



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique**

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par

**BOUKRIF Kheir-Eddine
ET
HARMALI Tahar**

Spécialité : Génie mécanique
Option : Energétique.

THEME

Conception, Réalisation et Simulation d'un concentrateur
solaire à particules solides.

Déposé le 22/10/2020.

-Mr. MOUSSAOUI Mouhammed	Université de Bouira	MAA	Examineur
-Mr. BAGHDADI Fazia	Université de Bouira	MAA	Examineur
- Mr. LAOUARI Azzedine	Université de Bouira	MAA	Promoteur
-Mr.FARHAT Brahim	Université de Boumerdes	DOCTORANT	Co-promoteur

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Notre encadreur monsieur A. LAOUARI, chargé de cours au département génie mécanique à l'université de BOUIRA, qui a accepté de diriger notre travail, a toujours répondu présent pour tout problème rencontré, pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Nous remercions vivement Monsieur M.Ferhat.BRAHIM, Doctorant à l'université de BOUMERDES, qui nous a fait l'honneur de nous Co-encadrer dans ce mémoire.

Que monsieur le président des de jurys trouve dans ce modeste travail, l'expression de nos profond respect et soit remercié d'avoir accepté de présider le jury.

Nous remercions en particulier messieurs les jurys pour leur intérêt donné à notre travail et nous honorions de leur présence au jury.

Dédicace

*Au nom de l'amour qui j'éprouve à chacune
des personnes qui m'entourent et qui m'ont
toujours solidement soutenu le long de ce
long parcours.*

*A mes chers parents qui m'ont toujours
éclairé le chemin de la vie en me tendant la
main tout au long de mes années d'études
« que dieu me les garde ».*

A toute ma famille et mes amis.

*A tous ceux qui m'ont aimé, m'aiment et
m'aimeront, pour moi*

Même, je dédie ce modeste travail.

Kheïreddine

Dédicaces

Avec un grand plaisir je tiens à dédier ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère.

A celui qui ma fais de moi un homme, mon père.

A mon cher frère et mes chères sœurs.

Aux petits enfants SAMI et DJAMAL.

A mes grands parents que dieux me les gardes en pleines
santés.

A la mémoire de mon grand père et ma grande mère.

A ma copine KARIMA qui ma encouragé et qui ma donnée
son soutien tous ses 5 ans ensemble.

A toute ma famille et mes amis.

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont aidé de pré ou de
loin.

TAHAR

Résumé : Réalisation, dimensionnement, conception et simulation d'un dispositif expérimentale (Micro CSP) avec un récepteur tubulaire de hauteur de 500 mm et une cavité de particules tombantes à travers laquelle une fenêtre variable de 50 mm de largeur pour un rideau de 500 mm de particules est placée et chauffée directement avec plusieurs cycle par une source de chaleur artificielle. Pour déplacer les particules jusqu'à au sommet du récepteur, on dispose d'un compresseur et un doseur de particules solide. L'installation est aussi composée d'un cyclone séparant les particules et le gaz, une trémie supérieure pour stocker les particules avant une chute libre dans la cavité réceptrice et enfin une trémie inférieure pour capturer les particules chaude à la sortie.

Mots clés : dimensionnement. Conception. Realisation. Simulation. Transfer de chaleur. Micro CSP

Abstract: Realization, dimensioning, design and simulation of an experimental device (Micro CSP) with a tubular receiver of height of 500 mm and a cavity of falling particles through which a variable window of 50 mm of width for a curtain of 500 mm of particles is placed and heated directly with several cycles by an artificial heat source. To move the particles to the top of the receiver, a compressor and a solid particle feeder are available. The installation is also composed of a cyclone separating the particles and the gas, an upper hopper to store the particles before a free fall in the receiving cavity and finally a lower hopper to capture the hot particles at the outlet.

Keywords: dimensioning. Design. production. Simulation Experimental set-up. Heat transfer. Micro CSP.

المخلص: انجاز, تحجيم, تصميم و محاكاة جهاز تجريبي (Micro CSP) مع مستقبل انبوبي بارتفاع 500 ملم و مستقبل مجوف للجسيمات المتساقطة من خلال نافذة متغيرة المساحة بعرض 50 ملم لشريط من 500 ملم من الجسيمات يتم تسخينه مباشرة عبر عدة دورات بواسطة مصدر حراري اصطناعي لنقل الجسيمات الى اعلى جهاز الاستقبال. يتوفر النظام على ضاغط و جهاز مسؤول عن امداد التركيب بالجسيمات الصلبة, يتكون التركيب ايضا من فاصل مخروطي يفصل بين الجزيئات و الهواء و خزان علوي لتخزين الجسيمات قبل عملية السقوط الحر في المستقبل المجوف و خزان سفلي لالتقاط الجسيمات المسخنة في المخرج.

الكلمات الرئيسية : انجاز. تحجيم. تصميم . محاكاة . الاعدادات التجريبية. انتقال الحرارة. مايكرو CSP

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale

CHAPITRE I : Généralités sur les concentrateurs solaire et les concentrateurs solaires à particules solides

INTRODUCTION.....	1
I. L'énergie solaire	1
I.1. Potentielle de l'énergie solaire en Algérie	1
I.2.Présentation des types de capteurs solaires.....	2
I.2.1.Panneaux photovoltaïques.....	2
I.2.2.Collecteurs solaires thermiques plan.....	2
I.2.3.Les systèmes solaires à concentration.....	3
I.2.3.1.Le concentrateur cylindro-parabolique.....	3
I.2.3.2.Les miroirs de Fresnel	4
I.2.3.3.Le concentrateur parabolique	5
I.2.3.4.La tour solaire	5
I.3.Les récepteurs solaires à particules	6
I.3.1.Classement des différents récepteurs solaires à particules.....	7
I.3.2.Exemples de récepteurs solaires à particules	7
I.3.2.1.Les récepteurs à lit fixe.....	8
I.3.2.2.Les récepteurs à lit rotatif	9
I.3.2.3.Les récepteurs à lit mobile.....	10

I.3.3. Les récepteurs solaires et les réacteurs à film tombant	11
1.3.4. Récepteur solaire à particules tombantes obstruée	11
I.3.4.1. Les récepteurs cyclone.....	12
I.3.4.2. Les récepteurs à particules entraînées.....	13
I.3.4.3. Les récepteurs à lit fluidisé	14
I.3.4.4. Les récepteurs à lit fluidisé pour cycles thermodynamiques	15
I.4. Le principe d'utilisation de la suspension dense des particules.....	16
I.4.1. Les propriétés et le choix des particules solides	17
I.5 : Les propriétés et le choix du fluide caloporteur.....	19
CHAPITRE II : Dimensionnement , conception et réalisation d'un concentrateur solaire à particules solides	
II.1. Introduction	20
II.1.1 Dimensionnement de dispositif.....	20
II.2. Description du banc d'essai	21
II.2.2 Données de l'expérimental	22
II.3. Montage de la partie industrielle	23
II.3.1. Système d'injection.....	23
- Doseur.....	23
- Distributeur.....	24
- Support.....	24
Le système d'injection assemblé.....	25
II.3.2. Souffleur.....	25
II.3.3. Le tube absorbeur.....	26
II.3.4. Le cyclone séparateur	27
II.3.5. Le récepteur de particules tombantes.....	28
II.3.6. La vis sans fin et le réservoir de stockage à froid	30
- La vis sans fin	30
- Le réservoir de stockage à froid	30
II.3.7. La cuve de stockage à chaud.....	32
II.3.8. Cuve de stockage d'air	32
II.3.8. Les capteurs de température.....	33
II.3.9. Les capteurs des pressions : (variation de pression)	33
II.3.10. Débit mètre.....	33

II.3.11. L'armoire de commande	34
II.3.12. Carte arduino.....	34
II.3.13. Assemblage général du dispositif concepté	35
II.4. Solides utilisés	36
II.5. Paramètres de contrôle et grandeur mesurés	37
II.6. Résultats.....	37
II.6.1. La classe des particules	37
II.6.2. Propriétés physiques du fluide et des particules	38
II.6.3. Caractéristiques hydrodynamiques des fluides	39
II.6.4. Dimensionnement du lit.....	40
II.7. Simulation.....	41
II.7.1. Les simulations pour la vitesse d'injection.....	41
II.7.1.1. Les champs moyennés.....	41
II.8. Interprétations	42
II.9. L'influence de la taille des particules.....	42
CHAPITRE III : Modélisation et simulation d'un concentrateur solaire tubulaire à particules solides	
III.1. MODELISATION.....	48
III.1.1. INTRODUCTION	48
III.2. Les équations et le modèle mathématique utilisé	48
III.3. Simulation Numérique	50
III.3.1. Introduction	50
III.3.2. Présentation d'ANSYS fluent (CFD)	50
L'utilisation de logiciel Ansys/Fluent.....	50
III.3.3. Création de la géométrie.....	52
III.3.4. Génération du maillage.....	53
III.3.5. Repérage des conditions aux limites	54
III.3.6. les étapes de la configuration enregistrés sur fluent	55
III.4 Les résultats obtenus par la simulation	59
III.4.1 La courbe de résiduels	59
III.4.2 La température de la suspension.....	59
III.4.3 La vitesse de la suspension	61
III.4.4 La variation de pression de la suspension	64

III.5. Discussions sur les résultats	65
III.6. Conclusion.....	66
Conclusion générale	67

Bibliographie

Liste des figures chapitre I :

<i>Figures</i>	<i>Pages</i>
Figure. I.1 : Panneau photovoltaïque.	2
Figure. I.2 : collecteur solaire plan.	2
Figure. I.3 : schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique.	3
Figure. I.4 : schéma d'un concentrateur solaire de Fresnel.	4
Figure. I.5 : concentrateur solaire parabolique.	5
Figure. I.6: schéma d'une centrale à tour.	6
Figure. I.7 : Différents types de récepteurs solaires à particules.	7
Figure. I.8 : Réacteur solaire à lit fixe à éclairage vertical.	9
Figure. I.9: Réacteur solaire à lit rotatif étudié à PSI, Suisse.	10
Figure. I.10 : Réacteur solaire à lit mobile.	10
Figure. I.11: Réacteur solaire à lit mobile (rideau ou film de particules solides).	11
Figure. I.12 : Récepteur solaire a particules tombantes obstruée.	12
Figure. I.13: Réacteur solaire à lit entraîné du laboratoire WIS.	13
Figure. I.14: Réacteur solaire à lit entraîné du laboratoire PSI.	13
Figure. I.15 : Réacteurs solaires à lit fluidisé circulaire.	14
Figure. I.16: Réacteurs solaires à lit fluidisé à circulation interne.	15
Figure. I.17: exemple d'une maquette verticale d'une suspension dense de particules.	16
Figure I.18: carbure de silicium.	18
Figure I.19 : le sable.	18

Liste des figures chapitre II :

<i>Figures</i>	<i>Pages</i>
Figure II.1 : Dispositif expérimental.	22
Figure II.2 : conception de doseur avec logiciel solidworks.	23
Figure II.3 : Le doseur.	24
Figure II.4 : conception de distributeur avec logiciel solidworks.	24
Figure II.5 : conception de support avec logiciel solidworks.	24
Figure II.6 : conception de système d'injection avec logiciel solidworks.	25
Figure II.7 : Le système d'injection.	25
Figure II.8 : Conception de siffleur avec logiciel solidworks.	26
Figure II.9 : Le siffleur (pompe).	26
Figure II.10 : conception de tube absorbeur par logiciel solidworks.	26
Figure II.11 : Le tube absorbeur.	27
Figure II.12 : Conception de cyclone avec logiciel solidworks.	27
Figure II.13 : Conception de cyclone avec couple par logiciel solidworks.	28
Figure II.14 : Le cyclone.	28
Figure II.15 : conception de récepteur de particules tombantes avec logiciel solidworks.	29
Figure II.16 : Le récepteur de particules tombantes.	29
Figure II.17 : conception des chevrons avec logiciel solidworks.	29
Figure II.18 : Les chevrons.	30
Figure II.19 : Conception de la vis sans fin avec logiciel S.W	30
Figure II.20 : Le réservoir de stockage à froid.	31
Figure II.21 : Conception de réservoir de stockage à froid avec logiciel solidworks.	31
Figure II.22 : La vis sans fin et le réservoir de stockage à froid.	31
Figure II.23 : Conception de réservoir de stockage à froid avec	32
Figure II.24 : Conception de la cuve de stockage d'air avec S.W.	32
Figure II.25 : capteur de température.	33
Figure II.26 : variation de pression.	33
Figure II.27 : débit mètre.	34
Figure II.28 : L'armoire de commande.	34

Figure II.29: Système arduino.	35
Figure II.30 : Conception d'assemblage avec logiciel solidworks.	35
Figure II.31: Le concentrateur solaire a particules solides.	36
Figure II. 32 : les classifications des particules [16].	38
Figure II.33 : La variation de la vitesse des particules a 0,9 mm.	42
Figure II.34 : La variation de la vitesse des particules a 0,5 mm.	42
Figure II.35 : évolution de la variation de volume pour différentes taille de particules [17].	43
Figure II.36: variation moyenne de volume pour des différentes tailles des particules [17].	44
Figure II.37 : évolution de la variation de volume pour différentes taille de particules [17].	44
Figure II.38 : la variation de profil de volume pour différentes tailles particules Selon Z [17].	46
Figure II.39: variation moyenne de volume pour des différentes tailles des particules [17].	47

Liste des figures chapitre III :

<i>Figures</i>	<i>Pages</i>
Figure III.1 : La page d'accueil d'Ansys/Fluent	51
Figure III.2 : Repartions d'outils et d'opération	52
Figure III.3 : La géométrie du tube absorbeur	53
Figure III.4 : Le maillage du tube absorbeur	54
Figure III.5 : Définition des conditions initiales du tube	55
Figure III.6 : Fenêtre de démarrage de Fluent	56
Figure III.7 : Définition de modèle qui nous avons choisis	56
Figure III.8 : Définition des caractéristiques de l'air	57
Figure III.9 : Définition des caractéristiques des particules solide (le sable).	57
Figure III. 10 : Définition des conditions aux limites de la paroi	58
Figure III. 11 : Définition des conditions aux limites à l'entrée	58
Figure III.12 : La courbe de résiduels	59
Figure III.13 : Répartition de la température le long de tube	60

Figure III.14 : Variation de l'enthalpie le long de tube	61
Figure III.15 : La distribution de la vitesse sur la section de sortie	61
Figure III.16 : La répartition de vectrices vitesses à la sortie	62
Figure III.17 : La distribution de la vitesse sur la section de l'entrée	63
Figure III.18 : La répartition de vectrices vitesses à l'entrée	63
Figure III.19 : La distribution de la pression le long de tube	65

Liste des tableaux chapitre I :

<i>Tableaux</i>	<i>Pages</i>
Tableau. I.1 : comparatif des poudres.	18
Tableau. I.2 : comparatif des fluides caloporteur.	19

Liste des tableaux chapitre II :

<i>Tableaux</i>	<i>Pages</i>
Tableau II.1 : les propriétés et les valeurs des particules.	36
Tableau II.2 : les propriétés des particules selon le fluide ou le solide.	39
Tableau II.3 : la variation de la vitesse (U) en fonction de variation de diamètre.	40
Tableau II.4 : les résultats obtenus par les équations.	41

Nomenclatures :

T : Température. (K°)

ΔT : Différence de température. (K°)

Q_f : Le débit de fluide (air). (Kg/S)

Q_s : Le débit massique de solides. (Kg/S)

S : La section du tube absorbeur. (m²)

U_{mf} : La vitesse minimale de fluidisation. (m/s)

U_t : La vitesse terminale de chute (Schiller-Nuaman). (m/s)

C_D : Le coefficient de traînée C_D .

Re : Nombre de Renault.

m_p : La masse de particules. (Kg)

Fp , Le débit massique entrant des particules dans le lit. (Kg/S)

τ_p , Le temps de séjour des particules dans le lit. (S)

H_L : La hauteur. (m)

d_b : Le diamètre des bulles de fluide. (m)

ΔV_i : La variation de volume par volume et seconde (s⁻¹) dans la cellule i. (m³/S)

V_i : Le volume de la cellule i. (m³)

N : Le nombre de cellules.

S_m : Une masse ajoutée à la deuxième phase. (Kg)

ρ : La masse volumique. (Kg/m³)

K : Coefficient thermique laminaire. (W/m.K)

∇ : Nabla.

C_p : La chaleur spécifique de mélange. (J/K.Kg)

σ_t : Nombre de Prandtl.

μ_t : La viscosité de la turbulence. (m²/s)

S_{user} : Un terme de source défini par l'utilisateur.

\bar{f} : Fraction de mélange.

S_{msa} : La source de masse spécifiée.

$\Gamma\alpha\beta$: Le débit massique par unité de volume. (Kg/m^3)

μ : Viscosité dynamique. ($\text{Kg}/\text{m.s}$)

ν : Viscosité cinématique. (m^2/s)

\vec{F} : La force gravitationnelle. (g)

ABRIVIATIONS

TDH: La hauteur de désengagement.

HTF: Heat transfer fluid.

HTC: heat transfer coefficient.

DPS: Suspension des particules dense.

Introduction générale

De nos jours les demandes en énergie dans le monde ne cessent de s'augmenter, l'énergie est devenue un élément indispensable pour les secteurs industriels et économiques

L'exploitation des énergies renouvelables sont sans doute le meilleur alternatif pour subvenir à la croissance mondiale de consommation énergétique toute en préservant la nature et l'environnement.

Les énergies renouvelables sont des productions qui dépendent des conditions climatique, ces dernières ne sont pas contrôlable puisque elles ne sont pas constantes, parmi ces énergies renouvelables, on s'intéresse à l'énergie solaire.

L'énergie solaire se présente à des conditions précises, c'est pour ça Il est temps de répondre à la question suivante : comment profiter du temps limité pour récupérer le maximum d'énergie pendant la journée, et comment faire lors de l'absence de ces conditions (la nuit) ?

Des recherches sur l'énergie solaire nous mènent à travailler avec des températures élevées, il faut récupérer le maximum de flux optique incident qui peut se réaliser à l'aide d'un concentrateur solaire.

- Types de concentrateur solaire :

Concentrateur ponctuelle fixe (centrales à tours).

Concentrateur ponctuelle mobile (collecteurs paraboliques).

Concentrateur linéaire fixe (collecteurs Fresnel linéaires).

Concentrateur linéaire mobile (collecteurs cylindro-parabolique).

Notre travail s'appuie sur le 1^{er} type de concentrateur (tour solaire), il consiste à réaliser un dispositif expérimental d'un récepteur solaire à particules solides.

Chapitre I :

**Généralités sur les concentrateurs solaires et les
concentrateurs solaires à particules solide.**

INTRODUCTION

Les énergies renouvelable comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse. [1]

I. L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique (voir photo à droite), des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires (voir photo à gauche). Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire [1].

I.1. Potentielle de l'énergie solaire en Algérie

L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes.

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M², soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale [2].

I.2.Présentation des types de capteurs solaires

Trois familles de capteurs solaires sont présentées dans les pages qui suivent. Chaque famille se différencie selon la façon dont elle capte et transforme l'énergie solaire. Pour chacune des familles, les différentes variantes de capteurs seront exposées ainsi que le type d'énergie qui est produit et la température de la chaleur produite, si tel est le cas. Le type de moyen utilisé pour pallier aux fluctuations d'ensoleillement et le type d'application pour chaque capteur seront également décrits [3].

I.2.1.Panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont probablement les plus connus des capteurs solaires. En effets, on retrouve ces derniers sous différentes grandeurs tant sur des petits appareils tels que les calculatrices, que pour des applications de plus forte puissance pour des bâtiments loin des réseaux électriques. Ces derniers convertissent directement l'énergie solaire en électricité [3].



Figure.I.1 : Panneau photovoltaïque.

I.2.2.Collecteurs solaires thermiques plan

Les collecteurs solaires thermiques plans servent à produire de la chaleur à relativement basse température, soit entre 30 et 200 C. La plupart d'entre eux fonctionnent sous le principe d'effet de serre pour chauffer un liquide caloporteur ou de l'air. Une surface sélective absorbe le rayonnement solaire pour convertir ce dernier en chaleur [3].

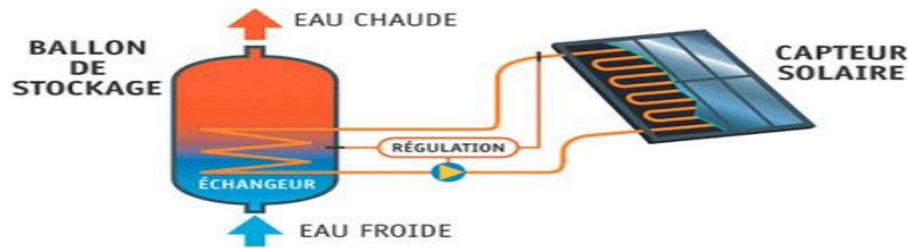


Figure.I.2 : collecteur solaire plan.

I.2.3. Les systèmes solaires à concentration

Les concentrateurs solaires focalisent les rayons du soleil dans un point comme la tour solaire et le concentrateur parabolique, ou dans une ligne comme le concentrateur Cyllindro-parabolique et les miroirs de Fresnel. Les concentrateurs en lignes possèdent généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels, ce facteur caractérise la géométrie générale d'un concentrateur. Il représente le rapport entre la surface de captation la surface d'absorption. Les systèmes utilisant les concentrateurs solaires sont capables de générer des températures au voisinage de 1000°C, ces systèmes ont été initialement développés pour la production d'électricité [4].

Les centrales solaires à concentration souffrent cependant de deux contraintes majeures.

La première tient à la disponibilité de la ressource. En effet, la concentration ne peut se faire que pour le rayonnement solaire direct à la différence du photovoltaïque. Le deuxième inconvénient est comme pour la plupart des énergies renouvelables, d'ordre économique. Et le coût d'investissement est supérieur aux centrales conventionnelles. D'autres problèmes doivent également être examinés. Une ressource en eau est nécessaire pour le lavage des concentrateurs et la connexion au réseau de distribution électrique doit également être étudiée avec attention tout comme le coût du terrain [4].

I.2.3.1. Le concentrateur cylindro-parabolique

Le système est constitué de miroirs cylindro-paraboliques qui concentrent le flux solaire sur une ligne focale. On place sur cette dernière un tube dans lequel circule un fluide caloporteur qui sera ainsi chauffé. La parabole ou surface dite stigmatique : tout rayon parallèle à l'axe optique converge, après réflexion, en un point F appelé foyer. Le cylindro-

parabolique utilise la propriété de la parabole, cependant le foyer F n'est plus un point mais une ligne [5].



Figure.I.3 : schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique.

I.2.3.2. Les miroirs de Fresnel

Ce système est composé par des miroirs plans ou faiblement paraboliques, disposés en lames parallèles qui s'inclinent sur un axe de façon à réfléchir les rayons du soleil vers le foyer. Les miroirs restent près du sol, cette position leur permet d'éviter le vent. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers un récepteur tubulaire fixe au-dessus des miroirs dans le centre du champ solaire (figure 1.4). Malgré la chute des performances optiques de cette technologie (2/3 de celle d'un CCP), une baisse des coûts de maintenance et d'investissement de 50% dans une centrale solaire basée sur cette technologie par rapport aux autres technologies (concentrateur parabolique et tour solaire). Cette technologie a été récemment mise au point par plusieurs sociétés, les premiers prototypes réalisés jusqu'à maintenant sont prometteurs, mais ils souffrent encore d'un manque de maturité [4].

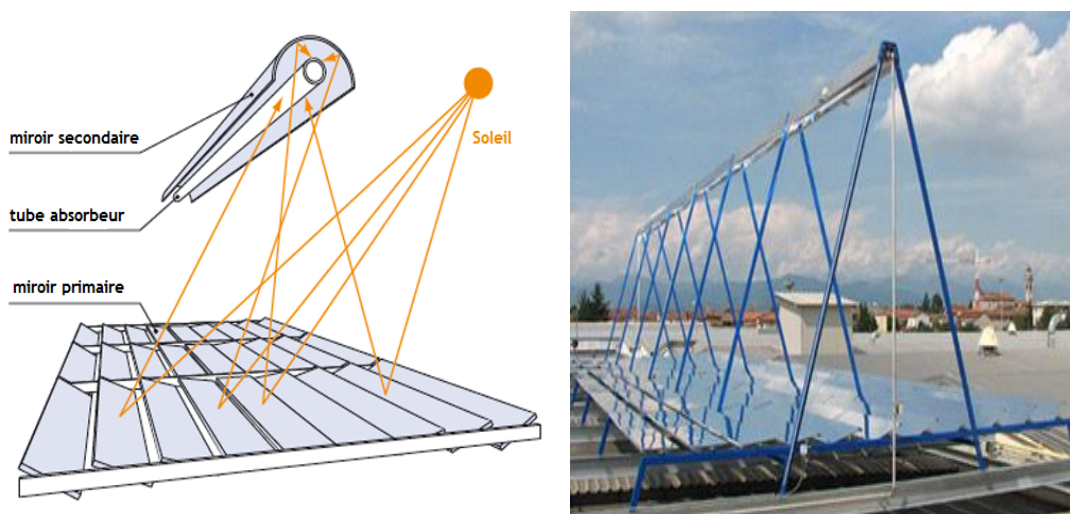


Figure.I.4 : schéma d'un concentrateur solaire de Fresnel.

I.2.3.3. Le concentrateur parabolique

Le concentrateur parabolique représenté schématiquement sur (la figure 1.5) est composé d'une surface réfléchissante qui concentre le rayonnement solaire incident à son foyer. La contrainte majeure est la nécessité de mobiliser la parabole selon deux axes de rotation pour assurer la poursuite du soleil. Ceci entraîne une limitation de la dimension unitaire de ce concentrateur. Trois types des surfaces réfléchissantes ont été utilisées, la première possibilité consiste en un dépôt d'argent ou d'aluminium à l'arrière d'une plaque de verre, la deuxième est basée sur le même principe mais on remplace la plaque de verre par un film plastique et la troisième possibilité consiste en des feuilles d'aluminium polies. [4]

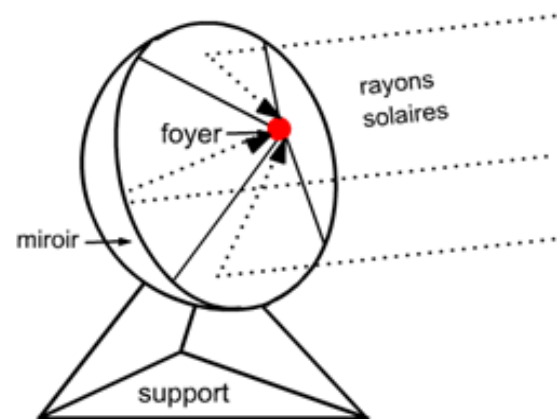
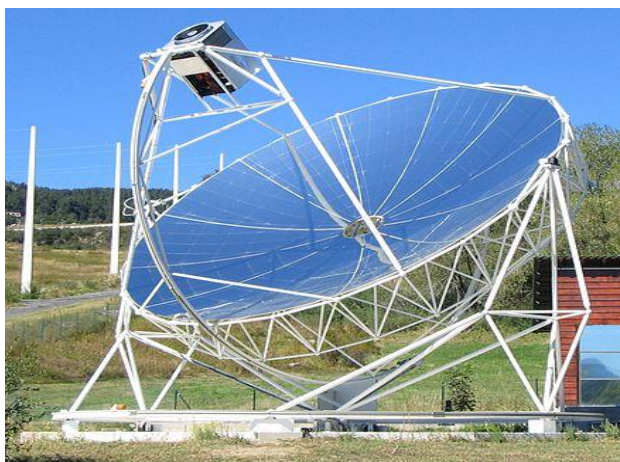


Figure.I.5 : concentrateur solaire parabolique.

I.2.3.4. La tour solaire

Pour échapper aux limitations des tailles rencontrées avec le concentrateur parabolique, Une tour en béton ou en poutres métalliques entouré par un champ de nombreux miroirs Appelés" héliostats" (en grec: qui fixe le soleil) est développé (figure 1.6). Les héliostats ont une surface située entre 30 m^2 et 120 m^2 et chaque héliostat poursuit le soleil individuellement sur deux axes pour concentrer le rayonnement solaire direct vers un receveur on sommet de la tour solaire, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, mais l'ombre portée de la tour sur le champ d'héliostats influe directement sur l'efficacité du système. A ce jour, la seule application de la tour solaire est la production d'énergie électrique dans un système dénommé centrale à tour. Les trois fluides caloporteurs les plus utilisés dans ces centrales sont la vapeur d'eau, l'air et les sels fondus. La production de la vapeur d'eau par centrale à tour a fait l'objet de plusieurs projets de recherche, cette technologie a été abandonnée à cause des problèmes critiques dus à la surchauffe de la vapeur. La vapeur d'eau

a ensuite été remplacée par des sels fondus, qui ont l'avantage d'être également un moyen de stockage de l'énergie calorifique. Un nouveau concept de récepteur à air a alors été mis au point, l'air atmosphérique aspire au travers d'un récepteur volumétrique, ce récepteur utilise un maillage de fils métalliques directement exposé à la radiation solaire incidente. Seulement quelques projets de recherche ont été réalisés et ont surtout porté sur l'amélioration du rendement des récepteurs volumétriques. [4]

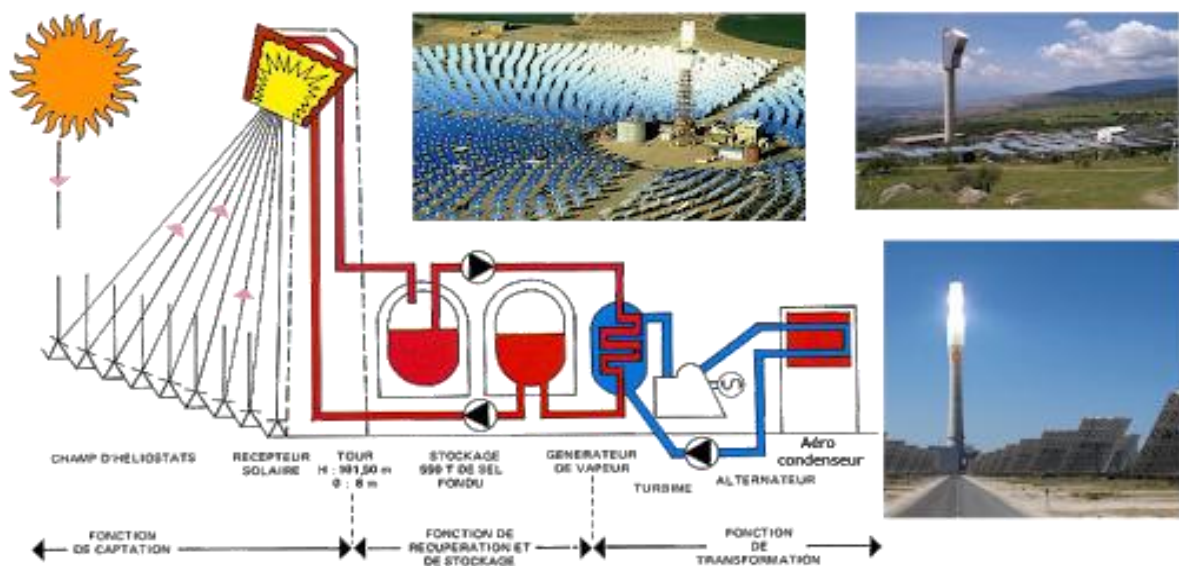


Figure.I.6:schéma d'une centrale à tour.

I.3.Les récepteurs solaires à particules

Les récepteurs solaires à particules présentent une alternative très intéressante. Dans les récepteurs à particules, le rayonnement solaire concentré est absorbé par un milieu particulaire traversé par un gaz qui s'échauffe à son contact. D'une part, l'utilisation de particules permet d'augmenter les échanges solides/gaz par l'augmentation de la surface spécifique de l'échangeur. D'autre part, les milieux particulaires peuvent présenter une très bonne absorption du rayonnement solaire que l'on peut moduler en faisant varier la concentration de particules. De plus, la mise en mouvement des particules absorbantes peut contribuer à homogénéiser la température dans le récepteur. Enfin, la présence de solides dont la capacité calorifique est plus importante que celle du gaz est un bon moyen pour stabiliser la température du gaz et stocker de l'énergie sous forme de chaleur. Les récepteurs solaires à

particules proposent un grand nombre de dispositifs aux concepts divers et variés adaptables à l'utilisation en centrale thermodynamiques. Nous allons maintenant les passer en revue. [6]

I.3.1. Classement des différents récepteurs solaires à particules

Plusieurs critères rendent l'identification des récepteurs à particules possible.

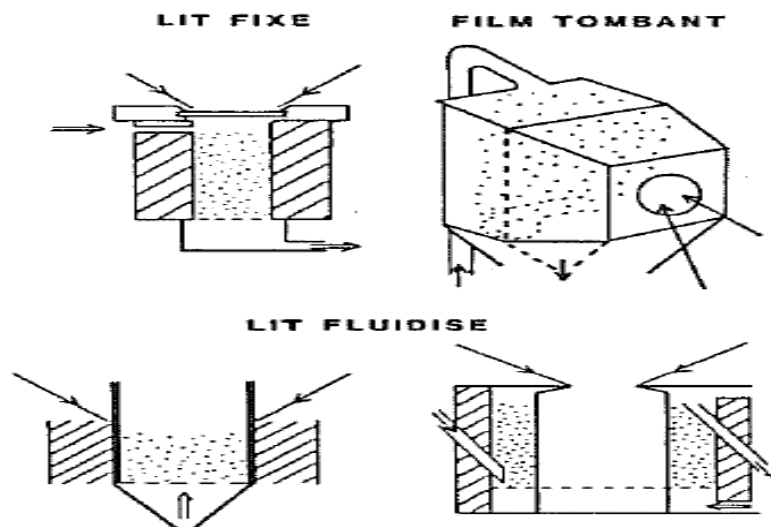


Figure I.7 : Différents types de récepteurs solaires à particules.

Un premier critère est le mode de chauffage des particules. En effet, on peut chauffer un lit de particules soit de manière directe, soit de manière indirecte. Dans le cas de l'échangeur à illumination directe, le rayonnement concentré pénètre dans le récepteur par une ou plusieurs parois transparentes pour venir chauffer directement les particules. Dans la configuration à chauffage indirect, le rayonnement solaire vient impacter une surface opaque et absorbante qui une fois chauffée va transmettre sa chaleur par convection et rayonnement aux particules contenues par le récepteur. Un deuxième critère de différenciation concerne le mode de contact solide-gaz qui peut être un empilement de solide comme le lit fixe ou un milieu mobile comme les lits tombants et les lits fluidisés. Un autre critère de discrimination des récepteurs solaires à haute température est le type d'application envisagé. Il peut être soit de convertir l'énergie solaire en énergie thermique et produire de l'électricité par un cycle thermodynamique, soit de convertir l'énergie solaire en énergie chimique afin de pouvoir stocker de l'énergie sous la forme de combustibles chimiques, notamment l'hydrogène. [6]

I.3.2.Exemples de récepteurs solaires à particules

Les réacteurs solaires, dans le cas qui nous intéresse, sont utilisés pour chauffer un gaz à haute température dans un cycle thermodynamique visant la production d'électricité. Mais l'application des lits de particules dans le domaine de l'énergie solaire ne s'arrête pas là et il est bon de savoir que les lits fluidisés sont aussi utilisés dans de nombreuses applications chimiques. De plus, alors que l'étude des récepteurs à vocation thermodynamique semble avancer au ralenti, depuis ces dernières années, des travaux beaucoup plus récents peuvent être trouvés dans les applications à la chimie. L'application chimique la plus répandue est la production d'hydrogène par la thermolyse de l'eau en utilisant par exemple le couple redox Zn/ZnO. En fait, on retrouve ces applications pour des plages de températures très larges et des réactions chimiques très variées. Cette diversité de paramètres donne naissance à une grande variété de réacteurs solaires qui peuvent prendre une dizaine de formes différentes dont les principales vont être abordées par les exemples ci-dessous. [6]

Dans cette partie, il sera question de lits fluidisés. Pour plus de renseignements concernant le principe de fluidisation et les notions de base sur les lits fluidisés, veuillez-vous reporter à L'annexe A. [6]

I.3.2.1.Les récepteurs à lit fixe

Gregg ainsi que Taylor ont été les premiers à appliquer l'utilisation d'un lit fixe à la gazéification du charbon dans la vapeur d'eau ou le CO₂. Le rayonnement solaire concentré pénètre par une fenêtre de quartz situé sur le dessus ou le coté du lit pour venir chauffer les particules qui sont traversées par un courant de gaz. Lors de leurs expériences, plus de 40% de l'énergie solaire incidente a pu être stockée chimiquement.[6]

Malheureusement, plus la puissance du rayonnement incident est haute, plus le rendement chute : 19 à 48% pour des puissances comprises entre 4 et 23 kW. Des pertes thermiques entre 70 et 60% ont été constatées expérimentalement. Les gradients de température dans le lit fixe ainsi que les pertes thermiques sont les deux problèmes majeurs de ce procédé qui doivent être résolus. D'autres travaux intéressants sur l'expérimentation des lits fixes, le calcul des transferts radiatifs dans le lit ainsi que la comparaison d'efficacité thermique entre lits fixes et lits fluidisés ont été menés par Olalde et Flamant au laboratoire du four solaire d'Odeillo. [6]

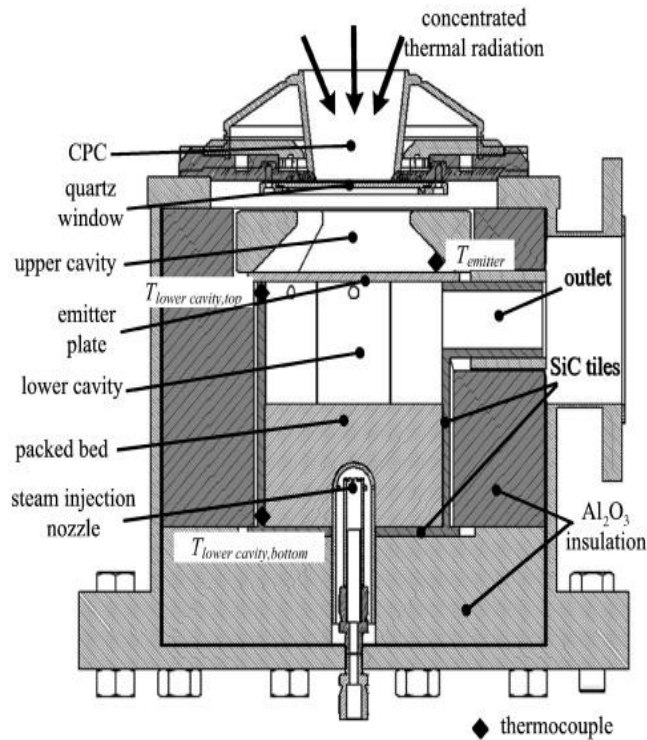


Figure.I.8 : Réacteur solaire à lit fixe à éclairage vertical.

I.3.2.2. Les récepteurs à lit rotatif

Le concept de ce type de récepteur consiste à absorber directement l'énergie solaire par des particules dans un courant de gaz réactif. L'illumination directe de la suspension dense de particules a l'avantage de créer un gradient thermique entre la zone de réaction et les parois du dispositif, qui sont ainsi préservées. Ce type de récepteur a été étudié par Flamant, Royere et Badie au four solaire d'Odeillo (France) dès les années 80 mais aussi par les équipes de PSI (Paul Scherrer Institut) en Suisse. Des températures supérieures à 1000 K ont pu être facilement atteintes tout en gardant les parois à des températures avoisinant 550 K. Ces travaux s'inscrivent principalement dans une démarche de décomposition thermique d'oxydes de fer ou de zinc dans un courant de gaz inerte. Cette réaction, couplée à une autre réaction d'oxydo-réduction permet in fine la production d'hydrogène. Des efficacités thermiques de l'ordre de 30% ainsi que des températures de 2000 K ont pu être atteintes. [6] Les recherches sur ce type de procédés, permettant la production d'hydrogène par dégradation thermique d'espèces métalliques sont encore d'actualité dans ces deux laboratoires notamment afin d'augmenter les rendements et de répondre aux problèmes liés à la résistance des matériaux du récepteur à haute température. [6]

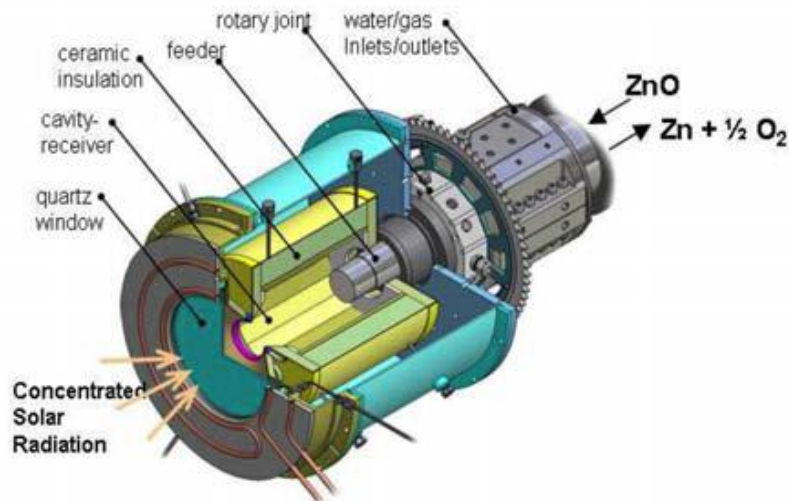


Figure.I.9: Réacteur solaire à lit rotatif étudié à PSI, Suisse.

I.3.2.3. Les récepteurs à lit mobile

De morphologie un peu plus complexe que le lit fixe (Figure I.10), le lit mobile permet de maintenir le front de réaction au niveau de la tâche focale du concentrateur et ce malgré la consommation des réactifs constituant le lit. Un exemple de ce type de réacteur a été étudié dans les années 2000 pour la gazéification solaire du charbon. Des rendements globaux de 58% ont pu être atteints pour des taux de conversion de charbon de 98%. [6]

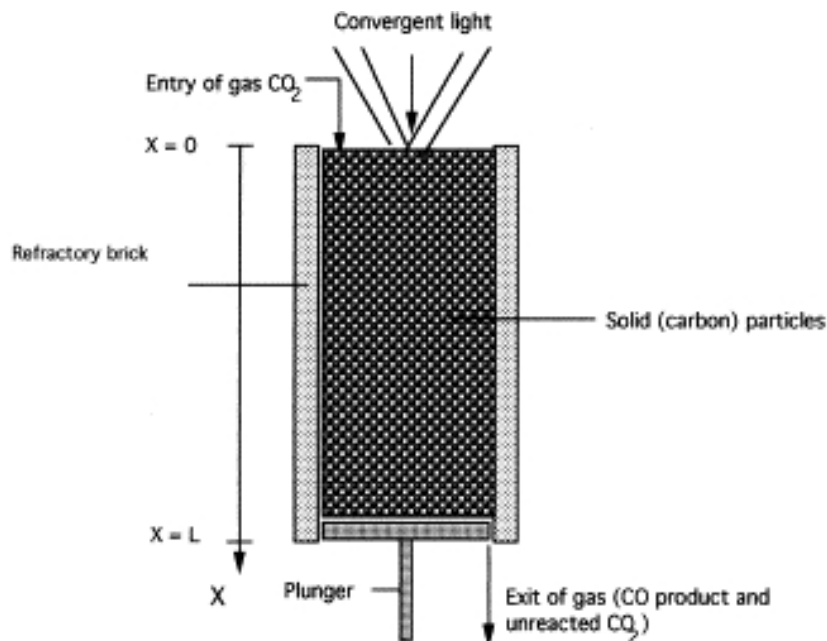


Figure.I.10 : Réacteur solaire à lit mobile.

I.3.3. Les récepteurs solaires et les réacteurs à film tombant

Basé sur une idée originale de Falcone, un concept de récepteur solaire à film tombant a été développé puis testé à l'échelle de pilote par les laboratoires Sandia dans les années 80.

Encore étudié de nos jours aux USA ce récepteur est constitué d'une cavité et une ouverture.

Ce récepteur adapté aux centrales solaires fut l'objet de très nombreuses études et optimisations dont voici un exemple. L'efficacité du récepteur pour chauffer des particules aux alentours de 1000°C est mesurée à 60%. Malgré ce niveau d'efficacité acceptable, ce procédé demande encore à être amélioré au niveau des pertes radiatives et convectives de chaleur dues à l'ouverture du récepteur solaire. D'autre part, une fois le rayonnement capté par les particules tombant dans un gaz à pression atmosphérique, la chaleur doit encore être transférée au gaz turbiné par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur solide-gaz sous pression. Cet échangeur complexe pose quelques problèmes au niveau de sa conception et de son rendement. [6]

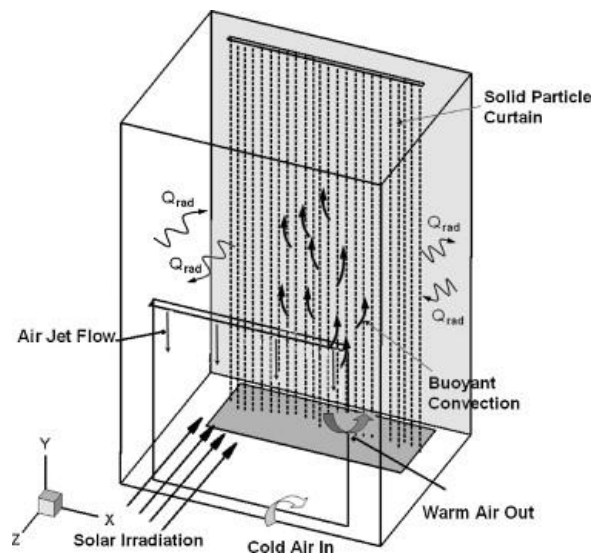


Figure.I.11: Réacteur solaire à lit mobile (rideau ou film de particules solides).

1.3.4. Récepteur solaire à particules tombantes obstruée

Les particules chauffées indirectement avec des particules descendant sous la force de la gravité à travers des tubes dans une cavité. Les tubes ont été irradiés par la lumière solaire concentrée sur les surfaces intérieures lors du transfert de chaleur. Les particules circulant sur le côté extérieur des tubes à l'intérieur d'une cavité (Figure I.12). Des tests et des modèles à petite échelle ont été effectués qui ont montré que le transfert de chaleur vers les particules était limité aux endroits autour des structures tubulaires où les particules perdaient contact avec

les surfaces murales chauffées. Données spécifiques sur les particules les températures et les rendements thermiques n'étaient pas disponibles, et aucun des tests au soleil ont été effectués.

D'autres limitations peuvent inclure maintenir un débit massique suffisant et obtenir une pénétration importante et un flux uniforme de lumière solaire concentrée. Les avantages de cette conception n'incluent aucune perte de particules à travers une ouverture ouverte et des pertes de chaleur réduites par rapport à un récepteur à cavité ouverte. [7]

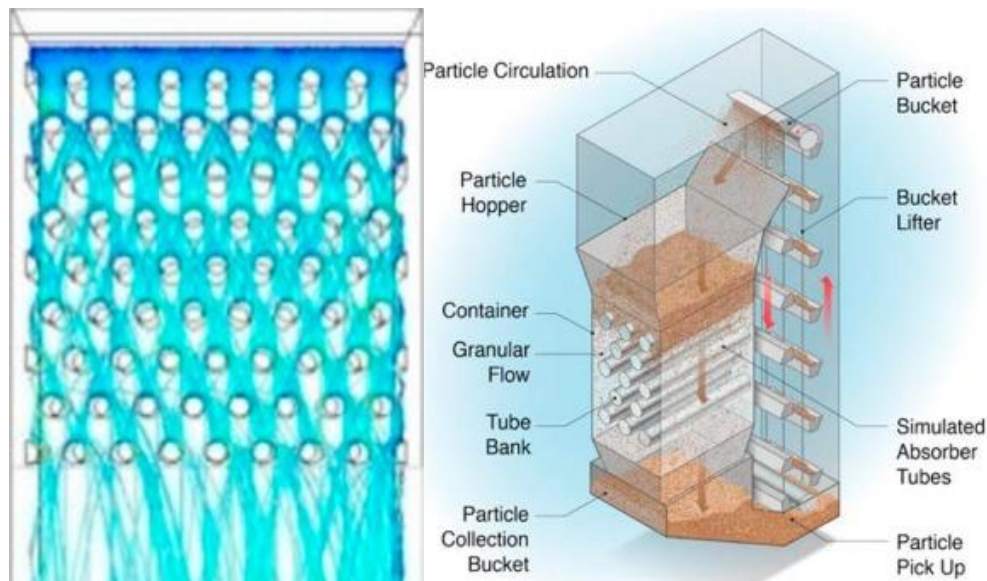


Figure I.12 : Récepteur solaire a particules tombantes obstruée.

Antal a lui aussi expérimenté un réacteur à lit tombant afin de gazéifier de la biomasse sous vapeur d'eau dans une colonne de quartz placée dans un four solaire de 1000 kW. Malheureusement, ce procédé peu adapté n'a permis d'atteindre que des rendements de 4% seulement. De plus, des problèmes de détérioration des qualités optiques des parois transparentes sont vite apparus.[6]

I.3.4.1. Les récepteurs cyclone

Les réacteurs cyclone peuvent être utilisés pour des réactions de type flash comme la pyrolyse du bois. Les temps de séjours sont très faibles et les températures atteintes peuvent être importantes. Lede a expérimenté ce type de réacteur pour la pyrolyse du bois et a obtenu des rendements de conversion de 80% pour des températures de particules de 600°C. Ce type de réacteur fut l'objet de recherches dans les laboratoires du PSI dans les années 1990.[6]

I.3.4.2. Les récepteurs à particules entraînées

Un prototype abouti de réacteur à lit entraîné pour la production d'hydrogène et de nanoparticules de carbone a été développé au WIS. Le principe de ce réacteur dit à tornade est d'entraîner des particules de carbone de l'ordre du micromètre dans un courant tourbillonnant d'azote qui permet ainsi de les maintenir dans la zone éclairée du récepteur. L'augmentation de la température du milieu liée à l'absorption de l'énergie solaire par les particules de carbone permet d'atteindre la température de dissociation du méthane et donc la production d'hydrogène. Des études numériques et expérimentales ont prouvé la capacité de ce récepteur à atteindre des températures allant jusqu'à 1500°C sous un concentrateur de 10 kW de puissance pour un rendement de conversion de méthane maximal de 100%. [6]

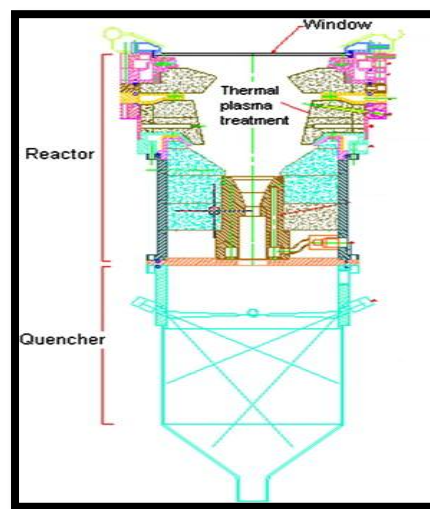


Figure.I.13: Réacteur solaire à lit entraîné du laboratoire WIS.

Une variante horizontale de ce type de réacteur a également été étudiée à PSI pour la production d'hydrogène. Des rendements de conversion très élevés ont également été atteints pour le méthane alors que le rendement global maximal était de 16%. [6]

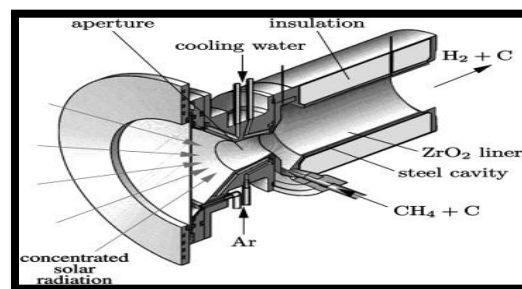


Figure.I.14: Réacteur solaire à lit entraîné du laboratoire PSI.

I.3.4.3. Les récepteurs à lit fluidisé

Les lits fluidisés permettent l'éclairement direct du solide divisé (dans certains cas) et possèdent de bons coefficients d'échange thermique, meilleurs que pour les lits fixes. Cet aspect représente un grand avantage quand il s'agit du transfert thermique qui limite la réaction chimique. Un réacteur à lit fluidisé transparent a été étudié par Flamant pour la décarbonation de la calcite vers 900°C. L'efficacité mesurée est malheureusement faible, de 10 à 15% en raison d'importantes pertes radiatives au niveau de toutes les parois semi-transparentes. C'est pour cette raison que d'autres types de récepteurs à lit fluidisés, notamment avec éclairement au travers d'une fenêtre de quartz située en haut d'une colonne d'acier réfractaire ont été développés et étudiés depuis.[6]

On peut par exemple citer le réacteur circulaire de Foro qui permet d'obtenir expérimentalement des rendements de l'ordre de 40% à une température de 900°C. Ce type de réacteur a aussi été étudié par Lede pour la pyrolyse d'huiles lourdes. Le système d'éclairement de ce dispositif est vertical et indirect, c'est-à-dire que le rayonnement n'est pas absorbé par les particules mais par une paroi intermédiaire. Le procédé traite la décarbonation de la calcite en continu. Un autre réacteur à éclairement indirect a été étudié par Flamant dans les années 80. Plus récemment, les récepteurs à parois transparentes ont été actualisés par Muller et Trommer pour produire de l'hydrogène à partir de la gazéification du charbon. Ces chercheurs ont pu constater des pertes thermiques équivalentes à 40% de l'énergie solaire incidente. Ce terme de perte peut être décomposé en une fraction réfléchiée par les parois du réacteur et une autre fraction émise dans le domaine de l'infrarouge par le lit de particules. Ces récepteurs à parois transparentes sont également développés à PSI pour la capture de CO₂ par la calcination du CaO.

On peut ensuite citer les travaux récents de Gokona au Japon qui a expérimenté un lit fluidisé à circulation interne pour la décomposition thermique d'oxydes de zinc.[6]

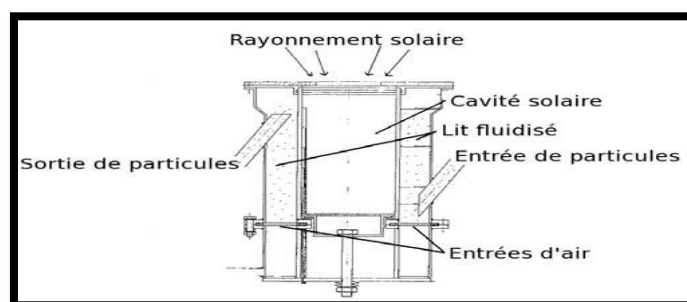


Figure.I.15 : Réacteurs solaires à lit fluidisé circulaire.

Des températures de plus de 1400°C ont été atteintes, mais les rendements restent pour l'instant très faibles car inférieurs à 1%. [6]

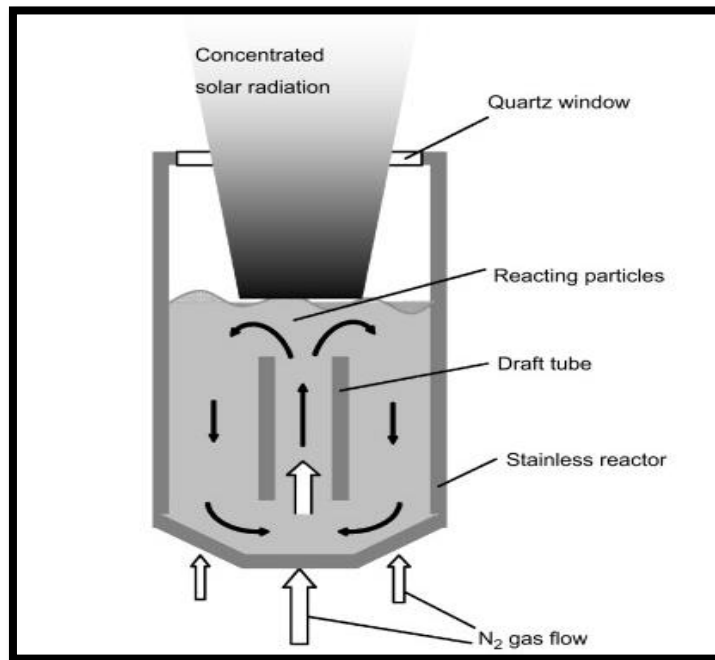


Figure.I.16:Réacteurs solaires à lit fluidisé à circulation interne.

Enfin, un réacteur à lit fluidisé bouillonnant à éclairage vertical indirect a été développé au centre PSI et étudié en France pour la gazéification du carbone. Dans ce récepteur à éclairage indirect, le rayonnement solaire n'est pas absorbé directement par les particules, il est absorbé par une plaque de métal. Il est intéressant de constater que même si le réacteur est maintenu à une température moyenne 1400°C, une forte hétérogénéité de température est constatée suivant la hauteur du lit (de l'ordre de 300°C sur 10 cm). [6]

I.3.4.4. Les récepteurs à lit fluidisé pour cycles thermodynamiques

Dans les années 80, de petits lits fluidisés ont été construits et étudiés au CNRS à Odeillo. Ces lits fluidisés étaient contenus dans des tubes en quartz transparent, pour une hauteur d'environ 10 cm de haut. Dans ce procédé, l'énergie solaire concentrée par un petit four solaire irradiait le lit fluidisé verticalement par le haut. Des températures de l'ordre de 1500°C ont pu être atteintes et des réactions chimiques ont pu être testées dans le lit. Les problèmes principaux rencontrés furent des pertes de chaleur importantes dues aux pertes radiatives à travers la paroi en quartz. Parallèlement, en 1980, un récepteur solaire à lit fluidisé de 30 cm de haut a pu être testé par le Westinghouse R&D Center à l'Advanced Components Test Facility du Georgia Tech Research Institute. Le lit fluidisé développé a été

testé en haut d'une tour au centre d'un champ d'héliostats. Le lit fluidisé en silice était éclairé sur toute sa circonférence. On a pu constater grâce à cette expérience qu'en plus des pertes thermiques importantes par émission du lit dans le domaine de l'infrarouge, venait s'ajouter un problème de dégradation des parois en silice qui devenaient très vite troubles à cause d'une multitude de rayures. Enfin, à partir de 1985, furent menées à Stuttgart des travaux expérimentaux et théoriques sur les lits fluidisés dans leur application solaire. Deux différents types de récepteurs ont été soumis à un rayonnement de 2,5 kW. Le premier type de récepteur possédait une forme tubulaire dans la zone de bullage et conique dans sa partie supérieure afin de faire chuter la vitesse du gaz et donc de favoriser la retombée des particules dans la zone irradiée et éviter l'entraînement des particules. Par ce procédé, des températures de l'ordre de 500 à 900°C ont pu être atteintes. Le deuxième procédé était équipé d'un lit fluidisé circulant avec un cyclone pour la séparation des particules et du gaz. Les mêmes problèmes ont pu être constatés lors de ces expériences, à savoir des pertes radiatives importantes pour des rendements oscillant entre 30 et 70%. [6]

I.4. Le principe d'utilisation de la suspension dense des particules

Le principe général est de remplacer le fluide caloporteur par une suspension dense de particules (approximativement 40% de volume solide). Grâce à ces particules solides on peut augmenter la température de fonctionnement qui permet une production d'énergie à partir un cycle thermodynamique à haute température, elles seront chauffées au maximum possible afin de récupérer l'énergie du rayonnement solaire [8].

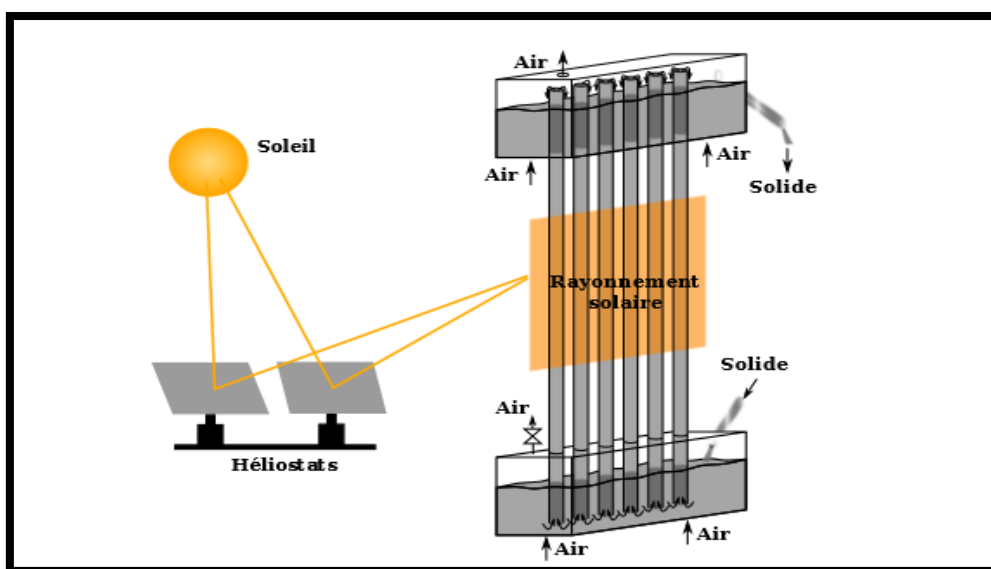


Figure.I.17: exemple d'une maquette verticale d'une suspension dense de particules.

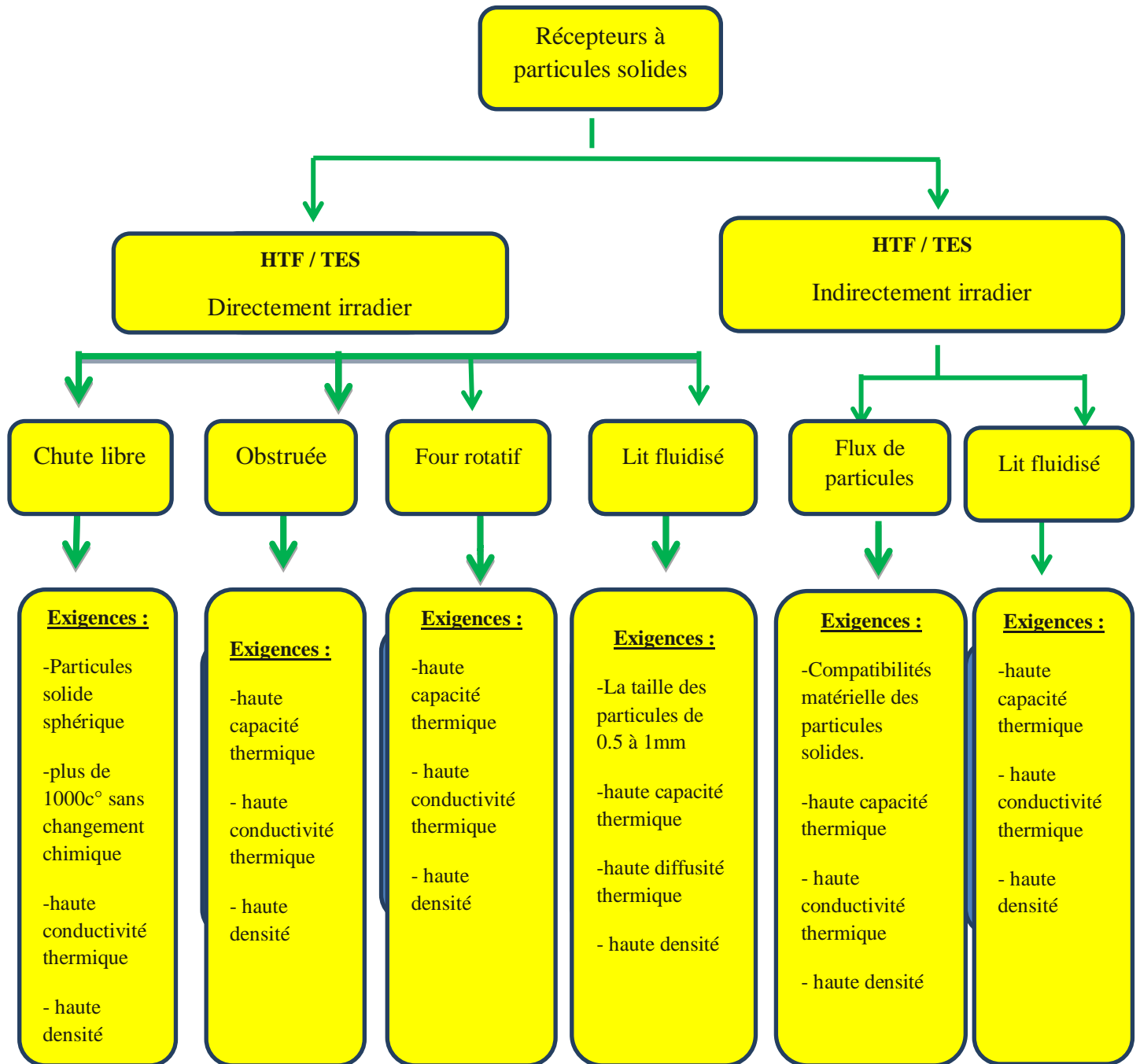


Schéma explicatif des caractéristiques des récepteurs à particules solide



I.4.1. Les propriétés et le choix des particules solides

La haute température récupérer par le rayonnement solaire peut causer des dégâts (des pertes).

A cette température ; les collisions entre les particules peuvent conduire à la formation d'agglomérats qui présente un phénomène qu'il faut éviter car il conditionne la stabilité hydrodynamique de la suspension, donc il est préférable que la poudre (particule) idéale doit :

- Etre stable à la haute température (ne subit pas des modifications de ses propriétés physique).
- Avoir une capacité calorifique, volumique la plus grande possible.
- Etre utilisée sur une large gamme de température.
- Etre disponible.
- Etre commercialisée (son cout).

Parmi les poudres les plus utilisées, en sites trois d'entre elles :

(Le sable, l'alumine compacte et le carbure de silicium). [8]



Figure I.18: carbure de silicium.

Figure I.19 : le sable.

Leurs propriétés thermo physiques sont comparées dans le tableau suivant :

	Sable	Alumine compacte	Carbure de silicium
$P_p [kg.m^{-3}]$	2630	2360	3210
$C_p [j.kg^{-1}.k^{-1}]$	835	800	670 (20°C) – 1260 (1000°C)
$P_p. C_p [kj. m^{-3}.k^{-1}]$	2196	1888	≈3210
$T_{fritt} [C^{\circ}]$	860	1100	1400
$\lambda [W. m^{-1}. k^{-1}]$	≈2	≈10	≈40

Tableau.I.1 : comparatif des poudres.

D'après l'analyse de tableau 1 on déduit que la poudre la plus efficace parmi ces trois est le carbure de silicium en plus de sa disponibilité illimité et son cout est faible.

I.5 : Les propriétés et le choix du fluide caloporteur

Ce qui concerne cette technologie nombreux fluides caloporteurs se présentes (les huiles minérale, les sels fondus, hélium, l'air, les particules solidesEtc.). Mais le plus utilisées d'entre eux est le fluide qui avoir un coefficient de transfert (h) important, ses propriété thermo physiques stables et plus de sa disponibilité illimité, son cout d'achat raisonnable. Dans le tableau suivant en présente les propriétés thermo physiques de certains fluides caloporteurs :

	Eau liquide	Vapeur surchauffée	Air
Capacité calorifique (cp)	5,73	2,71	1,17
Masse volumique ρ (kg/m ³)	713	43,6	2,9
Température de fusion T (°C)	0	-	-
Température maximum T (°C)	303.3	-	Illimité
Viscosité μ (pa. s)	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Coefficient d'échange (h)	(10000-60000)	(4000-16000)	(100-300)
Conduction thermique λ (w/m.k)	0,55	0,086	0,78

Tableau.I.2 : comparatif des fluides caloporteur

Certains pensent a utilisées des métaux liquides (sodium, l'alliage.....) dans cette technologie comme fluide caloporteur, mais les contraintes de sécurité et la faible capacité calorifique volumique de ces métaux liquides ne permet pas de les utilisées [8].

Chapitre II :

**Dimensionnement, Conception et réalisation
d'un concentrateur solaire à particule solide.**

II.1.Introduction

La suspension dense des particules solides dans le récepteur tubulaire[9] et les particules tombantes dans les récepteurs à particules tombantes [10] est un procédé largement utilisé dans les industries de production de l'électricité par voie d'énergie solaire thermique.

De nombreux modèles prédictifs existent dans le cas des suspensions, c'est-à-dire lorsque le diamètre des particules est petit devant le diamètre du tube[11]. Il est alors possible de prédire les pertes de charges en tube verticale.

Ces dernières années, la forte augmentation de la demande de l'électricité rend l'exploitation des nouvelles ressources très intéressante, en particulier l'exploitation de champs situés aux centrales solaires thermiques dans la région ensoleillée de l'Afrique, dans le but de produire une électricité respectueuse de l'environnement pour l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Europe.

Dans ce cas, il s'agit de transporter des particules solides de taille de 0.1 à 1 mm de diamètre, dans un circuit de forme complexe, incluant des parties verticales c'est le lit fluidisé circulant, cyclone, et éventuellement des particules tombantes et des formes en chevrons. Pour le transport en conduite verticale, il existe des modèles prédictifs basés sur les travaux de [12] B. Boissière, [13] H. Benoit et [14] G. Flamant. Nous avons vérifié la validité de ce modèle sur un ensemble de données expérimentales.

II.1.1 Dimensionnement de dispositif

Durant le dimensionnement nous avons concentrés sur la faisabilité du concept de récepteur DPS qui a permis de déterminer les valeurs du coefficient de transfert thermique (CTH) paroi-suspension dans cette configuration.

La configuration expérimentale a été équipée afin de chauffer les particules solides et de fonctionner à haute température dans le tube absorbeur (jusqu'à plus de 700 °C).

Nous étudions aussi les pertes de charges et les régimes d'écoulement à froid pour des particules solides, par mesures de pression et visualisations de la suspension dense des particules.

Deux densités sont utilisées. Des modèles basés sur le nombre Prandtl et Nusselt sont testés [15].[16].[17].[18]. Nous étudions enfin des mélanges de taille et/ou de densité. Nous nous intéressons également aux transitoires de bouchage et débouchage de tube.

Au terme de cette étude nous dresserons un bilan sur l'avancement actuel dans la recherche portant sur la modélisation et la simulation des écoulements solide/fluide applications dans les tours solaires à particules solides.

II.2. Description du banc d'essai

La boucle d'essai est schématisée en (Fig. 1). Elle est constituée d'un premier tube cintrée en 90° rigide et transparent, de diamètre 42 mm et de longueur 270 mm et d'une deuxième partie de tube verticale de hauteur 2400 mm et troisième partie de tube cintrée en 90° rigide transparent, de diamètre 42 mm et de longueur 270 mm dans lequel circule le mélange solide/fluide. À une hauteur de 1300 mm, nous avons installé une différentielle de pression la distance entre les deux prises soit égale 800 mm.

L'objectif est d'installer le tube rigide transparent afin que nous puissions voir le type d'écoulement et la distribution des particules à l'intérieur de récepteur tubulaire dans les expériences à froid.

Dans les expériences à chaud nous avons utilisé un tube en acier avec les mêmes dimensions. Et nous avons pris les mêmes données. Le tube se termine par un cyclone pour séparer le mélange solide/fluide, atteint ensuite un séparateur cyclone constitué de deux sorties en haut sortie l'air chaud vers la cuve de stockage, et l'autre en bas, à travers lesquelles les particules solides sortent vers la trémie supérieure.

Le retour des particules s'effectue dans une cavité réceptrice à particule réalisé par des tôles de 2 mm en acier, de hauteur de 600 mm largeur de 150 mm et de 500 mm de longueur. Les particules solides tombent alors dans la cavité réceptrice, et les particules solides s'écoulent dans des chevrons à 120° muni à sa trémie supérieure d'une trappe réglable. Air rejoint à la chambre de mélange par un supprimeur à un tube muni d'un débitmètre, et les particules par un doseur mécanique situé au-dessus.

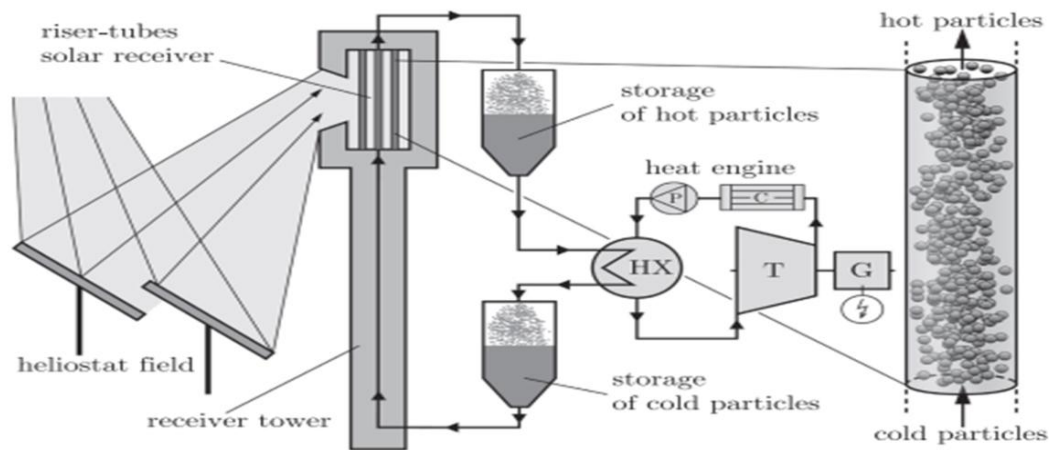


Figure II.1 : Dispositif expérimental.

II.2.2 Données de l'expérimental

Nous devons modéliser et simuler un lit fluidisé des particules de petite taille (échelle pilote de laboratoire) avec injection et soutirage de particules qui traite un débit massique de particules de sable de 5 à 15 kg/m².s par un débit massique d'air de 250°C à 350°C a Cinq valeurs d'aération flux ont été testées: 0,010. 0,020. 0,040. 0,060. 0,080 et 0,100 Nm³.m⁻².s⁻¹. Le temps de séjour des particules vaut entre 10 min à 15 min, la fraction volumique lit est de l'ordre de 40 % et la pression à la sortie du lit correspond à la pression atmosphérique. A partir de ces données nous pouvons calculer les dimensions du lit ainsi que ses propriétés hydrodynamiques suivant divers corrélations que nous explicitons par la suite.

L'utilisation de l'un des modes de contact solide-gaz parmi ceux cités précédemment peut dépendre de plusieurs facteurs comme la taille des particules et le temps de séjour du gaz dans le lit.

Dans le domaine de la conversion électrique de l'énergie solaire, le gaz doit être dépourvu de particules à l'entrée de la turbine et il doit être à très hautes températures.

Le temps de séjour du gaz dans le lit de particules est élevé dans les lits fixes et très faibles dans les lits transportés.

Dans les procédés de récepteurs solaires utilisant les lits de particules pour chauffer un gaz à haute température, ce temps de séjour ne doit être ni très élevé ni très faible. Un passage rapide du gaz dans un lit insolé, comme le lit transporté, fait que sa température à la sortie sera faible.

Quand ce temps de passage est faible, comme dans les lits fixes, les pertes thermiques sont très importantes. Dans les lits fluidisés ce temps de passages situe entre ceux des deux lits cités précédemment.

La diminution du temps de passage de l'air dans le lit fluidisé permet d'avoir des rendements importants et de diminuer les pertes thermiques. Cependant, on ne peut pas augmenter infiniment le débit d'air pour ne pas entraîner les particules vers l'extérieur du récepteur et aussi pour ne pas détériorer la fenêtre du récepteur.

La taille des particules a un effet négatif sur la température de sortie du gaz en raison de la diminution de la surface de contact solide-gaz. Ce paramètre a un effet positif sur le rendement thermique du récepteur. Cependant, il est déconseillé d'utiliser les fines particules pour ne pas détériorer le hublot. L'augmentation de la hauteur du lit au repos permet d'augmenter les surfaces d'absorption du rayonnement solaire et d'échange thermique entre les particules solides et l'air.

L'augmentation du temps de séjour de l'air dans le lit fluidisé permet d'avoir des températures d'air importantes, mais les pertes thermiques augmentent et le rendement du récepteur diminue. L'augmentation du nombre de fluidisation (vitesse de fluidisation) permet de diminuer la densité volumique du lit et donc d'augmenter la pénétration du rayonnement dans le lit à travers les interstices. Ce phénomène permet de diminuer les pertes par réflexion à la surface du lit et d'augmenter l'énergie captée par le lit et échangée entre les particules et le gaz. Ce point positif des lits fluidisés est perceptible au niveau du rendement du récepteur mais il est masqué au niveau de la température de sortie du gaz en raison de l'accroissement de la vitesse de ce dernier.

II.3. Montage de la partie industrielle

II.3.1. Système d'injection

- Doseur

Le doseur est un élément essentiel dans le dispositif, il est composé de 4 chambres tournantes autour d'un axe. Les chambres sont séparées par des Parois sous forme des rectangles en acier, il sert à alimenter la chambre de mélange avec les particules solide.

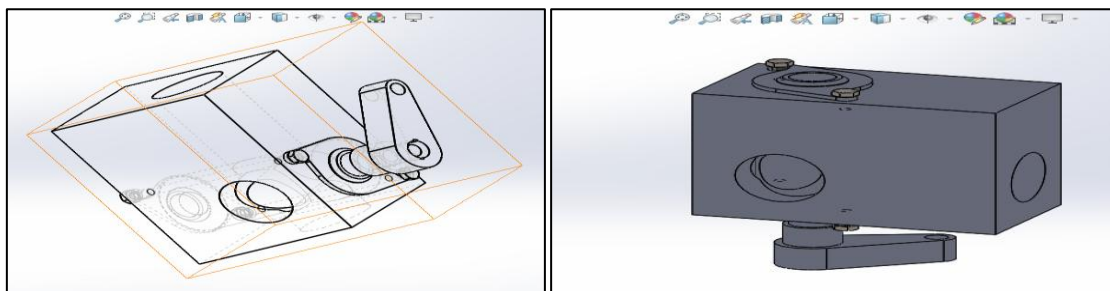


Figure II.2 : conception de doseur avec logiciel solidworks.



Figure II.3 : Le doseur.

- **Distributeur**

Il sert à assurer une meilleure distribution de lit fluidisé.

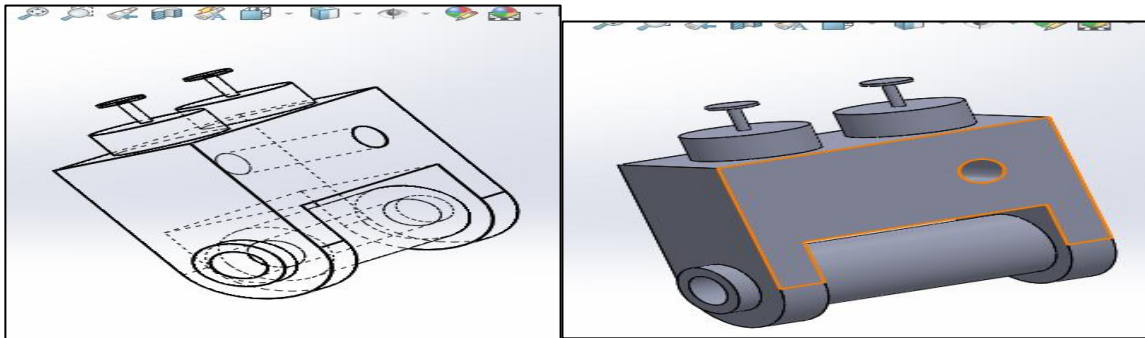


Figure II.4 : conception de distributeur avec logiciel solidworks.

- **Support**

Le rôle du support est de supporter le système d'injection et amortir les chocs lors le système est en fonctionnement.

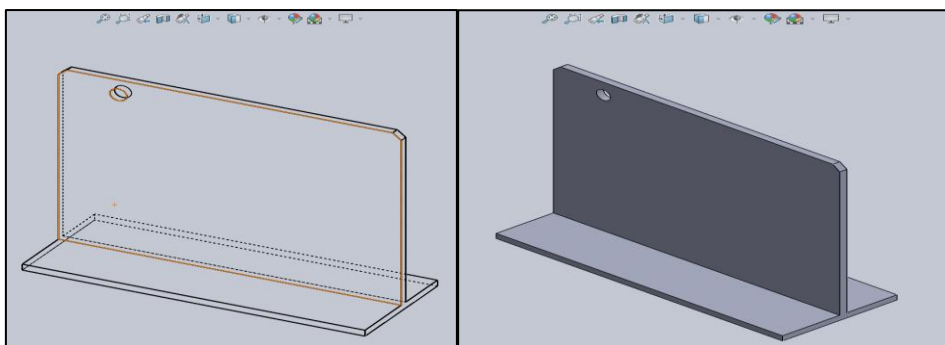


Figure II.5 : conception de support avec logiciel solidworks.

Le système d'injection assemblé

Le système d'injection est l'ensemble de doseur-distributeur relier entre eux et porté par un support, son rôle est d'injecté l'ensemble de mixture (air+particule) dans la pompe.

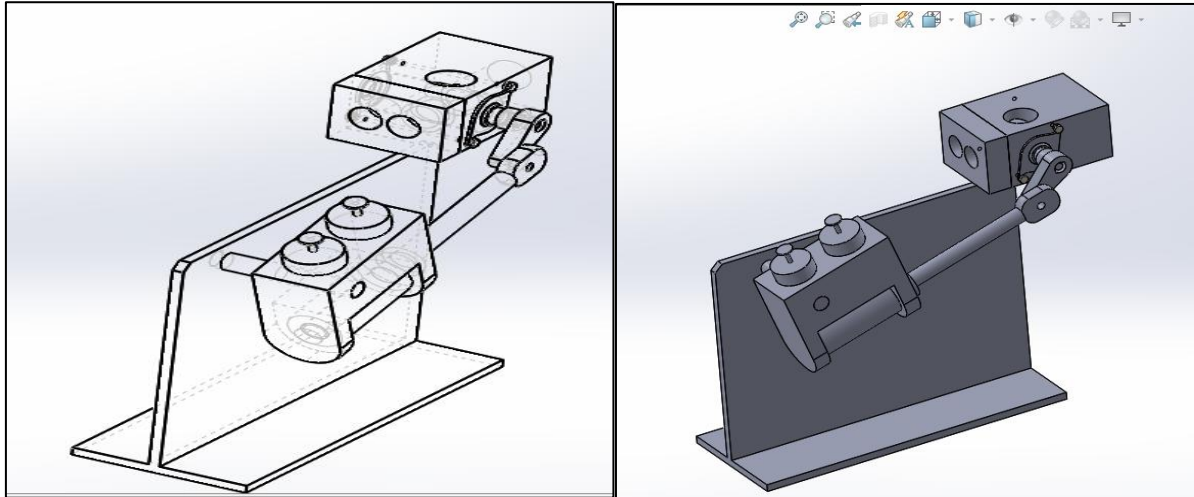


Figure II.6 : conception de système d'injection avec logiciel solidworks.



Figure II.7 : Le système d'injection

II.3.2.Souffleur

Son rôle c'est de faire circuler le mélange (air+particules) dans le tube absorbeur avec un débit et une pression bien précise.

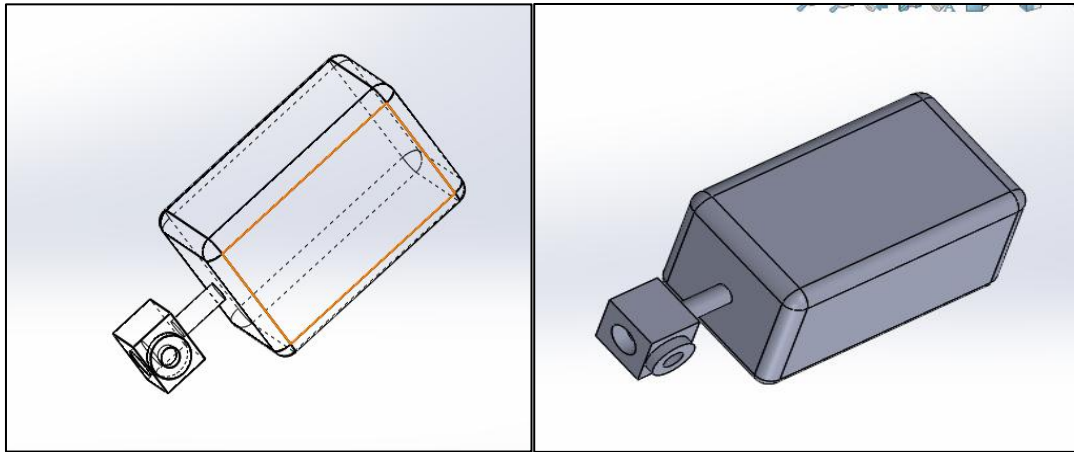


Figure II.8 : Conception de souffleur avec logiciel solidworks.



Figure II.9 : Le souffleur (pompe).

II.3.3. Le tube absorbeur

Chaque lit fluidisé comprend un distributeur de fluidisation en acier (dans la maquette chaude) inoxydable fritté ; permettant ainsi à la fois une résistance mécanique et une bonne chute de pression tout en résistant à haute température. Le tube absorbeur est suspendu sur un cadre métallique horizontale.

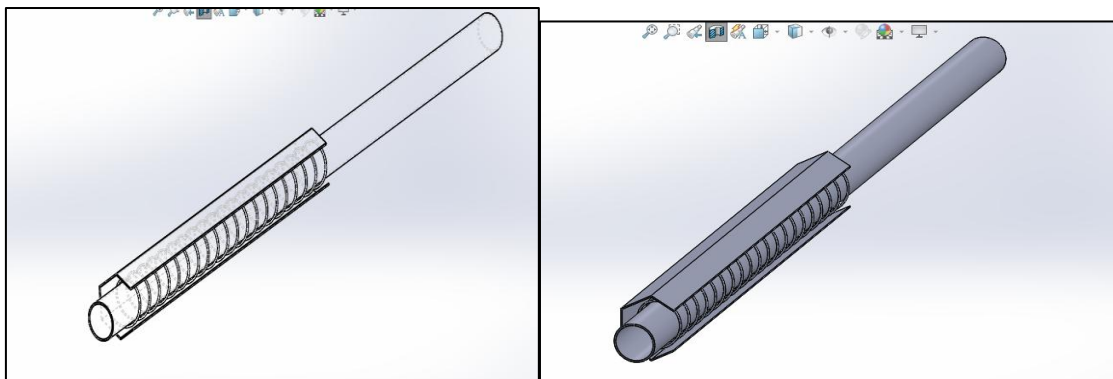


Figure II.10 : conception de tube absorbeur avec logiciel solidworks.



Figure II.11 : Le tube absorbeur

II.3.4.Le cyclone séparateur

Son rôle est de séparé le mélange (air+particules) ou elle dérive l'air vers la turbine pour la fabrication de l'électricité et les particules vers le récepteur de particules tombantes pour les réchauffées jusqu'à l'obtention de la température souhaitée.

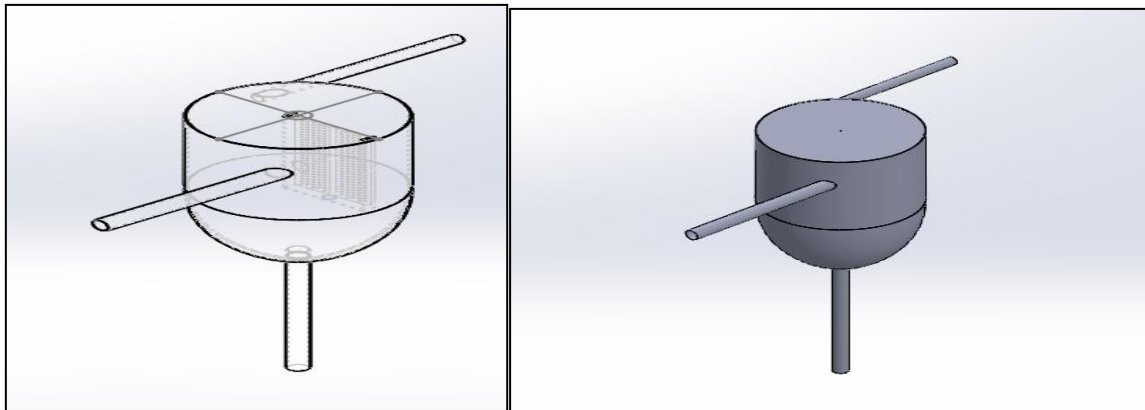


Figure II.12 : Conception de cyclone avec logiciel solidworks.

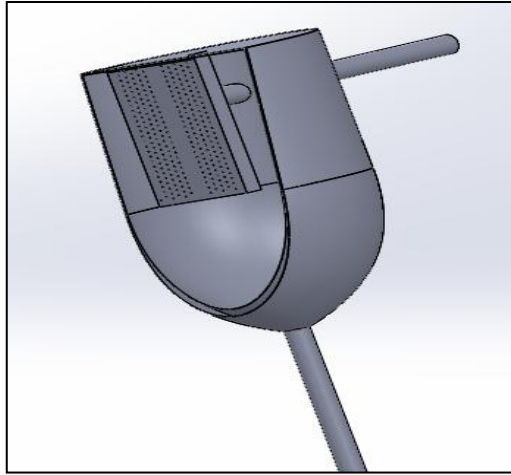


Figure II.13 : Conception de cyclone avec coupe par logiciel solidworks



Figure II.14 : Le cyclone.

II.3.5.Le récepteur de particules tombantes

Est un élément essentielle dans le système son rôle consiste a capturé le rayonnement solaire puis l'utilisation de ce dernier pour le réchauffement des particules solide a un degré de température très élevé (700°C _ 1000°C), on utilise des obstacles (les chevrons) pour retardé la décente des particules solides vers la cuve de stockage pour les exposé au rayonnement solaire pour un certain temps qui nous aide a avoir des températures haute que celles de la chute libre.

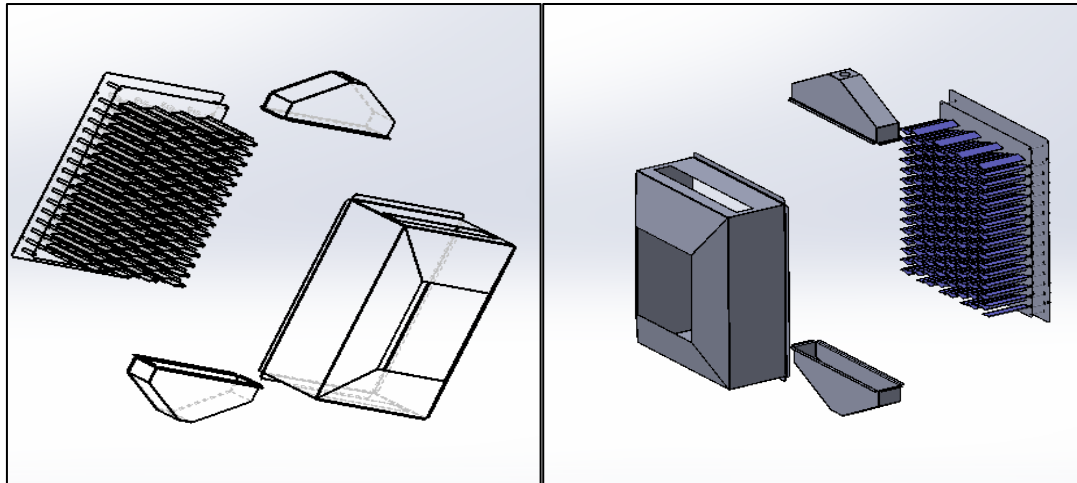


Figure II.15 : conception de récepteur de particules tombantes avec logiciel solidworks.



Figure II.16 : Le récepteur de particules tombantes.

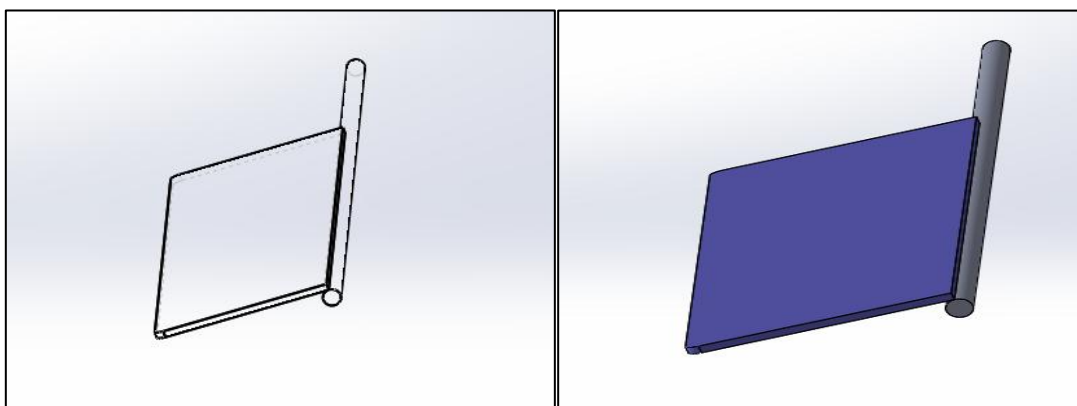


Figure II.17 : conception des chevrons avec logiciel solidworks.



Figure II.18 : Les chevrons.

II.3.6. La vis sans fin et le réservoir de stockage à froid

- La vis sans fin

Le rôle de la vis sans fin est de transporter les particules solides (Sable) à partir de la cuve de stockage des particules froides vers le système d'injection.

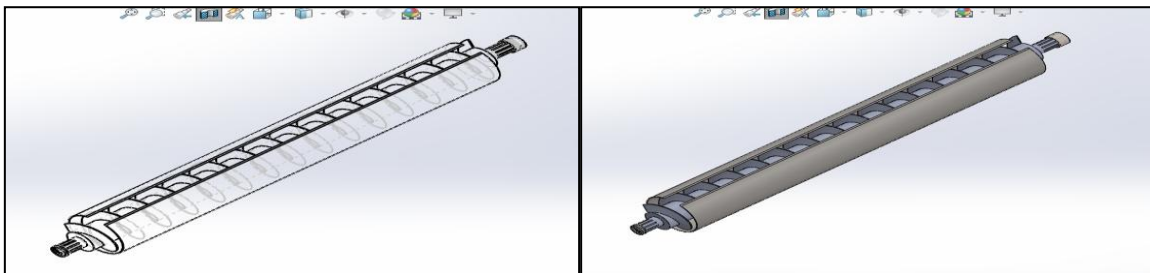


Figure II.19 : Conception de la vis sans fin avec logiciel solidworks.

- Le réservoir de stockage à froid

Il sert a stocké les particules solides avant l'utilisation.



Figure II.20 : Le réservoir de stockage à froid.

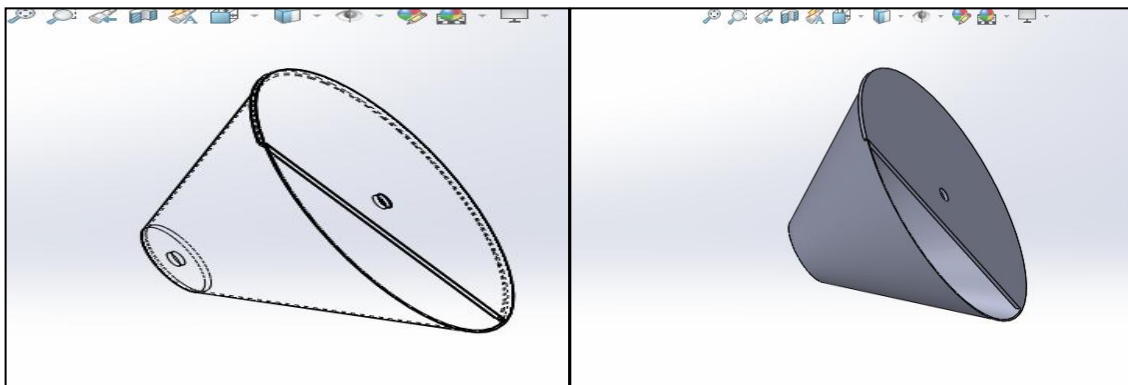


Figure II.21 : Conception de réservoir de stockage à froid avec logiciel solidworks.



Figure II.22: La vis sans fin et le réservoir de stockage à froid.

II.3.7. La cuve de stockage à chaud

Elle sert à stocker les particules solides chauffées après leur fluidisation et elle est composée de trois murs avec différentes compositions de matériaux pour chacun.

Mure 1 : Brique réfractaire.

Mure 2 : Béton armé.

Mure 3 : Acier avec isolation thermique.

Et cela pour mieux conserver la température pour long temps.

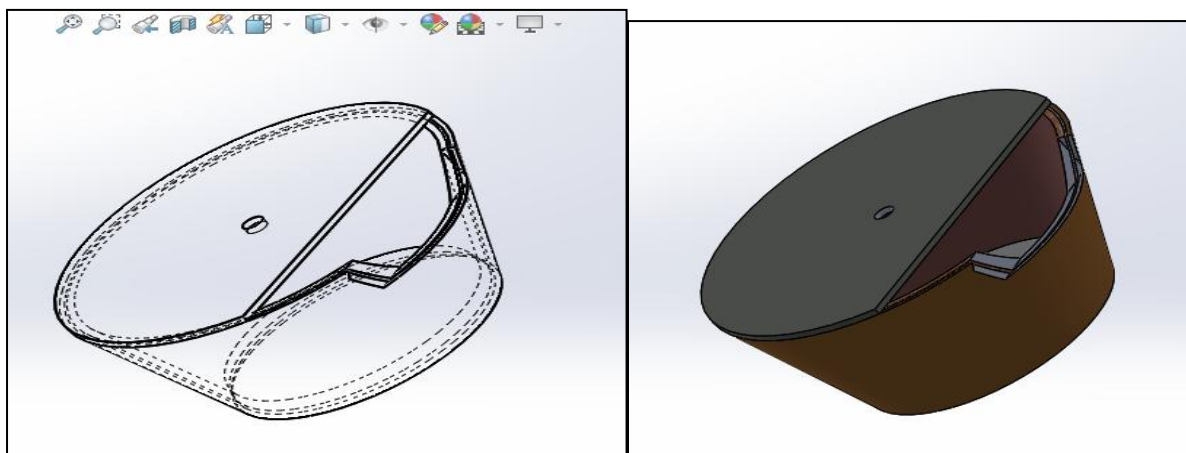


Figure II.23 : Conception de réservoir de stockage à froid avec logiciel solidworks.

II.3.8. Cuve de stockage d'air

Elle sert à stocker l'air chaud.

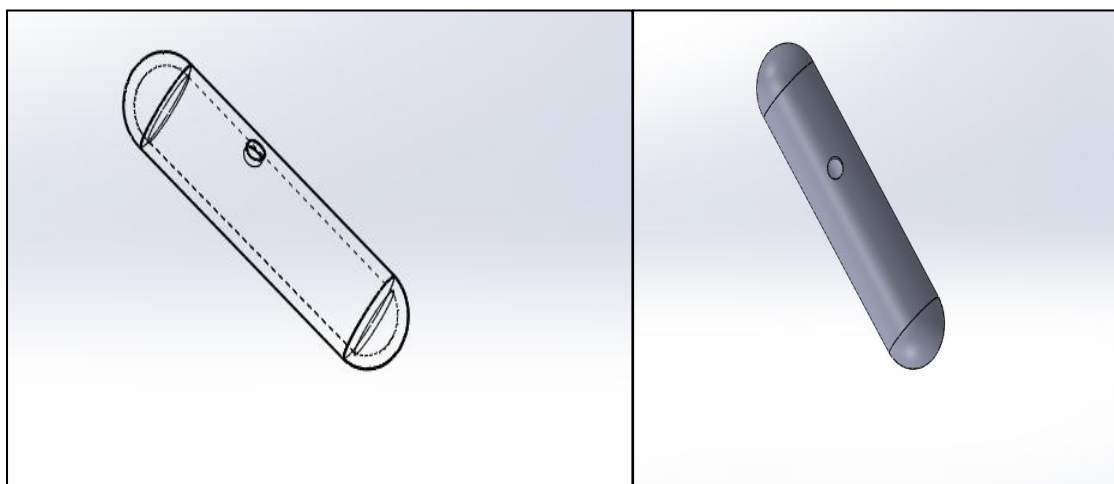


Figure II.24 : Conception de la cuve de stockage d'air avec logiciel solidworks.

II.3.8. Les capteurs de température

L'installation est équipée de capteurs qui permettent de mesurer la température de l'air et de solide placés dans plusieurs coins de dispositif, ces capteurs ont une capacité élevée pour une haute température {0°C – 800°C}.



Figure II.25 : capteur de température

II.3.9. Les capteurs des pressions : (variation de pression)

Ils mesurent la continuellement de pression du lit fluidisé diminue, les pressions avant que leurs distributeurs et dans leurs hauteurs de dégagement, et la chute de pression à l'intérieur du tube absorbeur. Ils peuvent aussi varier la pression à l'entrée du tube absorbeur.



Figure II.26 : variation de pression.

II.3.10. Débit mètre

Cet appareil mesure le débit d'air à l'entrée du dispositif, et il permet de varier le débit de l'air.



Figure II.27: débit mètre.

II.3.11. L'armoire de commande

L'armoire de commande nous aide a effectué des action et donné des instructions pour la machine a distance et avec précision.



Figure II.28 : L'armoire de commande.

II.3.12. Carte arduino

C'est un système électronique qui permet au capture de suivre l'emplacement des rayons solaire intelligemment et avec précision sans l'utilisation de la méthode manuelle.



Figure II.29: Système arduino

II.3.13.Assemblage général du dispositif concepté

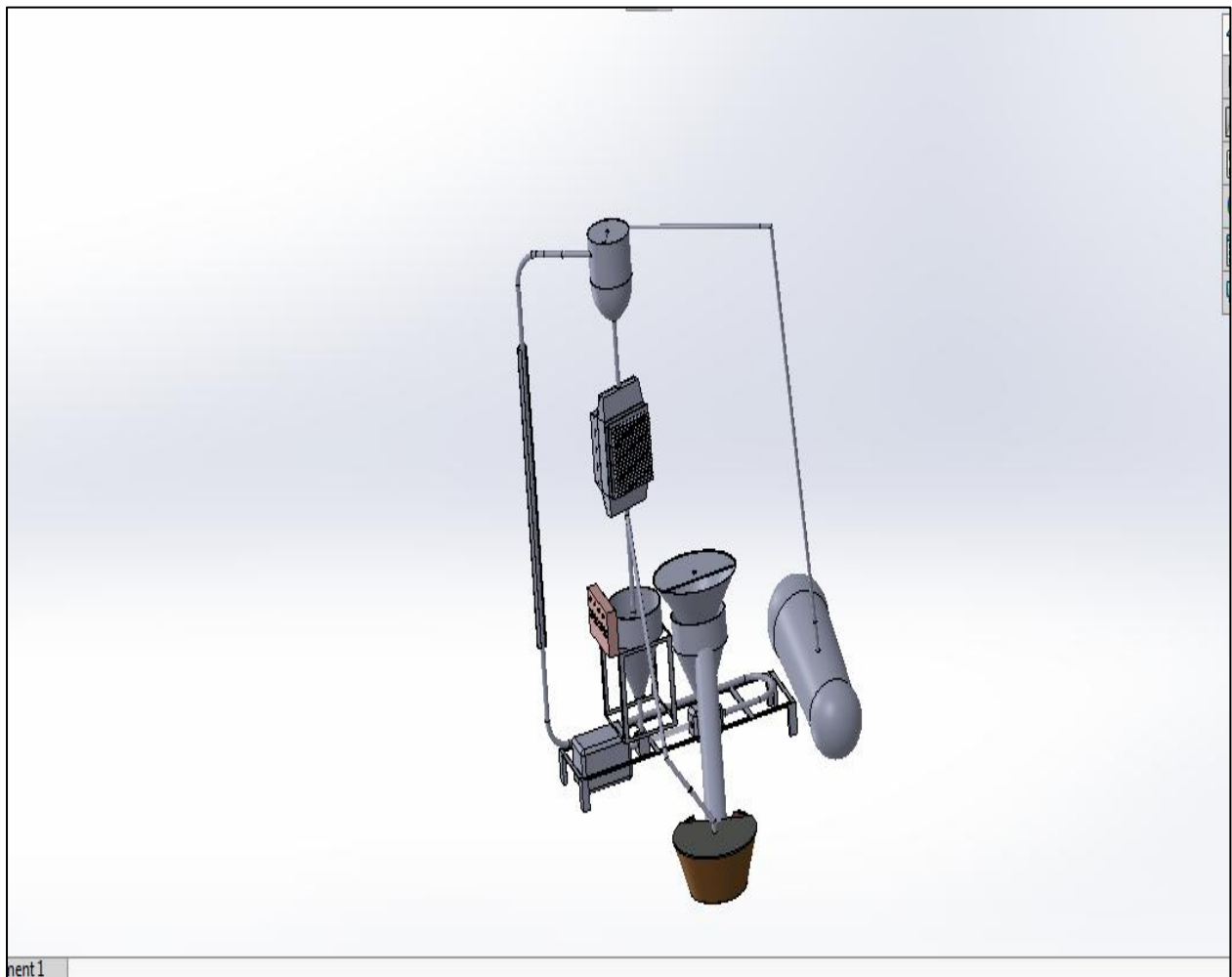


Figure II.30 : Conception d'assemblage avec logiciel solidworks.

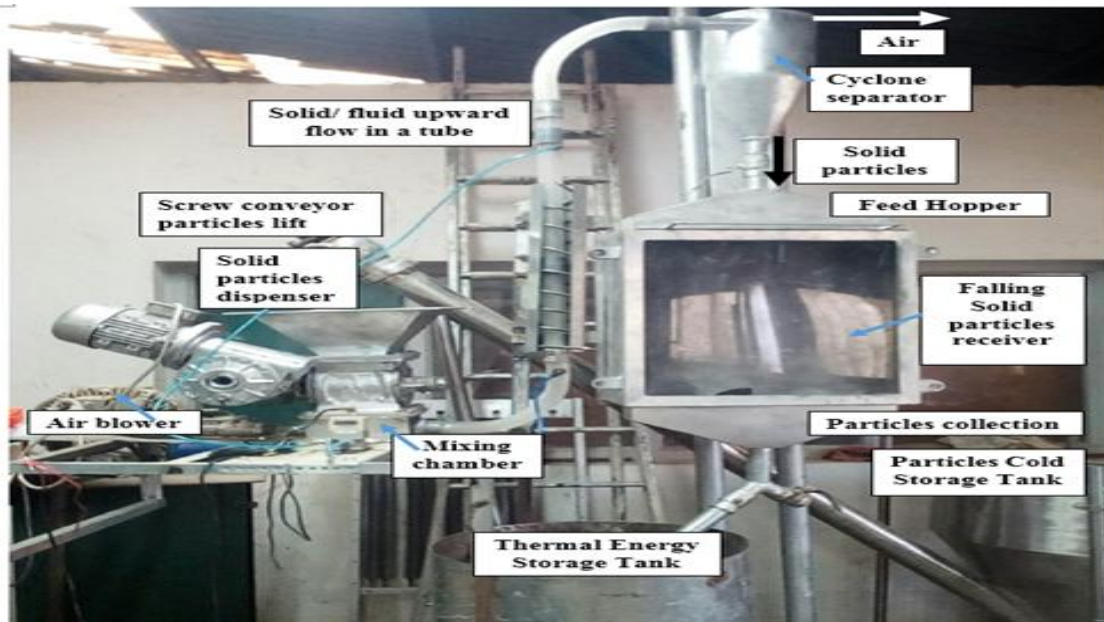


Figure II.31: Le concentrateur solaire a particules solides.

II.4. Solides utilises

Chaque particule rayonnante, échangeant de la chaleur avec les autres particules, avec les parois du tube et avec le ciel à travers la fenêtre.

Propriétés	Valeur
Absorbation solaire	0,85
Chaleur spécifique moyenne (0-300 °C)	760 J / kg K
Sphérique	0,9
Grandeur	0,9
Densité apparente	1.5/1.7
Densité	2.4/2.7
Diamètre moyen des particules	950 um
composition du matériau	SIO2 : 97.9/98.8%
Conductivité thermique	2,0 W / m K

Tableau II.1 : les propriétés et les valeurs des particules.

II.5. Paramètres de contrôle et grandeur mesurés

Pour un type de particules solides données, nous mesurons la distribution de température autour de tube, le flux solaire incident, la variation de fraction volumique moyenne, les pertes de charge dans la partie verticale ; pour différentes concentrations et a différentes vitesse de mélange.

Les paramètres de contrôle sont :

Q_f : Le débit de fluide (air),

Q_s : Le débit massique de solides.

Nous introduisons alors la vitesse de mélange V_m et la concentration de transport ou concentration délivrée C , telles que :

$$C = \frac{Q_s}{Q_s + Q_f} \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec S la section du tube absorbeur.

D'une part les particules solides ne s'écoulent pas à la même vitesse que air, et d'autre part il est possible d'avoir des régimes ou un lit fixé de solides se forme [19, 20]. Il est donc important de bien distinguer la concentration qui, elle, représente le rapport de l'aire occupée par les solides `a la section du tube absorbeur[21][22, 23].

L'objectif est de réaliser des mesures en variant V_m entre 0 et 5 m.s-1, pour des concentrations déférentes.

Nous effectuons également des prises de vue au moyen d'une caméra rapide a une résolution de 1280 × 1024 pixels et à une cadence de 200Hz.

II.6. Résultats

II.6.1. La classe des particules

Nous devons quantifier les phénomènes dans le lit fluidisé dus aux impacts inter particulaires et aux impacts particule-paroi, nous avons donc choisi de réaliser plusieurs simulations mono dispersent pour rendre compte de l'effet de la taille de la particule sur l'attrition allant de 10 µm à 2 mm :

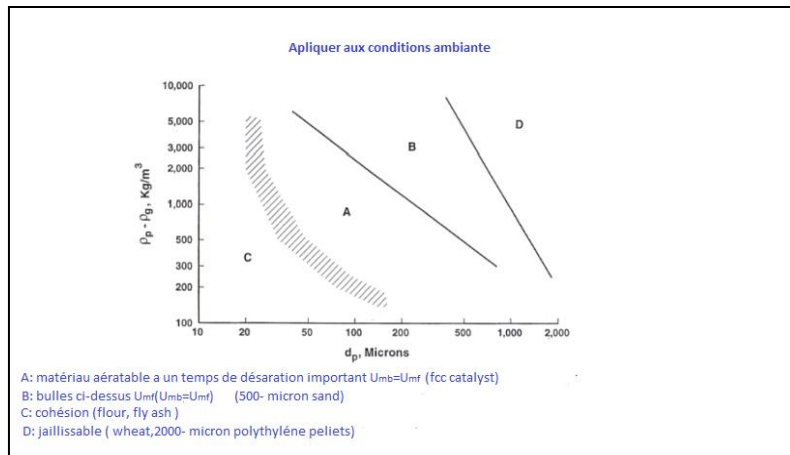


Figure II. 32 : les classifications des particules. [24]

Nous observons suivant la classification de Geldart que nos particules de sable sont de classe D, le régime de bullage est atteint dès que la vitesse minimale de fluidisation est dépassée. Nous verrons par la suite qu'avec la vitesse de fluidisation choisie, le lit fonctionne en régime de bullage : l'entraînement est réduit aux projections depuis la surface du lit liées à l'éclatement des bulles de gaz.

II.6.2. Propriétés physiques du fluide et des particules

Les propriétés du fluide qui est l'air sec ont été trouvées par les corrélations suivantes valables à pression atmosphérique :

$$\mu_f = 1,458.10^{-6} \frac{T^{3/2}}{110,4+T} \dots\dots\dots (II.2)$$

Pour $100 > T < 2000$ en °K avec une précision de 2%

$$\rho_f = 1.293 \frac{273}{T} \text{ Avec T en kelvins. } \dots\dots\dots (II.3)$$

solide	Type particule.	Sable SIC
	Température (°C).	700
	Masse volumique (kg/m ³).	2350
	Viscosité dynamique (Pa.s).	
Fluide	Type Gaz.	Air
	Température (°C).	700
	Masse volumique (kg/m ³).	0,68
	Viscosité dynamique (Pa.s).	2,75E-005

Tableau II.2 : les propriétés des particules selon le fluide ou le solide.

II.6.3. Caractéristiques hydrodynamiques des fluides

Nous calculons, dans un premier temps, les vitesses caractéristiques du système qui sont :

- la vitesse minimale de fluidisation : U_{mf} ;
- la vitesse terminale de chute (Schiller-Nuaman) : U_t ;

Pour la vitesse minimale de fluidisation, nous avons choisi la corrélation de Wen & Yu vérifiée pour $>100 \mu m$ et $0,01 < Re < 1000$, elle donne une relation entre le Reynolds au minimum de fluidisation et le nombre d'Archimède (Ar), nombre adimensionnel qui est le rapport entre les forces gravitationnelles, les forces d'inertie et les forces visqueuse :

La relation générale de la vitesse terminale de chute est donnée par :

$$U_t = \left[\frac{4d_p(\rho_p\rho_f)g}{3C_D\rho_F} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (II.4)$$

Le coefficient de traînée C_D se calcule par la corrélation de Schiller – Naumann valable pour une particule solide isolée en écoulement dans un fluide pour tout régime :

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \dots\dots\dots (II.5)$$

Nous pouvons alors trouver à l'aide d'un solveur la vitesse terminale de chute, vitesse limite du fluide au-delà de laquelle les particules solides sont emportées par le courant gazeux. Il est à noter que la valeur que nous trouvons est surestimée de part le fait que le coefficient de traînée associé à plusieurs particules est supérieur à celui d'une particule isolée. La vitesse de transition du régime de fluidisation à bulle et de fluidisation turbulente est calculée par la corrélation de Bi & Grace (1995) : $Re = 1,24Ar^{0,45}$ Valable pour $2 < Ar < 10^8$ (II.6)

Diamètre des particules (mm)	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Ar	5.24E+00	3.82E+00	2.68E+00	1.8E+00	1.13E+00	6.54E+00
Umf (m/s)	1.12E-0.1	1.01E-00	8.06E-00	6.21E-00	4.59E-00	3.2E-00
Uc (m/s)	1.25	1.20	1.15	1.1	1.04	0.98
Ut (m/s)	7.67	6.59	5.52	4.48	3.49	2.56

Tableau II.3 : la variation de la vitesse (U) en fonction de variation de diamètre.

Nous remarquons que suivant les diamètres des particules, nous sommes toujours en régime de bullage ($V_f < U_c$).

II.6.4. Dimensionnement du lit

Dans un premier temps, nous calculons la section débitante S_L du lit fluidisé :

$$S_L = \frac{Q(T_L, P_L)}{V_f} \text{ Avec : } Q(T_L, P_L) = \frac{\rho_f(T_L, P_L)}{\rho_f(T_{ref}, P_{ref})} Q(T_{ref}, P_{ref}) \dots\dots (II.7)$$

La masse de particules dans le lit fluidisé se trouve par la formule suivante :

$$m_p = F_p \tau_p \dots\dots\dots(II.8)$$

Avec : F_p , le débit massique entrant des particules dans le lit.

τ_p , le temps de séjour des particules dans le lit.

Enfin, nous pouvons trouver la hauteur H_L du lit fluidisé :

$$H_L = \frac{m_p}{(1-\varepsilon)S_L \rho_p} \dots\dots\dots (II.9)$$

En ce qui concerne la hauteur de désengagement, nous utilisons la corrélation de Darton qui calcule le diamètre des bulles de fluide d_b à la hauteur h du lit

$$d_p = \frac{0,54(V_f - U_{mf})^{0,4}(h + 4\sqrt{5,52 \cdot 10^{-5}})}{g^{0,2}} \dots\dots\dots (II.10)$$

Et la corrélation de Davidson – Harrison qui nous donne la vitesse d’ascension U_b des bulles à la surface du lit

$$U_b = V_f - U_{mf} + 0,711\sqrt{gd_b(H_L)} \dots\dots\dots(II.11)$$

Enfin la hauteur de désengagement TDH se calcule par la relation de Baron (1987) :

$$TDH = 0,22U_b^2 \dots\dots\dots (II.12)$$

Nous récapitulons les résultats principaux dans le tableau ci-dessous :

Diamètre du lit (m)	0.04					
Hauteur du lit (m)	0.60					
Diamètre des particules (mm)	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
TDH (m)	0.65	0.68	0.70	0.72	0.73	0.75
Hauteur totale du lit (m)	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.42

Tableau II.4 : les résultats obtenus par les équations.

Pour des raisons de temps de calcul, nous avons décidé de simuler un lit fluidisés de 1,2 mètres de hauteur afin d'avoir un maillage assez raffiné.

II.7. Simulation

Nous avons tout d'abord simulé des lits fluidisés circulant en faisant varier la taille des particules de 0.2 à 1 mm, avec la différente vitesse d'injection de l'air et pour un même différent débit de particule. En effet, nous avons mis initialement sur une hauteur de 0,60 m, un lit de fraction volumique 0,23[25].

Pour ces trois simulations, nous avons simulé l'établissement (14 s temps physique) puis calculez les valeurs moyennes (sur 30 s). Une simulation complète prenant une semaine, nous nous sommes limités à trois grandeurs de particules.

Puis nous avons simulé, pour le même volume et même vitesse d'injection, des lits fluidisés de particule de 0,1 mm à 1 mm par pas de 0,1 mm pendant (14 s).

Nous avons aussi voulu comparer des simulations pour différentes tailles de particules mais avec le même régime dynamique. En effet, plus les particules ne sont petites, plus la vitesse la suspension augmente U_c et la vitesse minimum de fluidisation U_{mf} diminue. Or comme nous gardons une vitesse d'injection, les simulations avec des petites particules (0,1 et 0,5 mm) sont plus proches du régime fluidisé que celle de grand diamètre (0.6 à 1 mm).

Nous utilisons alors le nombre de C défini comme :

$$C = \frac{U - U_{mf}}{U_c - U_{mf}} \dots\dots\dots (II.13)$$

U_{mf} Et U_c sont calculés avec les corrélations données précédemment. En gardant ce nombre constant, nous espérons trouver des résultats assez semblables car ils doivent correspondre à des régimes identiques.

II.7.1. Les simulations pour la vitesse d'injection

II.7.1.1. Les champs moyennés

Les figures ci-dessous représentent (de gauche à droite) les moyennes dans le temps (30s) des champs de :

- la fraction volumique $\langle \alpha p \rangle$
- la perte de volume $\langle \alpha p^2 \rangle x \langle \alpha p^2 (qp^2)^{3/2} \rangle$

La grandeur $\langle \alpha p \rangle p^2 (\langle qp^2 \rangle)^{3/2}$ est aussi représentée pour montrer l'importance des fluctuations dans l'attrition.

II.7.2. Diamètre de 0.9 mm :

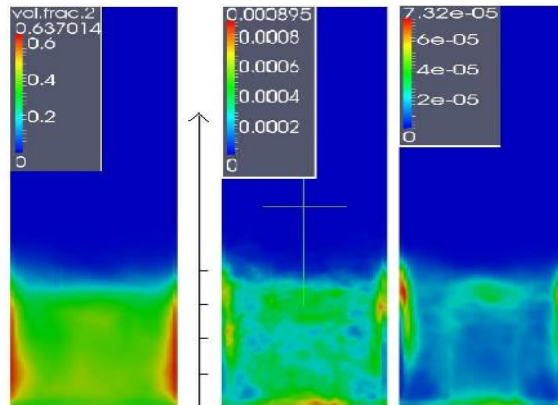


Figure II.33 : La variation de la vitesse des particules a 0,9 mm.

II.7.3 Diamètre de 0.5 mm :

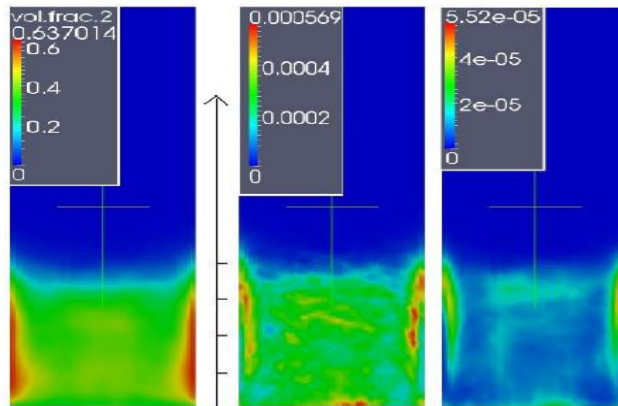


Figure II.34 : La variation de la vitesse des particules a 0,5 mm.

II.8. Interprétations

On remarque tout d'abord pour les champs de fraction volumique une relative homogénéisation du lit, hormis à partir de 10 cm de hauteur près des parois, où il existe des zones de stagnation. Le centre du lit semble en moyenne plus peuplé montrant ainsi la tendance des bulles à emprunter la zone entre le centre du lit et les zones de stagnation. Pour les champs de perte de volume, on remarque une notable différence, d'ordre de grandeur (de 10) entre les champs est :

$$\langle \Delta V \rangle \propto \langle p^2 (qp^2)^{3/2} \rangle$$

On remarque que le dessus du lit est plus sujet à l'attrition et que des fortes pertes de volume sont situées dans des zones entre 20 cm et 30 cm de hauteur près des parois. Il existe aussi des zones où la perte de volume est faible et correspond aux zones de stagnation.

II.9. L'influence de la taille des particules

Les données utilisées ci-dessous sont extraites des simulations où l'on a fait varier les tailles de particules de 0,5 à 1,2 mm par pas de 0,1 mm pour une même vitesse d'injection et un même volume de particule. Les valeurs sont intégrées pour avoir l'attrition en m^3/s (perte de volume par seconde).

On procède alors à une intégration spatiale telle que

$$(\Delta V)_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n (\Delta V)_i \times V_i \dots \dots \dots (II.14)$$

Avec

- $(\Delta V)_i$ étant la variation de volume par volume et seconde (s^{-1}) dans la cellule i .
- V_i étant le volume de la cellule i .
- N étant le nombre de cellules.

Comme vu au chapitre maillage, la taille des cellules n'est pas uniforme dans une section. Pour simplifier le calcul, nous avons considéré que la variation de volume pour la hauteur (qui varie avec une raison de 1,0) et pris une base de cellule constante pour les sections en divisant la section par le nombre de cellules : $S_{\text{base}} = \frac{S_{\text{section}}}{N}$ L'erreur commise par cette approximation n'excède pas les 2%.

Ci-dessous est représentée l'évolution de l'attrition totale dans le temps pour différentes tailles de particules :

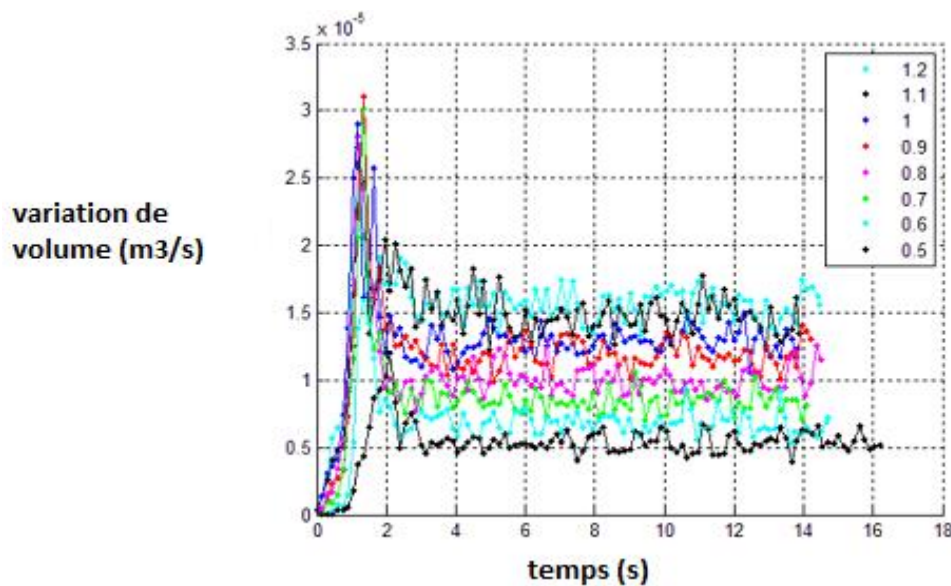


Figure II.35 : évolution de la variation de volume pour différentes taille de particules [25].

Les courbes les plus basses sont celles des petites tailles de particules et inversement. On remarque que l'attrition augmente avec la taille, ce qui n'était pas trivial car $\propto (qp^2)^{3/2}$ ne dépend pas explicitement du temps.

La présence du pic est due à l'établissement du lit. Le lit semble établi à partir de 3 à 4 secondes. On a représenté l'attrition moyenne sur 10s en fonction de la taille de la particule :

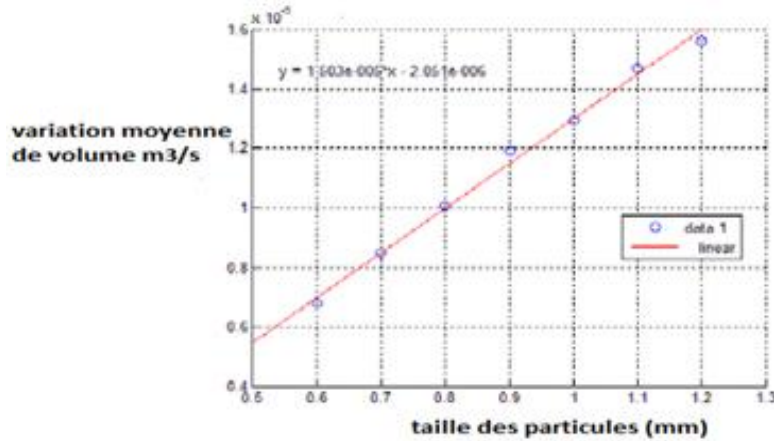


Figure II.36: variation moyenne de volume pour des différentes tailles des particules [25].

L'évolution de l'attrition totale paraît (étonnement) linéaire avec la taille de la particule. La linéarisation donne la formule :

$$(\Delta V)_{\text{totale}} = 1.5 \times 10^{-5} dp + 2.05 \times 10^{-6} \dots \dots \dots (II.14)$$

On a aussi tracé l'évolution de l'attrition verticalement (selon z) en calculant l'attrition par section. Ainsi :

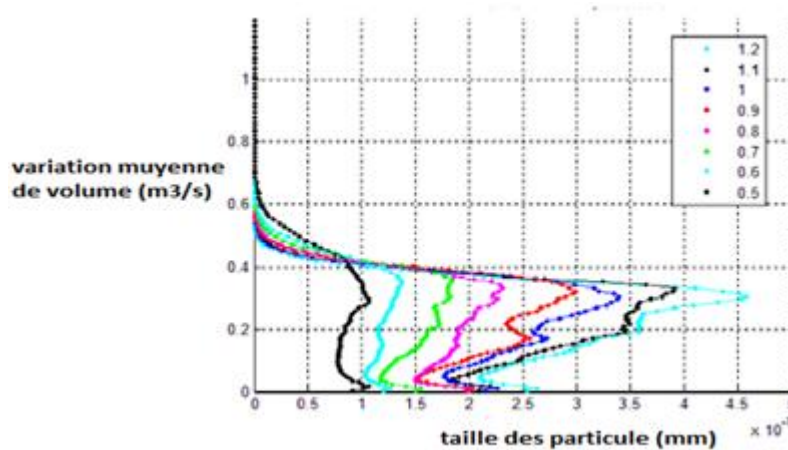


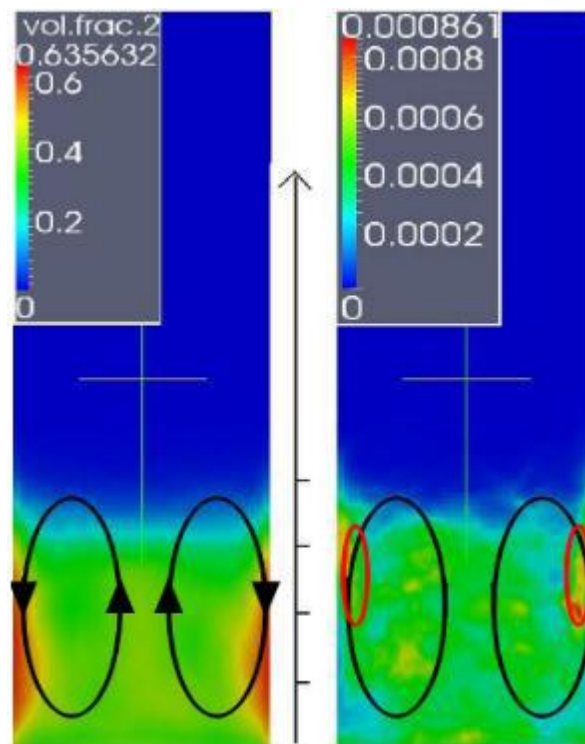
Figure II.37 : évolution de la variation de volume pour différentes taille de particules [25].

La courbe la plus à gauche représente l'attrition pour les particules de diamètre de 0,5 mm et celle la plus à droite, les particules de 1,2 mm. Pour les particules de diamètre supérieur à 0,9 m, on observe bien un pic à 30 cm. Cette hauteur correspond au dessus du lit. L'attrition y est

importante car c'est là où l'agitation est la plus forte. De grosses bulles remontent à la surface et y « explosent ». On a alors les deux ingrédients de l'attrition de l'agitation et des densités importantes (même si ici c'est l'agitation qui y est la plus conséquente).

On remarque que l'attrition est tout d'abord décroissante jusqu'à environ 5cm puis croissante jusqu'à la hauteur 20cm. Si l'on recroise avec les observations sur les champs de fraction volumique, on a conclu que les bulles montaient surtout par le centre du lit. Or du fait de la gravité, les particules retombent lentement et descendent en amas sur les côtés. Il y a concordance entre les zones de stagnation et de faible attrition. Sur les animations de l'évolution du champ, on voit bien que les bulles se forment à partir de 5 cm. C'est donc à ce niveau que sont réintroduites les particules dans la boucle et vont remonter rapidement à la surface grâce aux bulles. Ce qui explique aussi les zones de fortes attritions au dessus du lit et sur les côtés, c'est là où les particules perdent toutes leurs agitations en retombant sur le lit.

La circulation a donc une phase rapide et ascendante avec peu de particules et une phase lente et descente avec de forte densité.



Bien entendu, le mouvement des bulles et des particules est plus erratique qu'un simple mouvement cellulaire mais il peut correspondre à une forte tendance.

Pour les particules de faibles diamètres, on remarque que le profil d'attrition selon z est plus aplati et le pic d'attrition à la surface du lit moins marqué. Comme dit précédemment, nous avons gardé la même vitesse d'injection ce qui correspond à un nombre de Castrov plus élevé. On

est donc plus près du régime turbulent, ce qui peut expliquer la tendance à l'uniformisation du taux d'attrition dans le profil. Nous avons donc fait des simulations pour différentes tailles de particules et pour un même volume initial de particule ainsi qu'un même nombre de Castrov. Garder un nombre de Castrov constant permet, à priori, de simuler des lits ayant les mêmes régimes. Cela implique donc de changer les vitesses d'injection.

Nous avons pris le cas des particules de diamètre 1mm et de vitesse d'injection 0,8 m/s comme référence. Nous avons trouvé un nombre de Castrov égal à 0,601. Ainsi pour les particules de diamètres inférieurs à 1mm, il faut baisser la vitesse d'injection pour garder le même nombre de Castrov et réciproquement pour les particules plus grandes que 1mm.

Nous avons pris des granulométries allant de 0,7 à 1,2 mm par pas de 0,1 mm. Ci-dessous sont représentés les profils selon z. L'effet d'atténuation du pic et de raidissement du profil pour les faibles diamètres semblent ne sont pas avoir disparu même en essayant de garder le même nombre de Castrov.

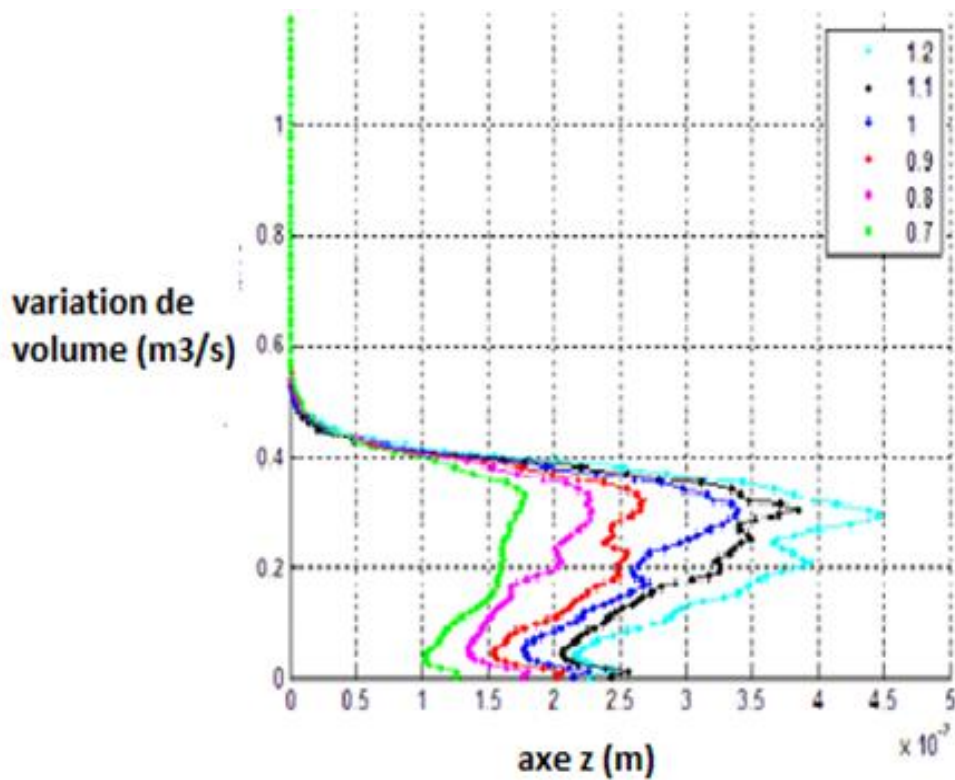


Figure II.38 : la variation de profil de volume pour différentes tailles de particules Selon Z [25].

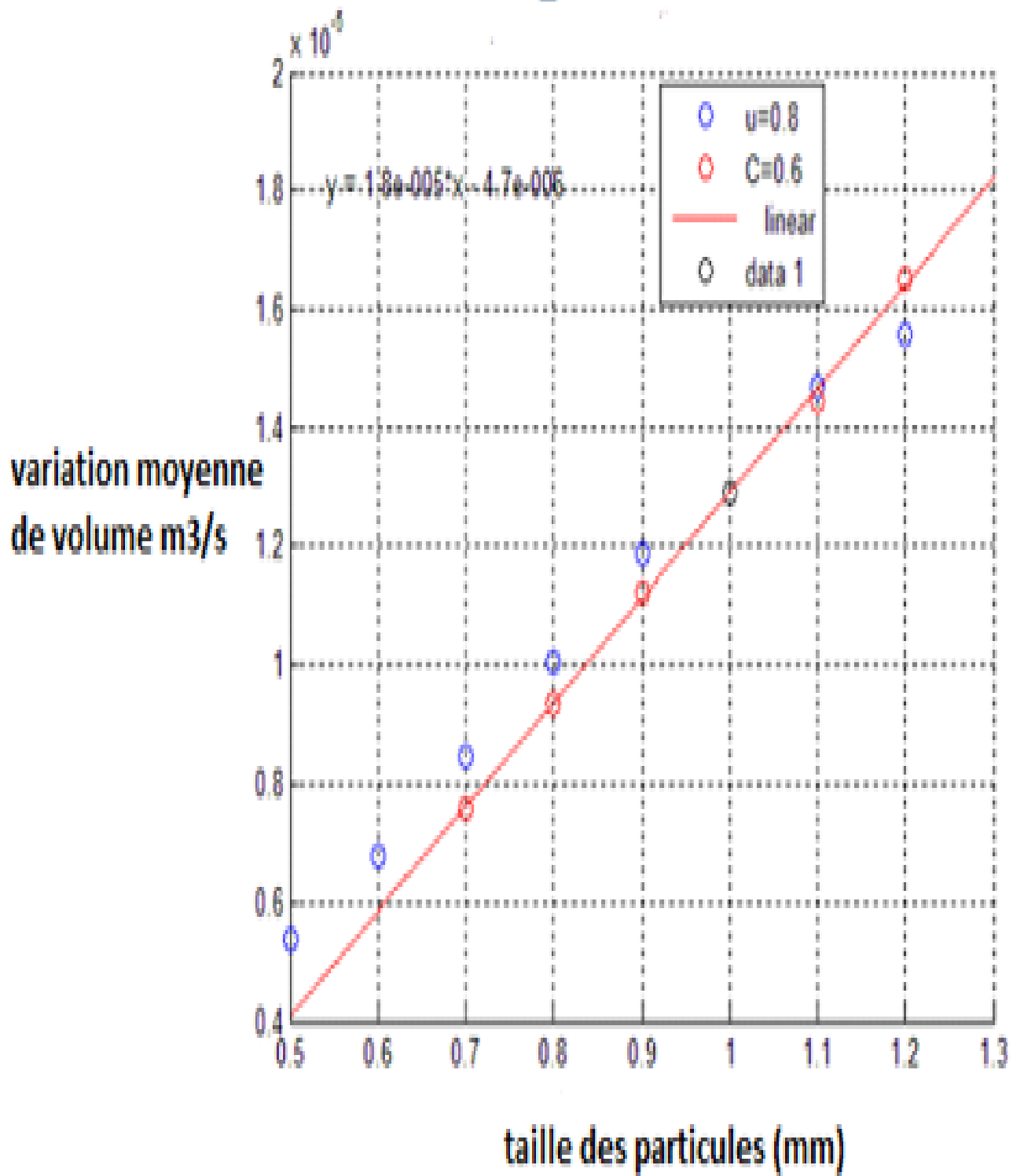


Figure II.39: variation moyenne de volume pour des différentes tailles des particules [25].

Chapitre III :

**Modélisation et simulation d'un concentrateur
solaire tubulaire à particules solide.**

III.1.MODELISATION

III.1.1.INTRODUCTION

Dans le domaine de la modélisation des écoulements diphasiques gaz-particules en lits fluidisés, on utilise généralement deux catégories, La première catégorie de modèles repose sur une approche «physique» de l'écoulement et donne de très bons résultats à condition qu'ils soient alimentés par des lois ou corrélations réalistes concernant les propriétés des bulles et de l'émulsion (coalescence, vitesse, porosité). La deuxième catégorie, consiste à résoudre les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement sur le gaz et sur le solide (particule).

L'objectif de cette partie est d'établir un outil «intermédiaire» par les résolutions des équations bilans utilisées pour la simulation numérique 3D. Afin de pouvoir traiter les écoulements denses rencontrés dans le récepteur solaire.

III.2.Les équations et le modèle mathématique utilisé

- **Equation de conservation de masse**

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \dots \dots \dots \text{III.1}$$

Pour les géométries axisymétriques 2D ; l'équation de continuité est donnée par :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho V_r) + \frac{\rho V r}{r} = S_m \dots \dots \dots \text{III.2}$$

S_m : une masse ajoutée à la deuxième phase.

ρ : la masse volumique.

- **Equation d'énergie :**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{c_p} + \frac{\mu t}{\sigma t} \right) \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \dots \dots \text{III.3}$$

k : coefficient thermique laminaire.

∇ : Nabla.

C_p : la chaleur spécifique de mélange.

σ_t : nombre de Prandtl.

μ_t : la viscosité de la turbulence.

S_m : une source uniquement du au transfert de masse dans la phase gazeuse à partir de gouttelettes de combustible liquide ou de particule en réaction.

S_{user} : un terme de source défini par l'utilisateur.

\bar{f} : Fraction de mélange.

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a \times U_a) + (\rho_a \times U_a \times U_a) = S_{msa} + \Gamma \alpha \beta \dots \dots \dots \text{III.4}$$

S_{msa} : la source de masse spécifiée.

$\Gamma \alpha \beta$: le débit massique par unité de volume.

- **Equation de Navier- stocks :**

Les équations utilisées dans cette simulation sont obtenus par le filtrage des équations de Navier- stocks, ça forme générale est présenté comme suite :

$$\rho \frac{dp}{dt} = \rho \vec{F} - \overrightarrow{grad} P + \mu \Delta \vec{V} \dots \dots \dots \text{III.5}$$

Avec : gradient de pression $\overrightarrow{grad} P = \frac{dp}{dx} + \frac{dp}{dy} + \frac{dp}{dz} \dots \dots \dots \text{III.6}$

L'équation de Laplace $\Delta = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \dots \dots \dots \text{III.7}$

L'écoulement est unidimensionnel donc :

$$\frac{dp}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \Delta \vec{V} \dots \dots \dots \text{III.8}$$

Le développement de cette équation est de la projeté sur les axes (\overrightarrow{ox} , \overrightarrow{oy} et \overrightarrow{oz}) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots \text{III.9}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots \text{III.10}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots \text{III.11}$$

μ : viscosité dynamique.

ν : viscosité cinématique.

\vec{F} : La force gravitationnelle.

III.3.Simulation Numérique

III.3.1.Introduction

Un nouveau concept de récepteur solaire utilisant une suspension de particules denses (DPS) l'écoulement ascendant dans les tubes a été étudié. L'intérêt de l'utilisation en tant que chaleur de fluide de transfert des particules solides transportées par un flux d'air est que le milieu bi-phasique créé prend les propriétés d'écoulement de liquide tout en étant capable de résister à des températures élevées, Atteindre des températures supérieures à 700, C'est nécessaire afin d'utiliser des cycles de conversion à haut rendement.

Les paramètres de simulation sont détaillés : géométrie et maillage, modèles mathématiques, conditions aux limites. La procédure de simulation est expliquée. Ensuite, les valeurs numériques et les résultats expérimentaux sont comparés au niveau de la pression linéaire et la température pour valider le modèle. Enfin, l'influence de la température sur le débit de la suspension dense des particules.

III.3.2.Présentation d'ANSYS fluent (CFD)

Fluent est le logiciel leader de simulation de fluide de l'industrie utilisé pour prédire le débit de fluide, le transfert de chaleur et de masse, réactions chimiques et d'autres phénomènes connexes. Reconnues pour fournir les solutions les plus précises du secteur sans compromis, les capacités de modélisation avancées de fluent incluent des modèles de turbulence de pointe, des écoulements multiphasiques, le transfert de chaleur, la combustion, l'optimisation de la forme, la multiphasique et bien plus encore.

L'utilisation de logiciel Ansys/Fluent

La simulation numérique est faite par le logiciel Ansys/Fluent.

La figure III.1 présente la page d'accueil de Ansys/fluent qu'est un logiciel de simulation numérique .Il couvre toutes les étapes pour faire les simulations : la conception des géométries, le maillage, la résolution, le traitement de résultats.

Ce logiciel englobe quatre fonctions principales, qui sont :

- Conception des géométries.
- Sélection des façades et maillage des structures.
- Définition des conditions aux limites.
- Simulation des écoulements et des transferts de chaleur.

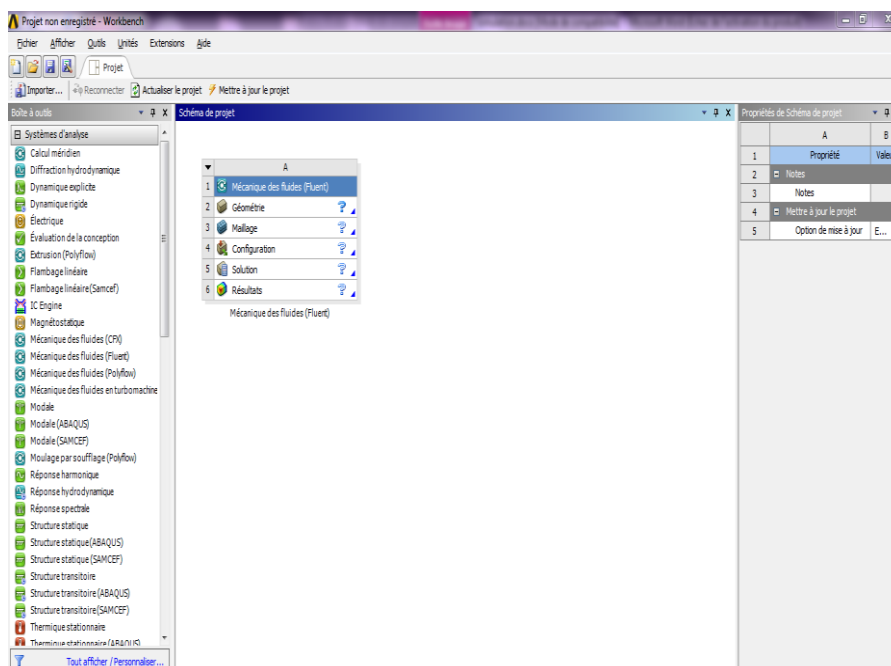













Figure III.1 : La page d'accueil d'Ansys/Fluent

✓ Répertoire d'opération

Le répertoire d'opération comporte six étapes principales :

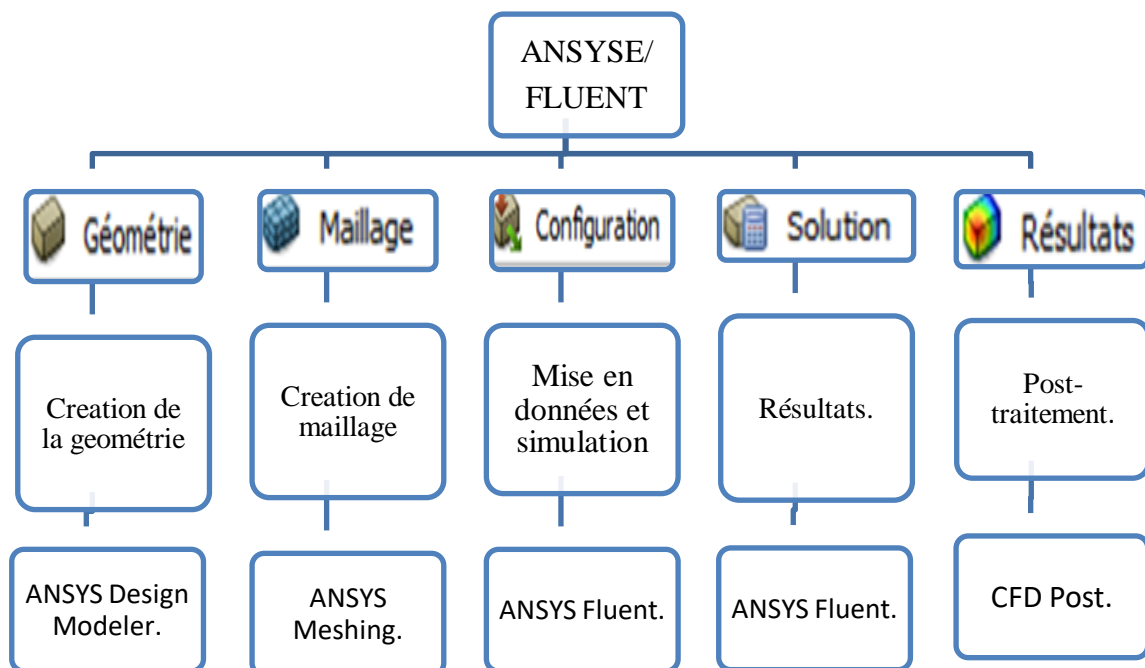
A		
1	 Mécanique des fluides (Fluent)	
2	 Géométrie	
3	 Maillage	
4	 Configuration	
5	 Solution	
6	 Résultats	

Mécanique des fluides (Fluent)

Figure III.2 : Repartitions d’outils et d’opération.

✓ **Les différentes étapes**

L’organigramme suivant présente le système composé de différentes cases associées à différentes étapes successives réalisées chacune avec un logiciel de la suite ANSYS/FLUENT.



Organigramme des différentes étapes avec le logiciel correspondant.

III.3.3. Création de la géométrie

Cette étape consiste à dessiner la géométrie de tube absorbeur : avec le logiciel ANSYS Design Modeler. Il englobe toute l'opération de création de la géométrie, telle la création du point, des lignes des surfaces et des volumes.

La géométrie simulée est limitée juste au niveau de tube absorbeur illustré dans la figure III.3, le tube a un diamètre intérieur de 36 mm et de 40mm de diamètre extérieur, la hauteur de tube est de 500mm, les dimensions géométriques sont correspondantes à celle de la maquette froide.

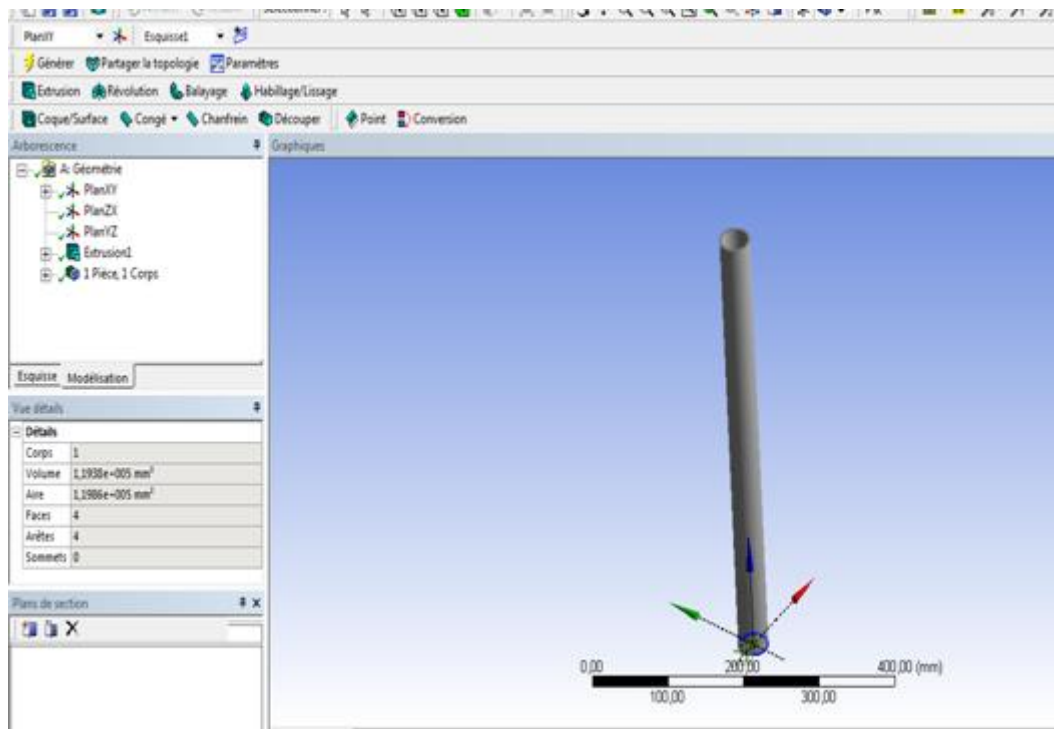


Figure III.3 : La géométrie du tube absorbeur.

III.3.4. Génération du maillage

Pour traiter la fluidisation des particules il nous faut un certain maillage précis, illustré dans la figure III.4, qui nous aide à voir la variation des propriétés à chaque point (intervalle) de surface de tube. Cette opération nous offre aussi l'option de mailler selon une ligne, une surface ou un volume avec le logiciel ANSYS Meshing.

✓ Pour assurer la qualité de maillage, en applique des conditions suivantes :

✓ Fonction de taille : courbure.

Taille d'élément initiale : assemblage actif.

Lissage : moyen.

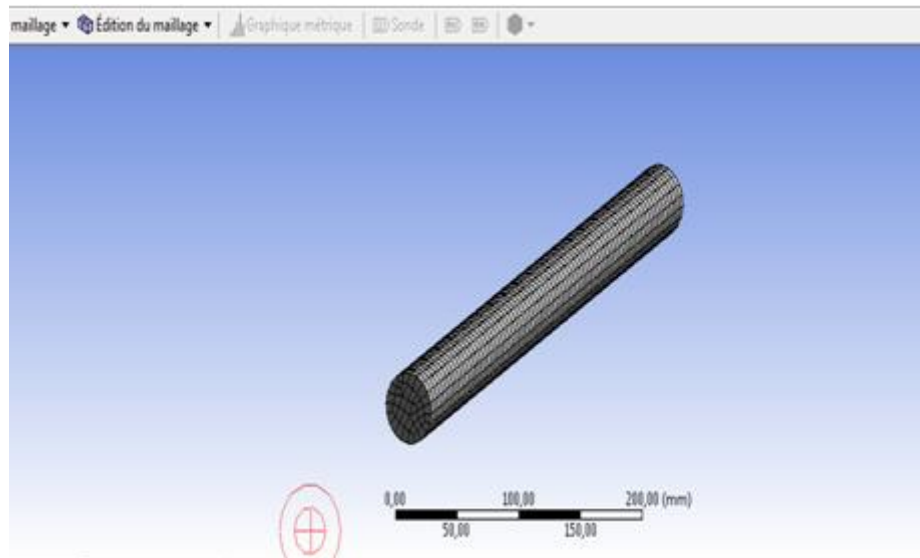


Figure III.4 : Le maillage du tube absorbeur

III.3.5. Repérage des conditions aux limites

Il consiste à identifier et à nommer différentes parties de la géométrie afin de :

- définir les conditions aux limites du problème (entrées, sortie etc. ...).
- définir des conditions sur le maillage au niveau des différentes sélections.

La condition à la limite, repérer dans la figure III.5 et le schéma en dessous de la paroi était une condition anti dérapage [26], tant pour le gaz que pour les particules, elle donne des résultats proches des expériences sur la maquette à froid.

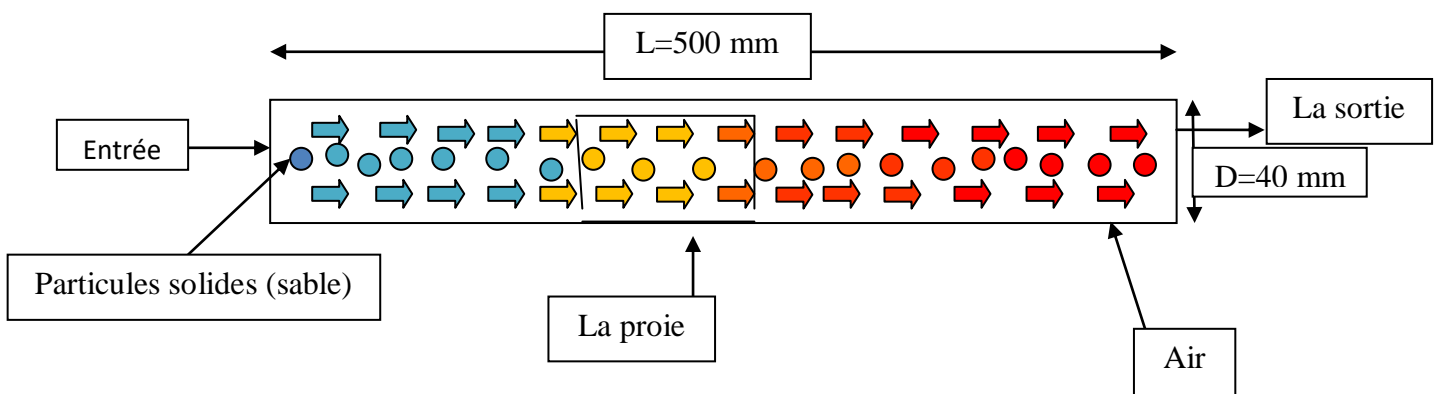


Schéma explicatif des conditions aux limites de la conduite.

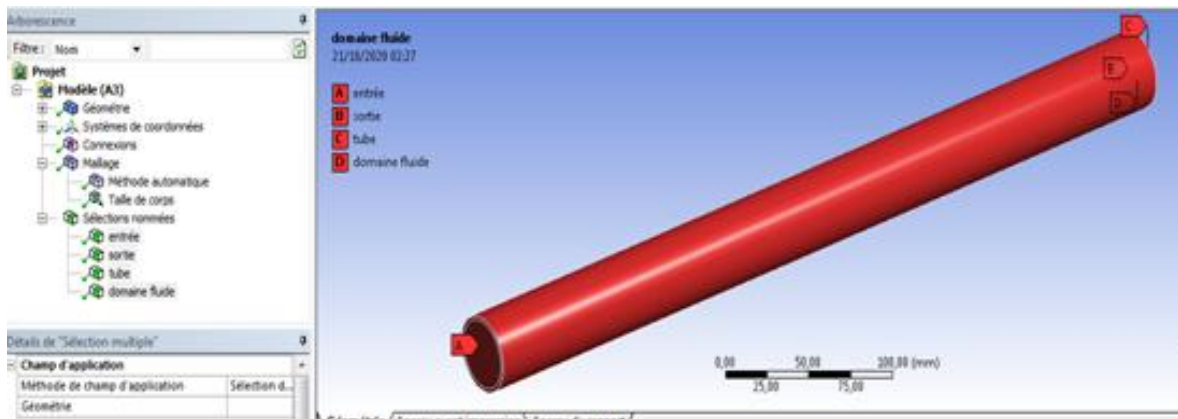


Figure III.5 : Définition des conditions initiales du tube

A : l'entrée du mélange (air + particules).

B : la sortie du mélange (air+ particules).

C : la paroi (tube).

D : domaine fluide

✓ Condition de chaleur :

Un flux de chaleur de $1000 \text{ (w/m}^2\text{)}$ est imposé sur la paroi de tube, il existe une différence entre les expériences et la simulation. Ce qui fait, pendant les expériences, le tube avait une perte au milieu ambiant contrairement à la simulation.

III.3.6.les étapes de la configuration enregistrés sur fluent

Après la mise à jour de maillage, on peut passer à l'étape suivante qui consiste à mettre en données le problème sous Fluent.

Apparaît tout d'abord la fenêtre de lancement, comme l'indique la figure III.6, qui sert à indiquer si l'on va travailler en 2D ou en 3D, dans notre cas en utilisant 3D.

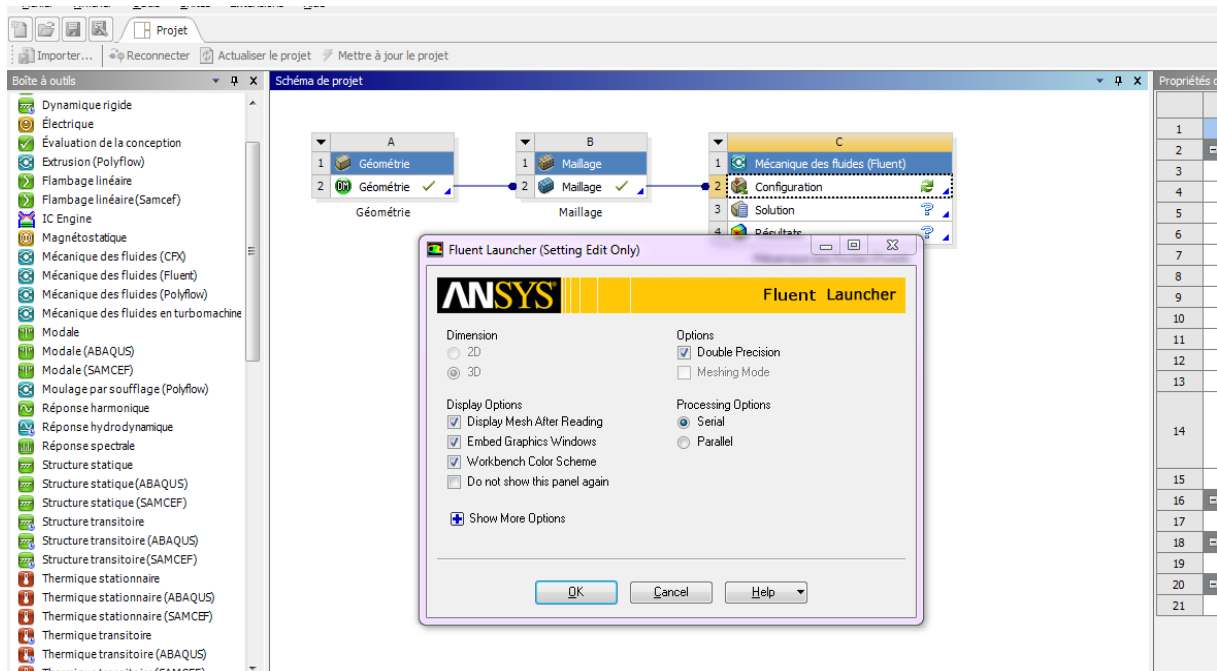


Figure III.6 : Fenêtre de démarrage de Fluent

- **Réglage des paramètres**

On programme Fluent par rapport à notre cas d'étude (suspension dense de particules), avec les étapes à suivre.

On choisit le modèle → multi phase → mixture (2 phase) enregistré dans la figure III.7

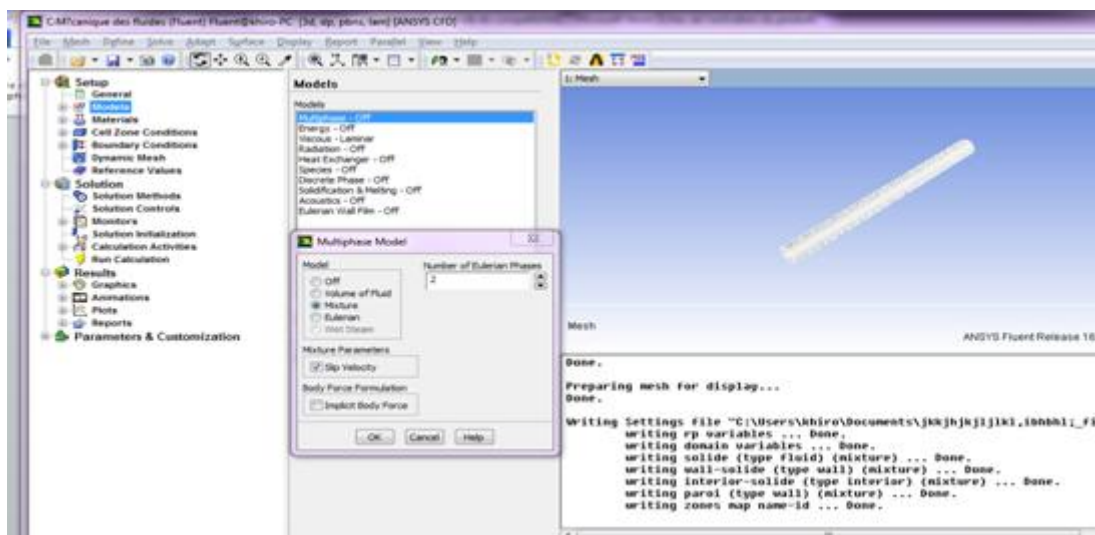


Figure III.7 : Définition de modèle qui nous avons choisis

Après on choisit le matériel : (figure III.8)

-Materials → fluid → air → définir les propriétés physiques de l'air.

-Materials → fluid → sable → définir les propriétés physique de sable

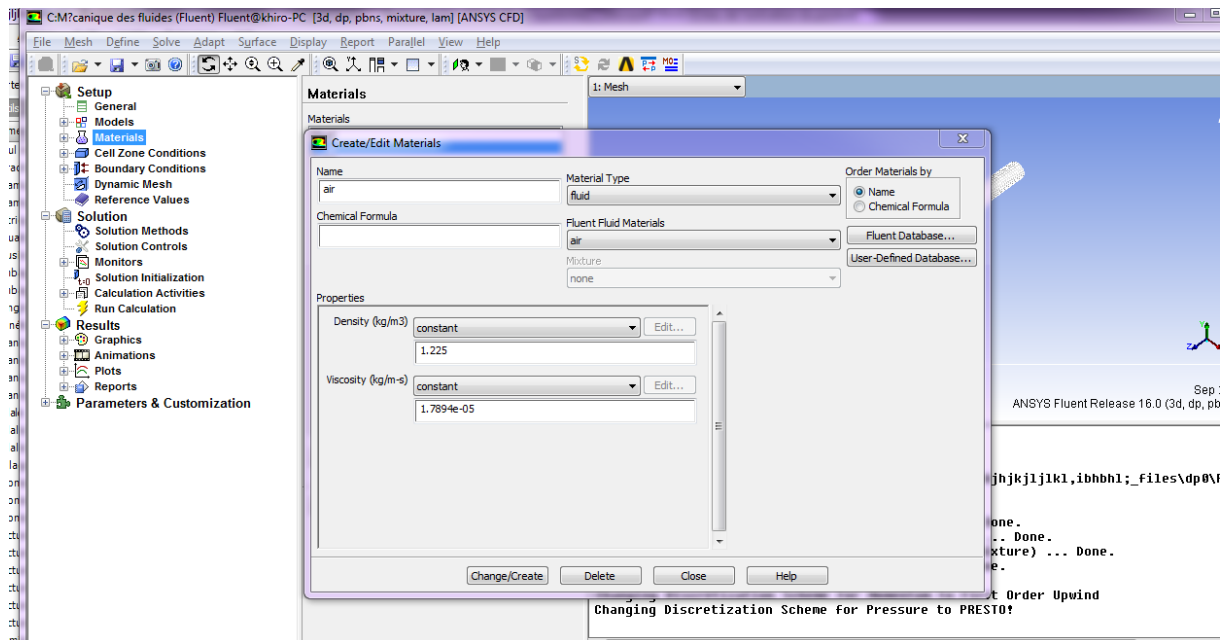


Figure III.8 : Définition des caractéristiques de l'air

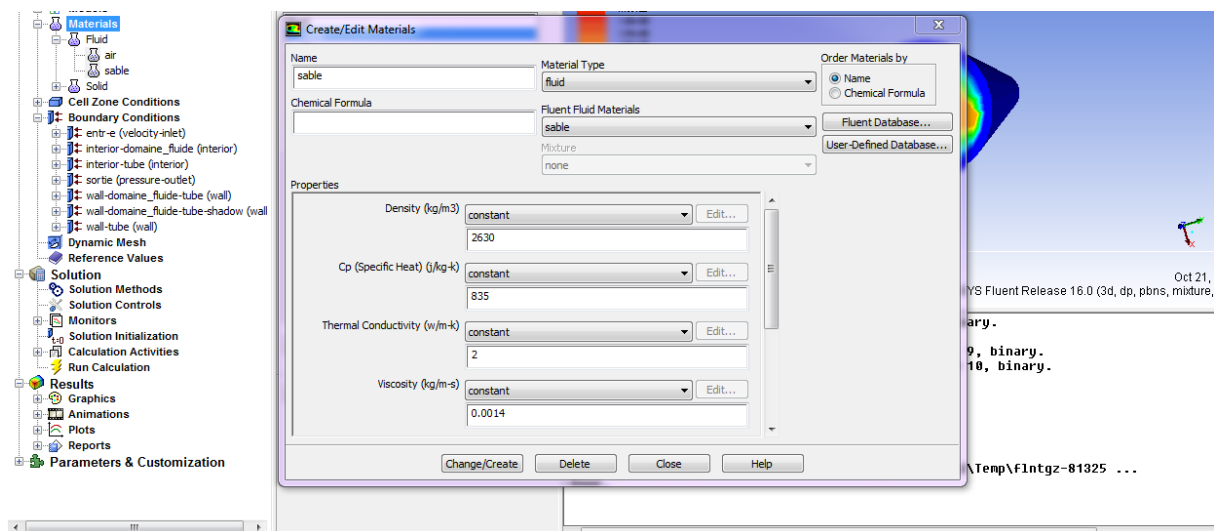


Figure III.9 : Définition des caractéristiques des particules solide (le sable)

On impose les conditions aux limites à la paroi : comme on a fait dans la figure III. 10.

Boundary conditions → paroi → on impose le flux de chaleur. .

On impose les conditions aux limites à la paroi : comme on a fait dans la figure III. 10.

Boundary conditions → paroi → on impose le flux de chaleur.

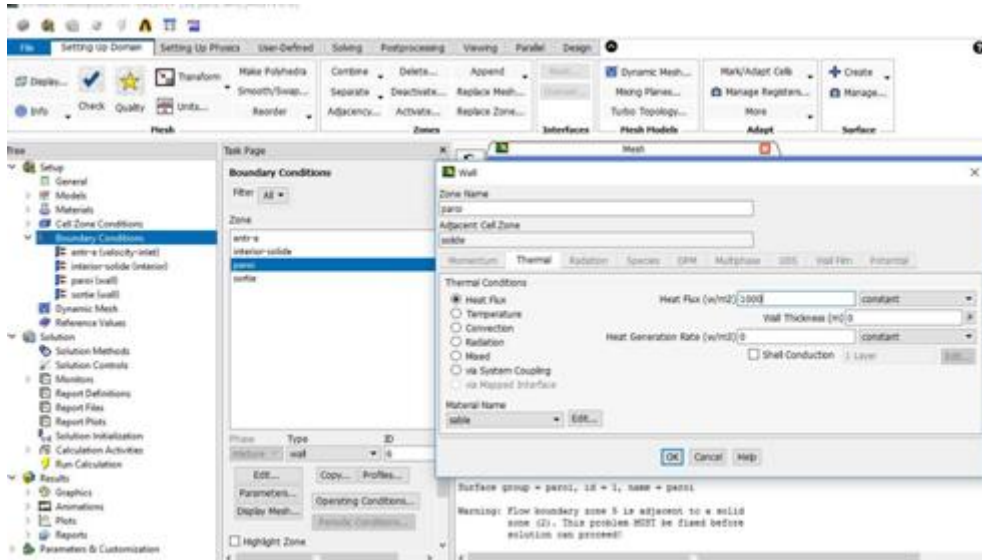


Figure III. 10 : Définition des conditions aux limites de la paroi

On impose les conditions aux limites au niveau de l'entrée :

Boundary condition → l'entrée → on impose la vitesse d'entrée et la température de la suspension.

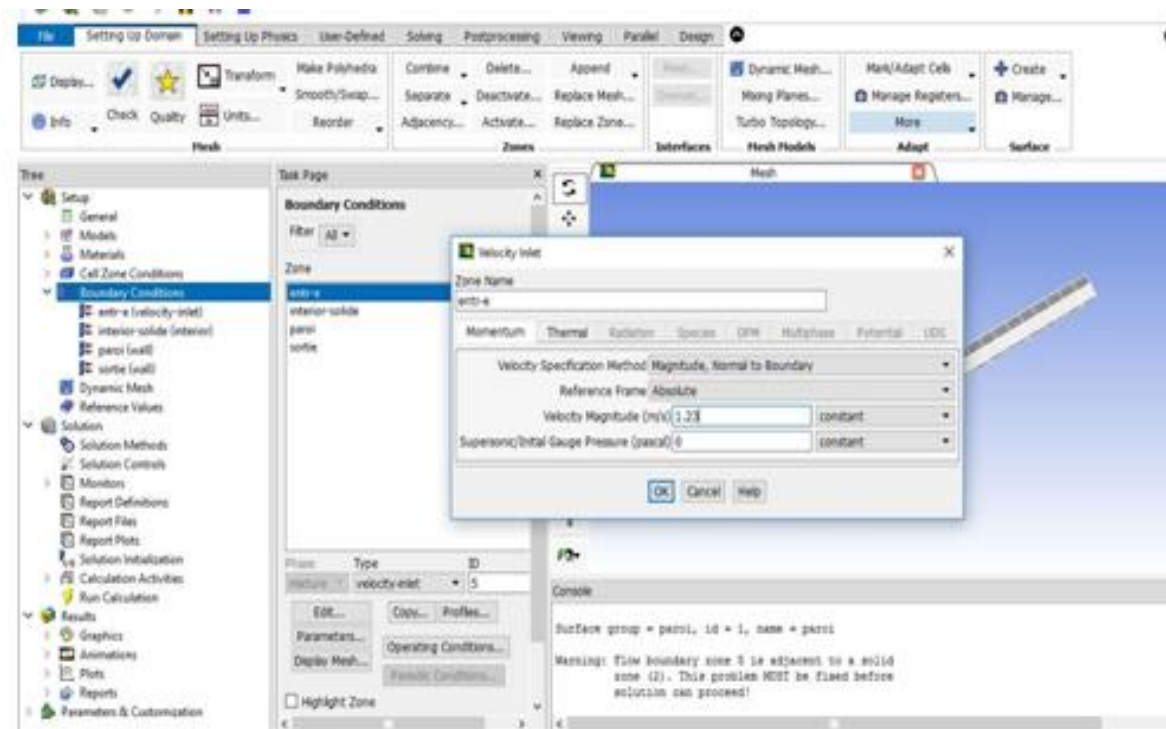


Figure III. 11 : Définition des conditions aux limites à l'entrée

III.4 Les résultats obtenus par la simulation

III.4.1 La courbe de résiduels

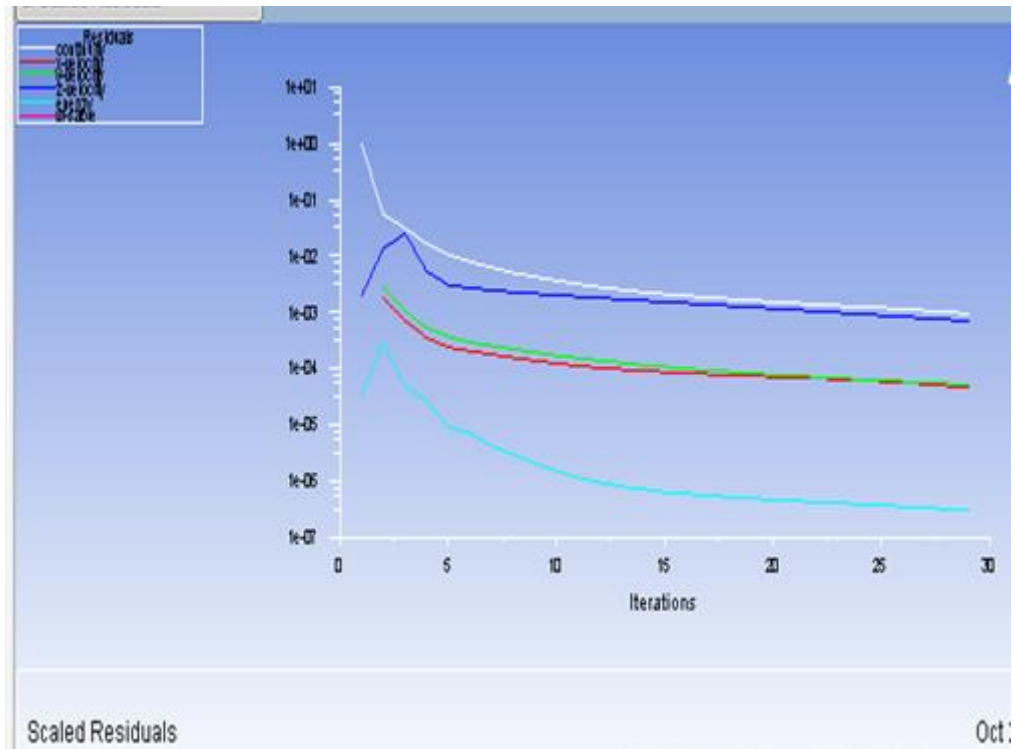


Figure III.12 : La courbe de résiduels.

On remarque que toutes les courbes sont convergées au voisinage des 29 nombres d'itération. Cette convergence, nous ouvre le chemin pour faire tout genre de calculs pour chaque propriétés thermo physique du tube.

III.4.2 La température de la suspension

De cette simulation en présente la répartition de la température le long de tube, la température d'entrée est imposée (température ambiante 25°C), en insiste sur la différence de température obtenu par la simulation indiqué dans la figure III.13 et celle de l'expérience, aux expériences il y a un phénomène de perte de charge (diminution de l'enthalpie) qu'on peut éviter dans la simulation.

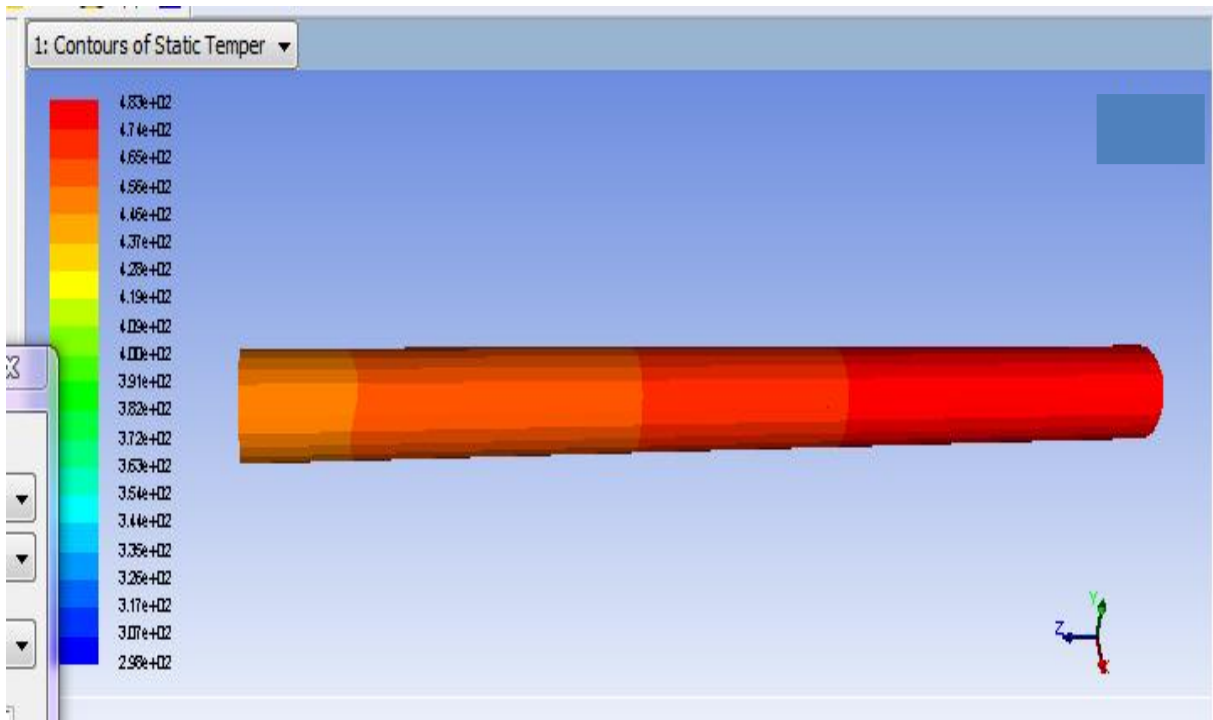
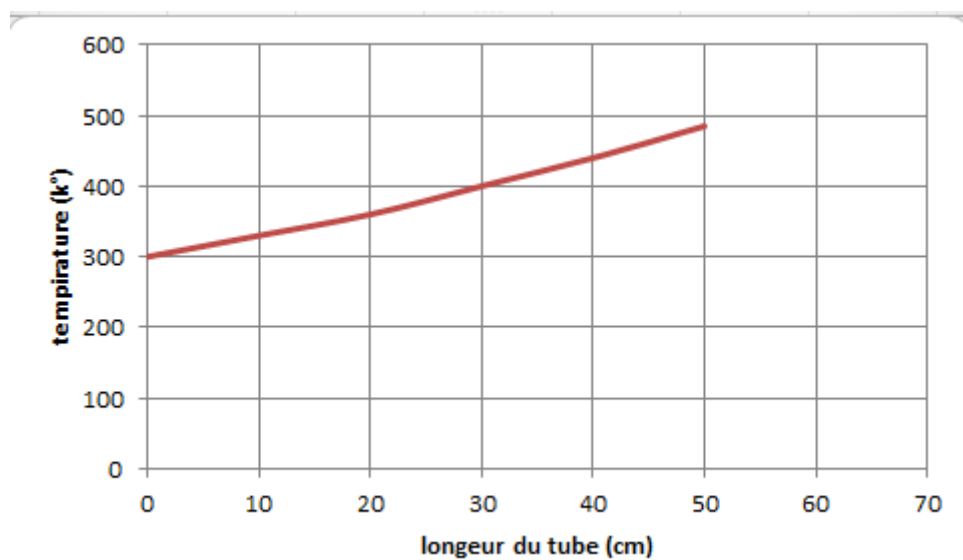


Figure III.13 : Répartition de la température le long de tube.

En déduit de cette figure que la température augmente le long de tube, ce que veut dire quand s'en rapproche de la sortir du tube, par ce que le mélange (air +particule) reçoit la chaleur de la paroi. L'augmentation de cette température est résumée par le Graphe III.1.



Graphe III.1 : L'évolution de la température en fonction de la longueur de tube.

La température varie entre deux valeurs, minimale de 300°K et de maximum 483°K Cette répartition de température nous conduit vers une variation de l'enthalpie proportionnelle

d'une valeur min de 0.65 kJ/kg vers une valeur max de 161.39 kJ/kg comme l'indique la figure III.14.

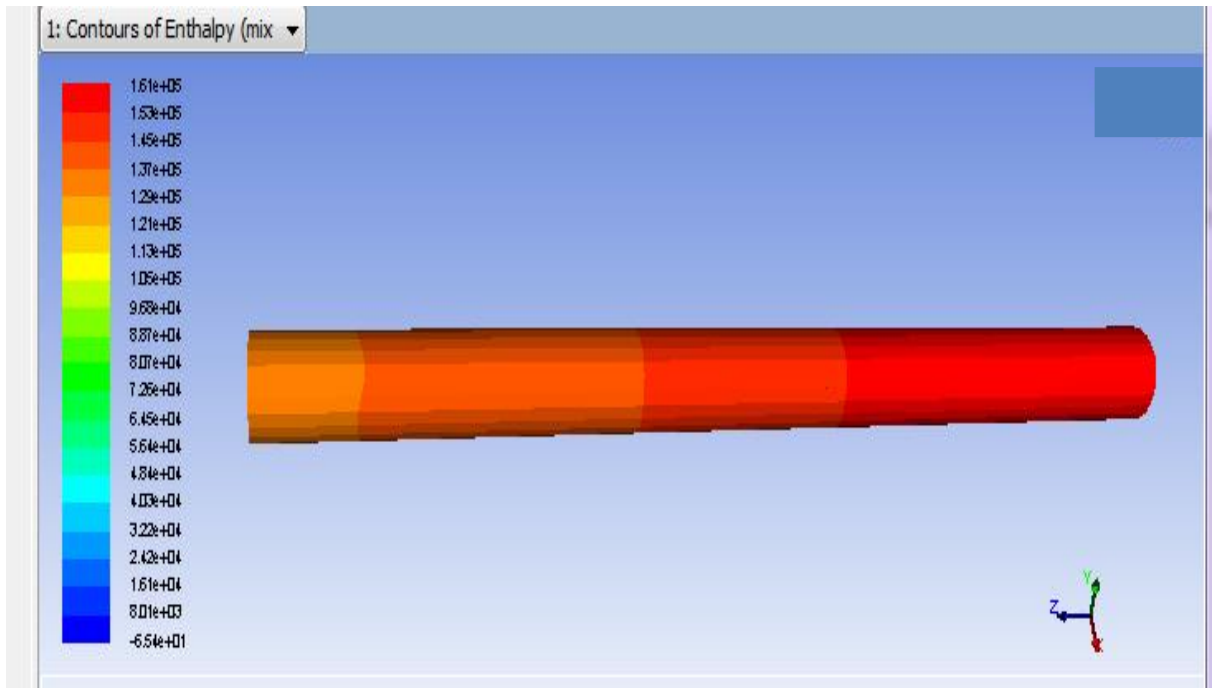


Figure III.14 : Variation de l'enthalpie le long de tube.

III.4.3 La vitesse de la suspension

On présente dans la figure III.15 la distribution de la vitesse verticale dans le tube sur le long de la hauteur ($h=500$ mm) et en présente aussi la variation et les vecteurs vitesses dans l'entrée et la sortie de tube.

- La sortie :

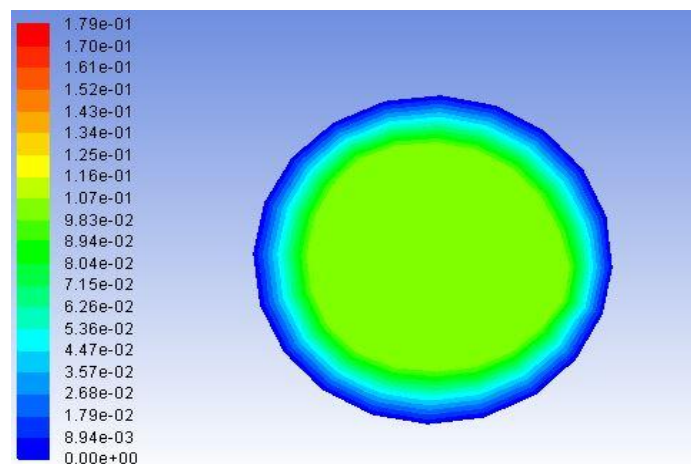


Figure III.15 : La distribution de la vitesse sur la section de sortie.

On remarque que la vitesse de sortie du tube est très faible. Elle s'annule en approchant la paroi (la vitesse de la suspension à la paroi = 0), au milieu de tube elle peut atteindre une valeur maximale de 8.04×10^{-2} m/s. pour confirmer ces résultats on s'appuie sur le schéma de vecteur vitesse à la sortie :

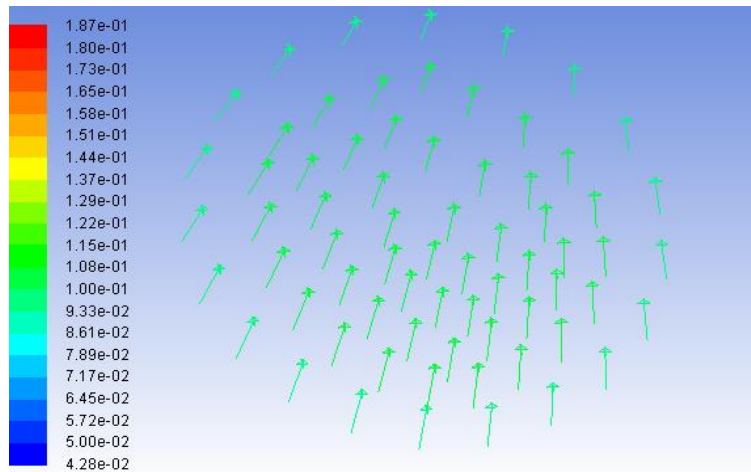
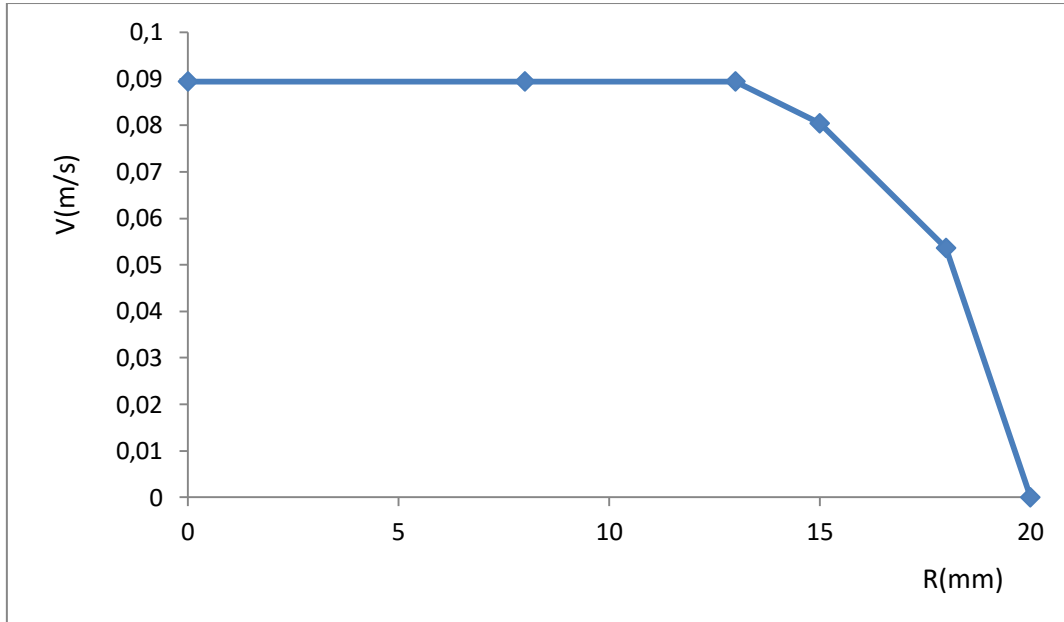


Figure III.16 : La répartition de vectrices vitesses à la sortie.

Les deux figures précédentes sont résumées dans le graphe III.2



Graphe III.2 : variation de la vitesse de la sortie en fonction de rayon de tube (surface de sortie).

- L'entrée :

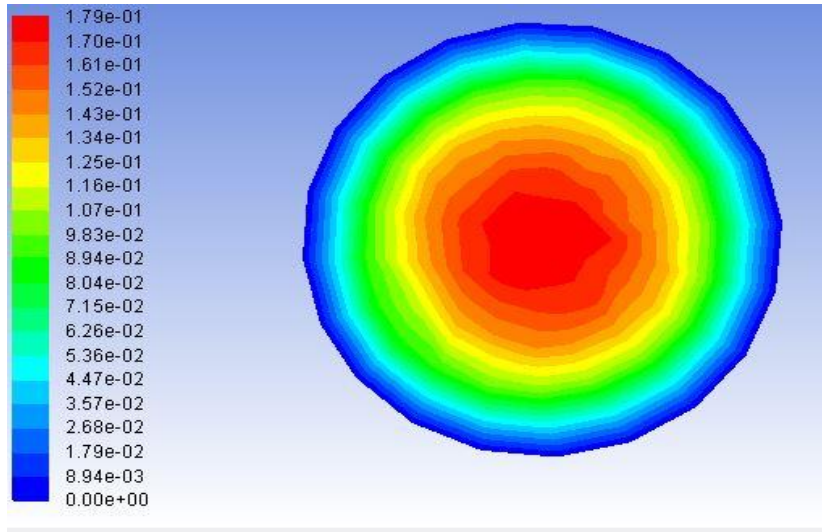


Figure III.17 : La distribution de la vitesse sur la section de l'entrée.

De cette figure III.17 en déduit que la variation de vitesse à la sortie est pareille à la variation de l'entrée. D'où, elle s'annule à la paroi et elle augmente en approchant vers le centre de tube, ou elle atteint sa valeur maximale sur tout le long du tube d'une valeur de 0.18 m/s. cela le confirme le schéma de vecteur vitesse :

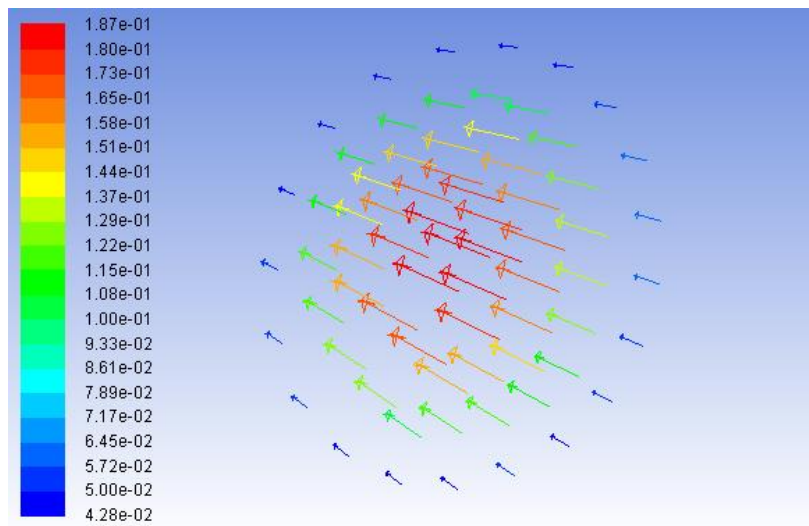
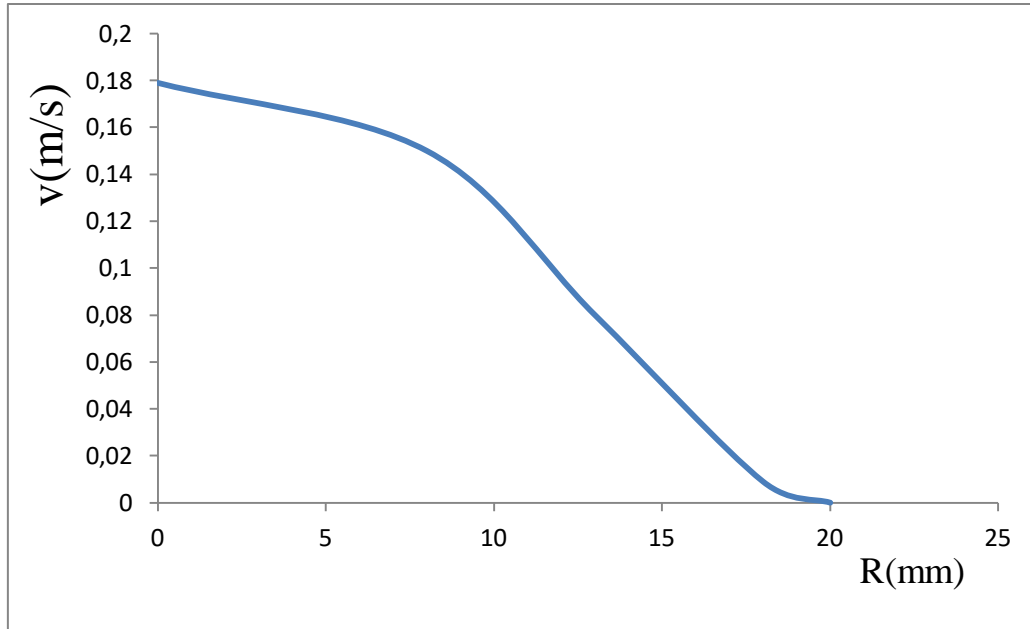


Figure III.18 : La répartition de vectrices vitesses à l'entrée.

Les vecteurs vitesses les plus vite sont bases au centre de tube et se diminuons en arrivons vers la paroi. Elle atteint sa vitesse maximale au centre d'une valeur 0.18 m/s.

On s'appuis sur le graphe III.3 pour mieux expliquer :



Graphe III.3 : variation de la vitesse d'entrée en fonction de rayon de tube (surface d'entrée).

La suspension à une vitesse verticale maximale au centre et nulle à la paroi, l'injection d'un débit de l'air secondaire entraîne une augmentation de la vitesse de gaz, qui conduit à une augmentation de la vitesse des particules. La taille des particules ont une influence sur la vitesse de la suspension dans le tube, tandis que la taille des particules est plus grande, la vitesse devrait être plus élevée afin de rendre les particules solides fluidisées.

III.4.4 La variation de pression de la suspension

La variation de température conduit vers une variation de pression dans le tube, une chute de pression est remarquable le long de tube, l'illustration de cette chute est traduite dans la figure III.19 :

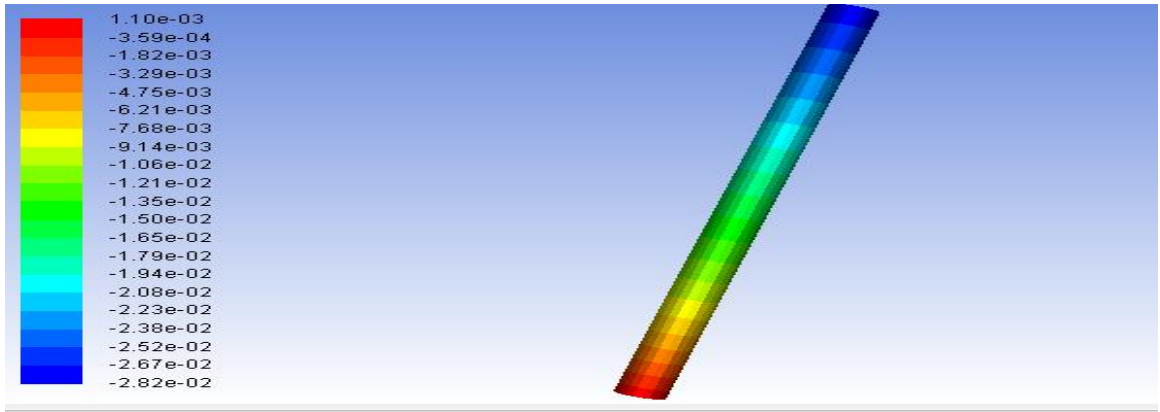
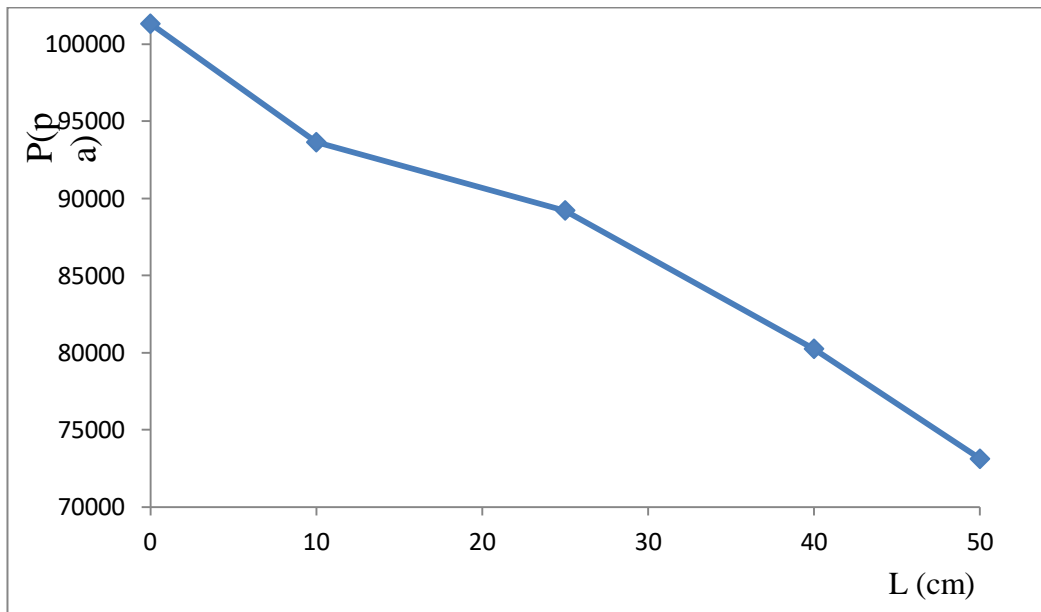


Figure III.19 : La distribution de la pression le long de tube.

Le signe (-) indique que notre pression est en-dessous de la pression atmosphérique.

On remarque sur cette figure que la pression de la suspension diminue, d'une valeur maximale de 101325 Pa (la pression atmosphérique), elle diminue d'une valeur de de -2.82×10^2 Pa. la pression de sortie est de 73125 Pa, le graphe III.4 confirme notre résultat



Graphe III.4 : variation de pression en fonction de la longueur de tube.

III.5. Discussions sur les résultats

La pression de sortie du tube est inférieure à la pression atmosphérique, ce que cause une dépression au niveau de la sortie du tube. Cette dépression est nécessaire pour assurer la fluidisation de la suspension dense des particules, et éviter le blocage des particules dans le tube.

La température de la suspension qu'on a simulée (483°C) à la sortie du tube absorbeur, avec un deuxième cycle on obtient sûrement une valeur proche à la température qu'on veut atteindre dans notre dispositif (environ 800°C) avec les pertes de la chaleur.

La différence de l'enthalpie entre l'entrée (1,68kj/kg) et la sortie (664,16kj/kg) est important, car la suspension est reçoit un flux de chaleur (1000w) dans une petite surface d'échange de la chaleur. (Tube absorbeur).

On a remarqué aussi une variation de vitesse (la vitesse diminue) le long de tube pour obtenir une bonne fluidisation et assurer que les particules reçoivent le maximum de rayonnement possible dans le tube absorbeur.

La vitesse de la suspension varie aussi le long de rayon de tube absorbeur, elle est maximum au centre de tube et nulle à la paroi (adhérence à la paroi).

III.6.Conclusion

La simulation numérique 3D nous montre les vrais comportements de la suspension dans le tube, ses résultats permet de comparer ou confirmer les résultats obtenus lors des essais dans le labo. En peut aussi déduit de cette simulation :

- La différence de température entre l'air et les particules solides est presque nul (inférieur à 30°K).
- La diminution de la vitesse d'entrée (le débit massique d'air à l'entrée), gérer par un régulateur à l'entrée de tube conduit vers une augmentation de température à la sortie.
- La vitesse de la suspension est nulle à la paroi, elle devient plus élevée au centre de tube.
- Pour obtenir une température considérable à la sortie du tube (voisinage des 800°C), il faut diminuer la vitesse et la pression de la suspension tout le long de tube.
- Avec un deuxième cycle ou avec le passage de la mixture dans la seconde zone de chauffage (récepteur à particules tombantes voir la figure **II.16**) on peut atteindre des températures plus élevés supérieure à 1000°C

Plusieurs possibilités sont actuellement à l'étude pour améliorer l'adéquation entre les simulations et les expériences à l'avenir et obtenir un très bon rendement de ces capteurs solaire à particule. [27]

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons entrepris, nous permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur les capteurs solaires à particules. Le but de notre projet est de réaliser un dispositif expérimental qui va recevoir le maximum d'énergie solaire.

Notre objectif principale est la conception et réalisation d'un dispositif expérimental pour l'étude des écoulements solide- fluide dans un récepteur solaire à particule, et faire un système nécessaire pour stocker l'énergie (la chaleur) résultante.

Les résultats trouvés par la simulation numérique du tube absorbeur sont comme suite :

- Une température élevée jusqu'au voisinage des 700°k.
- Un total d'enthalpie mesuré à 1.65×10^5 kJ/kg.
- Une chute de pression au-dessous de la pression atmosphérique est repérer dans le tube absorbeur à la section du sortie.
- On a remarqué aussi, que la température résultante varie à la variation de la vitesse d'entrée de la suspension (air+particules). La vitesse d'entée est faible, la température de la suspension augmente.

En conclusion, on a réussi de fabriquer un capteur solaire à particules solides qui permet de récupérer et stocker l'énergie solaire sous forme de chaleur .