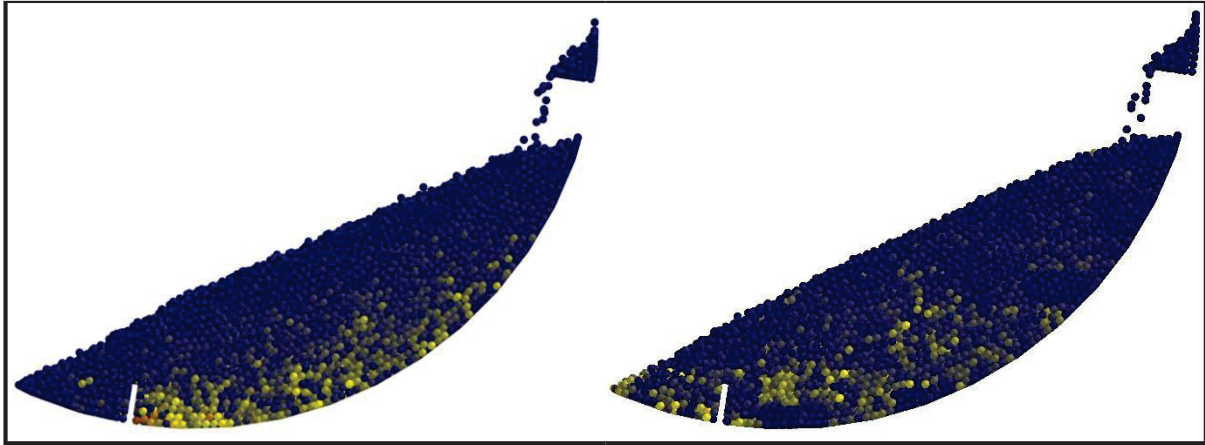


Figure 92 : Images des forces compressives pour le lit mono-disperse à gauche et le lit bi-densités à droite à 14 minutes. (3 rpm)

L'échelle de couleur des forces compressives passe du bleu au jaune et enfin au rouge en allant des forces compressives les plus faibles vers les forces compressives les plus élevées. Le lit mono-disperse en taille de particules présente effectivement plus de particules de couleur jaune que le lit bi-densités, surtout à proximité des ailettes. Le lit mono-disperse présente davantage de contacts, il est donc logique que les forces compressives y soient plus importantes. Ces images prouvent que le lit mono-disperse présente un degré de tassement plus important que le lit bi-densités, le lit mono-disperse présentant d'ailleurs un angle de talus plus droit que le lit bidensités.



## B) Géométrie de tambour avec 8 grandes ailettes (8GA)

Cette configuration a été étudiée afin d'observer l'effet de grandes ailettes chauffées sur l'homogénéité et sur le chauffage du lit. Pour cette étude et cette configuration, nous n'avons retenu que les lits bi-densités et les lits bi-tailles.

### a. Indices de ségrégation thermique

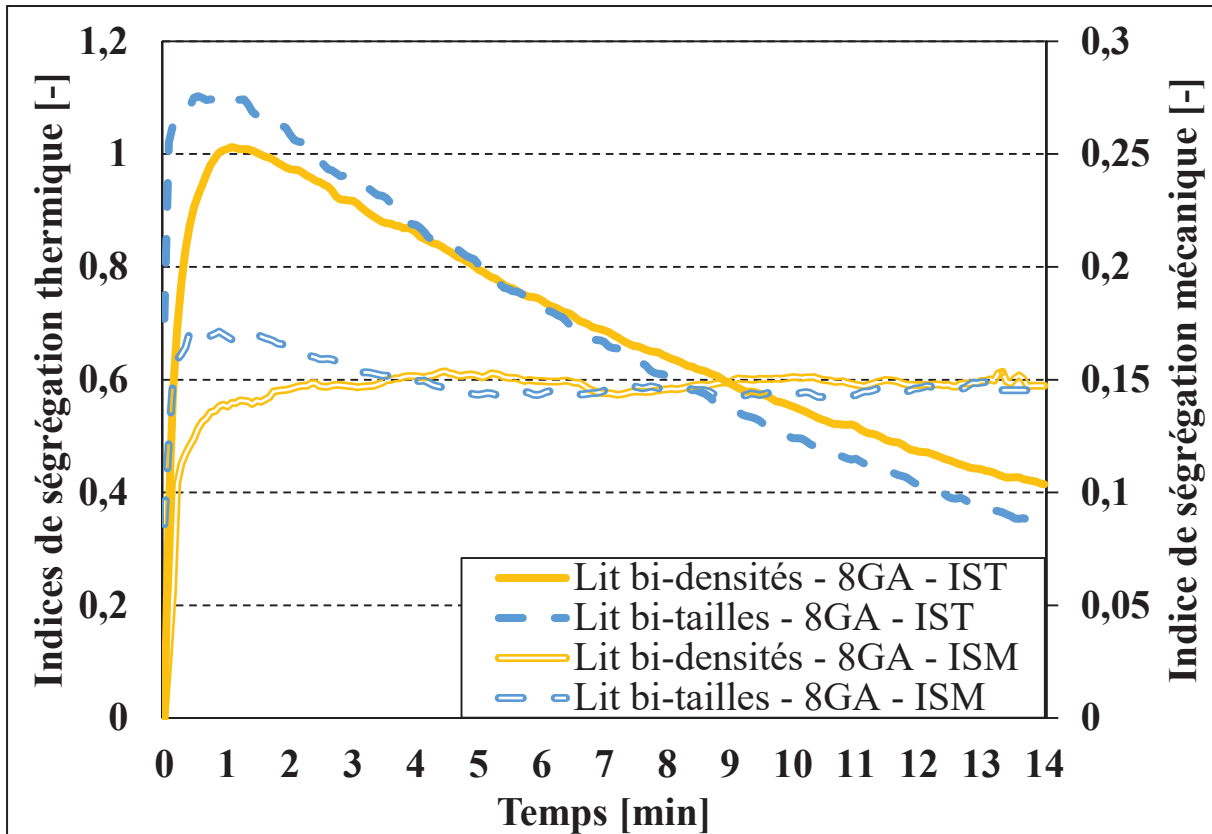


Figure 93 : Evolution des indices de ségrégation thermique et des indices de ségrégation mécanique pour les lits granulaires bi-tailles et bi-densités avec tambour muni de 8 grandes ailettes (3 rpm)

On constate sur la figure 93 que les 2 courbes d'évolution des profils des indices de ségrégation sont plus élevées pour les lits bi-tailles que pour les lits bi-densités durant la première période, soit jusqu'à 4 minutes environ, puis ces profils se croisent de sorte que ces courbes des indices de ségrégation du lit bi-densités se situent légèrement au-dessus de celles du lit bi-tailles.

Comme précédemment, on constate que ces profils présentent deux périodes bien distinctes, la première en moins de 2 minutes lorsque le lit se met en place, les valeurs de deux indices ISM et IST augmentent rapidement pour atteindre un maximum. Puis durant une deuxième période les valeurs de l'indice ISM se stabilisent à leur valeur finale au bout de 5 minutes environ, tandis que les valeurs des indices IST diminuent plus lentement (diminuant de 2/3 environ en 14 min). Dans cette configuration les ségrégations mécaniques et thermiques sont sans doute décorrélées au vu de ces graphes, la ségrégation mécanique se stabilisant beaucoup plus vite que la ségrégation thermique

Durant les premières minutes de chauffage, la ségrégation mécanique et la ségrégation thermique atteignent pratiquement leurs valeurs les plus élevées, un peu moins rapidement pour l'indice ISM du lit bi-densités que pour le lit bi-tailles. Puis les profils de ségrégation mécanique se rejoignent.

### b. Températures moyennes du lit

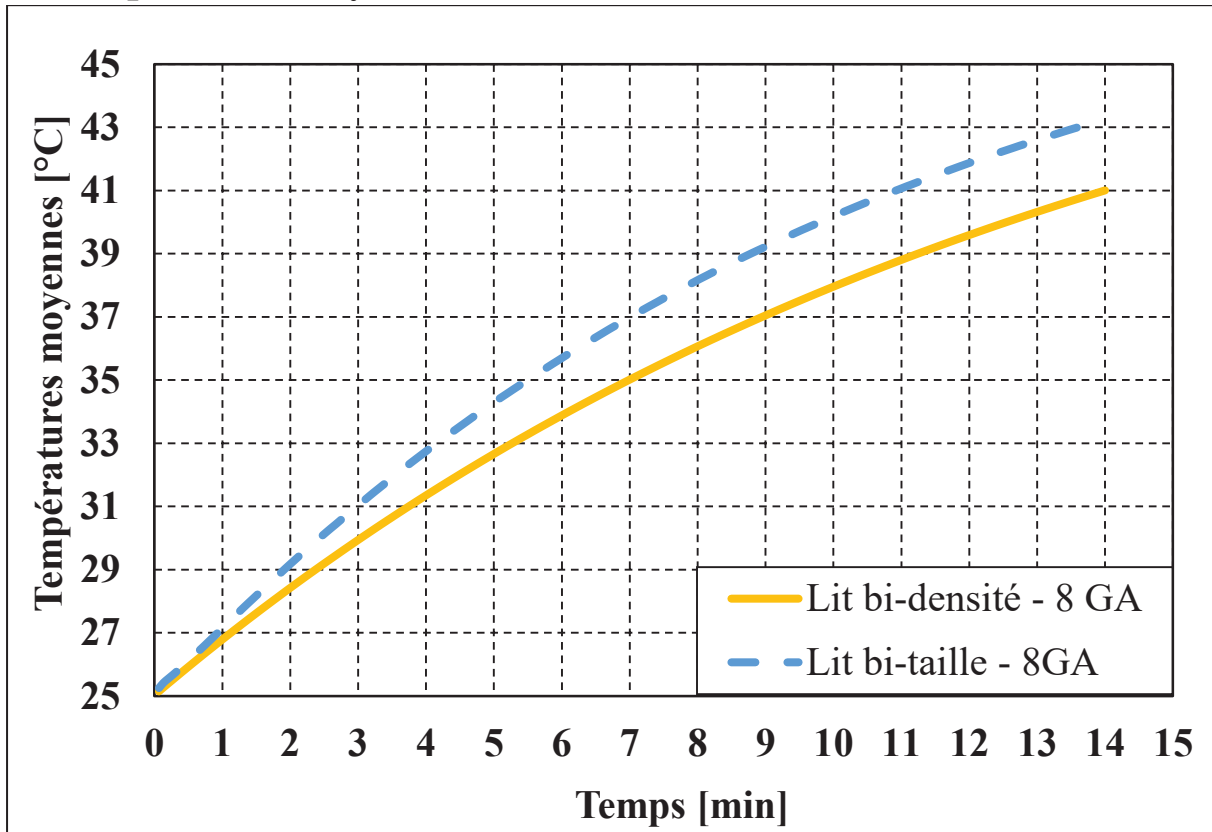


Figure 94 : Evolution des températures moyennes des lits granulaires bi-disperse en tailles et en densités avec une configuration de tambour muni de 8 grandes ailettes chauffées (3 rpm)

Comme on l'a rencontré précédemment, la figure 94 montre que les températures moyennes du lit bi-taille sont plus élevées que pour le lit bi-densité. On peut voir que l'écart entre les deux profils se creuse au cours du temps, passant de 1°C à 3 minutes à plus de 2°C au bout de 14 minutes.

### C) Géométrie de tambour sans ailette (0A)

La configuration d'un tambour sans ailettes permet d'étudier l'influence des ailettes sur les hétérogénéités thermiques et mécaniques au sein des lits ainsi que sur la vitesse de chauffage dans la même configuration que nous avons étudiée avec des lits bi-tailles et des lits bi-densités.

#### a. Indices de ségrégation thermique

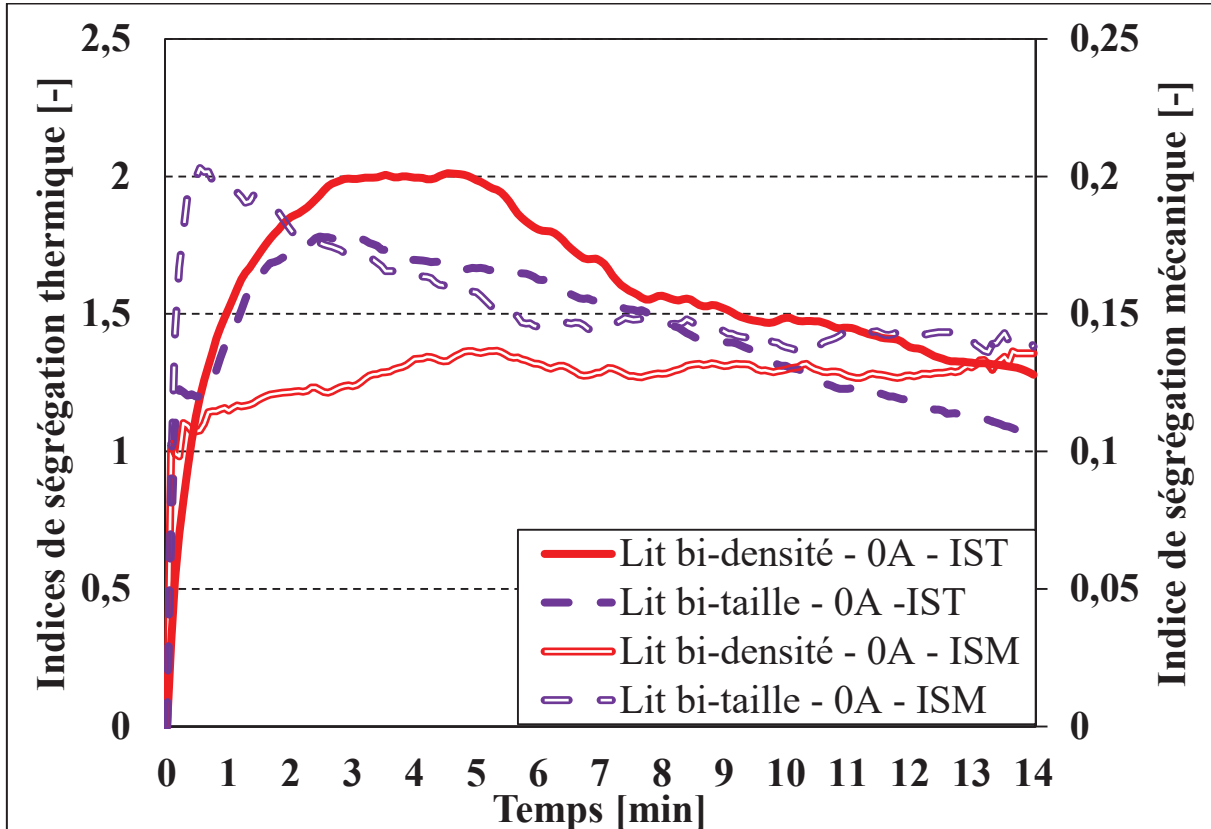


Figure 95 : Evolution des Indices de ségrégation thermique et mécanique pour les lits granulaires bi-densités et les lits bi-tailles avec une configuration de tambour sans ailettes (3 rpm)

Sur la figure 95, on constate tout d'abord que les valeurs des IST sont plus élevées pour le lit bi-densités que pour le lit bi-tailles ce qui signifie qu'il existe une plus grande hétérogénéité de température dans le lit bi-densité malgré une ségrégation mécanique moindre. Par contre, avec la configuration du lit bi-taille, la ségrégation mécanique, très marquée, ne semble pas corrélée avec l'hétérogénéité thermique du lit.

De plus, avec le lit bi-tailles, les valeurs des indices de ségrégation mécanique (ISM) augmentent fortement durant la première période tandis que les valeurs de l'ISM pour lit bi-densité atteignent leur valeur stationnaire de plateau beaucoup plus lentement, sans passer par un maximum. De plus, les valeurs de l'ISM avec le lit bi-tailles diminuent lentement pour rejoindre sensiblement les valeurs du plateau observé avec le lit bi-densité. On observe également que le maximum du profil de l'indice de ségrégation thermique, IST, avec le lit bi-taille est décalé d'environ 2 min par rapport au maximum du profil de l'indice de ségrégation mécanique, ISM, dans cette même configuration.

L'influence des ailettes sur les ségrégations mécaniques et thermiques sera abordée plus en détail dans la partie suivante (Résultats et discussion, III) en comparant les résultats obtenus avec différentes géométries de tambour avec un même lit donné.

### b. Températures moyennes du lit

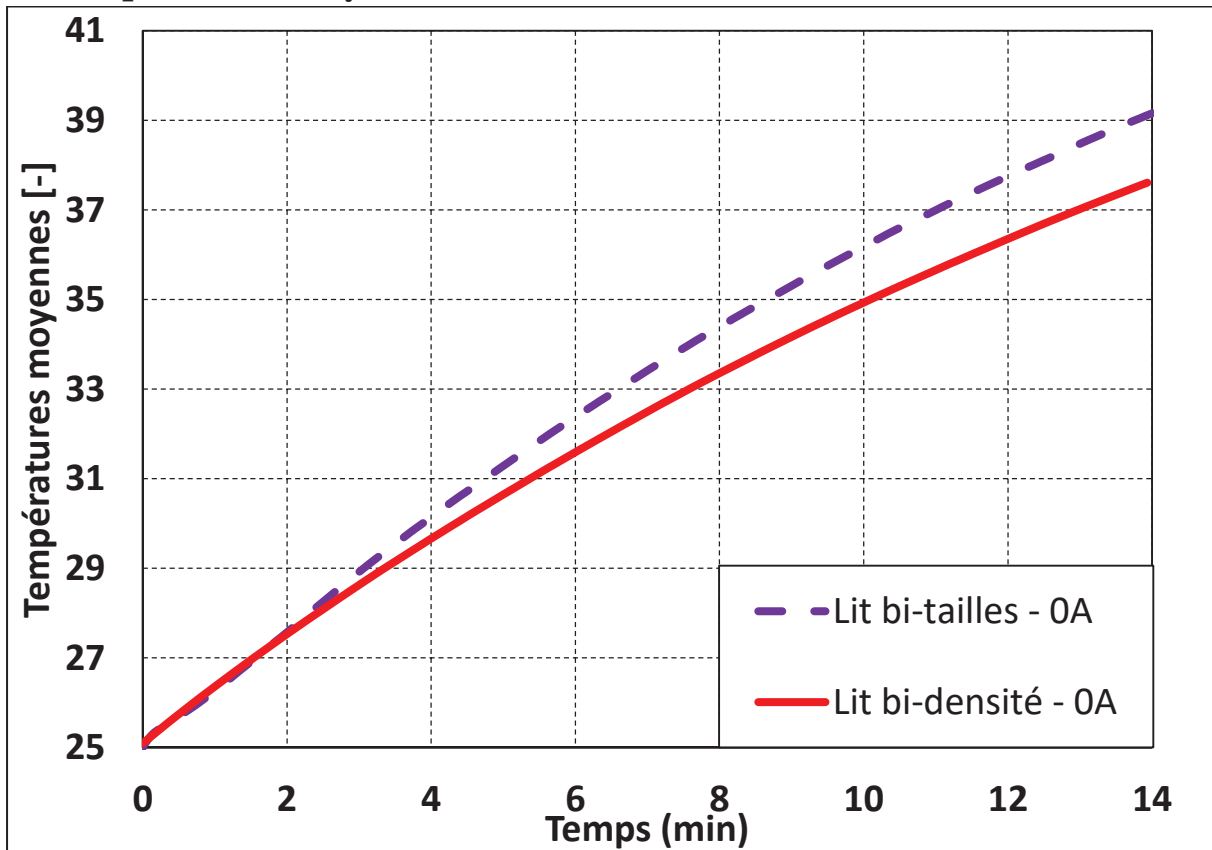


Figure 96 : Profils de températures moyennes au sein des lits bi-densités et bi-tailles avec une configuration de tambour sans ailettes (3 rpm)

Comme avec toutes les autres configurations, on observe sur la figure 96, que le lit bi-tailles présente une vitesse de chauffage un peu plus élevée que le lit bi-densités. Cependant, dans cette configuration, cette même figure montre que les deux profils de température moyenne se chevauchent durant les 2 premières minutes puis l'écart reste relativement faible pour atteindre 1,5°C au bout de 14 minutes Ce qui signifie que l'absence d'ailettes permet de diminuer les différences de vitesse de chauffage entre les lit bi-tailles et les lits bi-densités.

### III. Comparaison des indices de ségrégation entre tambours avec différentes configurations géométriques d'ailettes

Dans cette partie nous allons comparer l'effet des différentes configurations d'ailettes sur les indices de ségrégation et les températures moyennes pour les deux types de lit étudiés à savoir, le lit bi-taille et le lit bi-densité.

#### A) Lit bi-tailles

Le lit bi-tailles a été étudié avec 3 configurations géométriques d'ailette, à savoir :

- Tambour sans ailettes
- Tambour avec 8 grandes ailettes
- Tambour avec 4 petites ailettes (chauffées et non chauffées)

##### a. Indices de ségrégation thermique

Les indices de ségrégation mécanique et thermique sont présentés sur la figure 97 ci-dessous :

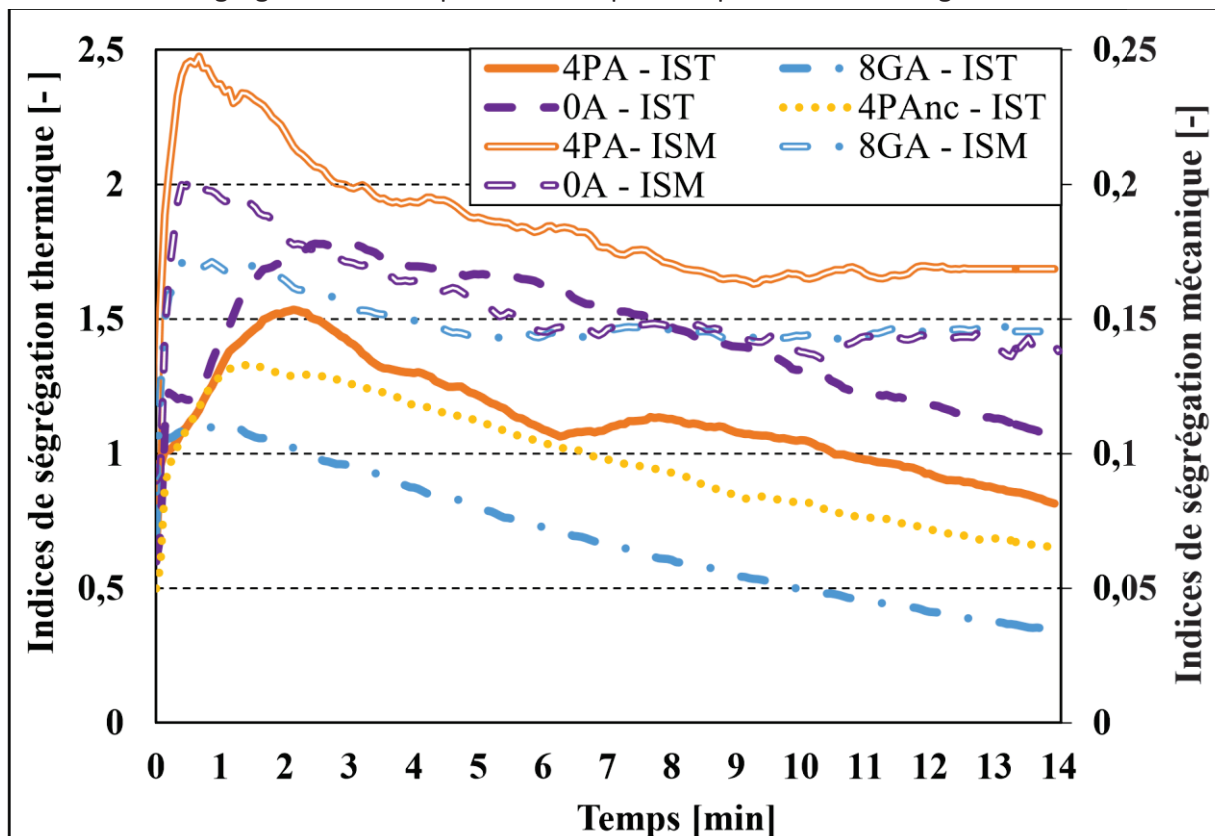


Figure 97 : Evolution des Indices de ségrégation mécanique et thermique avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes pour un lit granulaire bi-tailles (3 rpm)

Concernant les valeurs de l'indice de ségrégation mécanique (ISM) des lits bi-tailles, on observe sensiblement les mêmes types d'évolution de profils en fonction du temps, c'est-à-dire, une importante augmentation pendant la première minute puis une diminution relativement lente avant d'arriver à un plateau. Cette tendance est bien plus marquée avec une configuration

géométrique de tambour avec 4 petites ailettes qu'avec une configuration avec 8 grandes ailettes. De plus, il n'apparaît pas de valeurs d'ISM pour le lit 4 ailettes non chauffées car il est équivalent à la valeur de l'ISM du lit avec 4 ailettes chauffées.

Par ailleurs, cette même figure 97 montre que les valeurs de l'indice de ségrégation thermique (IST), atteignent un maximum durant les premières minutes puis ces valeurs diminuent lentement et linéairement, exception faite pour l'indice concernant la configuration avec 4 ailettes chauffées.

Tous ces profils d'évolution montrent deux périodes bien distinctes, à savoir :

- une première période durant les 3 premières minutes durant laquelle les profils d'évolution des valeurs des indices ISM et IST présentent des tendances similaires, c'est-à-dire qu'elles vont atteindre un maximum.

- une seconde période très différente durant laquelle les valeurs de l'indice de ségrégation mécanique (ISM) se stabilisent tandis que les valeurs de l'IST diminuent linéairement et régulièrement. Par conséquent, on peut en déduire que les phénomènes de ségrégation semblent bien corrélés durant la première période et possiblement décorrélés durant la seconde période. La première période correspondrait donc à une étape transitoire au cours de laquelle les particules se mettent en place tandis que la deuxième période correspondrait à une période plus stationnaire de stabilité au cours de laquelle les particules seraient déjà ségrégées avec des valeurs de l'indice de ségrégation mécanique constante au cours du temps. L'IST tend à atteindre 0 une fois que toutes les particules auront atteint la même température finale. L'ISM quant à lui devrait rester stable au cours du temps.

Plus la ségrégation mécanique est prononcée, plus la valeur maximum de l'IST sera décalée dans le temps, le décalage des maximas des deux courbes d'évolution des deux indices étant plus important avec le lit sans ailettes (Ref OA) qu'avec le lit avec 8 grandes ailettes (Ref. 8GA).

Concernant les valeurs de l'indice de ségrégation thermique, IST, la figure 97 montre que les valeurs les plus faibles correspondent à la configuration géométrique avec 8 grandes ailettes qui présente la plus grande surface chauffante, ainsi que la ségrégation mécanique la plus faible de tous les autres lits, ces deux caractéristiques expliquent facilement l'effet favorable observé avec une configuration avec 8 grandes ailettes sur les valeurs de l'indice de ségrégation thermique. En effet de nombreuses et grandes ailettes aident à l'homogénéisation mécanique en brassant et en renouvelant le noyau central de particules, quant à l'homogénéisation thermique, l'aire des ailettes étant plus grande, plus de particules sont impactées par le transfert de chaleur. De plus le but de cette étude est de savoir si la ségrégation mécanique influe sur la ségrégation thermique, dans ce cas de 8 grandes ailettes les 2 ségrégations sont faibles, ce qui conforte notre théorie, cette configuration s'avère donc la plus efficace pour l'homogénéisation thermique et mécanique du lit.

Par ailleurs, concernant la ségrégation thermique, malgré une ségrégation mécanique faible, c'est la configuration sans ailettes (OA) qui donne les valeurs de l'IST les plus élevées, en raison de l'existence d'un noyau froid au sein du lit sans ailettes ainsi qu'une faible partie de tambour

chauffée, en effet comme il n'y a pas d'ailettes la surface de chauffage est diminuée par rapport aux autres configurations de tambour. De plus, malgré la faible ségrégation mécanique, le rôle des ailettes est de brasser et de renouveler les particules à la paroi, en l'absence de celle-ci un noyau se crée avec peu de renouvellement à la paroi chauffante.

Concernant la configuration avec 4 ailettes, nous avons vu précédemment, qu'il était normal que les ailettes chauffées augmentent la ségrégation thermique à cause d'un double chauffage de billes coincées entre les ailettes et la paroi chauffante. Pour conclure sur les tendances globales des IST, on voit que les valeurs des IST diminuent en augmentant le nombre et la longueur des ailettes.

Cependant, si l'on considère l'influence globale de la ségrégation mécanique sur la ségrégation thermique, il est difficile de dégager des conclusions générales. La configuration géométrique avec 4 ailettes conduit à des résultats particuliers avec des valeurs de l'indice de ségrégation mécanique ISM atteignant le plateau le plus élevé, mais avec des valeurs de l'IST plus faibles qu'avec la configuration sans ailettes. Pour la configuration géométrique avec 8 grandes ailettes, les valeurs de plateau de l'ISM observées sont les plus faibles de tous les lits étudiés, ce qui est plutôt logique lorsque l'on sait que plus les ailettes sont grandes et nombreuses, plus la ségrégation mécanique sera diminuée. Toutefois, en raison des résultats particuliers observés avec la configuration géométrique avec 4 petites ailettes, une corrélation directe entre le niveau des valeurs moyennes des indices ISM et le niveau des valeurs moyennes de IST ne peut pas être démontrée.

De plus, les valeurs d'IST de la configuration géométrique sans ailettes sont plus élevées qu'avec la configuration avec 4 petites ailettes non chauffées alors que ces deux configurations géométriques présentent la même surface de contact tandis que la ségrégation mécanique semble plus faible avec ailettes que sans ailette. Cela peut s'expliquer par la présence d'un noyau central dans la configuration géométrique sans ailette sans renouvellement de particules à la paroi, tandis que les petites ailettes jouent le rôle de mélangeur et renouvellent les particules à la paroi mais en forçant la ségrégation mécanique à se mettre en place. Le lit sans ailette va donc présenter de fortes ségrégations thermiques entre les parois chauffantes et le cœur froid, sans augmenter la ségrégation mécanique tandis que la configuration géométrique avec de petites ailettes non chauffées va accentuer la ségrégation mécanique en ramenant les grosses particules à la paroi mais en ayant la possibilité de renouveler les particules à la paroi et donc de diminuer la ségrégation thermique.

## b. Températures moyennes du lit

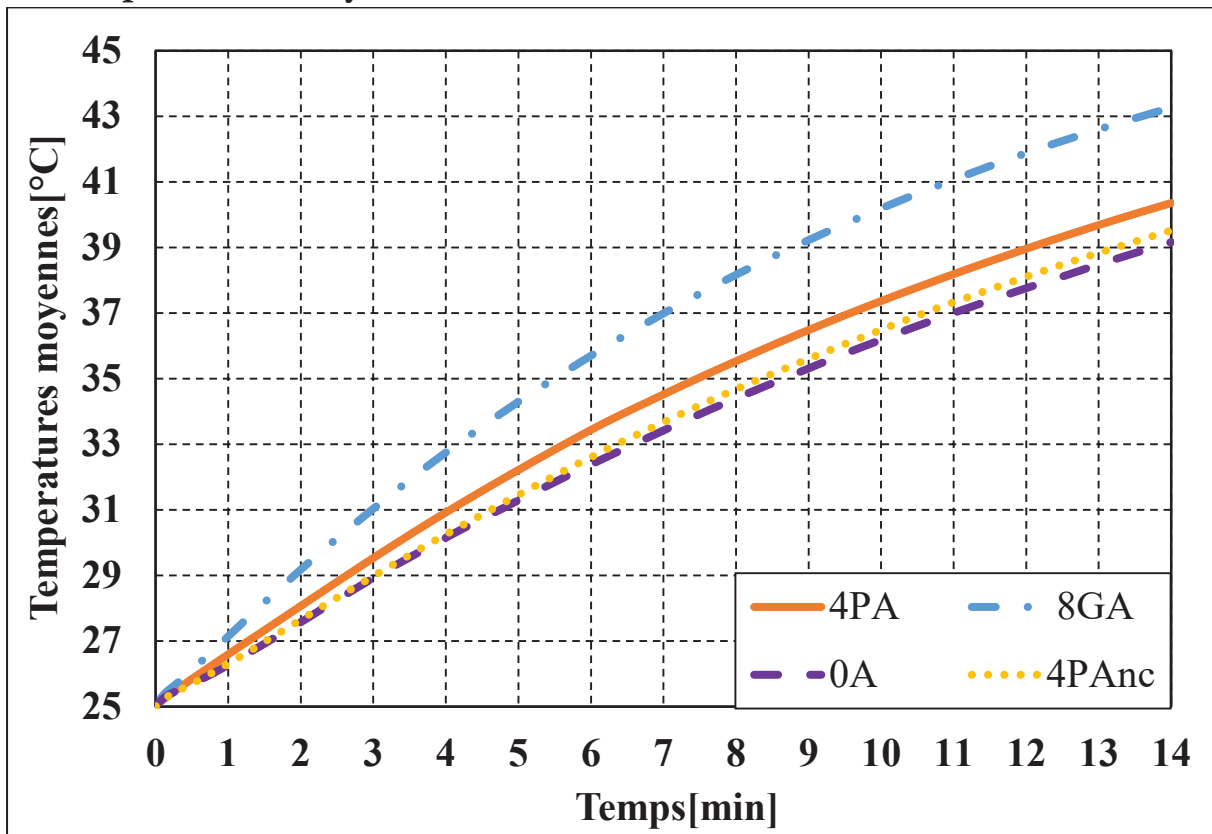


Figure 98 : Températures moyennes du lit granulaire bi-tailles avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes (3 rpm)

En ce qui concerne l'influence des ailettes sur les profils de températures moyennes du lit bi-taille, la vitesse de chauffage (tangente des courbes) augmente avec le nombre et la longueur des ailettes, la plus rapide correspondant à la configuration avec 8 grandes ailettes tandis que la plus faible correspond à la configuration géométrique sans ailettes. La vitesse de chauffage s'avère donc logiquement, proportionnelle à la surface chauffante totale du tambour (paroi périphérique et ailettes). Mais alors que la configuration avec 8 grandes ailettes présente une accélération de chauffage significative, la configuration de tambour avec 4 ailettes chauffées présente un impact plutôt modéré par rapport à la même configuration de tambour avec des ailettes non chauffées. En fait, même si la vitesse de chauffage est légèrement accélérée par de petites ailettes chauffées, l'impact des ailettes reste très faible. Alors que les profils de températures moyennes des configurations géométriques sans ailettes et avec 4 ailettes non chauffées sont très proches les uns des autres, la courbe de la configuration avec 4 ailettes non chauffées augmente légèrement plus vite dans les dernières minutes. En effet, les ailettes devraient légèrement remuer le cœur du lit et ainsi permettre de nouveau contact entre les particules et donc améliorer très légèrement le chauffage. En conclusion, on constate qu'une configuration géométrique avec de petites ailettes non chauffées n'a que très peu d'impact sur la vitesse de chauffage du lit granulaire.



### c. Indices de ségrégation thermique pour chaque type de particules

Les indices de ségrégations pour les billes de 2mm et les billes de 3 mm ont aussi été observés et comparées aux valeurs de l'IST du lit entier. Cela permet de savoir si une population sera plus sujette à la ségrégation thermique qu'une autre.

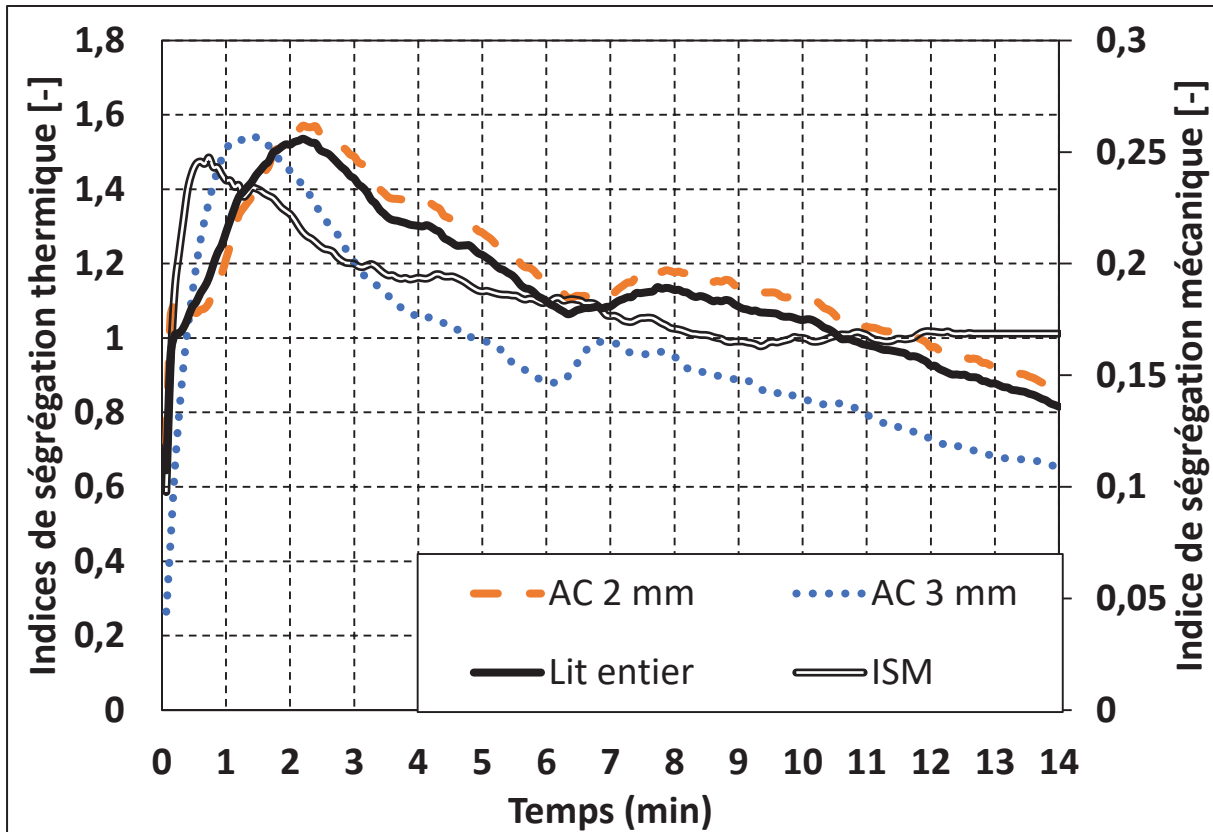


Figure 99 : Evolution des indices de ségrégation pour chaque type de population pour un lit granulaire bi-tailles avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm)

Les valeurs des indices de ségrégation thermique, IST, du lit entier et des petites particules sont très proches, en effet le lit est constitué principalement de petites particules en terme de nombre, cette population a donc un fort impact sur les valeurs d'IST du lit entier. Pour les 3 types d'IST étudiées, les valeurs présentent une augmentation rapide durant les 3 premières minutes jusqu'à atteindre un maximum. Puis on observe une diminution assez rapide, suivie d'une légère remontée (bosse) et enfin une décroissance plus lente et plus linéaire que lors de la période de descente. Les valeurs des indices de ségrégation mécanique, ISM, présentent sensiblement la même tendance, les maxima de valeurs d'IST, étant retardés par rapport aux maxima des ISM.

Si on regarde population par population, les billes de 3mm vont atteindre le maxima plus tôt que les particules de 2mm. Les maxima correspondent à la valeur de 1,57 pour chaque profil de ségrégation thermique. On constate qu'il existe donc la même hétérogénéité thermique avec chaque population de particules à un moment donné. De plus, les valeurs d'IST diminuent bien plus rapidement avec les billes de 3 mm que pour les billes de 2mm. En effet, les particules de 3 mm vont aller préférentiellement à la paroi en raison de la rotation du tambour (ségrégation mécanique et coefficient de frottement) et ces particules vont donc chauffer plus rapidement grâce à l'apport de chaleur de la paroi et grâce aux contacts avec les particules déjà chaudes. Il y

aura donc moins de différence de températures entre les billes de cette population. Par ailleurs, on constate que les particules de 2mm, présentent les valeurs des IST les plus élevées et par conséquent l'hétérogénéité la plus marquée. En effet, il existe un cœur froid de petites particules au sein du lit, tandis que d'autres petites particules vont se glisser dans les espaces laissés par les grosses particules et vont alors chauffer au contact avec la paroi ou des grosses particules plus chaudes ce qui va accentuer les disparités observées concernant les températures des petites particules.

#### d. Températures moyennes pour chaque type de particules

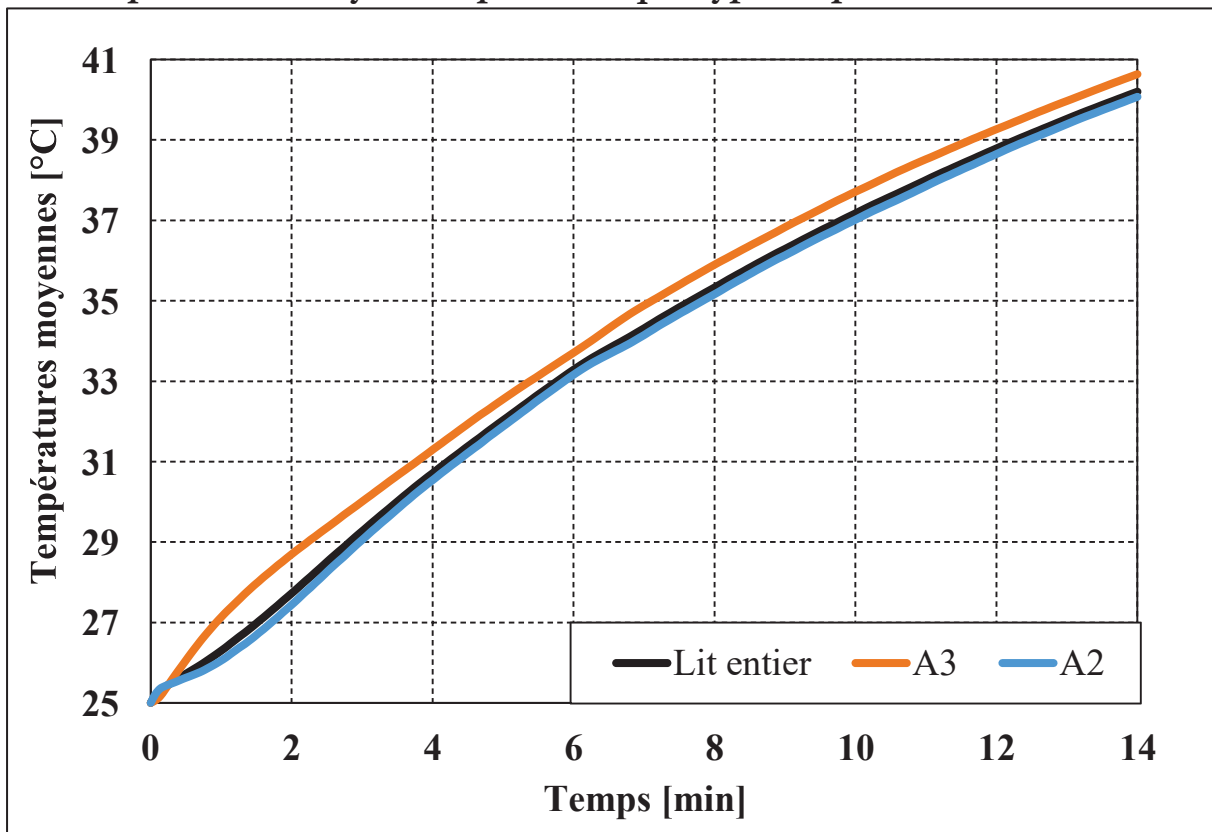


Figure 100 : Températures moyennes du lit granulaire bi-tailles en fonction de chaque type de simulation avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm)

Les profils de températures moyennes pour chaque type de particules sont très proches les uns des autres. Il est logique que les températures moyennes du lit entier soient proches de celles des petites particules car ce sont celles-ci qui constituent la majorité du lit granulaire. Les grosses particules sont celles qui présentent la vitesse de chauffage la plus élevée car ce sont celles qui se trouvent le plus au contact avec la paroi chauffante. Les petites particules, qui ont la possibilité de se glisser dans les espaces laissés par les grosses présentent la même vitesse de chauffage que les grosses particules. De plus, le lit bi-tailles, qui contient des particules denses, présente un tassement plus prononcé et beaucoup de points de contact ce qui favorise le chauffage de l'ensemble du lit granulaire.

## B) Lit bi-densités

Le lit bi-densités a été étudié avec 3 configurations géométriques, exactement comme le lit bi-tailles, à savoir :

- Tambour sans ailettes
- Tambour avec 8 grandes ailettes
- Tambour avec 4 petites ailettes (chauffées et non chauffées)

### a. Indices de ségrégation thermique

Les évolutions temporelles des indices de ségrégation mécanique et thermique sont présentées sur la Figure 101 ci-dessous :

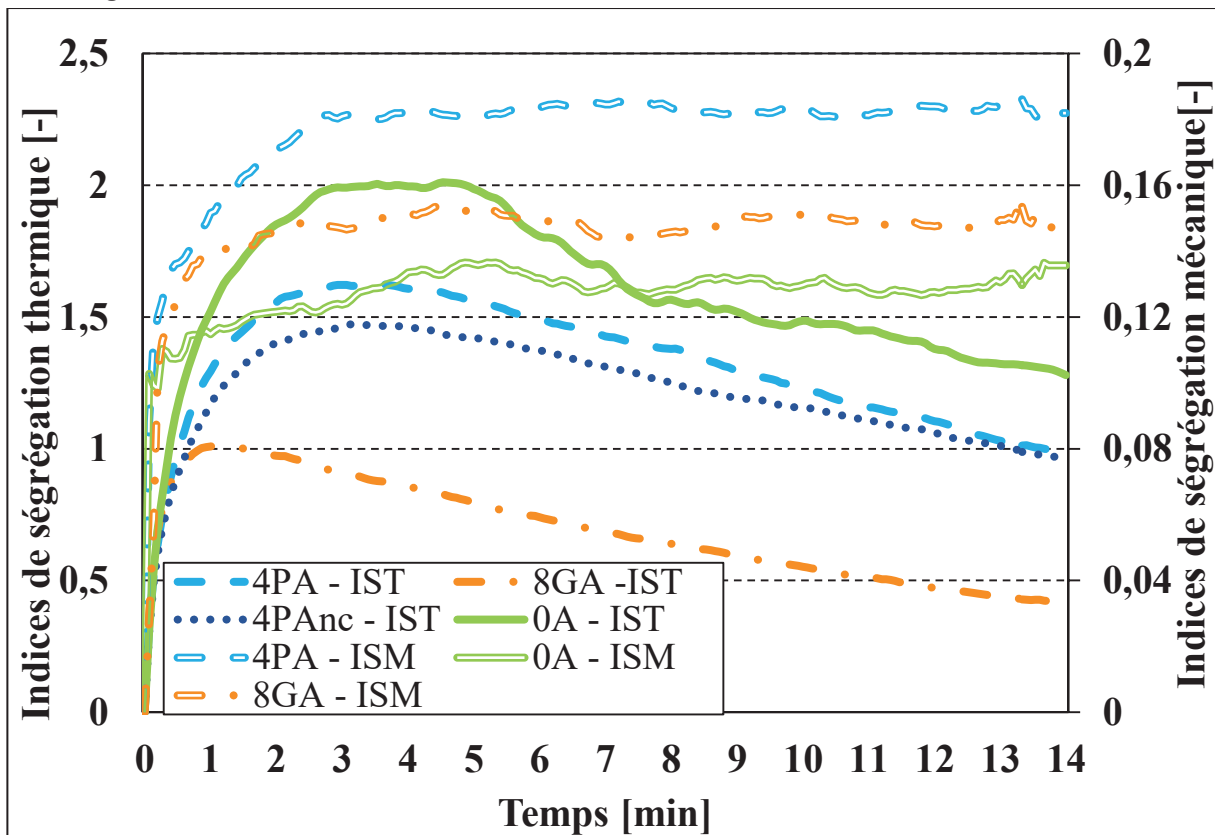


Figure 101 : Evolution des indices de ségrégation thermique et mécanique pour un lit bi-densités avec des tambours munis de différentes configurations d'ailettes (3 rpm)

Comme précédemment avec les lits bi-tailles, on observe sur ces courbes, pour les deux types d'indices de ségrégation, deux périodes qui sont :

- une montée rapide des deux types d'indice de ségrégation, thermique et mécanique,
- une seconde période avec un plateau pour la ségrégation mécanique (ISM) et une diminution quasi linéaire pour l'IST.

Contrairement aux lits granulaires bi-tailles, nous n'avons pas observé de maxima sur les courbes d'évolution des ISM ni, pour ce qui concerne la ségrégation thermique, de maxima aussi marqués que ceux observés avec le lit bi-tailles. De plus, les maxima des courbes de ségrégation

thermique sont atteints à peu près au même moment où les profils de ségrégation mécanique atteignent leur valeur plateau et non en décalage comme c'est le cas avec le lit granulaire bitailles. Les valeurs d'IST diminuent aussi très significativement avec l'augmentation du nombre ou de la longueur des ailettes. Par contre les courbes d'évolution des ISM s'avèrent plus compliquées à interpréter puisque, contrairement aux lits granulaires bi-tailles, l'ISM le plus faible correspond à la configuration de tambour sans ailette, puis on trouve les valeurs de la configuration de tambour avec 8 grandes ailettes et enfin la configuration avec 4 petites ailettes. On observe aussi que le mélange granulaire semble plus homogène mécaniquement avec la configuration sans ailette et que, bien que la surface chauffante soit la même que pour la configuration du tambour avec des petites ailettes non chauffées, cette deuxième configuration correspond à des valeurs de l'indice de ségrégation thermique IST plus faibles et donc à une meilleure homogénéisation thermique malgré une plus mauvaise homogénéisation mécanique.

On observe également que les valeurs des indices de ségrégation thermique sont proches au bout de 14 minutes dans la configuration de tambour avec 4 petites ailettes, chauffées et non chauffées, tout comme avec le lit granulaire bi-tailles, la configuration de tambour avec les ailettes chauffées doivent accentuer la ségrégation thermique. En effet comme pour le lit granulaire bi-tailles, les ailettes chauffées offrent un double chauffage aux particules coincés entre la paroi et les ailettes.

En conclusion, les configurations avec ailettes, même non chauffées, améliorent l'homogénéité thermique mais pas l'homogénéité mécanique mais aucune corrélation générale n'a été trouvée entre les valeurs moyennes des indices de ségrégation mécanique et thermique à l'exception d'une tendance générale avec les deux périodes comme décrit précédemment.

## b. Températures moyennes du lit

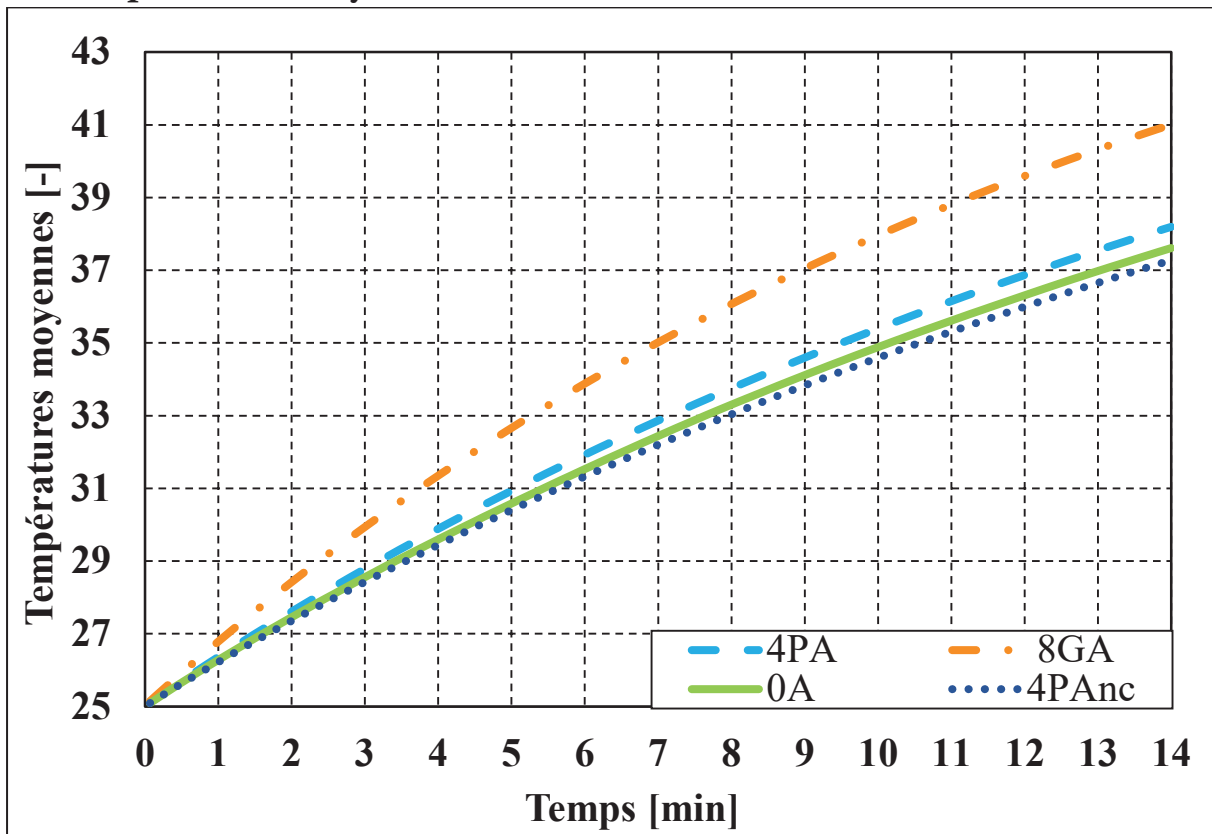


Figure 102 : Températures moyennes des lits granulaires bi-densités avec différentes configurations de tambour (3 rpm)

En ce qui concerne l'influence des ailettes sur les variations de températures moyennes du lit bidensité, la Figure 102 montre que la vitesse de chauffage – qui est donnée par la pente des profils de température moyenne en fonction du temps - augmente avec le nombre et la taille des ailettes comme pour les lits granulaires bi-tailles. La configuration de tambour avec 8 grandes ailettes conduit bien à la vitesse de chauffage la plus élevée tandis que toutes les autres configurations d'ailettes conduisent à des vitesses de chauffage nettement plus faibles. Il faut noter que la vitesse de chauffage avec une configuration de tambour avec 4 ailettes non chauffées est légèrement plus faible que celle observée avec la configuration de tambour sans ailette. Cela corrobore notre théorie selon lequel des petites ailettes améliore peu la vitesse de chauffage tandis que les mêmes ailettes non chauffées n'apportent quasiment rien au chauffage du lit.

### c. Indices de ségrégation thermique pour chaque type de particules

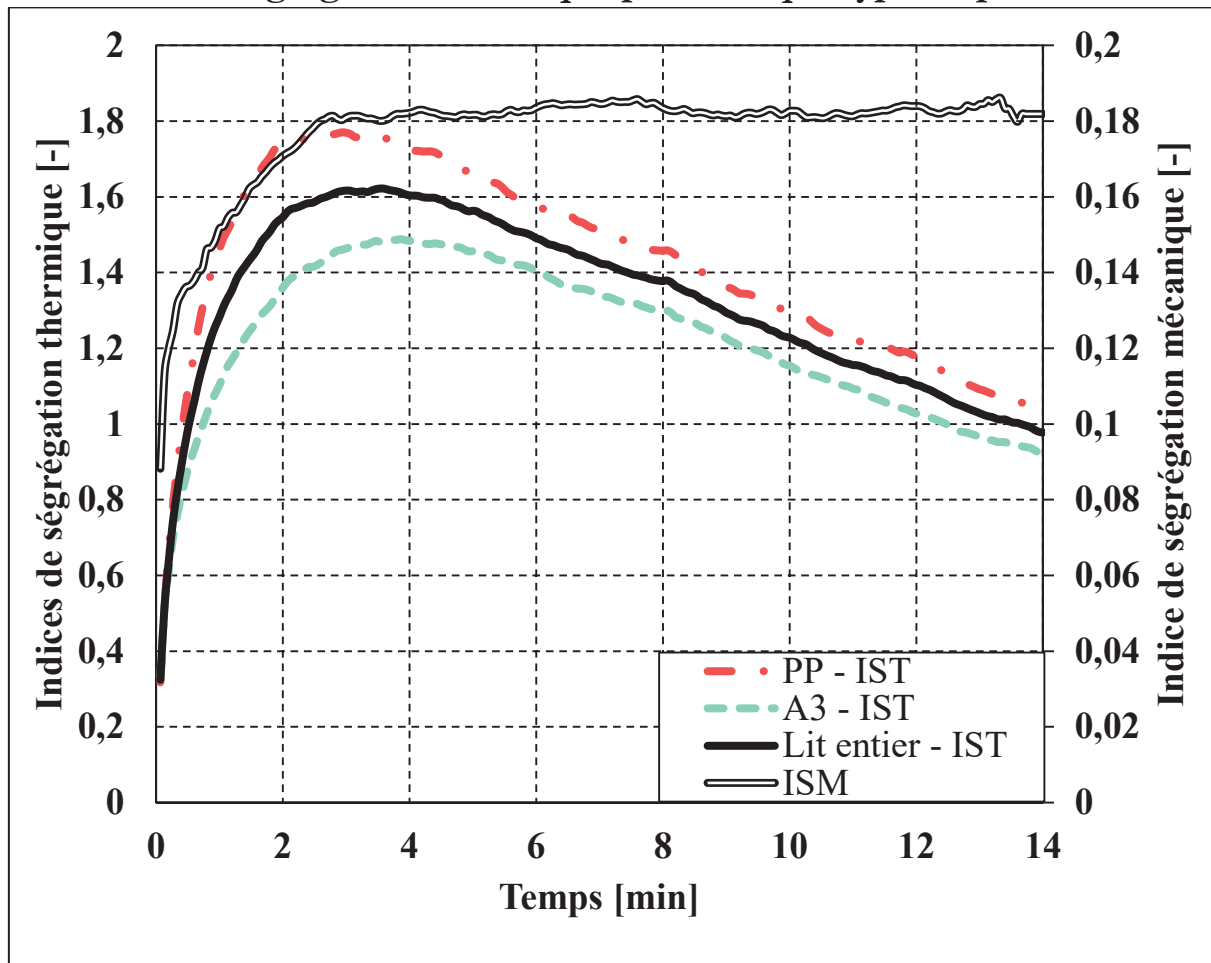


Figure 103 : Evolution des indices de ségrégation pour chaque type de population pour un lit granulaires bi-densités avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3 rpm)

Dans le lit bi-disperse en densités, toutes les particules ont le même diamètre de 3mm. Les évolutions dans le temps des valeurs des IST des particules sont donc bien plus proches qu'avec la configuration granulaire d'un lit bi-tailles. Les 3 courbes suivent la même tendance et les maxima, dans chaque cas, sont atteints au bout de 3 minutes. Le lit granulaire de particules de polypropylène présente les valeurs d'IST les plus élevées ; rappelons que nous avons vu précédemment que ces particules se trouvent rejetées vers la paroi périphérique chauffante, ce qui augmente très certainement leurs disparités thermiques, avec des particules très chaudes aux parois et des particules froides au cœur du tambour (le lit bi-densités a un cœur composé principalement d'AC mais aussi de PP en moindre proportion). Par contre, les particules d'acétate de cellulose sont celles qui se retrouvent principalement dans le cœur du tambour, qui est une zone plus froide, et peu de particules d'AC se retrouvent à la paroi, il y a donc moins de disparités thermiques.

Les 3 courbes d'évolution des valeurs d'IST, semblent bien corrélées aux courbes d'évolution des ISM avec une forte augmentation durant les 3 premières minutes, puis quand les valeurs de ISM atteignent leur plateau, les valeurs d'IST diminuent linéairement pour se rapprocher au bout de 14 minutes de ce qui correspond à une bonne homogénéisation thermique du lit.

#### d. Températures moyennes pour chaque type de particules

Les résultats des températures moyennes pour un lit bi-densités avec 4 petites ailettes sont présentés sur la Figure 104 :

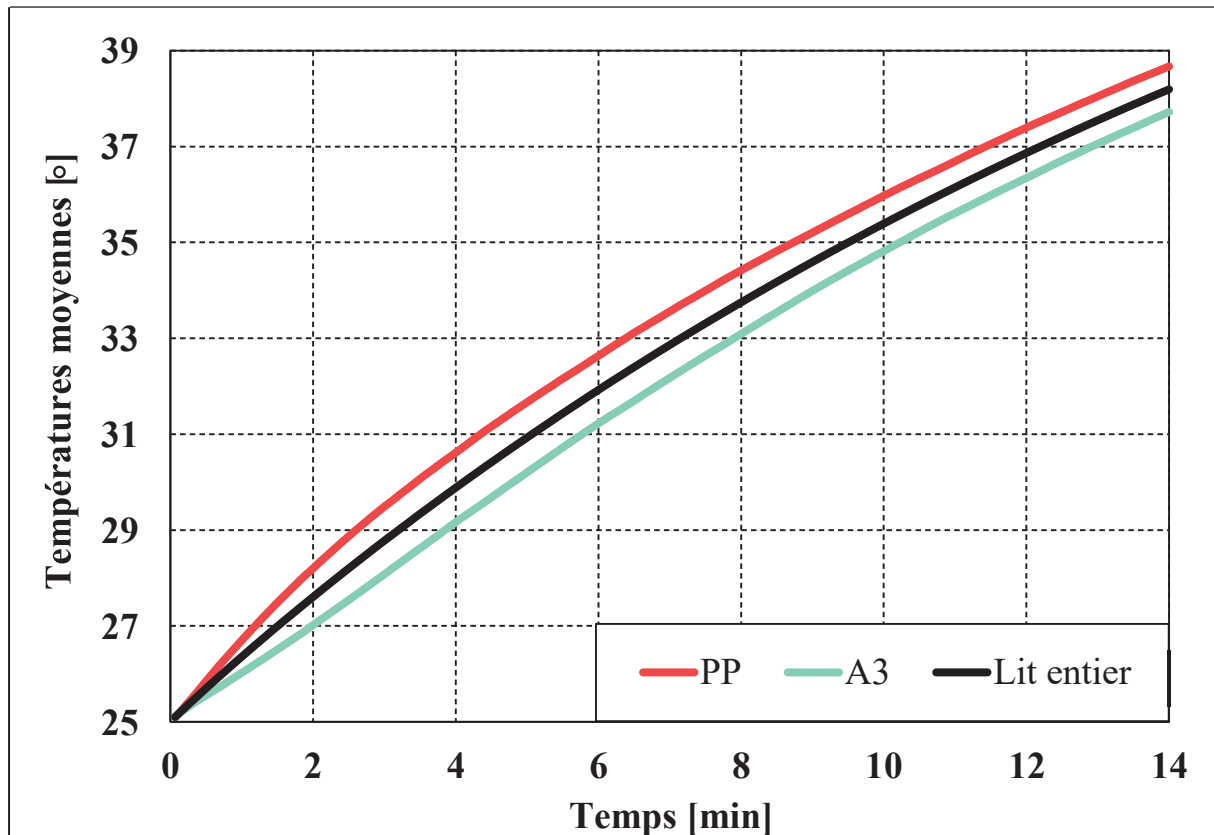


Figure 104 : Températures moyennes pour chaque type de particules dans le lit bi-densités avec un tambour muni de 4 petites ailettes (3rpm)

Les évolutions des profils de température moyenne du lit sont semblables. Les particules de polypropylène présentent la vitesse de chauffage la plus élevée ce qui est tout à fait cohérent avec le fait que ces particules se trouvent rejetées dans une zone proche de la paroi périphérique chauffée. Par conséquent les particules d'AC, qui constituent le cœur du lit granulaire, sont donc plus les plus froides. On remarque qu'au bout de 2 minutes, l'écart entre les courbes de température moyennes s'accroît pour diminuer à partir de 10 minutes, cela s'explique par le fait que la ségrégation mécanique se met en place très rapidement, chauffant donc rapidement les particules d'AC tandis qu'au bout de 10 minutes, il y a eu un bon renouvellement à la paroi et les particules chaudes ont pu transférer leur chaleur à d'autres particules, réduisant ainsi les écarts de chaleur et diminuant la ségrégation thermique. Malgré cela, la différence de vitesse de chauffage est très faible, en effet au bout de 14 minutes, il y a moins de 2°C en moyenne d'écart entre les particules de PP et d'AC.

## CONCLUSION

---

Dans cette deuxième partie du travail, le chauffage des billes par contact avec la paroi périphérique du tambour a été considéré. L'analyse a été basée uniquement sur des simulations numériques, sans expériences spécifiques. Les simulations du chauffage ont été réalisées avec le même code commercial EDEM que les simulations du mélange de la première partie, en utilisant un module du logiciel additionnel. Le transfert thermique entre les billes et avec la paroi chauffante était supposé par conduction pure lors du contact mécanique direct. Ce modèle assez imparfait ne permettait pas de prétendre de quantifier correctement les échanges thermiques au sein du lit mais a permis de saisir cependant les tendances qualitatives de l'évolution des températures des billes au cours du temps, selon la géométrie du tambour.

A partir des évolutions individuelles de température de chaque bille, un indice de ségrégation thermique global (s'apparentant à l'écart-type des températures des billes) et la température globale du lit entier ont été calculés pour un lit mono disperse, un lit à dispersion gaussienne, un lit bi-tailles et un lit bi-densités composés des mêmes billes que pour la partie 1. Différentes configurations d'ailettes : sans ailettes, avec 4 ailettes courtes et avec 8 ailettes longues, chauffées ou non chauffées, ont également été étudiées. Les évolutions de l'indice de ségrégation thermique ont été comparées à celles de l'indice de ségrégation mécanique pour la même configuration géométrique afin d'explorer le lien éventuel entre les deux.

La ségrégation thermique s'est en général avérée plus prononcée pour les lits bi-disperses que pour le lit mono-disperse et le lit gaussien et donc elle est effectivement apparue accentuée par la ségrégation mécanique. L'indice de ségrégation thermique était particulièrement élevé pour le lit bi-densités. Cependant l'évolution de la ségrégation thermique n'a pas suivi exactement la tendance de la ségrégation mécanique. Par exemple, l'augmentation significative de l'indice de ségrégation mécanique lors du passage d'un tambour sans ailettes à un tambour avec ailettes courtes n'a pas été observée sur les courbes de l'indice de ségrégation thermique. Globalement, aucune relation de proportionnalité directe entre le niveau moyen de l'indice mécanique et le niveau moyen des de l'indice thermique n'a été démontrée.

La vitesse de chauffage global du lit granulaire était beaucoup plus élevée pour le lit bi-tailles que pour les autres lits. Les profils de température globale des lits bi-densités et gaussiens se sont avérés très proches l'un de l'autre. Les tendances obtenues ont pu être expliquées en considérant la densité apparente du lit (et donc la conductivité thermique effective du lit) et le nombre des contacts par unité de temps entre les billes. Plus le lit était dense et plus il y avait des contacts, plus la cinétique thermique devenait rapide comme dans le cas du lit bi-tailles où les petites billes remplissaient efficacement les espaces entre les grandes. La configuration des ailettes a exercé une influence importante sur l'évolution thermique du lit. Le niveau de ségrégation thermique a diminué lorsque le nombre et la longueur des ailettes ont été augmentés et ceci de manière tout à fait proportionnelle à l'aire de surface totale des ailettes. Cependant, la vitesse de chauffage n'a pas été directement proportionnelle à l'aire des ailettes et n'a été sensiblement améliorée qu'avec les ailettes les plus longues. Les ailettes courtes et non chauffées n'ont eu pratiquement aucun effet sur la cinétique de chauffage du lit.



# Conclusion générale

---

## Bilan des travaux

---

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'un partenariat industriel avec la société Sanofi Pasteur pour contribuer à la caractérisation et à la modélisation d'un procédé discontinu de séchage de microsphères congelées par sublimation-désorption en tambour tournant. Les lits particuliers réels sont en général imparfaitement mono-disperse ce qui peut conduire à une répartition non homogène des particules selon leurs tailles ou densités (ségrégation mécanique). Le séchage implique le chauffage par contact du lit particulier par la paroi latérale du tambour (et donc sur sa périphérie) ce qui conjugué à la ségrégation mécanique peut induire le passage préférentiel d'un certain type de billes sur la paroi chauffante et des écarts de température importants entre les billes (ségrégation thermique). Le but général de l'étude était de déterminer quelles seraient les configurations géométriques (dimensions du tambour et des ailettes) permettant d'éviter ou réduire l'hétérogénéité du lit due à la ségrégation.

Dans la première partie de ce travail de thèse, le mélange des billes sphériques de taille millimétrique dans un tambour tournant cylindrique de type tranche à axe horizontal a été observé expérimentalement à l'aide des maquettes spécialement conçues pour cette étude et simulé numériquement à l'aide d'un code commercial de type DEM.

Les maquettes présentaient une face frontale en verre permettant de faire des photos et ainsi étudier la ségrégation radiale, ils possédaient aussi la possibilité d'enlever ou d'ajouter des ailettes de tailles différentes. Les essais expérimentaux ont été réalisés en modifiant le type de lit, bi-disperse en tailles ou bi-disperses en densités avec des billes d'acétate de cellulose de 2 et 3 mm ainsi que des billes de polypropylène de 2 mm et de densité plus faible que celle des billes citées précédemment. D'autres paramètres ont été étudiés comme le taux de remplissage, en restant toujours dans des taux de remplissage faibles (inférieur à 1/3), le nombre ou la hauteur des ailettes pour pouvoir observer l'influence de chacun de ces paramètres sur l'intensité de la ségrégation mécanique. Des traitements d'images des billes sur la face frontale du tambour ont été opérées pour extraire les grandeurs qui décrivent le comportement du mélange : l'indice de ségrégation radial, la fraction des billes ségrégées (plus petites ou plus denses), l'angle de talus dynamique.

Sur le plan numérique, un modèle simple de contact viscoélastique entre les billes a été adopté, avec prise en compte du frottement tangentiel, le modèle utilisé fut un modèle implanté dans le logiciel de DEM utilisé (EDEM) qui est le modèle de Hertz-Mindlin sans glissement à la paroi. Une étude préliminaire a permis d'étudier l'influence du coefficient de frottement particules/parois en le faisant varier et en le comparant à des essais expérimentaux, tandis que le coefficient particules/particules a été ajuster grâce aux essais expérimentaux d'angles de talus.

Les résultats des essais expérimentaux et des simulations pour le petit tambour ont pu être directement comparé d'une part qualitativement en utilisant des billes colorées prises en photographie lors des essais expérimentaux avec les images récupérées du logiciel EDEM, et d'autre part qualitativement en évaluant les indices de ségrégation, la fraction d'un type de

particules à la paroi ainsi que les angles de talus. En ajustant légèrement le coefficient de frottement, un accord satisfaisant a été obtenu entre le modèle et les essais expérimentaux. Les coefficients de frottement particules/parois se sont révélés très influents sur le mouvement des billes et sur la ségrégation.

Malgré le fait que les lits bi-disperses étaient étudiés en tambour de type « tranche » (2D), utilisés pour limiter la ségrégation axiale, les deux types de ségrégation, axiale et radiale, ont été observés. Il faut préciser que la ségrégation axiale a pu être mise en évidence uniquement grâce aux simulations DEM. Les lits bi-disperses en densités et bi-disperses en tailles se comportent différemment vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Le lit bi-disperse en tailles a présenté une ségrégation radiale nettement plus forte qu'axiale, avec la formation d'un noyau bien net de petites billes au centre du tambour. Le lit bi-disperse en densités a présenté un noyau central assez diffus de billes plus denses et a donné lieu à une ségrégation axiale marquée avec une accumulation des billes les moins denses aux parois avant et arrière. Les coefficients de frottement ont joué un rôle très important dans la ségrégation axiale. En effet, plus le coefficient de frottement était élevé, plus la ségrégation axiale a été marquée avec de grosses particules se regroupant aux parois frontale et arrière pour le lit bi-disperse en tailles.

Les durées de passage de chaque type de billes au contact de la paroi latérale (périphérique) ont aussi été déterminées. Le temps de contact des billes avec cette paroi est très important car c'est la paroi chauffante pour le traitement thermique. Pour le lit bi-disperse en tailles, les grosses billes sont passées préférentiellement et très majoritairement à la paroi périphérique par rapport aux petites ce qui était normal compte tenu de la ségrégation radiale. Cependant, un certain renouvellement de petites billes à la paroi périphérique a été observé.

L'analyse des indices de ségrégation a montré que la hauteur et le nombre des ailettes exercent une influence significative sur la ségrégation. En général plus les ailettes étaient longues et plus elles étaient nombreuses, moins la ségrégation était intense. Dans le cas du moyen tambour, une réduction très significative de l'indice de ségrégation a été obtenue pour les ailettes multiples et longues par rapport à configuration avec peu ou pas d'ailettes. Dans le cas du petit tambour et pour des ailettes courtes, le nombre d'ailettes n'a eu que très peu d'effet sur l'indice de ségrégation, quel que soit le taux de remplissage. Le dimensionnement des ailettes semble donc devoir être adapté à la taille et au remplissage du tambour, des ailettes trop courtes par rapport au diamètre du tambour risquent d'avoir une efficacité très limitée.

Le taux de remplissage a exercé aussi une forte influence sur la ségrégation : plus le taux de remplissage était faible, plus la ségrégation était réduite. Par contre, le diamètre du tambour semble n'avoir eu que peu d'influence sur l'intensité de la ségrégation au sein du lit. L'observation du lit dans le grand tambour a donné le même résultat que celle dans le petit et le moyen tambour, mais n'a été que qualitative. Les résultats expérimentaux pour le moyen-et le grand tambour n'ont pas été comparés à des simulations.

Dans la deuxième partie de ce travail de thèse, le chauffage des billes par contact avec la paroi périphérique du tambour a été simulé et l'évolution de la ségrégation thermique au sein du lit a été analysée. L'analyse de la ségrégation thermique a été basée uniquement sur des simulations numériques, sans expériences spécifiques. Les simulations thermiques ont été réalisées avec le

même logiciel commercial EDEM que lors de la première partie sur la ségrégation mécanique en utilisant un module numérique additionnel pour intégrer dans le calcul le contact thermique des billes avec la paroi chauffante. Le transfert thermique entre les billes et avec la paroi chauffante était supposé par conduction pure lors du contact mécanique direct, le rayonnement et la convection ont été considérés comme négligeables. Ce modèle, assez imparfait, ne permettait pas de prétendre de quantifier correctement les échanges thermiques au sein du lit mais a permis de saisir cependant les tendances qualitatives de l'évolution des températures des billes au cours du temps, selon la géométrie du tambour.

Quatre types lits ont été étudiés : un lit mono-disperse, composé de particules avec les propriétés d'acétate de cellulose de 3 mm qui a servi de référence, un lit à dispersion gaussienne composé de particules avec les propriétés d'acétate de cellulose qui devait représenter un lit réel, et enfin un lit bi-disperse en tailles et un lit bi-disperse en densités à l'image de ceux utilisés dans la partie précédente. Différentes configurations d'ailettes : sans ailettes, avec 4 ailettes courtes et avec 8 ailettes longues, chauffées ou non chauffées, ont également été considérées. Pour pouvoir comparer les résultats relatifs aux différents lits et aux différentes configurations d'ailettes, les images de la couche frontale du lit, l'indice de ségrégation thermique (écart type des températures des particules du lit) ainsi que la température globale du lit ont été utilisés. Les évolutions des indices de ségrégation mécanique et thermique ont été comparées aux indices de ségrégation mécanique pour les mêmes configurations d'ailettes ainsi que pour les mêmes types de lits afin d'explorer le lien éventuel entre les deux ségrégations.

La ségrégation thermique s'est en général avérée plus prononcée pour les lits bi-disperses que pour le lit mono-disperse et le lit gaussien et elle est donc effectivement apparue accentuée par la ségrégation mécanique. L'indice de ségrégation thermique était particulièrement élevé pour le lit bi-densités. L'augmentation de l'indice de ségrégation thermique était corrélée à la diminution du nombre et de la hauteur des ailettes et ceci de manière tout à fait proportionnelle à l'aire de surface totale des ailettes. Dans le cas des ailettes courtes, le fait qu'elles soient chauffées ou pas n'a pas eu d'impact sur l'indice de ségrégation thermique. En regardant séparément chaque type des billes, les indices de ségrégation spécifiques à un type de billes les plus bas correspondaient aux billes les plus grosses et les plus denses.

Les courbes des indices de ségrégation mécanique et thermique en fonction du temps présentaient clairement deux phases. Une première phase où les deux indices augmentaient fortement durant 1 à 4 minutes pour atteindre un maximum ou un plateau, et une deuxième où l'indice de ségrégation mécanique restait constant sur son plateau, tandis que l'indice de ségrégation thermique diminuait linéairement. La phase de montée peut être expliquée par la redistribution mécanique des billes accompagnées par l'apparition des gradients thermiques au sein du lit due à l'écart de température entre le lit et la paroi chauffante. La deuxième phase est celle où la ségrégation mécanique est déjà achevée et où grâce aux échanges thermiques entre les billes les gradients thermiques s'estompent et les billes tendent toutes vers la même température finale qui est celle de la paroi chaude.

Il est important de souligner que l'évolution de la ségrégation thermique n'a pas suivi exactement la tendance de la ségrégation mécanique. Par exemple, l'augmentation significative

de l'indice de ségrégation mécanique lors du passage d'un tambour sans ailettes à un tambour avec ailettes courtes n'a pas été observée sur les courbes de l'indice de ségrégation thermique. Globalement, aucune relation de proportionnalité directe entre le niveau moyen de l'indice mécanique et le niveau moyen des de l'indice thermique n'a été démontrée. Au niveau des allures des courbes de l'intensité de ségrégation, le lien entre la mécanique et la thermique n'est observable que dans la phase de mise en régime mécanique.

La vitesse de chauffage global du lit granulaire était beaucoup plus élevée pour le lit bi-tailles que pour les autres lits. Les profils de température globale des lits bi-densités et gaussiens se sont avérés très proches l'un de l'autre. Les tendances obtenues ont pu être expliquées en considérant la densité apparente du lit (et donc la conductivité thermique effective du lit) et le nombre des contacts par unité de temps entre les billes. Plus le lit était dense et plus il y avait des contacts, plus la cinétique thermique devenait rapide comme dans le cas du lit bi-tailles où les petites billes remplissaient les espaces entre les grandes. Si l'on considère séparément chaque type de billes, les particules qui chauffaient le plus rapidement étaient naturellement les plus grosses et les moins denses car elles restaient proches de la paroi du fait de la ségrégation mécanique. La configuration des ailettes a exercé une influence importante sur l'évolution thermique du lit. Cependant, la vitesse de chauffage n'a pas été directement proportionnelle à l'aire des ailettes et n'a été sensiblement améliorée qu'avec les ailettes les plus longues. Les ailettes courtes et non chauffées n'ont eu pratiquement aucun effet sur la cinétique de chauffage du lit par rapport à un lit sans ailettes.

## Intérêt de l'étude

---

Comme décrit ci-dessous, cette étude a abouti à un nombre considérable des résultats d'expériences et de simulations dont l'analyse et l'interprétation pourraient probablement être encore davantage affinés. Néanmoins, les tendances dégagées pourront servir de guide dans le dimensionnement du tambour et des ailettes permettant de réduire les phénomènes de ségrégation. A la différence des études déjà publiées, elle a concerné différentes morphologies (types de dispersion) du lit particulière et a été réalisée avec un nombre très important de petites particules. L'intérêt scientifique majeur de l'étude devait être la mise en évidence de la relation entre la ségrégation mécanique et la ségrégation thermique au sein du lit. Un lien a été observé, mais il s'est avéré moins évident et moins direct que supposé au démarrage de cette étude. Malgré cela, cette étude apporte une contribution scientifique importante en ce qui concerne le couplage du mélange rotatif avec le chauffage par contact du solide divisé. Elle répond aussi à des forts enjeux économiques qui sont le développement de nouvelles technologies de séchage par contact plus productives, plus efficaces énergétiquement mais aussi plus respectueuses du produit pour des produits granulaires rencontrés dans différents secteurs industriels (alimentation, pharmacie, bâtiment, etc.).

## Perspectives de l'étude

---

La suite à court terme de la partie 1 de ce travail de thèse serait la réalisation des essais systématiques avec le grand tambour, avec différentes tailles d'ailettes, et en déterminant les caractéristiques globales quantitatives, notamment l'indice de ségrégation. Ensuite, à plus long terme, une étude expérimentale du mélange dans un tambour beaucoup plus profond (selon l'axe) pourrait être envisagée, avec des nouvelles maquettes. Cette configuration correspondrait plus à la réalité du procédé et permettrait de cerner la distribution radiale et axiale des billes. Cependant la prise d'échantillon selon l'axe et sur plusieurs positions radiales pour chaque position axiale est délicate à réaliser et la construction des nouvelles maquettes nécessiterait plus d'effort que celle des maquettes type 'tranche'. Sur le plan numérique, pour rendre le modèle mécanique DEM plus prédictif, les coefficients de restitution lors du choc frontal entre deux billes et de frottement tangentiel entre deux billes pourraient être mesurés plutôt qu'identifiés (ajustés). Cela implique des montages expérimentaux additionnels, dont certains sont déjà décrits dans la littérature.

En ce qui concerne les perspectives pour la partie 2 de ce travail, il est important de rappeler d'abord la réserve sur l'exactitude des valeurs simulées des températures. Les simulations thermiques de cette étude ont servi à comparer différents cas et ont permis à mettre en évidence des tendances générales concernant l'homogénéité de température au sein du lit. Elles n'ont pas forcément une valeur en soi sur le plan quantitatif car notre modèle n'a pas été validé et la valeur des certains paramètres a été modifiée pour diminuer la durée des simulations. Les très longs temps des simulations, jusqu'à une semaine de calcul pour

représenter un quart d'heure de procédé dans les cas considérés dans cette étude, présentent d'ailleurs une forte contrainte pour l'application de la méthode DEM.

La poursuite de cette partie 2 passera donc nécessairement par la validation et l'identification du modèle thermique DEM. Des expériences de chauffage sur un séchoir pilote devront être réalisées et sont en fait déjà programmées chez un partenaire industriel avec comme produit des billes de cellulose microcristalline sèches de taille submillimétrique. Les cinétiques thermiques simulées et expérimentales dans les mêmes conditions seront comparées et les conductances bille-bille et bille-paroi éventuellement ajustées. Ensuite, il sera possible d'aller plus loin dans la modélisation et la simulation en abordant le procédé de séchage rotatif par contact. La modélisation du séchage, comme déjà signalé dans le manuscrit, implique d'inclure les étapes de vaporisation et de désorption de l'eau contenue dans des billes initialement humides. Il ne s'agit pas seulement d'une modification du bilan thermique d'une bille mais de l'ajout d'un bilan hydrique de la bille et donc l'ajout d'une nouvelle variable d'état dépendante du modèle qui est la teneur en eau de la bille. Au niveau du code de calcul, ça implique non seulement la modification des routines existantes mais l'implémentation d'une nouvelle variable et la gestion de cette variable entre le code principal et les routines spécifiques. Ceci ne sera peut-être pas facilement possible avec un code commercial même si le code EDEM est en partie ouvert. Par ailleurs, la variation de la teneur en eau des billes peut induire une variation notable des coefficients de frottement et d'échange thermique entre les billes. Il faudra donc essayer d'estimer l'ampleur de ce phénomène, et le cas échéant en tenir compte dans la modélisation.

# Références

---

- [1] Hohner D., Wirtz S., Scherer V., "A study on the influence of particle shape and shape approximation on particle mechanics in a rotating drum using discrete element method"; *Powder technology*, vol 253, pp 256-265, 2014.
- [2] Figueroa I., Watson L., Vargas J., McCarthy J., "Mixing and heat conduction in rotating tumblers"; *Chemical Engineering Science*, vol 65, pp 1045–1054, 2010.
- [3] Henein H., Brimacombe J.K., Watkinson A.P., "The modelling of transverse solids motion in rotary kilns"; *Metallurgical Transactions B*, vol 14, pp 207-220, 1983.
- [4] Mellmann J., "The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior"; *Powder technology*, vol 118, pp 251-270, 2001.
- [5] Rajchenbach J., « Flow in powders : from discrete avalanches to continuous regime » ; *Physical Review Letters*, vol 65, no 18, pp 2221-2224, 1990.
- [6] Felix G., « Ecoulement de milieu granulaires en tambour tournant. Etude de quelques transitions de régime. Application à la ségrégation. » ; *Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine*, 2002.
- [7] Norouzi H.R., Zarghami R., Mostoufi N., "Insights into the granular flow in rotating drums"; *Chemical engineering research and design*, vol 102, pp 12–25, 2015.
- [8] Ding Y.L., Forster R., Seville J.P.K, Parker D.J., "Granular motion in rotating drums: bed turnover time and slumping-rolling transition"; *Powder technology*, vol 124, pp 18-27, 2002.
- [9] Bonamy D., « Phénomènes collectifs dans les matériaux granulaires, Ecoulements de surface et réarrangements internes dans des empilements modèles » ; *Thèse de doctorat de l'Université Paris XI-Orsay*, 2001.
- [10] Rao S.J., Bathia S.K., Khakhar D.V., "Axial transport of granular solids in rotating cylinders. Part 2: Experiments in a non-flow system"; *Powder technology*, vol 67, pp 153-162, 1991.
- [11] Elperin T., Vikhansky A., "Granular flow in a rotating cylindrical drum"; *Europhysics Letters*, vol 42, no 6, pp 619-623, 1998.
- [12] Makse H.A., "Continuous avalanche segregation of granular mixtures in thin rotating drums"; *Physical Review Letters*, vol 83, no 16, pp 3186-3189, 1999.
- [13] Alexander A., Shinbrot T., Muzzio F.J., "Scaling surface velocities in rotating cylinders as a function of vessel radius, rotation rate, and particle size"; *Powder technology*, vol 126, pp174190, 2002.
- [14] Boateng A.A., Barr P.V., "Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder"; *Journal of fluid Mechanics*, vol 330, pp 233-249, 1997.

- [15] Orpe A.V., Khakhar D.V., "Scaling relations for granular flow in quasi-two-dimensional rotating cylinders"; *Physical Review E*, vol 64, 031302, 2001.
- [16] Cui Z., Zhao Y., Chen Y., Liu X., Hua Z., Zhou C., Zheng J., "Transition of axial segregation patterns in a long rotating drum"; *Particuology*, vol 13, pp 128–133, 2014.
- [17] Cantelaube F., Bideau D., Roux S., "Kinetics of segregation of granular media in a twodimensional rotating drum"; *Powder technology*, vol 93, pp 1-11, 1997.
- [18] Dury C.M., Ristow G.H., "Radial segregation in a two-dimensional rotating drum"; *Journal de Physique I France*, vol 7, pp 737-745, 1997.
- [19] Vargas W.L., Hajra S.K., Shi S., McCarthy J.J., "Suppressing the segregation of granular mixtures in rotating tumblers"; *AIChE Journal*, vol 54, pp 3124-3132, 2008.
- [20] Bhattacharya T., Hajra S.K., McCarthy J.J., "A design heuristic for optimizing segregation avoidance practices in horizontal drum mixers"; *Powder technology*, vol 253 pp 107–115, 2014.
- [21] Das Gupta S., Khakhar D.V., Bhatia S.K., "Axial segregation of particles in a horizontal rotating cylinder", *Chemical engineering science* vol 46, pp 1513-1517, 1991.
- [22] Hill K.M., Caprihan A., Kakalios J., "Axial segregation of granular media rotated in a drum mixer: Pattern evolution"; *Physical review E*, vol 56, pp 4386-4393, 1997.
- [23] Khosropour R., Valachovic E., Lincoln B., "Flow and pattern formation in a binary mixture of rotating granular materials"; *Physical Review E*, vol 62, pp 807-812, 2000.
- [24] Tabata T., Masaki S., Hosokawa K., "A compression test to determine the coefficient of friction in forging P/M preforms"; *International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology*, vol 16, pp 149-157, 1980.
- [25] Nafsun A.I., Herz F., Specht E., Komossa H., Wirtz S., Scherer V., Liu X., « Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters »; *Chemical Engineering Science*, vol 160, pp 346-353, 2017.
- [26] Emady H.N., Anderson K.V., Borghard W.G., Muzzio F.J., Glasser B.J., Cuitino A., "Prediction of conductive heating time scales of particles in a rotary drum"; *Chemical Engineering Science*, vol 152, pp. 45–54, 2016.
- [27] Weigler F., "Diskrete Untersuchung des Aufheizverhaltens von Partikelschüttungen"; *phdthesis, genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-vonGuericke Universität Magdeburg*, 2012.
- [28] Sahni E.K., Chaudhuri B., "Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches"; *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 434, pp. 334–348, 2012.
- [29] Schlünder E.-U., Mollekopf N., "Vacuum contact drying of free flowing mechanically agitated particulate material"; *Chemical engineering and processing: Process Intensification* vol 18, pp. 93-111, 1984.



- [30] Kwapinska M., Saage G., Tsotsas E., "Continuous versus discrete modelling of heat transfer to agitated beds"; *Powder Technology*, vol. 181, pp. 331–342, 2008.
- [31] Feng Y.T., Han K., Li C.F., Owen D.R.J., "Discrete thermal element modelling of heat conduction in particle systems: basic formulations"; *Journal Computational Physics*, vol 227, pp. 5072-5089, 2008.
- [32] Chaudhuri B., Muzzio F.J., Tomassone M.S., "Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners"; *Powder Technology*, vol 198, pp. 6 – 15, 2010.
- [33] Komossa H., Wirtz S., Scherer V., Herz F., Specht E., "Heat transfer in indirect heated rotary drums filled with monodisperse spheres: Comparison of experiments with DEM simulations"; *Powder Technology*, vol 286, pp. 722–731, 2015.
- [34] Gui N., Fan J., "Numerical study of heat conduction of granular particles in rotating wavy drums"; *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 84, pp. 740–751, 2015.
- [35] Shi D., Vargas W.L., McCarthy J.J., "Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases"; *Chemical Engineering Science*, vol 63, pp. 4506–4516, 2008.
- [36] Nguyen V.D., "Modélisation par la méthode des éléments discrets des phénomènes thermomécaniques dans les interfaces de contact"; *Thèse de doctorat à l'Université de Picardie Jules Verne*, 2009.
- [37] Dintwa E., Tijssens E., Ramon H., "On the accuracy of the Hertz model to describe the normal contact of soft elastic spheres"; *Granular Matter*, vol. 10, pp. 209–221, 2008.
- [38] Deng J.X., Dehuan H., Wang S.X., "The Study of the Influence of Stress Relaxation on the Elastic Properties of Granular Materials and the Calibration of the Effective Media Model," *Chinese Journal of Geophysics*, vol. 54, pp. 240–253, 2013.
- [39] Tsotsas E., « Particle-particle heat transfer in thermal DEM: Three competing models and a new equation »; *International Journal of heat and mass transfer*, no 132, pp. 939-943, 2019.
- [40] Weigler F., Peglow M., Tsotsas E., "Discrete Investigation of Thermal Relaxation in Packed Beds"; *14<sup>th</sup> International heat transfer conference*, IHTC14-22200 pp. 241–246, Jan. 2010.
- [41] Vargas W.L., McCarthy J.J., "Stress effects on the conductivity of particulate beds," *Chemical Engineering Science*, vol 57, pp. 3119–3131, 2002.

# Annexes

---

## ANNEXE 1 : Méthode de calcul pour le comptage de particules pour les simulations

---

Pour toutes les simulations EDEM, un nombre prédéterminé de billes doit être préalablement saisi pour lancer les simulations. Pour s'approcher au plus près des conditions expérimentales, il a fallu calculer le nombre de billes contenues dans un volume connu et pouvoir en déduire la porosité externe d'un lit de ce type de billes.

Tout d'abord, il a fallu vérifier la masse moyenne d'une particule par une série de mesures pour différents nombres de billes et pour chaque type de billes.

Tableau 25 : Masse et densité unitaires moyennes des billes utilisées pour les expériences

Type de billes	AC 2mm	AC 3mm	PP 2mm	
Masse (mg)		5,21	17,81	3,70
Volume (mm <sup>3</sup> )		4,19	14,14	4,19
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )		1243	1260	883

Ensuite un volume de 250 mL a été rempli pour chaque type de particules puis pesé pour calculer le nombre moyen de billes correspondant à ce volume de référence :

$$\text{Nombre de billes} = \frac{\text{Masse de 250 mL de billes (mg)}}{\text{Masse moyenne d'une bille (mg)}} \quad (19)$$

Puis le volume réel de matière constituant les billes a été calculé pour estimer leur porosité externe :

$$\text{Volume réel des billes (cm}^3\text{)} = \text{Nombre de billes} * \text{Volume d'une bille (cm}^3\text{)} \quad (20)$$

$$\text{Porosité externe} = \frac{250 - \text{Volume réel des billes}}{250} \quad (21)$$

Tableau 26 : Porosité externe des particules

	AC 2mm	AC 3mm	PP 2mm
Porosité externe	0,368	0,374	0,385

Pour finir, il a fallu calculer le volume de billes à introduire dans le tambour en fonction des taux de remplissage et de la porosité du lit pour chaque type de billes. Les valeurs du nombre de billes nécessaire suivant les conditions de simulation sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 27 : Nombre de particules pour remplir le tambour

	Volume cible par type de billes (cm <sup>3</sup> )	AC 2mm	AC 3 mm	PP 2mm
1/4	370,5	55884	16388	54381
1/6	247,5	37332	10947	36328
1/8	185	27905	8183	27154

*NB : quand les 2 types de billes sont de même taille et introduits en volumes égaux dans le lit, le volume total rempli est exactement le double de la valeur donnée dans le tableau précédent. Par ex., un remplissage à 1/4 du tambour correspond à un volume total de lit de 741 cm<sup>3</sup>, comprenant pour moitié 370,5 cm<sup>3</sup> de billes de chacun des 2 matériaux choisis.*

Les concentrations volumiques sont différentes suivant le type de lit :

- pour le lit bi-disperse en tailles, la concentration volumique de billes de 2 mm est égale à 0,773
- pour le lit bi-disperse en densités, la concentration volumique des billes d'acétate de cellulose est de 0,506 à cause de la plus grande porosité externe.

## ANNEXE 2 : Calcul du nombre de billes nécessaires aux simulations

---

Volume du cylindre :

$$V_{cylindre} = \frac{\pi D^2}{4} \times h = 2,12 \cdot 10^{-3} m^3 \quad (22)$$

La porosité du lit a été prise égale à  $\phi = 0,36$

Donc le volume occupé par les billes est défini par l'équation suivante :

$$V_{occupé} = (1 - \phi) \frac{V_{cylindre}}{\text{Taux de remplissage}} \quad (23)$$

$V_{occupé} = 0,452 \cdot 10^{-3} m^3$  pour un remplissage de  $1/3$   $V_{occupé}$

$= 0,340 \cdot 10^{-3} m^3$  pour un remplissage de  $1/4$

Ainsi nous avons estimé le nombre de billes pour un taux de remplissage de  $1/3$  à l'aide des

$$N_{d=2} = \frac{V_{occ\text{billes}}}{2 \times V_{bille}} \simeq 53954 \quad N_{d=3} = \frac{V_{occ\text{billes}}}{2 \times V_{bille}} \simeq 15986$$

équations suivantes:

Et pour un remplissage de  $1/4$ , le nombre de particules équivaut à :

$$N_{d=2} = \frac{V_{occ\text{billes}}}{2 \times V_{bille}} \simeq 40585 \quad N_{d=3} = \frac{V_{occ\text{billes}}}{2 \times V_{bille}} \simeq 12025$$

## ANNEXE 3 : Etapes pour le calcul de l'indice de ségrégation $I_s$ à la paroi frontale à l'aide des codes Image J et Matlab

### 1- Sélection de l'image et suppression de la partie hors zone d'étude

La photo choisie est une image prise après 2 minutes de rotation, qui correspond au temps de simulation auquel la comparaison est faite. Le tambour a fait 6 tours en 2 minutes, ce qui est suffisant pour observer la ségrégation. Le choix de l'image est crucial car il faut une image claire et nette pour obtenir de bons résultats avec le logiciel Image J.

Ensuite il faut limiter l'image à la zone qui correspond à la zone du lit étudiée pour ne pas perturber les calculs ou les sélections de billes par le bruit de fond. Pour ce faire on délimite d'abord la zone à étudier puis on supprime tout ce qui est en dehors de cette zone.

(Fonction « Clear outside »).

### 2- Réglages de l'échelle

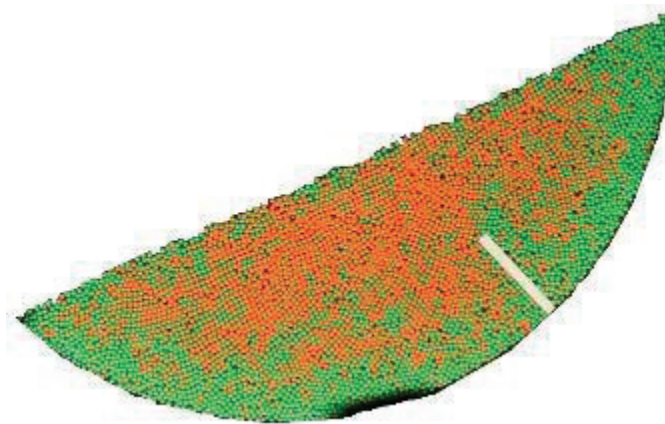


Figure 105 : Image de la première étape sous Image J "sélection et suppression de l'arrière-plan"

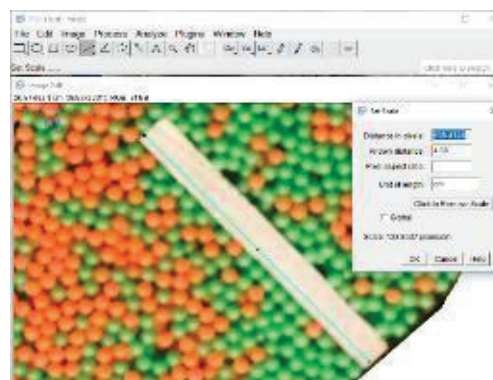


Figure 106 : Image de l'étape 2 sous Image J "réglages de l'échelle"

Il faut déterminer l'échelle de l'image à traiter pour connaître le nombre de pixels par centimètre et pouvoir faire les calculs ultérieurs. Il faut sélectionner un segment de droite entre deux points séparés par une distance connue, ici celle des ailettes qui ont une dimension bien définie (fonction « Straight line »). A partir de ce segment de droite dont le nombre de pixels est calculé par le logiciel, en entrant la dimension connue de nos ailettes, en cm, le logiciel calcule automatiquement l'échelle pixels/cm (fonction « Set Scale »).

### 3- Seuillage de l'image

Cette étape a pour but de faire apparaître certains détails ou de détacher un objet du fond de l'image. Elle permet de séparer les objets entre eux en fonction de leur couleur, ou les objets du bruit de fond. Le seuillage couleur (fonction « color threshold ») est appliqué et une couleur doit être choisie pour faire ressortir les billes correspondantes. Il faut ajuster la teinte et la luminosité pour rendre les billes bien distinctes. Cette étape n'est pas requise pour le lit bi-disperse en tailles.

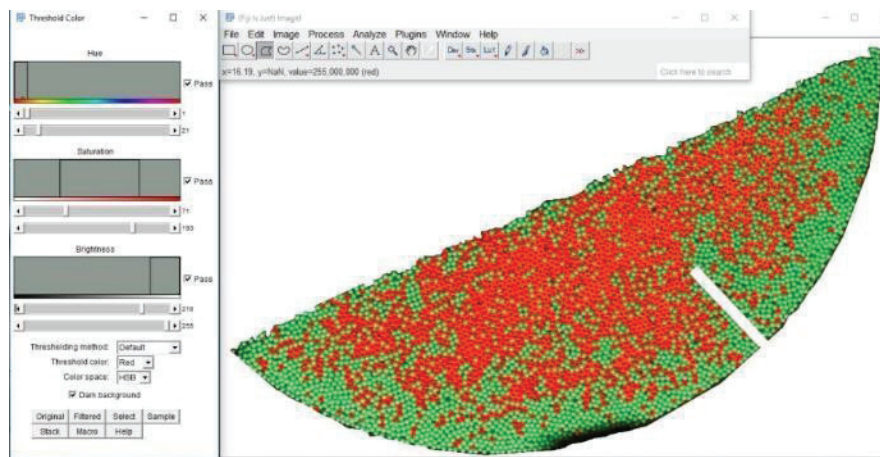


Figure 107 : Image de l'étape 3 sous Image J "seuillage de l'image »

### 4- Conversion en échelles de gris

Une fois qu'un type de particules a été mis en avant, il faut réduire la résolution de l'image en 8 bits (fonction « 8 bits »). En effet il y a plus de contraste dans une image de niveaux de gris. De ce fait la séparation des particules est plus facile et permet d'appliquer la fonction « Fill Holes » qui comble les trous que le logiciel a créés en seuillant puis « Watershed » qui sépare même les particules que le logiciel n'avait pas pu séparer par seuillage.

## 5- Comptage des particules

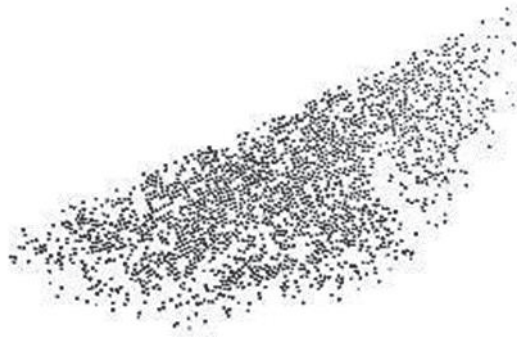


Figure 108 : Image de l'étape 4 sous Image J "conversion »

Afin de compter les billes, il faut fixer au logiciel un intervalle de tailles de billes cohérent avec la composition du lit. En dehors de la fourchette fixée, tous les éléments seront ignorés (fonction « Analyze particules »). Les informations que le logiciel extrait de l'image sont la taille et la position x et y du centre de chaque particule visible à la paroi. Les fourchettes de « taille » (en fait de surface déterminée après traitement de l'image), sont respectivement de 0.009-0.03cm<sup>2</sup> pour les billes oranges et vertes et de 0.001-0.006cm<sup>2</sup> pour les billes noires.

En effet, seuls les reflets du tube fluorescent qui est utilisé pour identifier les billes noires sont détectés ; ces reflets donnent une surface visible significativement plus petite que pour les autres billes identifiées grâce à leur surface de couleur.

## 6- Application du code Matlab

Le logiciel Image j ayant fourni la taille et la position de chaque bille, le logiciel Matlab permet de les classer dans un tableau avec le nombre de billes dans chaque maille de la grille (carré de 2cm par 2cm) comme dans les simulations, avec quelques commandes simples.



Figure 109 : Image de l'étape 5 sous image j "Comptage des particules"

```
Grille=zeros(10,15)
```

```
    for  
i=1:1170
```

```
Grille(floor((Yn(i)/2))+1,floor((Xn(i)/2))+1)=Grille((floor(Yn(i)/2))+1,floor((Xn(i)/2))+1)+1 end
```

*NB : une bille appartient à une maille quand son centre est situé dans la maille, quelle que soit la forme de la maille ou la taille de la bille.*

### 7 – Application de l'équation de définition de l'indice de ségrégation

2 tableaux sont obtenus, un pour chaque type de billes ; l'équation de définition de l'indice de ségrégation a été appliquée sur le tableau pour obtenir la valeur de l'indice de ségrégation de chaque lit.

$$I_s = \sqrt{\left[ \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (C_i^* - \bar{C})^2 \right]}; \quad C_i^* = \frac{N_i^*}{N_i} \quad (24)$$

*M*: Nombre de mailles de contrôle

*N<sub>i</sub>*: Nombre total de billes dans la maille *i*

*N<sub>i</sub><sup>\*</sup>*: Nombre d'un type de particules dans la maille *i*

$\bar{C}$ : Concentration d'un type de particules dans l'ensemble du lit

*C<sub>i</sub>*: Concentration d'un type de particules dans la maille *i*



## ANNEXE 4 : Routine du calcul de l'Is axiale

---

```
function [TIME,nbr_partic_d2,nbr_partic_totale,t_Is]=Read_Is_axiale()
filename1='nbr_d2_Is_axiale.txt'; filename2='nbr_totale_Is_axiale.txt';
Timeini='3.00001';
Number_Zones=10; Number_Times=21;
nbr_partic_d2=zeros(Number_Zones,Number_Times);
TIME=zeros(1,Number_Times);
A=textread(filename1,'%s','delimiter',' ');
n=0;
for Line=1:size(A,1)      if
strcmp(A{Line,1},Timeini)
break      end end for
t=1:Number_Times
    TIME(1,t)=str2num(A{Line+(t-1)*(Number_Zones+1),1});      for
p=1:Number_Zones      nbr_partic_d2(p,t)=str2num(A{Line+(t-
1)*(Number_Zones+1)+p,1});      end
nbr_partic_totale=zeros(Number_Zones,Number_Times);
B=textread(filename2,'%s','delimiter',' '); n=0;
for Line=1:size(B,1)      if
strcmp(B{Line,1},Timeini)
break      end end for
t=1:Number_Times
    TIME(1,t)=str2num(B{Line+(t-1)*(Number_Zones+1),1});      for
p=1:Number_Zones      nbr_partic_totale(p,t)=str2num(B{Line+(t-
1)*(Number_Zones+1)+p,1});      end end
%Code de calcul de Is pour 21 Itérations(3..5..7 un pas de 2)
t_Is=[]; for i=1:21      t_Is(i,1)=TIME(1,i);      t_Is(i,2)=0; end
for j=1:21      c_moyenne=0; for i=1:10      if nbr_partic_totale(i,j)>0
c_moyenne= c_moyenne+(nbr_partic_d2(i,j)/nbr_partic_totale(i,j));
end end
c_moyenne= c_moyenne/10; for i=1:10      if nbr_partic_totale(i,j)>0 t_Is(j,2)=
t_Is(j,2)+(((nbr_partic_d2(i,j)/nbr_partic_totale(i,j))-c_moyenne)^2);      end
end
t_Is(j,2)=sqrt((1/9)*t_Is(j,2));
end end
```

## ANNEXE 5 : Routine du calcul de du nombre de contact à la paroi

---

```
%changer le N dans la ligne 122 par le nombre de particules de la simulation
%pour executer le programme il faut taper la commande suivante
%:"[TIME,INDEX,RADIUS,X,Y,Z,particules_nbrfoissurlaparoil]=Read()"
function [TIME,INDEX,DIAMETRE,X,Y,Z,particules_nbrfoissurlaparoil]=Read()
%clear all
filename1='extraction_id_particules.txt';
filename2='extraction_diametres.txt';
filename3='extraction_position_x.txt';
filename4='extraction_position_y.txt';
filename5='extraction_position_z.txt';

A=textread(filename1,'%s','delimiter',' ');
TIME=[]; INDEX=cell(1,1); n=0;
flag_time=0; for
line=1:size(A,1)      if
strcmp(A{line,1},'TIME:')
n=n+1;
        INDEX{n,1}=[];
        TIME(n,1)=str2num(A{line+1,1});
flag_time=1;      elseif flag_time==1
flag_time=0;      continue
elseif strcmp(A{line,1}(1),'Q')
continue      elseif
strcmp(A{line,1}(1),'n')
continue      elseif n>0
        INDEX{n,1}=cat(1,INDEX{n,1},str2num(A{line,1}));
end end

B=textread(filename2,'%s','delimiter',' ');
DIAMETRE=cell(1,1); n=0;
flag_time=0; for
line=1:size(B,1)      if
strcmp(B{line,1},'TIME:')
n=n+1;
        DIAMETRE{n,1}=[];
flag_time=1;      elseif
flag_time==1
flag_time=0;
continue
        elseif strcmp(B{line,1}(1),'Q')
continue      elseif
strcmp(B{line,1}(1),'n')
continue      elseif n>0
        DIAMETRE{n,1}=cat(1,DIAMETRE{n,1},str2num(B{line,1}));
end
end

C=textread(filename3,'%s','delimiter',' ');
X=cell(1,1); n=0; flag_time=0; for
line=1:size(C,1)      if
strcmp(C{line,1},'TIME:')
n=n+1;      X{n,1}=[];
flag_time=1;      elseif
flag_time==1      flag_time=0;
continue      elseif
strcmp(C{line,1}(1),'Q')
continue      elseif
```

```

strcmp(C{line,1}(1),'n')
continue elseif n>0
    X{n,1}=cat(1,X{n,1},str2num(C{line,1}));
end end

D=textread(filename4,'%s','delimiter',' ');
Y=cell(1,1); n=0; flag_time=0; for
line=1:size(D,1) if
strcmp(D{line,1},'TIME:')
n=n+1; Y{n,1}=[];
flag_time=1; elseif
flag_time==1 flag_time=0;
continue elseif
strcmp(D{line,1}(1),'Q')
continue elseif
strcmp(D{line,1}(1),'n')
continue elseif n>0
    Y{n,1}=cat(1,Y{n,1},str2num(D{line,1}));
end end

E=textread(filename5,'%s','delimiter',' ');
Z=cell(1,1); n=0; flag_time=0; for
line=1:size(E,1) if
strcmp(E{line,1},'TIME:')
n=n+1; Z{n,1}=[];
flag_time=1; elseif
flag_time==1 flag_time=0;
continue elseif
strcmp(E{line,1}(1),'Q')
continue
elseif strcmp(E{line,1}(1),'n')
continue elseif n>0
    Z{n,1}=cat(1,Z{n,1},str2num(E{line,1}));
end end
%création du tableau contenant les id des particules et le nombre de fois sur la
%parois
particules_nbrfoissurlaparois=[]; for k=1:81514
particules_nbrfoissurlaparois(k,1)=k;
particules_nbrfoissurlaparois(k,2)=0; end % la boucle sur toutes les
iterations et dans toutes les zones selectives. for i=1:size(TIME,1)
x_c=X{i}; y_c=Y{i}; z_c=Z{i}; id_c=INDEX{i};
diametre_c=DIAMETRE{i};
% la boucle sur le nombre de particules maximum situé dans une seul zone.
for j=1:size(x_c,1)
% calcul de la distance entre le centre de chaque particule et le centre du tambour
d=sqrt(x_c(j)^2+y_c(j)^2+z_c(j)^2);
% condition sur chaque particule pour verifié si elle touche la paroi du tambour ou
non if d+(diametre_c(j)/2)>=150

particules_nbrfoissurlaparois(id_c(j),2)=particules_nbrfoissurlaparois(id_c(j),2)+1;
end end end
%filetest=['test.asc'];
%fid=fopen(filetest,'w');
%for line=1:size(C,1)
% fprintf(fid,'%s\n',C{line,1});
%end
%return

```

## Annexe 6 : Etude paramétrique

Tableau 28 : Etude paramétrique sur les paramètres les plus influents sur la vitesse de chauffage

Essai	Durée de calcul		temps simulé [s]	T max [°C]	K [w/(m.K)]	Cp [J/(kg.K)]	Coeff de Restiution	Time Step
1	30 min	CI	0	25	0,36	1900	0,5	3,58E-05
		CF	0,88	25,281				
2	30 min	CI	0	25	0,36	1900	0,5	8,95E-05
		CF	1,67	25,466				
3	30 min	CI	0	25	0,36	1900	0,3	8,95E-05
		CF	1,7	25,467				
4	30 min	CI	0	25	3	1900	0,5	3,58E-05
		CF	0,93	26,984				
5	30 min	CI	0	25	3	1900	0,5	8,95E-05
		CF	1,78	28,91				
6	30 min	CI	0	25	10	1900	0,3	8,95E-05
		CF	1,71	30,91				
7	30 min	CI	0	25	0,36	1200	0,3	8,95E-05
		CF	1,53	30,619				
8	30 min	CI	0	25	1	1200	0,3	8,95E-05
		CF	1,55	25,653				

CI : Conditions initiales

CF : Conditions finales

- L'essai N°1 (rouge) : Essai de référence.
- L'essai N°6 (orange) : Essai à plus grande valeur de conductivité thermique. -  
L'essai N°8 (vert) : Essai avec les paramètres retenus pour nos simulations.

## Annexe 7 : Code Matlab utilisé pour obtenir l'IS thermique

---

```
function [TIME,temp,temp2,temp3,Moyenne]=ReadBD() clear
all

filename1='StandPP.txt';
filename2=load('Tall.txt');
filename3='StandA3.txt';
filename4='StandAll.txt';

A=textread(filename1,'%s','delimiter',' ');
TIME=[]; temp=cell(1,1); n=0; flag_time=0;
for line=1:size(A,1)    if
strcmp(A{line,1},'TIME:')    n=n+1;
temp{n,1}=[];
    TIME(n,1)=str2num(A{line+1,1});
flag_time=1;    elseif flag_time==1
flag_time=0;    continue    elseif
strcmp(A{line,1}(1),'Q')    continue    elseif
strcmp(A{line,1}(1),'n')    continue    elseif
n>0
temp{n,1}=cat(1,temp{n,1},str2num(A{line,1}));
end end
    B=textread(filename3,'%s','delimiter',' ');
TIME=[]; temp2=cell(1,1); n=0; flag_time=0;
for line=1:size(B,1)    if
strcmp(B{line,1},'TIME:')    n=n+1;
temp2{n,1}=[];
    TIME(n,1)=str2num(B{line+1,1});
flag_time=1;    elseif flag_time==1
flag_time=0;    continue    elseif
strcmp(B{line,1}(1),'Q')    continue    elseif
strcmp(B{line,1}(1),'n')    continue    elseif
n>0
temp2{n,1}=cat(1,temp2{n,1},str2num(B{line,1}));
end
end
    C=textread(filename4,'%s','delimiter',' ');
TIME=[]; temp3=cell(1,1); n=0;
flag_time=0; for line=1:size(C,1)    if
strcmp(C{line,1},'TIME:')    n=n+1;
temp3{n,1}=[];
    TIME(n,1)=str2num(C{line+1,1});
flag_time=1;    elseif flag_time==1
flag_time=0;    continue    elseif
strcmp(C{line,1}(1),'Q')    continue    elseif
strcmp(C{line,1}(1),'n')    continue    elseif
n>0
temp3{n,1}=cat(1,temp3{n,1},str2num(C{line,1}));
end

Moyenne=filename2(:,2);
```

```

end

-----
[TIME,temp,temp2,temp3,Moyenne]=ReadBD();
n=165;
m=8055; %PP
m2=8183; %AC
m3=16238; %all
T=zeros(m,n);
T2=zeros(m2,n);
T3=zeros(m3,n); for
i=1:n

    T(:,i)=cell2mat(temp(i));
    T2(:,i)=cell2mat(temp2(i));
    T3(:,i)=cell2mat(temp3(i));
end

S=zeros(1,n);
S2=zeros(1,n);
S3=zeros(1,n);
    for j=1:m
for i=1:n

    cc(j,i) = T(j,i) - Moyenne(i,1) ;
cc2(j,i)=cc(j,i)*cc(j,i);
S(1,i)=S(1,i)+cc2(j,i);
t_Is(i,1)=TIME(i,1);          t_Is(i,2) =
sqrt(1/(m-1)*S(1,i));

end
end

        for
j=1:m2
for i=1:n
    ccAC(j,i) = T2(j,i) - Moyenne(i,1) ;
cc2AC(j,i)=ccAC(j,i)*ccAC(j,i);
    S2(1,i)=S2(1,i)+cc2AC(j,i);
t_Is(i,1)=TIME(i,1);          t_Is(i,3) =
sqrt(1/(m2-1)*S2(1,i));

end
end

        for
j=1:m3
for i=1:n
    ccPP(j,i) = T3(j,i) - Moyenne(i,1) ;
cc2PP(j,i)=ccPP(j,i)*ccPP(j,i);
    S3(1,i)=S3(1,i)+cc2PP(j,i);
t_Is(i,1)=TIME(i,1);          t_Is(i,4) =
sqrt(1/(m3-1)*S3(1,i));

end
end

```

```
X = t_Is(:,1); % Time
Y1 = t_Is(:,2); % IST PP
Y2=t_Is(:,3); % IST AC
Y3=t_Is(:,4); % IST All
```

## Annexe 8 : Validation du modèle thermique

---

### Premier cas de validation (Chauffage dans un tambour tournant)

Le travail de Weigler [16] a concerné le chauffage d'un milieu granulaire dans un tambour. Une méthode expérimentale a été mise en place pour mesurer la distribution de température des particules individuelles dans le lit.

Les expériences ont été réalisées avec un lit de 70 particules divisées initialement en deux parties : chaude (35 particules à 50°C) et froide (35 particules à 25°C). Les particules sphériques constituant le lit ont été en aluminium (Al) de 4mm de diamètre, revêtues de pigments thermochromiques. Les pigments thermo-chromiques sont des pigments qui changent de couleur avec l'apport de chaleur à la suite d'une transition de phase structurale. Ceci permet de mesurer la distribution de température dans un lit fixe ou agité, par l'analyse de la variation des couleurs.

Le tambour utilisé dans cette étude était un tambour rotatif de type 'tranche' de 500 mm de diamètre. Le matériau constituant le tambour était le polyuréthane (PU) ou le polystyrène (PS).

Des simulations numériques ont aussi été réalisées par Weigler et ont été comparées aux résultats des expériences.

Afin de valider notre modèle DEM thermique, nous avons simulé avec EDEM le cas étudié par Weigler et avons comparé les distributions de températures mesurées et simulées de Weigler aux résultats de nos simulations en lit fixe et en lit agité.

Le pas de temps de calcul a été fixé à 94% du pas de temps théorique de Rayleigh, et la taille de cellule « cell grid » à 20 R min.

Le modèle de contact utilisé dans notre simulation était le modèle de « Hertz-Mindlin with heat conduction ».

Des simulations supplémentaires avec une température de paroi périphérique cylindrique à 36°C ont été effectuées, pour introduire le transfert de chaleur de la paroi aux particules.

La première image des Figure 110 et Figure 112 représente le lit au moment de sa constitution.

Les particules rouges représentent les billes chaudes à 50°C et les bleues représentent les billes froides à 25°C.

Les propriétés des matériaux utilisées dans la simulation sont présentées dans le Tableau 29.



Tableau 29 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux- Simulation Weigler

<b>PARTICULES</b>	<b>Propriété</b>	<b>Unités</b>	<b>AI</b>
	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	2700
	Coefficient de Poisson	[-]	0,33
	Module d'élasticité	[GPa]	70
	Module de cisaillement	[GPa]	27
	Conductivité thermique	[W/(m.K)]	237
	Capacité thermique massique	[J/(kg.K)]	900
	Coefficient de frottement au roulement	[-]	0,01
	Coefficient de frottement statique	[-]	0,9
	Coefficient de restitution	[-]	0,3
<b>TAMBOUR</b>			<b>PS</b>
	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,25
	Coefficient de Poisson	[-] [Pa]	0,35
	Module d'élasticité		3,33x10 <sup>6</sup>
	Module de cisaillement	[Pa]	9x10 <sup>6</sup>
	Conductivité thermique	[W/(m.K)]	0,04
	Capacité thermique massique	[J/(kg.K)]	1500
	Coefficient de frottement au roulement	[-]	0,01
	Coefficient de frottement statique	[-]	0,6
	Coefficient de restitution	[-]	0,3

### 1. Simulation en lit statique

Les images thermiques suivantes (Figure 110), nous montre l'évolution du chauffage en lit statique au cours du temps.

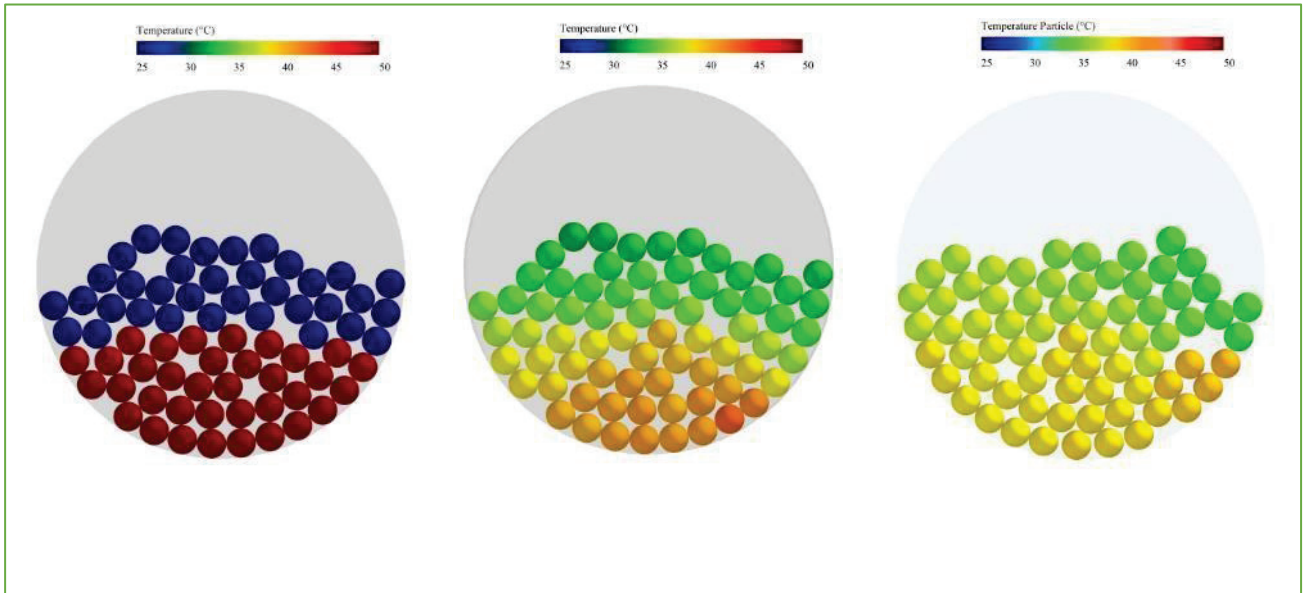


Figure 110 : Images thermiques de la simulation de Weigler en lit statique

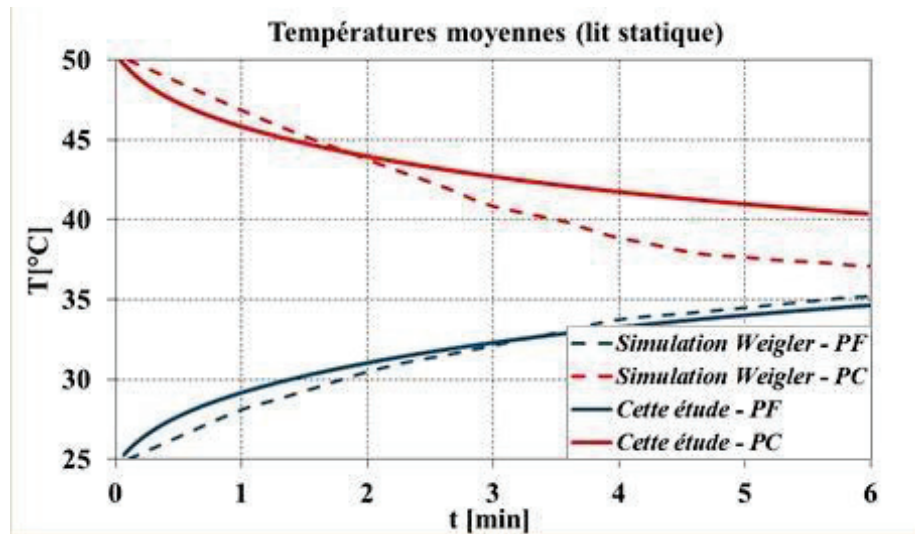


Figure 111 : Représentation graphique de la simulation de Weigler et celle de notre étude en lit statique.

Les images thermiques nous montrent qu'il y a bien un transfert de chaleur entre les particules chaudes et froides. Ceci se confirme avec la représentation graphique (Figure 111 : Représentation graphique de la simulation de Weigler et celle de notre étude en lit statique.) des températures moyennes des billes chaudes et froides au cours du temps (résultats de notre simulation).

On voit bien sur les courbes de la Figure 111 que la température des particules chaudes diminue avec la même vitesse à laquelle augmente la température des particules froides.

Nos résultats ont été comparés aux résultats de simulation de Weigler. On peut constater qu'il y a un grand écart entre notre courbe et celle de Weigler pour les billes chaudes et un petit écart pour les billes froides. On peut dire qu'on a un pourcentage de fractions chaudes assez important.

## 2. Simulation en lit agité

Pareillement qu'en lit statique, les images thermiques suivantes (Figure 112), nous montre l'évolution du chauffage du lit agité au cours du temps :

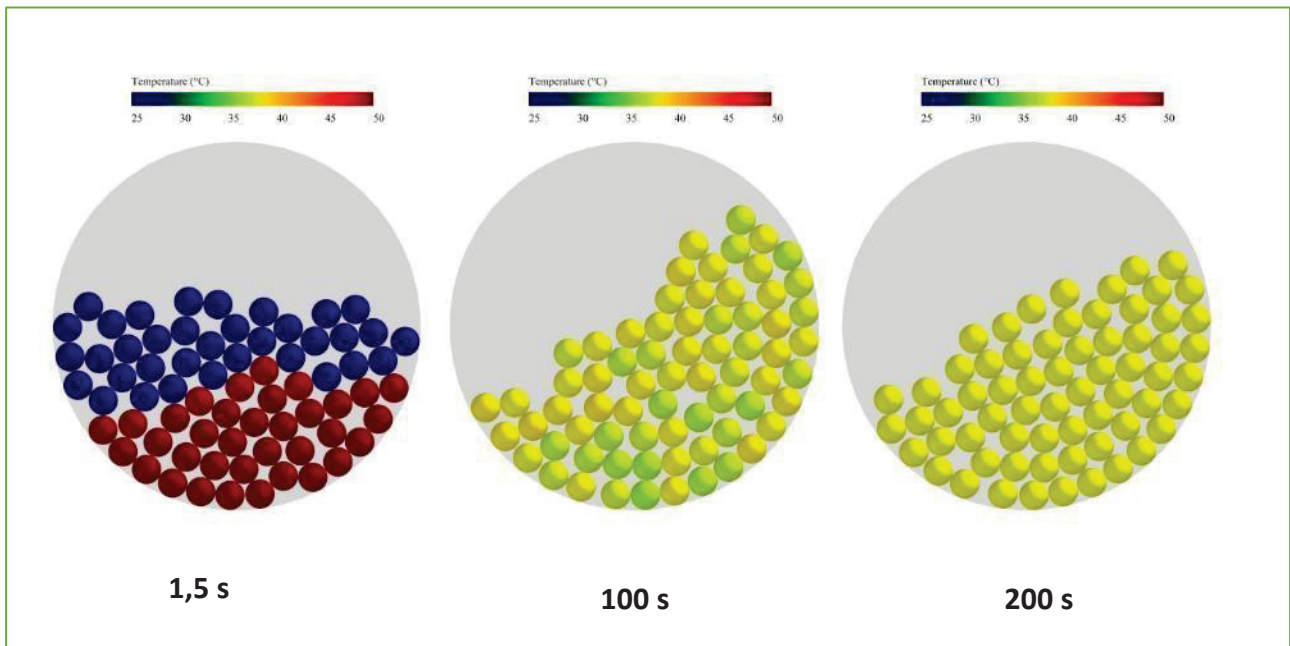


Figure 112 : Images thermiques de la simulation de Weigler en lit agité.

Comme on peut le voir sur ces images, le chauffage en lit agité est bien plus rapide qu'en lit statique, vu que les deux fractions de particules chaudes et froides arrivent à l'équilibre juste après 200 secondes de temps simulé, contre 1000 secondes environ pour le lit statique.

Nos résultats de simulation sont comparés à ceux simulés par Weigler. D'après nos simulations, la vitesse d'évolution thermique est nettement plus importante.

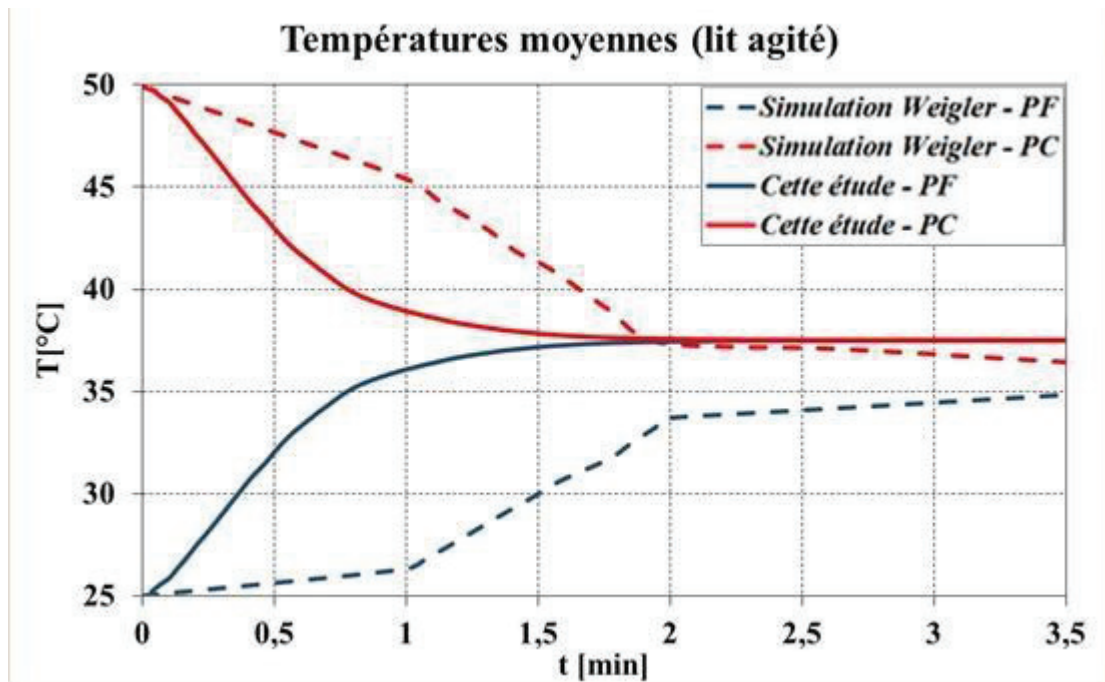


Figure 113 : Représentation graphique de la simulation de Weigler et celle de notre étude en lit agité.

Nos résultats ont été comparés à ceux de la simulation de Weigler comme dans le lit statique. On peut constater qu'un grand écart est aussi présent entre notre courbe et celle de Weigler pour les billes chaudes comme pour les billes froides. De plus, les températures moyennes de notre simulation se sont stabilisées au bout de 1,5 min de temps simulé, bien avant la simulation de Weigler. On constate qu'on a des pourcentages de billes chaudes et de billes froides bien plus importants.

### Chauffage d'une couche plane

Le transfert de chaleur à travers une couche plane de matériau granulaire a été étudié par Vargas et al 2002, [17] à la fois expérimentalement et numériquement.

Une monocouche de billes en acier inoxydable cylindrique a été utilisée, chargée uniquement uni-axialement.

Les particules avaient 3 mm de diamètre et la boîte rectangulaire qui les contenait avait à peu près 200 fois le diamètre des particules en largeur et 100 fois leur diamètre en hauteur.

Les parois latérales étaient isolées et le fond chauffé à 50°C. Dans l'expérience d'origine, un poids de 5 kg est appliqué sur le dessus, ce qui engendre une chaîne de contrainte dans le lit des particules.

Pour valider les simulations thermiques réalisées avec EDEM, nous avons effectué une simulation avec les mêmes conditions et les paramètres utilisés par Vargas.

Les différents paramètres de la simulation sont présentés dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux – Simulation Vargas

Propriété	Unités	Acier
Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]	7500
Coefficient de Poisson	[-]	0,29
Module d'élasticité	[GPa]	193
Module de cisaillement	[GPa]	748
Conductivité thermique	[W/(m.K)]	15
Coefficient de frottement au roulement	[-]	0,01
Coefficient de frottement statique	[-]	0,29
Coefficient de restitution	[-]	0,001

L'application d'une charge de 5 kg sur le lit n'a pas été réalisable directement sur EDEM sans l'ajout d'un nouveau module. Pour y remédier nous avons utilisé une paroi coulissante qui applique des forces sur le lit, selon la force de gravité.

Cependant la disposition des particules diffère un peu de l'expérience de Vargas, ce qui peut entraîner une différence sur les chaînes de contraintes et donc une différence sur les résultats.

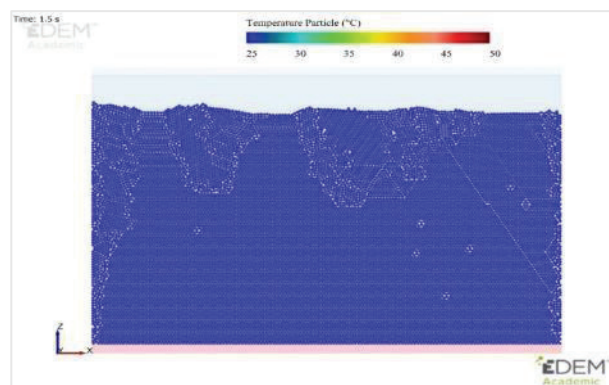
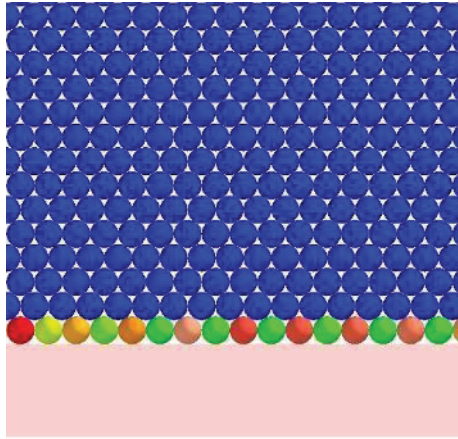


Figure 114 : Lit de particule hexagonale – Simulation Vargas



*Figure 115 : Lit de particule hexagonale – Simulation Vargas approchée*

La Figure 115 nous confirme qu'il y a bien un transfert de chaleur entre la paroi chauffée et les particules. On voit bien que la première couche commence à chauffer et à prendre des couleurs selon le code couleur imposé.

A cause de la longue durée de la simulation, nous n'avons pas poursuivi la simulation de Vargas, et nous n'avons donc pas pu comparer nos résultats à leur simulation,

L'accord entre nos résultats et ceux de Vargas n'a été démontré que qualitativement.

Il faut admettre que la validation de nos simulations n'a pas été satisfaisante et qu'il reste à trouver une autre comparaison plus concluante.

## Annexe 9 : Calcul du nombre de Biot

---

Dans l'approche adoptée ici, la conductance thermique entre deux billes est donnée par :  
 $K^{ij} = 2\lambda_{ij}R_{cont}$

Pour convertir la conductance en coefficient de transfert entre 2 billes on applique :  $h^{ij} = \frac{K^{ij}}{A_{ref}}$

Il y a différentes possibilités pour le choix de  $A_{ref}$  :

surface du cercle de contact :  $A_{ref} = A_{cont} = \pi R_{cont}^2$  et donc :  
 $h^{ij} = \frac{2\lambda_{ij}}{\pi R_c}$ , hypothèse non retenue.

surface de la bille (Tsotsas, 2019) :  $A_{ref} = A_{bille} = 4\pi R_{bille}^2$  et donc :  $h^{ij} = \frac{\lambda_{ij}R_{cont}}{2\pi R_{bille}^2}$ , c'est l'hypothèse retenue.

La géométrie du contact permet d'écrire :  $R_{cont}^2 = R^{ij} * \delta^{ij}$

Il y a deux hypothèses possibles pour évaluer  $\delta^{ij}$  ou  $R_{cont}$  :

hypothèse théorique du contact mécanique de Hertz :  $\sqrt{\delta_{ij}^{He}} = \frac{1}{\sqrt{R_{ij}}} \left[ \frac{3F_{ij}R_{ij}}{4E_{ij}} \right]^{1/3}$

hypothèse numérique de la méthode DEM sur l'interpénétration maximale :  $f = \frac{R_c}{R_{bille}}$

0,1 ou 0,01 et  $\lambda_{ij} = \lambda_{bille}$ ,  $R^{ij} = R_{bille}$

En introduisant  $f$ , on obtient :  $h^{ij} = \frac{\lambda f}{2\pi R_{bille}}$

Le nombre de Biot s'exprime par :  $Bi = \frac{h * e_{ref}}{\lambda}$  et  $e_{ref} = \frac{V_{bille}}{A_{bille}} = \frac{R_{bille}}{3}$  (Rapport du volume sur la surface d'une sphère)

Donc  $Bi = \frac{h^{ij} R_{bille}}{\lambda} = \frac{f}{6\pi}$

Avec  $f=0,1$  et  $\lambda = 1$  et  $R_{bille}=0,0015$ , on obtient  $h^{ij} = 10,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  et  $Bi = 0,005$