

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Réf. :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat en sciences : Génie Mécanique

Option : Energétique

**Stockage de la chaleur dans un milieu
granuleux solide**

Présentée par :
MAHFOUDI Nadjiba

Soutenue publiquement le : 28/02/2016

Devant le jury composé de :

BRIMA Abdelhafid	Professeur	Président	Université de Biskra
MOUMMI Abdelhafid	Professeur	Directeur de thèse	Université de Biskra
EL GANAOUI Mohammed	Professeur	Co-directeur de thèse	Université de Lorraine (France)
BENNACER Rachid	Professeur	Examinateur	ENS Cachan (France)
MOUMMI Noureddine	Professeur	Examinateur	Université de Biskra
ADOUANE Belkacem	Professeur	Examinateur	Université de Batna

*À celle à qui je dois toute ma réussite,
ma raison de vivre, ma mère, ma sœur,
et ma meilleure amie, ma chère **BETSY***

Remerciements

Enfin me voilà rédigeant mes remerciements ! Quelle longue mais belle aventure. Une thèse, en deux mots, est un parcours plein de surprises. C'est toute une histoire qui ne se limite point à son côté scientifique. C'est aussi aventures, rencontres, amitiés et pour certains amour aussi !

Ce défi est, certes, dur mais cela fait partie de la vie que toute personne amoureuse de la science aimerait avoir. Le domaine de la recherche scientifique est vaste et difficile à gérer mais on s'y adapte en se retrouvant face à des problèmes intellectuels et des obstacles techniques. Les solutions rarement simples et linéaires ne tombent pas du ciel ! Non, elles se sont imposées par le fruit de nombreuses relations et des différents contacts que j'ai eu l'occasion de rencontrer. Des personnes passionnées de la recherche et qui cependant m'ont été d'une aide et d'un support formidable. Ce chapitre a été l'un des plus beaux de ma vie et j'aimerais remercier tous ceux et celles qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à l'écriture de cet œuvre !

Je commence par remercier mon directeur de thèse le professeur Abdelhafid Moumami qui m'a confié ce travail de recherche, ainsi que pour l'aide qu'il m'a apporté et pour ses précieuses orientations. Je tiens à remercier également le professeur Mohammed El Ganaoui co-directeur de thèse pour m'avoir fait confiance et m'avoir accueilli dans son laboratoire (LERMAB) à l'IUT de Longwy, au sein d'une équipe tout simplement adorable, enthousiaste et passionnées. Je vous suis reconnaissante pour m'avoir ouvert la porte vers le chemin de la recherche scientifique, de m'avoir appris les réflexes d'un bon chercheur et à me poser les bonnes questions et à y répondre avec le maximum de rigueur. Merci pour votre soutien aussi bien sur la plan humain que scientifique.

Je souhaite remercier mon jury de thèse pour avoir accepté de poser un regard critique sur mon travail, en commençant par le professeur Abdelhafid Brima qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse, professeur Rachid Bennacer, professeur Noureddine Moumami et Professeur Belkacem Adouane, pour leur disponibilité et pour leur travail de rapporteur, pour le temps qu'ils y ont consacré.

Pendant toute ces années de thèse, je tiens à remercier toute l'équipe que j'ai connu, Sofiane O, Lahoucine, Yassine K, Luana, Van Diem, Zhang, Kassim, Rabah, Leila, Nessrine, Mengya (équipe de LERMAB), Bassem, Ghazi, Ahlam, Noussaiba (équipe du CRAN) pour

leur bonne compagnie, leur présence m'était très chère mais aussi leur aide et leur soutien de près ou de loin.

Avec le temps, certains collègues sont devenus des amis et j'aimerais leur dire à quel point j'ai apprécié leur présence à mes côtés tout au long de ces journées. Faiza, Yassine, Azza et Mustapha je vous remercie pour les moments de sourires, de folies et d'aventures partagés. Ce fut comme se sentir en famille et j'espère qu'on aura encore le temps de se revoir et de revivre des histoires ensemble mais sachez que mes souvenirs avec vous sont aussi beaux que indélébiles.

Je remercie fortement tout le personnel technique et administratif de l'IUT de Longwy, Un grand merci à Gabi pour son assistance durant les essais expérimentaux.

Enfin un clin d'œil à ma famille pour leur soutien et leur présence tout au long de mon parcours.

Sommaire

Sommaire	4
Liste des figures	8
Liste des tableaux	12
Nomenclature	13
Introduction générale	15

Chapitre I

Stockage thermique solide, procédés et matériaux

I.1. Introduction	20
I.2. Stockage thermique de l'énergie	20
I.2.1. Types de stockage de l'énergie thermique	21
I.2.1.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible	21
I.2.2.2. Stockage de l'énergie thermique par chaleur Latente	21
I.2.2.3. Stockage thermochimique	25
I.2.2. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique	27
I.2.3. Critères de choix et de conception de systèmes de stockage	28
I.3. Etat de l'art du stockage sensible solide	29
I.3.1. Le stockage sensible parmi les modes de stockage	29
I.3.2. Le stockage liquide	31
I.3.3. Le stockage solide	33
I.4. Procèdes de stockage sensible solide	33
I.4.1. Les lits fixes entassés (Packed bed)	33
I.4.2. Aspects scientifiques et techniques des lits fixes entassés	36
I.4.3. Le lits fluidisé	40
I.4.4. Aspects scientifiques et techniques des lits fluidisés	41
I.5. Conclusion	42

Chapitre II

Energétique des milieux granulaires

II.1. Introduction	43
II.2. Définition d'un milieu granulaire	43
II.3. Caractéristiques et propriétés physiques d'un milieu granulaire	45
II.3.1. Modélisation continue des milieux hétérogènes	45
II.3.2. Caractéristiques globales	46
II.3.2.1. L'élément de volume élémentaire (VER)	46
II.3.2.2. La porosité	47
II.3.2.3. La distribution de diamètres de grain	47
II.3.2.4. La fraction volumique	48
II.3.2.5. L'indice sphéricité	49
II.3.3. Paramètres thermiques	51
II.3.3.1. Capacité calorifique équivalente	51
II.3.3.1. Conductivité thermique équivalente	51
II.4. Transfert thermiques dans un milieu granulaire	53
II.4.1. Mécanisme de transfert de chaleur	53
II.4.2. Modélisation du transfert thermique dans un milieu granulaire	54
II.4.2.1. Moyenne prise sur un volume élémentaire représentatif	54
II.4.2.2. Le modèle à deux températures	55
II.4.2.3. Le modèle à une température	57
II.4.2.4. Modélisation du transfert thermique en proche parois	58
II.5. Transfert thermique dans un écoulement granulaire	60
II.5.1. Transfert de chaleur par contact	61
II.5.2. La théorie cinétique	62
II.6. Conclusion	63

Chapitre III

Conception et caractérisation d'une unité de stockage à l'échelle du laboratoire

II.1. Introduction	64
II.2. Caractérisation du matériau	65
III.2.1. Granulométrie	65
III.2.2 Masse volumique	66
III.2.3. Capacité calorifique	67
III.3. Conception du système de stockage	69
III.4. Essais expérimentaux	71
III.5. Modélisation du comportement thermique du sable	76
III.5.1. Description de la configuration étudiée	76
III.5.2. Modélisation 2D	77
III.5.2.1. Hypothèses	77
III.5.2.2. Equations gouvernantes	78
III.5.2.3. Modélisation numérique	78
III.5.2.4. Résultats de la simulation	79
III.5.3. Modélisation 3D	84
III.5.3.1. Conditions aux limites et initiales	85
III.5.3.2. Discrétisation du domaine	85
III.5.3.3. Résultats et discussion	86
III.5.3.4. Confrontation des résultats	91
III.6. Conclusion	92

Chapitre IV

Comportement thermo-fluidique du sable dans un lit fluidisé

IV.1. Introduction	93
IV.2. Considération fondamentale de fluidisation	93
IV.2.1. Classification des particules	94
IV.2.2. Régimes de fluidisation	96
IV.2.2.1. Vitesse minimale de fluidisation et vitesse de transport	96
IV.2.2.2. Etats de fluidisation	99

IV.2.2.3. Nombres adimensionnels	101
IV.2.2.4. Transfert de chaleur dans un lit fluidisé	102
IV.3. Modélisation du procédé de fluidisation	105
IV.3.1. Présentation du dispositif expérimentale modélisé	105
IV.3.2. Configuration géométrique	105
IV.3.3. Mise en équations	106
IV.3.4. Conditions initiales et aux limites	108
IV.4. Simulation Numérique	108
IV.4.1. Description numérique	108
IV.4.2. La physique du phénomène de la fluidisation vue par la simulation	109
IV.4.2.1. Variation de la fraction volumique de la phase solide	109
IV.4.2.2. Variation de la vitesse de la phase solide	112
IV.4.2.3. Chute de pression dans le lit	114
IV.4.2.4. Profils de la température de la phase solide	114
IV.4.2.5. Effet de la vitesse superficielle de l'air	117
IV.5. Extension vers l'échelle industrielle	118
IV.5.1. Présentations du dispositif industriel	118
IV.5.2. Configurations géométries	119
IV.6. Conclusion	121
Conclusion générale et perspectives	123
Références	126
Annexe A	141
Annexe B	143

Liste des figures

Figure 1. *L'homme et l'idée du stockage*

Figure 1. *Croissance de la demande énergétique mondiale*

Figure 2. *Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge*

Figure 3. *Zones à plus fort potentiel solaire et leur habilité de répondre aux besoins en électricité*

Figure I.1. *Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique*

Figure I.2. *Classification des matériaux à changement de phase*

Figure I.3. *Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide)*

Figure I.4. *Schéma du principe de stockage thermo-chimique*

Figure I.5. *Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique*

Figure I.6. *Principe de base de la réaction de décomposition/formation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$*

Figure I.7. *Critères de choix d'une technologie de stockage*

Figure I.8. *Stockage sensible parmi les autres types de stockage*

Figure I.9. *Volume nécessaire pour la même énergie stockée*

Figure I.10. *Schéma d'un système de stockage à lit entassé*

Figure I.11. *Variation de l'énergie stockée en fonction du temps pour différents matériaux de stockage*

Figure I.12. *Distribution spatiale de la température dans un lit fixe pour différents matériaux de stockage, à différents temps de chargement*

Figure I.13. *Arrangement de la segmentation d'un lit fixe selon la stratification*

Figure I.14. *Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé*

Figure I.15. *Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.*

Figure II.1. *Schéma de différentes formes de grain*

Figure II.1. *Exemple de milieux granulaires, (1) riz, (2) cailloux d'un lit de rivière, (3) sable*

Figure II.3. *Schéma simplifié d'un milieu granulaire*

Figure II.4. *Milieu granulaire réel (sable)*

Figure II.5. *Notion du volume élémentaire représentatif*

Figure II.6. *Evaluation de la sphéricité de grains par la simplification de Powers*

Figure II.7. *Strates en série et en parallèle*

Figure II.8. *Echanges de chaleur dans un lit granulaire*

Figure II.9. *Les différents régimes d'écoulement d'un milieu granulaire*

Figure III.1. *Moyenne annuelle globale reçue sur une surface horizontale de la région d'El Oued*

Figure III.2. *Vue photographique de la distribution de la taille des grains dans les échantillons de sable*

Figure III.3. *Diagramme de la distribution de la taille de grains de sable*

Figure III.4. *Différence entre masse volumique absolue et masse volumique apparente.*

Figure III.5. *Matériels utilisés pour la mesure de la capacité calorifique au laboratoire VTRS*

Figure III.6. *Variation de la quantité de chaleur reçue par le sable en fonction de la masse de sable et la différence de température*

Figure III.7. *Schéma du système de stockage*

Figure III.8. *Schéma de la cuve de stockage : (a) les dimensions de la cuve, (b) isolation, (c) photographie de la cuve*

Figure III.9. *Configuration de l'échangeur de chaleur dans la cuve de stockage*

Figure III.10. *Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage*

Figure III.11. *Données du rayonnement solaire à ciel clair de la région d'El Oued.*

Figure III.12. *Evolution temporelle de la température moyenne du sable et la température ambiante pendant le processus de chargement*

Figure III.13. *Evolution de la température du lit pendant deux jours successifs*

Figure III.14. *Evolution de l'Energie stockée dans le lit de sable*

Figure III.15. *Evolution du rendement instantané du lit de sable*

Figure III.16. *Variation de la température moyenne en fonction du nombre de tubes de chargement*

Figure III.17. *Variation de l'énergie stockée en fonction du nombre de tubes de chargement*

Figure III.18. *Variation du rendement instantané en fonction du nombre de tubes de chargement*

Figure III.19. *Schéma physique de l'unité de stockage*

Figure III.20. *Configuration en 2D du domaine d'étude ((a) coupe dans le plan xy, (b) symétrie considérée)*

Figure III.21. *Maillage du domaine d'étude*

Figure III.22. *Distribution de la température dans le lit de Sable pendant le chargement*

Figure III.23. *Contour de la température dans le lit de Sable et direction du flux de chaleur total pendant le chargement*

Figure III.24. *Profile de la température dans le lit de sable pendant le chargement (calculée au centre de la géométrie $x = y = 12.5$)*

Figure III.25. *Variation de l'énergie stockée dans le lit de sable pendant le chargement*

Figure III.26. *Rendement instantané du chargement du lit de Sable*

Figure III.27. *Profile de la température du lit de sable pendant un cycle complet charge/décharge*

Figure III.28. *Conditions aux limites et initiales appliquées*

Figure III.29. *Maillage de la géométrie du lit de sable avec 9 tubes de chargements*

Figure III.30. *Contours de temperature dans le lit de sable pendant le chargement*

Figure III.31. *Temps de chargement du lit de sable*

Figure III.32. *Variation de l'énergie stockée dans le lit de sable*

Figure III.33 : *Rendement de stockage du lit de sable*

Figure III.34. *Proile de la température du lit de sable pour trois configuration des tubes de chargement*

Figure III.35. *Variation de la température du fluide caloporteur selon la hauteur du lit de sable pour differents temps de chargement*

Figure IV.1. *Classification des particules selon Geldart.*

Figure IV.2. *Classification de Sexana et Ganzha.*

Figure IV.3. *Variation de la perte de charge dans un lit de particules en fonction de vitesse superficielle.*

Figure IV.4. *Principaux états de fluidisation d'un de particule solide soumis à un flux de gaz ascendant.*

Figure IV.5. *Diagramme de fluidisation de Reh.*

Figure IV.6. *Mode de transfert de la chaleur en fonction du diamètre et de la température des particules.*

Figure IV.7. *Dispositif expérimental du lit fluidisé étudié.*

Figure IV.8. *Schéma simplifié du lit fluidisé étudié.*

Figure IV.9. *Maillage du domaine d'étude avec les conditions aux limites appliquées*

Figure IV.10. *Distribution de la fraction volumique solide dans le lit fluidisé dans un intervalle de temps de 5 s*

Figure IV.11. *Photos des états de la fluidisation observées pendant les essais expérimentaux.*

Figure IV.12. *Variation de fraction volumique de la phase solide dans le lit fluidisé (calculé à $H = 15$ cm).*

Figure IV.13. *Présentation des vecteurs du champ de vitesse de la phase solide dans le lit fluidisé à différents temps*

Figure IV.14. *Profil de la vitesse de la phase solide dans le lit fluidisé à $t = 2$ s pour deux hauteurs différentes*

Figure IV.15. *Variation de la pression dans le lit fluidisé (calculé à $H = 15$ cm)*

Figure IV.16. *Contours de la température de la phase solide dans le lit fluidisé*

Figure IV.17. *Evolution de la température de la phase dispersée dans le lit fluidisé dans un temps de 9 s (calculé à $H = 15$ cm)*

Figure IV.18. *Evolution de la température de la phase dispersée dans le lit fluidisé dans un temps de 60 s (calculé à $H = 15$ cm)*

Figure IV.19. *Variation de la température de la phase dispersée en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 2$ s, pour deux hauteurs différentes*

Figure IV.20. *Variation de la température de la phase dispersée en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 45$ s*

Figure IV.21. *Effet de la vitesse superficielle de l'air sur la fluidisation*

Figure IV.22. *Description de l'installation du dispositif à lit fluidisé (Lermab de Longwy)*

Figure IV.23. *Pincipe de fonctionnement du dispositif à lit fluidisé (Lermab de Longwy)*

Figure IV.24. *Schéma d'un lit fluidisé avec un jet uniforme centré*

Figure IV.25. *Effet du maillage sur la fraction volumique de la phase solidependnat la 1ere seconde des test pour différents niveau dans le lit*

Figure IV.26. *Shémas du domaine de simulation pour les différentse géométries du lit fluidisé*

Figure IV.27. *Schéma du lit fluidisé avec une configuration convergent/divergent avec des tubes*

Liste des tableaux

Tableau I.1. *Technologies et matériaux de stockage par chaleur latente*

Tableau I.2 : *Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur*

Tableau I.3 : *Solution de stockage par chaleur sensible existantes*

Tableau I.4 : *Principales caractéristiques des matériaux utilisés dans le stockage liquide*

Tableau I.5 : *Techniques de stockage liquide*

Tableau I.6 : *Les propriétés de quelques matériaux solide utilisés pour le stockage dans les lits fixes*

Tableau II.1 : *Synthèse des propriétés des milieux granulaire avec les méthodes de caractérisation*

Tableau II.2 : *Principaux modèles de calcul du coefficient de dispersion thermique et d'échange thermique en proche paroi dans un lit granulaire fixe*

Tableau III.1. *Paramètre d'entrée du modèle*

Tableau III.2. *Paramètres utilisés pour la simulation*

Tableau IV.1. *Corrélation pour le calcul de la vitesse minimale de fluidisation*

Tableau IV.2. *Liste des nombres adimensionnels utilisés pour le calcul de la vitesse minimale de fluidisation*

Tableau IV.2. *Corrélation pour le calcul du nombre de Nusselt.*

Tableau IV.3. *Propriétés physiques des phases continue et dispersée*

Tableau IV.4. *Paramètres de simulation utilisés*

Nomenclature

<i>A</i>	<i>Superficie</i>	m^2
<i>a</i>	<i>Superficie caractéristique</i>	m^2
<i>Ar</i>	<i>nombre d'Archimède</i>	-
<i>C</i>	<i>Compacité</i>	-
<i>C_d</i>	<i>coefficient de trainée</i>	-
<i>C_p</i>	<i>capacité calorifique</i>	$J/kg.K$
<i>d</i>	<i>diamètre des particules solides</i>	m
<i>e</i>	<i>coefficient de restitution</i>	-
<i>Ga</i>	<i>nombre de Galilé</i>	-
<i>g</i>	<i>accélération de la gravité</i>	$m.s^{-2}$
<i>g₀</i>	<i>fonction de la distribution radiale</i>	-
<i>H</i>	<i>enthalpie,</i>	$J. kg^{-1}$
<i>h</i>	<i>coefficient de transfert de chaleur entre les phases continue et dispersée</i>	$J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-1}$
<i>L</i>	<i>Chaleur latente de changement de phase</i>	$J. kg^{-1}$
<i>m</i>	<i>masse</i>	kg
<i>Nu</i>	<i>nombre de Nusselt</i>	-
<i>P</i>	<i>pression</i>	Pa
<i>Pe</i>	<i>nombre de Peclet</i>	-
<i>Pr</i>	<i>nombre de Prandtl</i>	-
<i>Q</i>	<i>quantité d'énergie</i>	W
<i>Re</i>	<i>nombre de Reynolds</i>	-
<i>T</i>	<i>température</i>	K
<i>t</i>	<i>temps</i>	s
<i>u</i>	<i>Composante de la vitesse dans la direction x</i>	$m.s^{-1}$
<i>V</i>	<i>Volume</i>	m^3
\vec{v}	<i>champs de la vitesse</i>	$m.s^{-1}$
<i>Ze</i>	<i>nombre de Zenz</i>	-

Symboles grecs

α	<i>fraction volumique</i>	-
β	<i>coefficient d'échange de quantité de mouvement entre les phases</i>	-
Γ	<i>rapport de dissipation</i>	-

Δ	<i>variation</i>	-
ε	<i>porosité</i>	-
η	<i>rendement</i>	-
θ	<i>température granulaire</i>	$m^2.s^{-2}$
λ	<i>conductivité thermique,</i>	$W.m^{-1}.K^{-1}$
μ	<i>viscosité dynamique</i>	<i>Pas</i>
ρ	<i>masse volumique</i>	$kg.m^{-3}$
τ	<i>tenseur de contrainte,</i>	<i>Pa</i>
ψ	<i>indice de sphéricité</i>	-

Indices et exposants

<i>c</i>	<i>continue (air)</i>
<i>d</i>	<i>dispersée (solide)</i>
<i>e</i>	<i>entrée</i>
<i>eq</i>	<i>équivalent</i>
<i>ext</i>	<i>extérieur</i>
<i>f</i>	<i>fluide</i>
<i>g</i>	<i>grain</i>
<i>ini</i>	<i>initial</i>
<i>k</i>	<i>phase k</i>
<i>mf</i>	<i>minimum de fluidisation</i>
<i>N</i>	<i>nombre de mole</i>
<i>p</i>	<i>particule</i>
<i>s</i>	<i>solide</i>
<i>t</i>	<i>transport</i>

Introduction générale

L'homme a toujours stocké l'énergie sous forme de chaleur par de simples gestes (cf. figure 1), en faisant chauffer une pierre au soleil et l'utiliser après pour le chauffage ou la cuisson.

L'un des principaux enjeux liés à l'énergie est sans aucun doute son stockage. Qu'il s'agissait d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès, il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes, il est même capital dans le cas des énergies renouvelables. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de ces énergies, le stockage permet également de répondre à une demande constante.



Figure 1. L'homme et l'idée du stockage.

La demande énergétique mondiale est actuellement de l'ordre de 12.5 Gtep. Elle est en croissance permanente, et elle pourrait aller de 20 à 25 Gtep à l'horizon 2050 [1] (cf. figure 2). En parallèle, une situation environnementale inquiétante s'établit avec, 6.5 Gt de CO₂ générés annuellement, conduisant ainsi à un accroissement sensible de la température moyenne à la surface de la terre entre 1.5 °C et 5.8 °C d'ici 2100. Ceci représente une augmentation sans précédent qui s'accompagnerait en particulier de la montée du niveau des mers de 20 cm à 01 m [2].

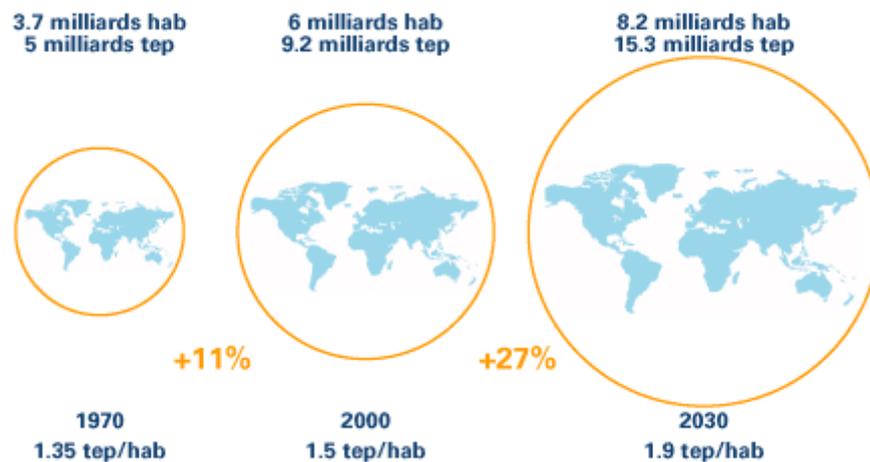


Figure 2. Croissance de la demande énergétique mondiale.

Face à cette situation, faire recours aux énergies renouvelables présente une solution bien entendu partielle. Parmi ces énergies, l'énergie solaire montre une attractivité spécifique puisqu'elle est en abondance sur terre et inépuisable. Le flux d'énergie moyen reçu au niveau de la terre est de l'ordre de 1300 W.m^{-2} (ciel dégagée). L'atmosphère en réfléchit et en absorbe une partie, en moyenne, la terre reçoit au niveau du sol 1000 W.m^{-2} . Pour donner un ordre de grandeur, 1 km^2 de désert (Sahara) pourrait développer une puissance de 50 MWe et éviter le dégagement de 200 000 tonnes de CO_2 par an. Pour la comparaison, la puissance d'un réacteur d'une centrale nucléaire française est comprise entre 900 et 1450 MWe (24h).

Cependant, l'énergie solaire, par sa nature est intermittente (jour/nuit), aléatoire (orages et passages de nuages) diluée et décalée par rapport à la demande énergétique quotidienne ou saisonnière. Par ailleurs, son exploitation nécessite le déploiement de systèmes de stockage performants. En revanche, la technologie de stockage thermique a atteint une maturité, qui la rend prête à être exploitée pour une utilisation efficace des énergies renouvelables.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois principes élémentaires : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et le stockage thermochimique [3]. L'importance du stockage thermique par rapport aux autres technologies existantes, est illustrée dans la figure 3 [4]. Elle montre que le stockage thermique permet la gestion de fortes puissances sur des périodes de longues durées.

Le stockage de l'énergie consiste à en préserver une quantité pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie, donc le matériau de stockage. Cette filière continue à faire l'objet de travaux de

recherches, que se soit pour des applications de stockage sensible, latent, ou thermochimique, toujours à la recherche de matériaux prometteurs, ayant à la fois des critères écologiques, économiques et une bonne conductivité thermique [5].

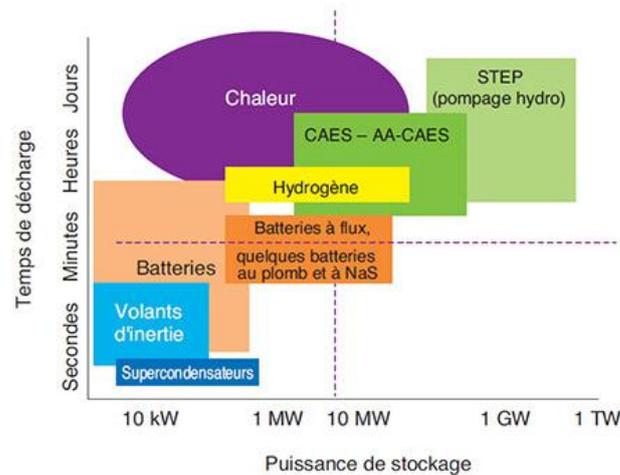


Figure 3. Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge

La technologie de stockage sensible est considérée comme simple, économique et relativement mature, ce qui lui permet d'être exploitée [6], en revanche le choix du matériau de stockage est primordial. Plus de 15000 matériaux de stockage sont disponibles avec de nouveaux développés chaque année [7].

Les systèmes de stockage sensible peuvent être classifiés selon le matériau de stockage utilisé, aux systèmes liquides, et systèmes solides. De même ils peuvent être classifiés selon la durée de stockage, au stockage à court et à long terme. Pour le stockage liquide, l'eau reste le milieu le plus utilisés (réservoir d'eau, aquifère, bassin solaire), pour des applications à basse température (25 - 90 °C). En revanche des matériaux plus performants sont destinés au stockage à haute températures (300 - 800 °C) (huiles à base de pétrole, sels fondus...etc.).

Dans le cas du stockage solide à basse et à haute température, des matériaux tel que pierre, sable, béton, brique, sont utilisés [8, 9]. A cet effet, et pour des raisons de sécurité et de stabilité, le stockage solide est favorisé par rapport au stockage liquide [10].

Le potentiel solaire des régions se situant dans la ceinture solaire¹ (cf. figure 4), dont l'Algérie fait partie, offre la possibilité de produire 10% de l'électricité mondiale, et par conséquent un besoin de 9 à 21 Mt/an de matériaux de stockage [11].

¹ Zone à plus fort potentiel solaire

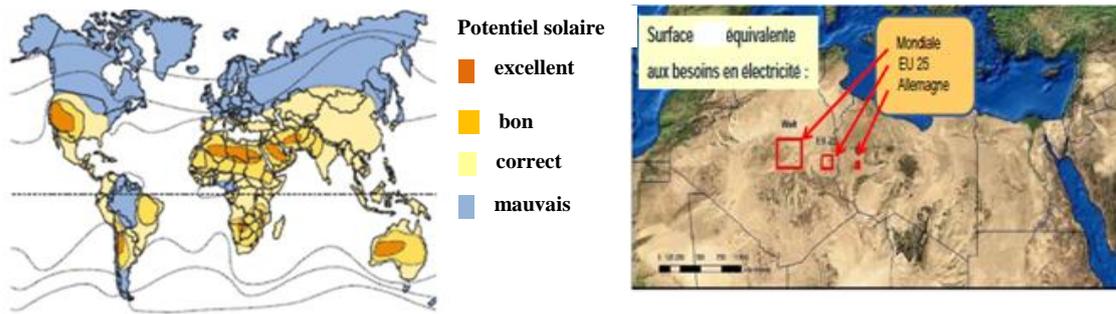


Figure 4. Zones à plus fort potentiel solaire et leur habilité de répondre aux besoins en électricité

Le besoin de stockage est donc, une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique. Dans ce contexte pourquoi dépenser des moyens financiers pour des matériaux de stockage coûteux, alors que d'autres sont disponibles gratuitement.

Dans le cadre de cette thèse, une étude de faisabilité pour un matériau abondant est réalisée à travers une analyse expérimentale et numérique d'une installation de stockage à l'échelle du laboratoire.

Le premier chapitre donne un aperçu rapide sur les techniques de stockage et se focalise sur le stockage solide et les différents procédés et matériaux qui en réfèrent. Ce chapitre s'articule sur trois parties. D'abord une analyse bibliographique des différentes techniques de stockage liquide et solide mis en œuvre est effectuée, suivie d'un état de l'art sur le stockage sensible et les matériaux utilisés pour ce type de stockage, présentant ainsi ces avantages. Enfin les différentes techniques usées dans le cas du stockage solide sont présentées. A l'issue de ce chapitre le choix s'est fixé sur le sable comme milieu de stockage.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à la compréhension du comportement hydrodynamique et thermique des milieux granulaires utilisés dans un lit fixe et un lit fluidisé. Dans un premier temps, nous présentons des généralités sur les grandeurs caractéristiques des milieux granulaires. En suite, une description des différents modèles qui étudient l'hydrodynamique dans les milieux granulaires est présentée. Finalement nous mettrons l'accent sur le transfert de chaleur dans ces milieux.

Dans le troisième chapitre on se focalise sur le milieu choisi qui est le sable et son comportement thermique ainsi que la capacité de stockage de ce milieu utilisé dans un lit fixe, à travers une étude expérimentale d'une cuve de stockage de forme cubique contenant le sable, et dans laquelle est installé un échangeur de chaleur assurant le transport du fluide

caloporteur. L'étude numérique réalisée produit des champs dynamiques du fluide caloporteur et thermiques du milieu de stockage, permettant d'accéder à l'efficacité du stockage.

Le chapitre quatre est destiné à l'étude expérimentale et numérique du comportement hydrodynamique et thermique du sable, utilisé dans un lit fluidisé de forme cylindrique. Une première partie bibliographique décrit le phénomène de fluidisation avec les différents régimes existants ainsi que les critères de transition entre ces derniers. La modélisation du lit fluidisé étudié dans le cadre de cette thèse est ensuite présentée. Les hypothèses réalisées et les équations constitutives sont détaillées. Dans le lit, le milieu à fluidisé (sable) est traversé par un écoulement ascendant d'air chaud, assurant à la fois, la fluidisation et le transfert de chaleur. Les résultats obtenus montrent une perte de symétrie rapide menant à un régime chaotique. L'effet de l'hydrodynamique sur la thermique du lit est présenté. Ceci a permis, enfin de faire le lien entre les résultats obtenus et le dispositif à lit fluidisé installé à l'IUT de Longwy (France).

L'étude conclue au potentiel important du sable comme milieu de stockage. La modélisation du transfert de chaleur dans ce type de milieu est également une voie intéressante pour la compréhension des phénomènes, et l'amélioration des conceptions technologiques des dispositifs de stockage en passant par l'amélioration des procédés. L'étude a été abordé de manière expérimentale à deux échelles, au laboratoire, qui a permis de caractériser le sable ainsi qu'un lit fluidisé (volume), ensuite un lit fluidisé à l'échelle industrielle, l'ensemble des conclusions devant conduire à mieux comprendre et contrôler l'articulation entre la production et la demande en énergie renouvelable pour une meilleure efficacité d'usage.

Chapitre I

Stockage thermique solide, procédés et matériaux

I.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter le contexte de l'étude et de sélectionner le matériau et la technique de stockage de l'énergie thermique mise en œuvre dans ce travail de thèse. Pour cela, quelques généralités sur les différents types de stockage de l'énergie thermique sont décrites et comparées. Ensuite, un état de l'art des procédés de stockage de l'énergie thermique par voie sensible est présenté. Cet état de l'art permettra de faire le point sur les technologies qui sont ou qui ont été étudiées et sur les matériaux appropriés à chaque technologie. Des critères de sélection seront présentés et confrontés aux matériaux afin de choisir le plus prometteur. A l'issue de ce chapitre, les techniques les mieux adaptées pour mettre en œuvre le matériau choisi seront sélectionnées.

I.2. Stockage thermique de l'énergie

Le stockage de l'énergie thermique concerne principalement la chaleur provenant du soleil, comme il concerne également la chaleur produite par certaines industries (industrie métallurgique, centrale à gaz, centrale d'incinération...).

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères (*cf. figure I.1*). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid » [12, 13]. Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage long terme » et le stockage « court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe trois principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », et « stockage par chaleur thermochimique » [3]. Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs [14]. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage.

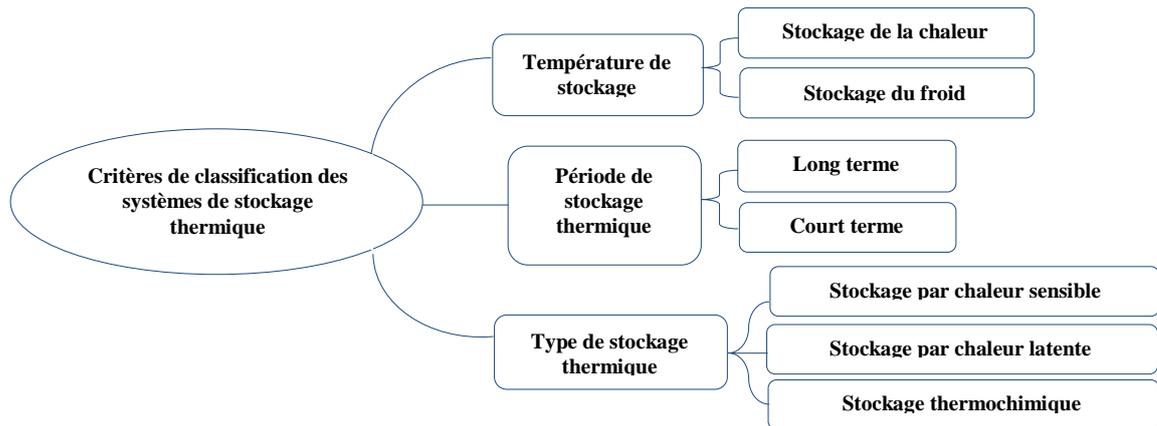


Figure I.1. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrons sur la classification selon le type de stockage. Ces types seront introduits brièvement dans la section (§2.1, page 16). En revanche la technologie de stockage par chaleur sensible fera l'objet d'un état de l'art détaillé (§3, page 24).

I.2.1. Types de stockage de l'énergie thermique

I.2.1.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température, et à la capacité calorifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état. La variation de la quantité d'énergie Q stockée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT \quad (I.1)$$

Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_p est la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

I.2.1.2. Stockage thermique par chaleur Latente

Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente, propriété intrinsèque du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP, PCM pour change phase

matérielle). De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. La Figure I.2 représente une classification des MCP [15, 16].

Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial. La Figure I.3 illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage.

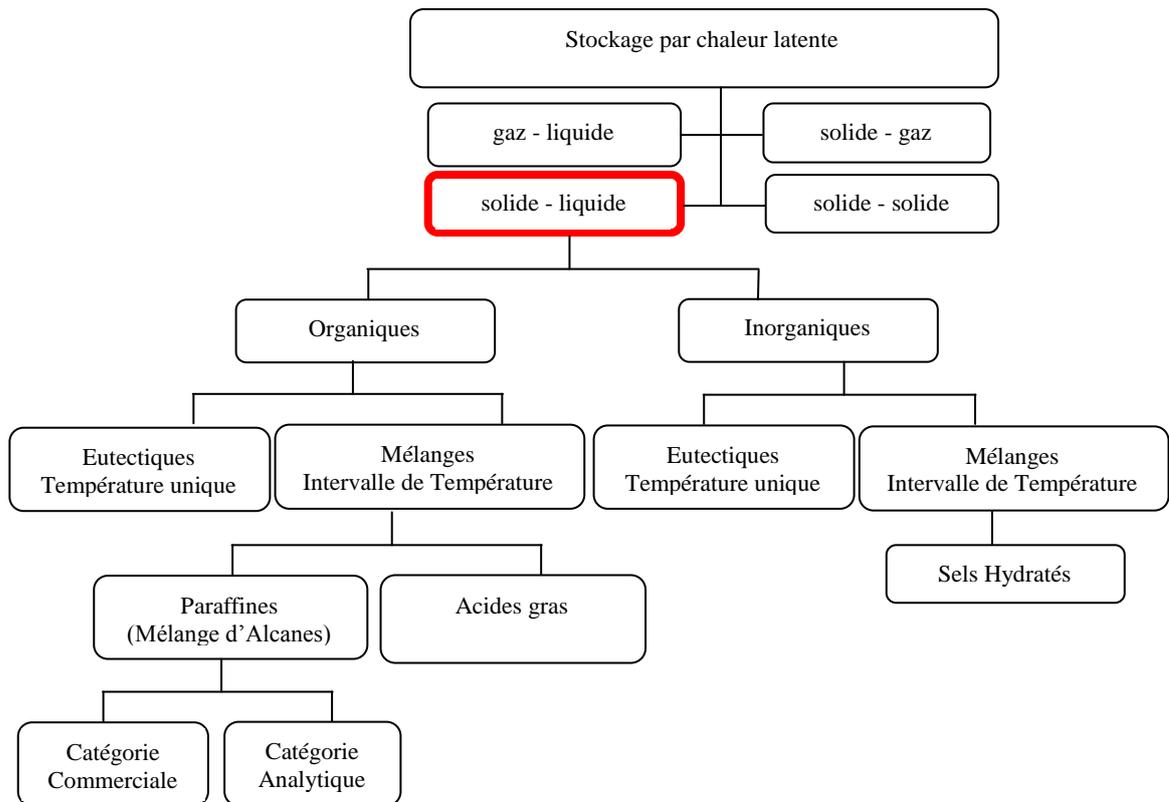


Figure I.2. Classification des matériaux à changement de phase

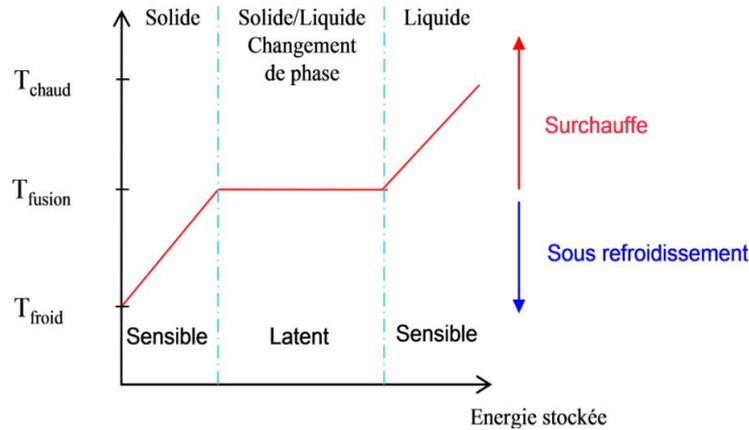


Figure I.3. Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide).

La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation (I.2). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$Q = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m \cdot C_{p,l} \cdot dT \quad (I.2)$$

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), $C_{p,s}$ et $C_{p,l}$ sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), ΔL est l'enthalpie infinitésimale de changement de phase ($J \cdot kg^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

L'utilisation du stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isothermes, en charge et en décharge. En revanche, les technologies à utiliser pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes. Des problèmes subsistent encore, dont notamment, la durée de vie des produits qui se dégradent après plusieurs cycles de fusion-solidification et les transferts thermiques qui sont difficiles à optimiser [17].

La technologie de stockage par chaleur latente n'est pas encore développée industriellement. La majorité des études menées ont été faites à l'échelle du laboratoire ou du prototype. Seuls deux projets, le projet DISTOR (2004/2007) et le projet ITES (2010), ont mis en œuvre des prototypes de grande taille. Un prototype dimensionné pour 100 kWth ayant une capacité de stockage effective de 58 kWth avec 2100 kg de mélange de 54% KNO_3 / 46% $NaNO_3$, a été testé dans la centrale solaire d'Almería en Espagne (centrale à capteurs cylindro-paraboliques, projet DISTOR). Un prototype de stockage couplé, sensible/latent/sensible d'une capacité de 1 MWhth a été implanté dans la centrale d'Endesa en Espagne en 2009. Le module de stockage par chaleur latente contient 14 tonnes de $NaNO_3$

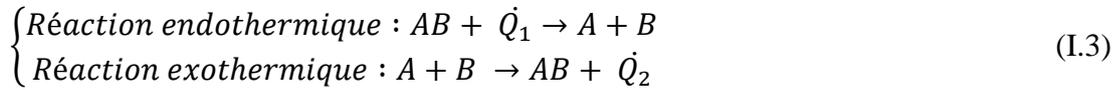
[18-20] résumé des principales technologies ainsi que les matériaux appropriés à ces dernières est présenté dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Technologies et matériaux de stockage par chaleur latente

Technologies	Description	Matériaux utilisés
Stockage de glace	<p>- Utilisé dans les systèmes de chauffage, ventilation, et air conditionné, le stockage journalier de glace a pour objectif de lisser le pic de consommation durant les chaudes journées d'été. Dans les pays à climat froid, les températures hivernales permettent de stocker la glace de manière saisonnière. Une source de froid naturelle peut être utilisée pour produire de la glace [15] cette glace peut être créée par circulation d'air froid ou accumulation de neige.</p>	<p>Eau (H₂O): Température de fusion : 0 °C ΔH_{fusion} (kJ/kg) : 333 Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹) : 0.612 liq, 20°C Densité (kg.m⁻³) : 998 liq, 20°C 917 sol, 0°C</p>
Application des MCP dans le bâtiment	<p>- L'intégration de MCP dans la construction des bâtiments (parois, toiture, plancher, vitrage...) permet d'augmenter leur inertie thermique [21, 22]. Les MCP sont généralement micro encapsulés dans des polymères, formant des billes de 2 à 20 µm. Ces microcapsules sont dispersées dans un liquide ; l'ensemble forme un fluide (<i>slurry</i>), qui présente l'avantage de pouvoir être directement pompé et utilisé comme fluide caloporteur. Le principe est de disperser de manière homogène des microcapsules de PCM dans des plaques de plâtre, de gypse, de béton, reposant sur un mode de stockage journalier de la chaleur. - Dans les chauffe-eau solaires, l'incorporation de capsules de différents MCP permet de créer et de maintenir des couches d'eau stratifiées ; la température d'une couche correspond à la température de fusion des différents matériaux utilisés. Dès lors, la capacité de stockage est augmentée tout en réduisant le volume du ballon d'eau chaude [16, 17, 23].</p>	<p>Paraffine C21-C50: Température de fusion : 66-68 °C ΔH_{fusion} (kJ/kg) : 189 Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹) : 0.21 sol Densité (kg.m⁻³) : 0.830 liq, 70°C 0.930 sol, 20°C</p>
Le stockage saisonnier	<p>- Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou quantité de chaleur que l'on souhaite stocker. Si les MCP organiques présentent une bonne tenue au cyclage thermique et une absence de corrosivité, leur densité volumique de stockage faible constitue a priori un sévère handicap à leur mise en œuvre dans le stockage saisonnier. Citons tout de même pour exemple le système mis au point et expérimenté en Turquie [24] utilisant une cire de paraffine et un échangeur de chaleur en polyéthylène (puissance solaire fournie : 1.22-2.63 kW, puissance transférée au système 0.65- 2.1 kW).</p>	<p>Paraffine C21-C50: Sel hydraté : CaCl_{2,6}H₂O: Température de fusion : 29 °C ΔH_{fusion} (kJ/kg) : 190.8 Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹) : 0.540 liq, 38.7°C 1.088 sol, 23°C Densité (kg.m⁻³) : 1562 liq, 32°C 1802 sol, 24°C</p>

I.2.1.3. Stockage thermochimique

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique. Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations (I.3) [18]:



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la figure I.4.

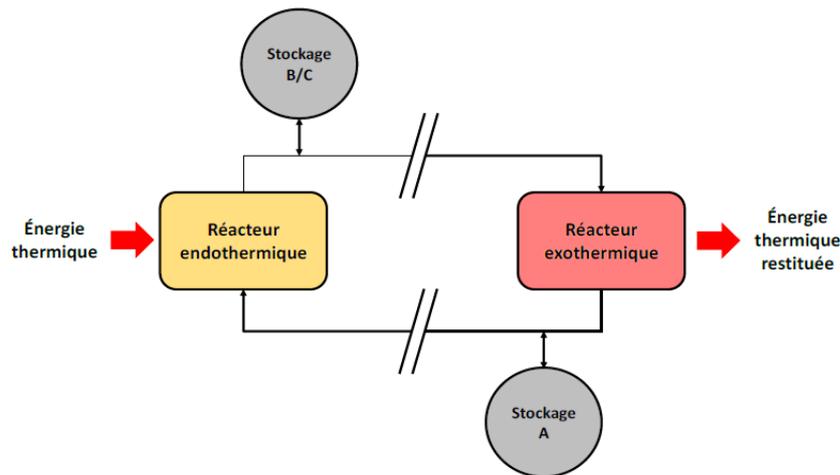


Figure I.4. Schéma de principe du stockage thermochimique.

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue d'une source de chaleur, notamment du champ solaire, permet de mettre en oeuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A et B) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A et B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur emmagasinée et régénérer le produit initial (AB).

La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique (I.3) est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation (I.4) :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{p_i} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (\text{I.4})$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J), n_A est le nombre de moles du produit A (mol), ΔH_r est l'enthalpie de la réaction ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ A}$).

En général, le stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse

température ($T \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200$ à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées. La classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique est présentée dans la figure I.5 [25].

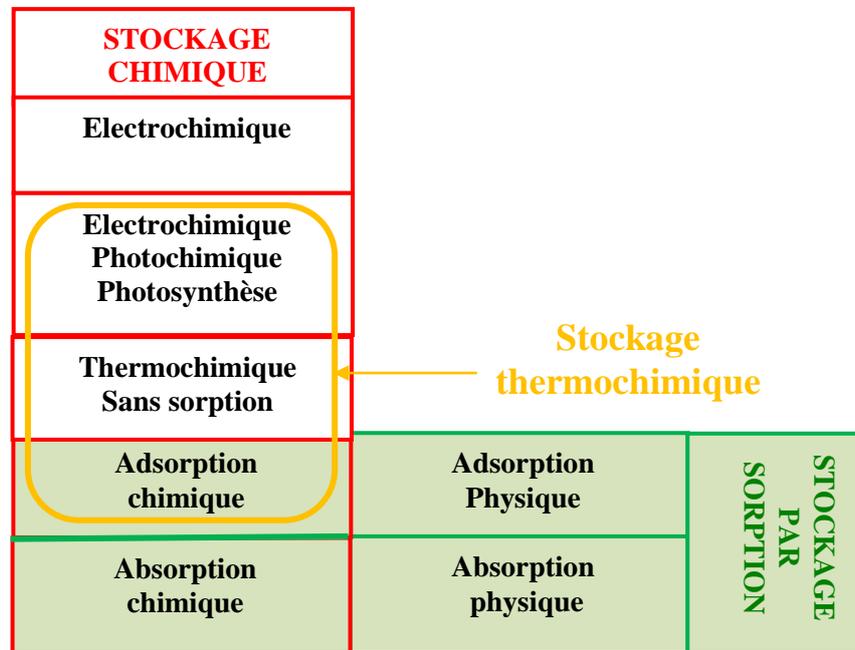


Figure I.5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique.

Pour le stockage thermochimique, des couples d'éléments chimiques sont mis en œuvre. Parmi les réactions les plus utilisées, nous citons :

- ✓ La décomposition réversible de l'hydroxyde de Calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches [18, 26, 27]. Le principe de base de cette réaction est illustré dans la figure I.6. Cette réaction se fait à une température relativement haute ($510 \text{ }^\circ\text{C}$).

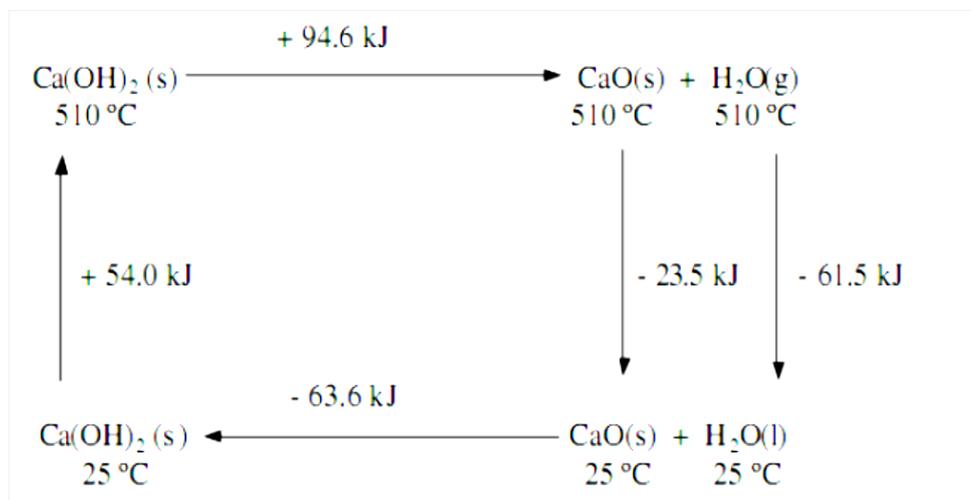
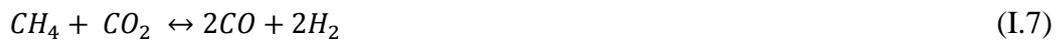


Figure I.6. Principe de base de la réaction de décomposition/formation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

- ✓ la dissociation de l'ammoniaque a attiré l'attention des chercheurs depuis plus de vingt ans [28-30] en raison de deux avantages majeurs qui sont la faisabilité à température ambiante et la basse toxicité de l'ammoniaque en comparaison avec d'autres produits chimiques. L'inconvénient majeur de cette réaction est son enthalpie de réaction (66,5 kJ/mol) considérée comme faible par rapport aux autres réactions telles que le reformage du méthane par le dioxyde de carbone (247 kJ/mol).



- ✓ Le reformage du méthane par le dioxyde de carbone



Comparé aux autres types de stockage, le stockage thermochimique ne nécessite pas l'isolation du système, permet d'obtenir une grande densité de stockage, et la restitution de l'énergie est réalisée à haute température. En revanche, cette technologie est complexe, coûteuse, et toujours en cours de développement.

I.2.2. Comparaison des différents types de stockage d'énergie thermique

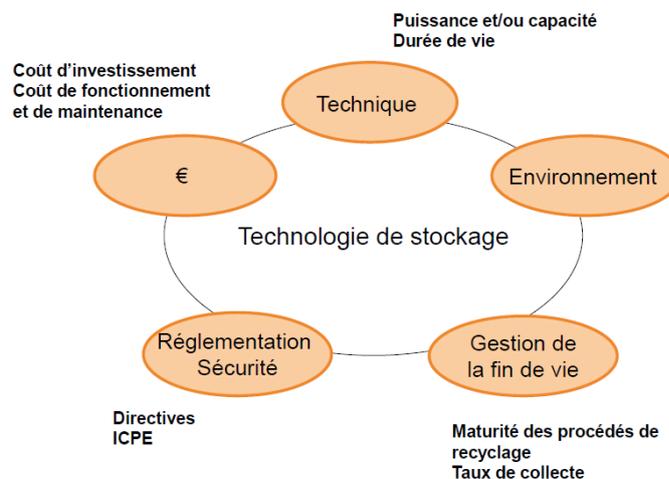
Le Tableau I.2 répertorie les caractéristiques des trois types de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système. Actuellement le stockage de chaleur par voie sensible est le procédé de stockage thermique le plus mature.

Tableau I.2 : *Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur*

		Stockage sensible	Stockage latent	Stockage thermochimique
Densité énergétique	Volumique	Faible ~15 - 60 kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~100 - 500 kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02- 0,03 kWh.kg ⁻¹	Moyenne ~ 0,05-0,1 kWh.kg ⁻¹	Haute ~0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou température ambiante
Durée de stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement Illimitée [31]
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.2.3. Critères de choix et de conception de systèmes de stockage

Si la capacité thermique, qui est la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé dans la conception d'un système de stockage, le choix de la technologie de stockage est crucial. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier de charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement... (cf. figure I.7).

**Figure I.7.** *Critères de choix d'une technologie de stockage.*

Lors de l'étude du besoin, se pose également la question de la durée de stockage :

- ✓ de quelques heures à une journée, pour la gestion des sources intermittentes productrices de la chaleur en journée et restituée le soir ;
- ✓ de plusieurs mois, stockage saisonnier du surplus de la chaleur produit en été et restituée en hiver.

Parmi les trois principes de stockage thermique (sensible, latent ou thermo chimique) le choix porte donc sur des critères :

- ✓ thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductibilité thermique...);
- ✓ physiques et chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...).

Parmi les critères de choix, la prise en compte de l'impact environnemental est également importante, notamment sur la nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage qui peuvent être polluants et difficilement retraités [32].

La maturité de la technologie de stockage peut également faire partie des critères de sélection. La technologie du chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature et ne nécessite donc plus d'effort, contrairement au stockage associé aux centrales thermodynamiques ou encore au stockage par réaction chimique qui, pour l'instant, n'existe qu'au stade de démonstrateur.

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage. Le volume du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés [33].

Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage.

I.3. Etat de l'art du stockage sensible solide

I.3.1. Le stockage sensible parmi les modes de stockage

La production d'énergie sous forme de chaleur est principalement associée au solaire thermique mais aussi aux sites industriels qui, dans leur activité, produisent du chaud ou du froid. Les températures atteintes peuvent être très variables d'une technologie à une autre : une centrale thermodynamique peut porter la vapeur d'eau à plus de 500°C, tandis qu'un panneau solaire installé sur le toit d'une maison porte la température de l'eau à une valeur voisine de 80°C.

Le stockage par chaleur sensible peut couvrir une plage de température assez étendue en comparaison avec les autres types de stockage (*cf. figure I.8*). Grâce à sa maturité, la technique de stockage par chaleur sensible est bien implantée dans l'industrie du solaire thermique. Ce type de stockage est utilisé industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques. On peut notamment citer : Andasol 1 & 2 (2008), Extrasol 1 & 2 (2010), Alvarado I (2009), Archimede (2010) et une vingtaine d'autres centrales qui utilisent deux réservoirs de stockage en sels fondus. Solar One (mise en fonctionnement en 1982 et arrêtée en 1985) et IEA-SSPS (en fonctionnement) utilisent respectivement un réservoir thermocline huiles/roches et un réservoir thermocline huile pure ou huile/acier. Récemment, dans la centrale solaire de GEMASOLAR (Tour solaire/Héliostats) possédant un système de stockage actif à deux réservoirs, une génération d'électricité en continu d'environ 20 MWe a été mise en œuvre durant 48 h (6-7 Juin 2011). Cette première prouve la faisabilité d'une production d'électricité en continu dans une centrale solaire thermodynamique munie d'un stockage par chaleur sensible et souligne la robustesse du procédé développé [34].

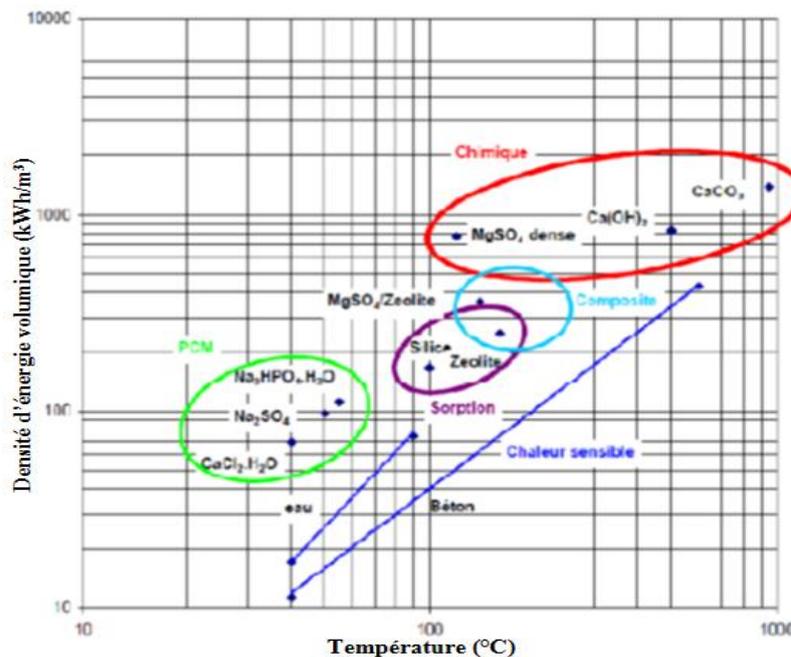


Figure I.8. Stockage sensible parmi les autres types de stockage.

En se basant sur le type du matériau de stockage, on peut classer le stockage par chaleur sensible en deux catégories : stockage par un liquide (eau, huile, sel fondus,...) et stockage par un solide (pierre, sable, métaux,...) [35]. Chacun de ces deux types de stockage a ses propres caractéristiques et ses applications propres. Le tableau I.3 présente les solutions

techniques développées à l'échelle industrielle et mises en œuvre dans les systèmes de stockage par chaleur sensible.

Tableau I.3 : Solution de stockage par chaleur sensible existantes

Techniques	Principes	Equipements
Stockage passif dans un milieu solide	L'énergie thermique est transmise/récupérée par un fluide caloporteur à un milieu solide. Un réservoir « chaud » permet de stocker le fluide en sortie du champ solaire, qui alimentera le générateur de vapeur en période non-ensoleillée. En sortie du générateur de vapeur, le fluide, refroidi, est dirigé vers un réservoir de stockage avant de retourner à nouveau vers le champ solaire.	Plateforme solaire d'Almeria/DLR
Stockage actif à deux réservoirs	Dans ce type de stockage, un seul réservoir et un seul fluide sont utilisés. Le fluide chaud et froid sont présents dans le même réservoir, avec un gradient thermique entre les deux. Ce gradient est nommé « thermocline ». Le fluide utilisé dans le réservoir est le fluide caloporteur.	SEGS I, SEGS II, Solar two, Solar tres, Andasol, Gemasolar,...
Thermocline	La vapeur surchauffée est stockée dans un réservoir d'eau sous pression dans lequel elle se condense. En phase de décharge, la vapeur est produite par la détente de l'eau saturée.	Solar one, PSA...
Stockage de vapeur		PS10

I.3.2. Le stockage liquide

Les liquides utilisés dans le stockage thermique sont abondants et économiquement compétitifs. Cependant, l'eau reste le liquide le plus utilisé pour des applications à basse température (25 – 90 °C). Pour une variation de température de 60 °C, l'eau stocke 250 kJ/kg, par conséquent, elle est largement utilisée dans les applications solaires destinées au chauffage des bâtiments et à l'eau chaude sanitaire [36]. Par contre son utilisation dans des applications à haute température est conditionnée par sa grande pression de vapeur qui présente un inconvénient majeur. A cet effet, l'utilisation de grands réservoirs de stockage est recommandée.

D'autres liquides sont utilisés pour le stockage sensible, les plus usuels sont : les sels fondus et les huiles organiques [37]. Toujours conditionné par des problèmes de sécurité et de stabilité, l'utilisation de ces liquides nécessite des installations très sophistiquées du point de vue du contrôle [38]. Les tableaux I.4 et I.5 résument les principaux liquides ainsi que les différentes techniques utilisées pour le stockage sensible [39, 40].

Tableau I.4 : Principales caractéristiques des matériaux utilisés dans le stockage liquide

Milieu de stockage	Température (K)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m K)	Capacité calorifique (kJ/kg K)	Coût par kg (US\$/kg)	Coût par kWh (US\$/kWh)
Sel solaire HITEC	120-133	1990	0.6	-	-	-
Huile minérale	200-300	770	0.12	2.6	0.3	4.2
Huile synthétique	250-350	900	0.11	2.3	3	42
Huile de Silicone	300-400	900	0.1	2.1	5	80
Sels de Nitrite	250-450	1825	0.57	1.5	1	12
Sels de Nitrate	265-565	1870	0.52	1.6	0.5	3.7
Sels de Carbonate	450-850	2100	2	1.8	2.4	11
Sodium liquide	270-530	850	71	1.3	2	21

Tableau I.5 : Techniques de stockage liquide

Techniques de stockage	Thermocline	Bassin solaire	Eau + Gravier	Aquifère
Milieu de stockage	eau	Eau salée	Gravier-eau	Eau souterraine
Température	25-90	50-95	-	10-40
Capacité calorifique (kW h/ m ³)	60-80	-	30-50	30-40
Volume équivalent à 1m ³ d'eau	1	-	1.3-2	2-3

I.3.3. Le stockage solide

Contrairement au stockage liquide, le stockage dans les milieux solides peut être utilisé à la fois pour des applications à haute et à basse température, sans se soucier du problème de la pression de vapeur dans le cas de l'eau et des limitations que présentent d'autres liquides de stockage (corrosion, stabilité, sécurité...). Une grande variété de matériaux solides est utilisée. La fonte est le matériau le plus performant relativement à sa densité de stockage qui dépasse celle de l'eau [41]. Cependant ce dernier matériau reste très coûteux, en comparaison avec d'autres matériaux (béton, brique, pierre, sable...), et sa période de retour sur investissement est très importante. Pour des applications solaires, le béton et la pierre sont les matériaux les plus exploités et les plus adaptés pour des applications dans le domaine du bâtiment [42]. Par exemple, pour une variation de température de 50 °C, le béton et la pierre stockent environ 36 kJ/kg. En général, le stockage sensible par un solide nécessite un plus grand volume que le stockage par un liquide. La figure I.9 illustre un exemple de comparaison de volume nécessaire au stockage pour la même quantité d'énergie stockée ($143,4 \cdot 10^8 \text{ J}$).

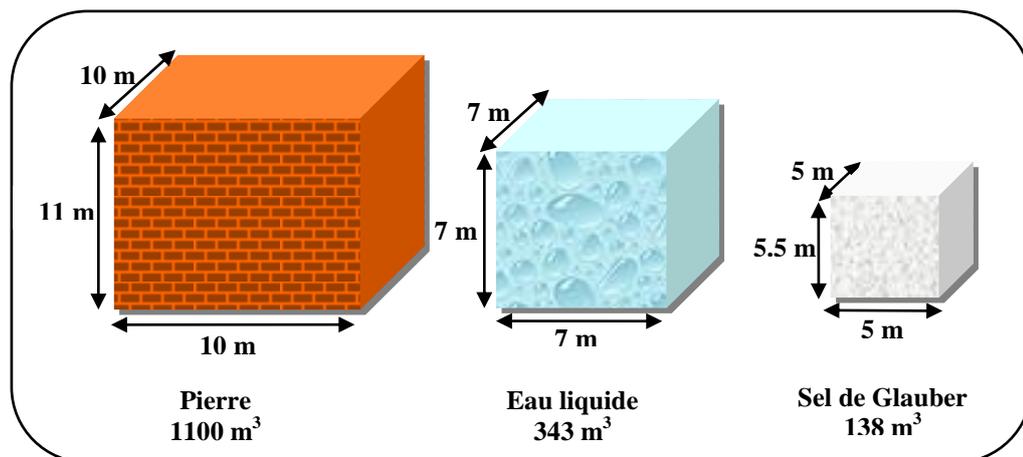


Figure I.9. Volume nécessaire pour la même énergie stockée.

I.4. Procédés de stockage sensible solide

I.4.1. Le Lit fixe entassé (packed bed)

La technique des lits entassés consiste en un amas de matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut circuler. Ce dernier traverse le lit de haut en bas assurant ainsi le transfert de chaleur au matériau pendant la période de chargement¹. Durant la période de décharge, le sens de l'écoulement du fluide caloporteur est inversé. En général cette

¹ Période durant laquelle la température du matériau augmente

technique est utilisée avec un capteur solaire à air (cf. *figure I.10*). Dans certaines configurations des conduites sont utilisées pour assurer le transport du fluide caloporteur.

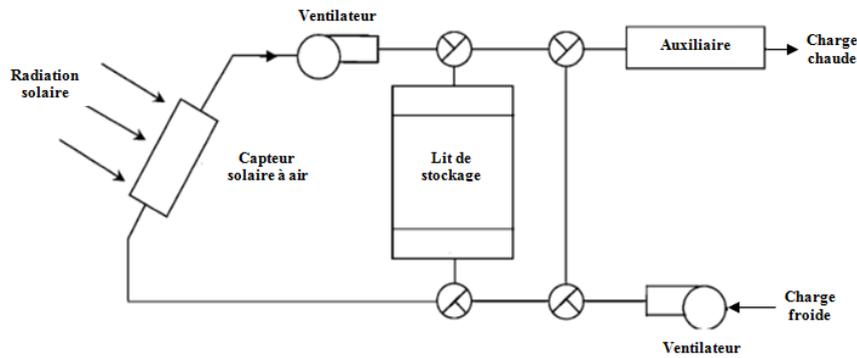


Figure I.10. Schéma d'un système de stockage à lit entassé.

Les matériaux utilisés dans ce type de stockage sont généralement des matériaux granulaires tels que : les pierres, les roches, les sables...etc. Quelques métaux sont utilisés dans le cas où une importante conductivité thermique est exigée en faveur du coût [37]. Les principaux milieux solides utilisés dans le stockage sensible sont résumés dans le tableau I.6 [12].

Tableau I.6 : *Les propriétés de quelques matériaux solide utilisés pour le stockage dans les lits fixes*

Milieu de stockage	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Capacité calorifique $\rho c \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	Conductivité thermique (W/m K)	Diffusivité thermique $a = k / \rho c \times 10^{-6}$ (m ² /s)
Aluminium	2707	896	2.4255	204 (à 20 °C)	84.100
Oxyde d'Aluminium	3900	840	3.2760	-	-
Sulfate d'Aluminium	2710	750	2.0325	-	-
Brique	1698	840	1.4263	0.69 (à 19 °C)	0.484
Brique de magnésie	3000	1130	3.3900	5.07	1.9416
Béton	2240	1130	2.5310	0.9 - 1.3	0.356 – 0.514
fonte	7900	837	3.6123	29.3	4.431
Fer pure	7897	452	3.5694	73 (à 20 °C)	20.450
Chlorure de Calcium	2510	670	1.6817	-	-
Cuivre	8954	383	3.4294	385 à 20 °C	112.300
Terre humide	1700	2093	3.5581	2.51	0.705
Terre sèche	1260	795	1.0017	0.25	0.250
Chlorure de Potassium	1980	670	1.3266	-	-
Sulfate de Potassium	2660	920	2.4472	-	-
Carbonate de Sodium	2510	1090	2.7359	-	-
Pierre, Granit	2640	820	2.1648	1.73 -3.89	0.799 – 1.840
Pierre, calcaire	2500	900	2.2500	1.26 – 1.33	0.560 – 0.591
Pierre, Marbre	2600	800	2.0800	2.07 – 2.94	0.995 – 1.413
Pierre, grès	2200	710	1.5620	1.83	1.172

I.4.2. Aspects scientifiques et techniques des lits fixes entassés

La technologie des lits fixes entassés a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, qui ont participé au développement de cette technique pour atteindre la maturité qu'il la caractérise actuellement, que ce soit sur le plan analytique ou expérimentale.

Dans les études portées sur le stockage thermique dans un lit fixe, on trouvera comment les dimensionner, les modéliser, les contrôler ou encore les optimiser.

Sur le plan analytique, le travail original mené par Shumann [43] sur l'écoulement d'un liquide à température uniforme à travers un prisme poreux, a été la base des travaux postérieurs. Ce travail, a permis l'élaboration d'un modèle monodimensionnel à deux phases (phase fluide et phase solide) pour un lit fixe. Shumann a résolu les équations gouvernantes du modèle par la méthode des séries infinies et les fonctions de Bessel.

De nombreux travaux ont été effectués après celui de Shumann pour améliorer à la fois le modèle et proposer des méthodes de résolution plus performantes. Ces travaux ont fourni des tables, des graphes et des monogrammes, qui facilitent le calcul à la main [44-46], ainsi que des solutions numériques basées sur la méthode des différences finies, en utilisant l'outil informatique [47-50]. Dans le même contexte, Sowell et al. [51] ont présenté un modèle précis fondé sur la théorie de convolution pour déterminer la distribution de la température dans le lit, et cela pour remplacer la méthode des différences finies jugée gourmande en temps de calcul.

Saez et Mcay [52] ont présenté un modèle mathématique pour simuler la réponse dynamique d'une colonne entassée. Ils ont pris en compte les propriétés négligées dans d'autres études, telles que, la dispersion thermique axiale et la conduction inter-particules, qui a un effet important dans les applications de l'énergie solaire. Ils ont trouvé que, dans le cas où le nombre de Biot (Bi) est suffisamment grand, l'effet de la conduction inter-particules ne doit pas être négligé. En revanche, cet effet est négligeable si $Bi \ll 1$; en outre, la température du fluide et celle du solide seront identiques dans toute section du lit.

Les études menées pour comprendre les modes de transfert de chaleur dans un lit fixe, se résument comme suit : transfert convectif entre les parois du lit et le fluide, transfert convectif entre les particules solides et le fluide, transfert conductif entre les parois et les particules solides constituant le lit fixe, transfert conductif entre les particules du lit et enfin le transfert radiatif [53]. Ces différents modes peuvent coexister comme il peut y avoir un ou plusieurs modes dominants.

Pour identifier les principaux paramètres de contrôle du système de stockage thermique à lit fixe (thermocline de sodium et de fonte), Pomeroy [54] a investigué des cas spécifiques, tels que : le transfert de chaleur idéal, l'effet de la résistance convectif, la conduction axiale et la température uniforme.

Les matériaux de stockage solide utilisés dans la technique des lits fixe ont été étudiés par de nombreux auteurs [55-57]. Des études extensives ont exploité la capacité abondante des roches et de la terre, tandis que d'autres ont été intéressés par les métaux. Aly et Echarkawi [58] ont étudié l'effet des propriétés des matériaux de stockage sur le comportement thermique du lit fixe pendant le processus de chargement. En testant trois matériaux de stockage, les résultats (*cf. figure I.11, figure I.12*) obtenus ont montré que le choix du matériau est crucial dans la conception d'un système de stockage. Cependant le sable nécessite une grande surface d'échange à cause de sa propriété d'isolation. Des recherches récentes ont mis en valeur l'utilisation du sable pour le stockage thermique montrant l'intérêt de son utilisation dans des applications liées au solaire thermique [59-61].

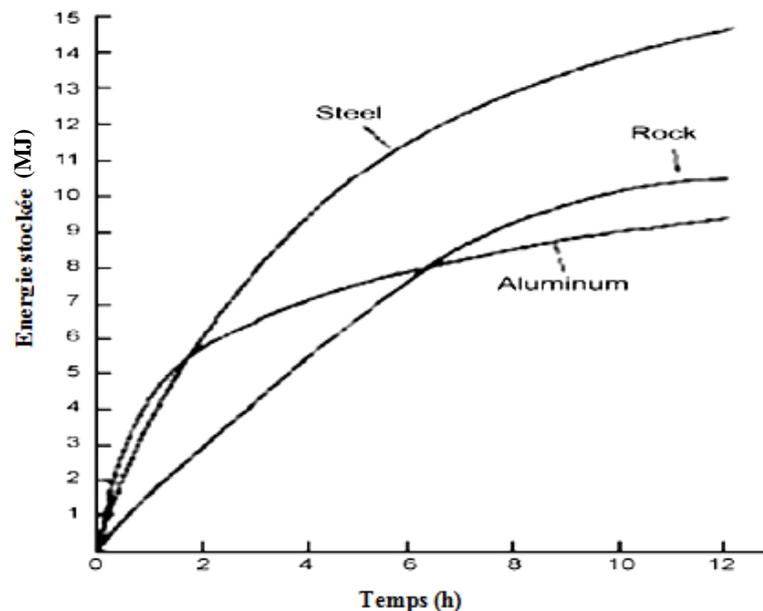


Figure I.11. Variation de l'énergie stockée en fonction du temps pour différents matériaux de stockage.

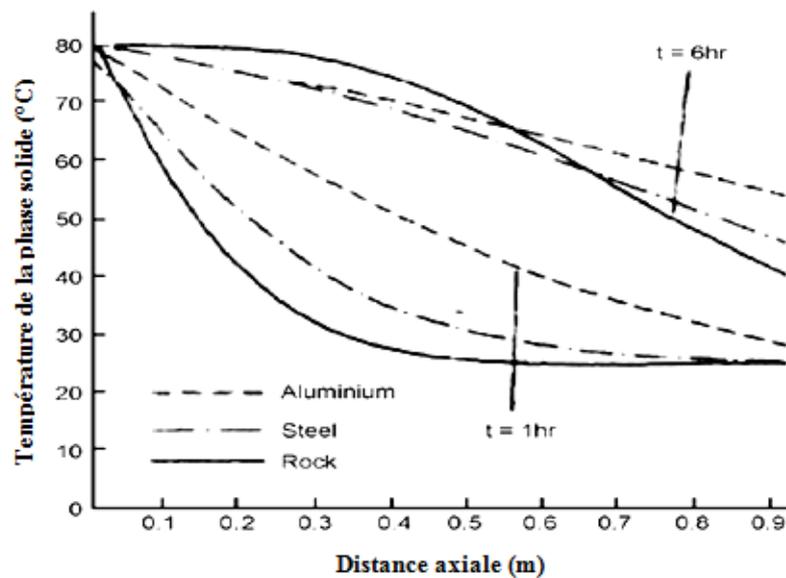


Figure I.12. Distribution spatiale de la température dans un lit fixe pour différents matériaux de stockage, à différents temps de chargement

Hasnain [12, 62] a montré à travers une étude de dimensionnement d'un lit de pierres couplé à un capteur solaire destiné à une application de chauffage résidentielle, que le dimensionnement dépend de plusieurs paramètres liés, au matériau de stockage, au fluide caloporteur, ainsi qu'au capteur solaire. Parmi ces paramètres : la taille et la forme des particules solides, la densité, les propriétés thermiques, la densité d'entassement, le débit du fluide caloporteur, le rendement du capteur solaire, le coefficient des pertes thermiques et les propriétés optiques du capteur. Dans cette étude une masse de pierre utilisée, est de 300-500 kg par 1 m² de capteur solaire, avec des diamètres allant de 1 cm à 5 cm.

En général, le stockage utilisant les pierres est recommandé dans les applications liées au secteur de bâtiment, vu leur coût relativement bas. De ce fait, et pour des raisons de cycle de vie et d'économie, les lits fixes entassés peuvent être considérés comme une solution de stockage de premier choix pour les bâtiments à haute performance énergétique. Une stratification thermique semblable à celle du stockage dans l'eau apparaît dans le stockage dans les lits fixes. Le bon transfert de chaleur entre le fluide caloporteur (air) et le solide vient en faveur de la stratification thermique dans le lit. En revanche, un mauvais échange de chaleur par conduction entre les particules du milieu solide, permet de maintenir la stratification pendant de longues périodes [18]. Dans ce cadre, Crandall et Thacher [63] ont effectué une simulation numérique pour étudier la stratification dans un lit fixe de roche destiné au stockage de l'énergie solaire. Ils ont montré l'avantage de la stratification dans le

stockage solide, comme ils ont proposé un arrangement du raccordement entre le capteur solaire et le réservoir de stockage pour préserver la stratification ; qui diminue avec le taux de l'ensoleillement pendant la journée et la température à la sortie du capteur solaire (*cf. figure I.13*).

Des études d'optimisation ont été menées afin de déterminer les paramètres optimales pour la conception d'un lit fixe, tels que : la vitesse d'air, les dimensions du réservoir de stockage, ainsi que celles des particules solides, et cela pour un rendement économique maximal [64, 65]

Les lits fixes sont aussi utilisés dans des applications de séchage des produits agricoles, dans ce contexte, de nombreux travaux de caractérisation et d'optimisation ont été réalisés, prouvant ainsi l'intérêt de cette technique [64, 66-73].

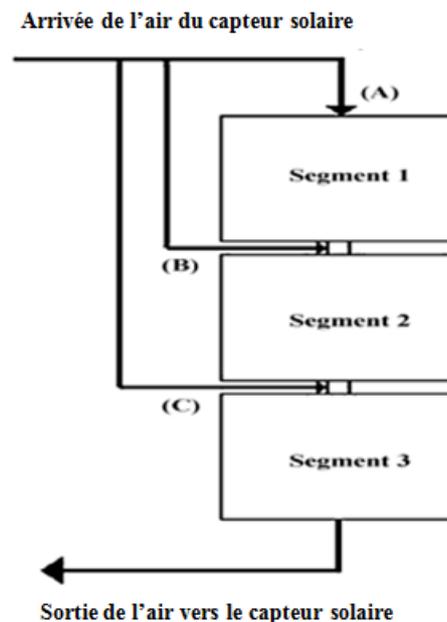


Figure I.13. Arrangement de la segmentation d'un lit fixe selon la stratification.

Sur le plan expérimental de nombreux travaux ont été réalisés. Les premières investigations expérimentales sur les lits fixes ont pour finalité l'étude du comportement thermique de différents matériaux notamment des matériaux granulaires [74-76]. Les résultats obtenus ont permis de déterminer la distribution de la température dans le lit de stockage ainsi que l'effet de la taille des particules solide sur le transfert thermique. Sur le même axe, les travaux se sont succédés afin de définir les paramètres de contrôle des systèmes de stockage à lit fixe [77-80]. La taille des particules solide aussi que la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur représentent des paramètres clés dans le dimensionnement des systèmes de stockage. En

utilisant des particules de faibles diamètres, on atteint une performance optimale et un large degré de stratification [81]. Pour des applications solaires, des recherches ont été réalisées pour déterminer les paramètres de dimensionnement ainsi que les performances énergétiques des systèmes de stockage, en testant de différents matériaux [82,83]. A l'issue de ces recherches une base de données est mise en place, afin de permettre aux concepteurs de systèmes de choisir le matériau de stockage qui convient à leurs besoins [84].

La majorité des travaux réalisés sur les lits fixes ont abordé l'aspect des performances thermiques des matériaux de stockage, en revanche l'aspect de la stabilité, qui est un aspect important dans les applications à hautes températures, a été peu traité dans la littérature. Des matériaux peuvent montrer de bonnes performances thermiques, mais ils se dégradent en subissant plusieurs cycles charge/décharge (composite de sel/céramique). Cependant d'autres milieux de stockage offrent un choix idéal, étant à la fois performant et stable (sable, matériaux à base de Zirconium) [85].

I.4.3. Le Lit fluidisé

La fluidisation est un procédé qui consiste à mettre en suspension des particules solides (lit) sous l'action d'un courant fluide ascendant (*cf. figure I.14*). Cet état résulte de la compensation du poids des particules par l'action du fluide sur celles-ci. L'écoulement diphasique ainsi créé, présente une instabilité naturelle qui donne lieu à une dynamique complexe. Cette technique favorise d'avantage le transfert de chaleur entre les particules solides et le fluide, ce qui bénéficie pour les applications de stockage thermique, notamment les applications solaires (*cf. figure I.15*).

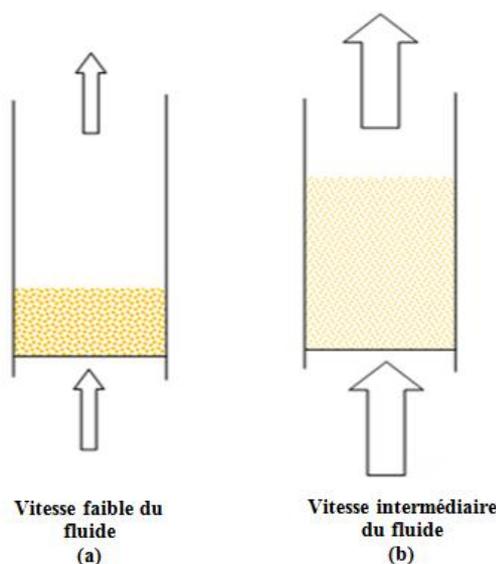


Figure I.14. Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.

L'aspect scientifique et technique des lits fluidisés sera présenté dans la section (§I.4.4, page 37). En revanche les considérations fondamentales de cette technique fera l'objet d'un état de l'art détaillé (§IV.2, page 76).

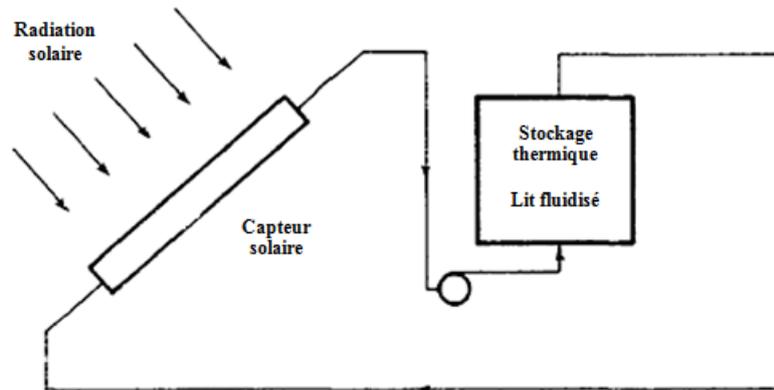


Figure I.15. Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.

I.4.4. Aspects scientifiques et techniques des lits fluidisés

La technologie des lits fluidisés est largement utilisée dans les différents secteurs industriels tels que : l'industrie, mécanique, chimie hydrocarbure, minière, et celle des énergies renouvelables. Les lits fluidisés gaz-solide présentent un choix attractif pour les applications liées au stockage thermique comparés à d'autres types de réacteurs (liquide-solide), car ils favorisent le transfert de chaleur entre la phase gazeuse et la phase solide en augmentant la surface de contact entre les deux phases [86]. Dans ce contexte de nombreux travaux de recherche ont été réalisés. Ces derniers ont montré que le lit fluidisé présente un comportement similaire à celui d'un réservoir de stockage, avec une température homogène le long du lit [87]. Les investigations numériques et expérimentales menés sur les lits fluidisés ont montré que la thermique de ces dispositifs est fortement influencé par leur hydrodynamique [88]. Cette dernière est assez complexe et nécessite d'éventuelles investigations, notamment le dimensionnement des dispositifs à l'échelle industrielle [89].

Le dimensionnement des lits fluidisés dépend de divers paramètres, tels que, la vitesse du gaz, la taille des particules solides, les dimensions du dispositif, ainsi que les propriétés physiques des deux phases (gaz, solide) [90]. La modélisation du comportement d'un lit fluidisé destiné au stockage thermique a montré qu'on obtient un optimum de performance avec une vitesse de l'air égale à celle au minimum de fluidisation. On outre, il existe un

optimum de la hauteur du lit qui permet de maximiser l'énergie récupérée [91]. Pour le stockage sensible le matériau le plus utilisé pour cette technique, est le sable [92].

La simulation numérique (CFD) est un outil important dans le dimensionnement et l'optimisation des réacteurs à lits fluidisés [93]. Le problème majeur rencontré lors de la modélisation de l'hydrodynamique des lits fluidisés est l'écoulement transitoire de deux phases dont l'interface est difficile à définir, et les interactions entre les différentes variables sont connues juste pour des conditions limitées.

I.5. Conclusion

L'étude ainsi réalisée a permis d'établir un état de l'art général quant au stockage thermique de l'énergie. Celui-ci permettra de remédier au problème d'intermittence limitant l'utilisation des sources d'énergies renouvelables, telle que l'énergie solaire. Outre l'examen des différents matériaux utilisés et procédés existants.

La comparaison des différents types de stockage thermique a permis de montrer les avantages de l'utilisation du stockage sensible solide, notamment la maturité de la technologie, la simplicité, et la stabilité.

La majorité des études réalisées sur le stockage sensible solide ont été répertoriées. Ceci nous a orienté vers la valorisation d'un matériau à la fois écologique et économique, qui est le sable. Ce dernier sera utilisé comme matériau de stockage, dans le cadre de cette thèse. Par ailleurs, les procédés de stockage utilisés pour la mise en œuvre du stockage dans le sable, sont le procédé : du lit fixe et du lit fluidisé.

Afin de pouvoir modéliser le comportement thermique du sable, le chapitre suivant est consacré à l'énergétique des milieux granulaire.

Chapitre II

Energétique des milieux granulaires

II.1. Introduction

Le sable en stase ou en mouvement, cette image de mot fait apparaître des caractères simple et intuitive. Malgré cette apparence, la matière en état granulaire regroupe les aspects les plus complexes des systèmes physiques. La compréhension du comportement des milieux granulaire reste évasive et nécessite encore de l'investigation.

Dans ce chapitre consacré aux milieux granulaire, plusieurs points vont être abordés afin de comprendre l'hydrodynamique et la thermique de ces milieux. Tout d'abord quelques généralités sur les différentes grandeurs caractérisant de tels milieux vont être présentées. Ensuite, une étude de l'hydrodynamique au sein des milieux granulaires avec les différents modèles sera décrite. La seconde partie se focalisera sur le transfert de chaleur dans les milieux granulaires. Cette étude permettra la compréhension du comportement hydrodynamique et thermique de ces milieux, utilisés dans des lits fixe ou lits fluidisés, afin de justifier le choix des différents modèles et paramètres utilisés dans le cadre de cette thèse. Enfin, et puisque l'étude de faisabilité d'un système de stockage débute par le choix du matériau, une partie consacrée à l'utilisation des matériaux granulaires dans le stockage thermique est présentée.

II.2. Définition d'un milieu granulaire

On peut définir ce que c'est un milieu granulaire selon deux points de vue. Un point de vue général et un point de vue physique :

✓ Selon le premier, un milieu granulaire, est une assemblée de grains. Ces grains peuvent être de formes quelconques (*ch. figure II.1*) et constituées de divers matériaux. Les matériaux granulaires sont les seconds matériaux les plus utilisés par les industries après l'eau [94]. Il existe une variété d'exemples de ce que l'on appelle un milieu granulaire au sens plus large du terme, tels que, sable, céréales, cailloux, ainsi que les poussières des nuages stellaires (*ch. figure II.2*). Cependant, cette définition du milieu granulaire reste trop large.

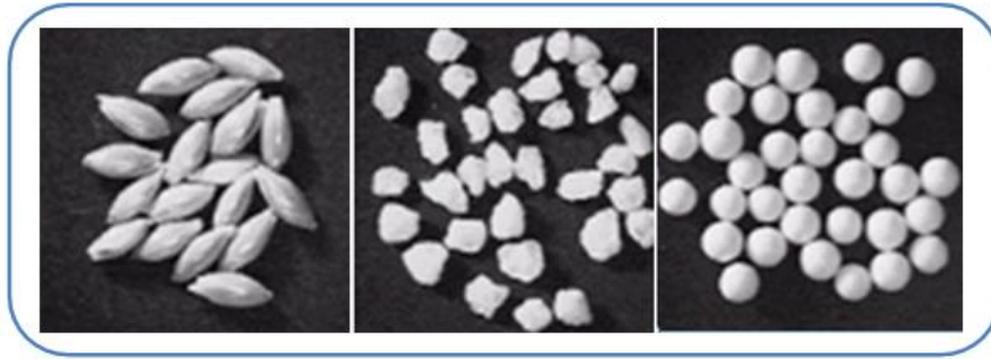


Figure II.1. Schéma de différentes formes de grain.



Figure II.1. Exemple de milieux granulaires, (1) riz, (2) cailloux d'un lit de rivière, (3) sable.

✓ En revanche, du point de vue physique, un milieu granulaire est un milieu constitué d'une collection de particules macroscopiques de taille supérieure à $100 \mu\text{m}$. Pour les petits constituants ($< 100 \mu\text{m}$), l'importance relative d'autres interactions que le contact solide augmente, des effets cohésifs dus aux interactions électrostatiques, aux forces de Van der Waals et capillaires peuvent apparaître. De plus, les propriétés d'une assemblée de grains peuvent fortement varier suivant le milieu dans lequel elle est plongée. Il convient donc, dans toute étude relative à ces milieux, de préciser la nature du fluide interstitiel mais aussi les conditions associées.

Cependant, on peut définir un milieu granulaire comme un milieu poreux particulier dont la phase solide est constituée de granulats. Il sera dit consolidé si, de plus, existent des liaisons entre grains assurées par un liant (ciment, chaux, argile...) [95]. Donc, pour décrire la structure d'un milieu granulaire, il est nécessaire de définir des données sur la matrice solide, tels que, diamètres et forme des grains, nature minéralogique et chimique...

Par ailleurs, l'empilement de ces grains délimite un réseau poreux dont il est important de définir la géométrie généralement complexe (*ch. figure II.3, ch. figure II.4*).

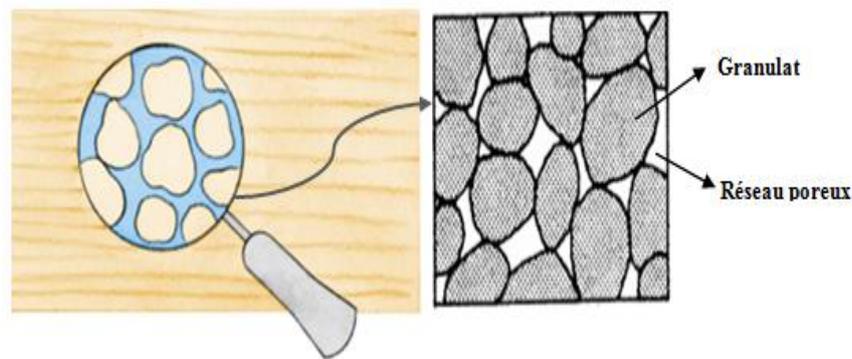


Figure II.3. Schéma simplifié d'un milieu granulaire.

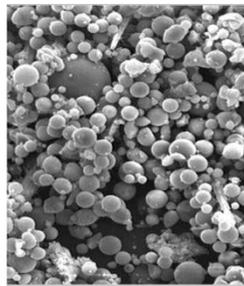


Figure II.4. Milieu granulaire réel (sable).

Il faut bien noter que les milieux granulaires se comportent de différentes façons. On observe un comportement solide dans certaines sollicitations, liquide dans d'autres, mais également le comportement d'un gaz dans d'autres sollicitations [96]. Il est évident que le comportement d'un tas de sable à l'équilibre dans le champ de pesanteur n'est pas le même que celui d'une avalanche de grains le long d'une surface fortement inclinée ou que celui du sable emporté par le vent. Dans le premier cas, le tas de sable peut être vu comme un solide. Par contre dans le deuxième cas, le milieu s'écoule, c'est un comportement qui se rapproche de celui d'un liquide. Enfin, dans une tempête de sable, les grains subissent des collisions puis se déplacent en vol balistique entre deux collisions successives à l'image de ce qui se passe dans un gaz de particules.

II.3. Caractéristiques et propriétés physiques d'un milieu granulaire

II.3.1. Modélisation des milieux hétérogènes

Un milieu granulaire est un milieu hétérogène [97]. Du point de vue de la mécanique des milieux continus, il existe deux approches pour décrire les processus de transport au sein de ces milieux : la description microscopique et la description macroscopique [98].

La description microscopique, largement illustrée par Bird et al. [99], requiert a priori la connaissance des coefficients de transport tels que la diffusivité thermique, la diffusivité massique, afin de résoudre les équations différentielles du transport. De nombreuses méthodes ont été développées pour relier le comportement de transport et les propriétés du système à sa microstructure [100]. Parmi ces méthodes, on citera, la technique d'homogénéisation, la pondération statistique, la pondération d'ensemble, la pondération du volume et l'approche du milieu effectif. Dans cette dernière approche, et pour le calcul d'une grandeur scalaire, le milieu hétérogène peut être représenté par un milieu homogène effectif défini par des propriétés locales uniformes et par une conductance identique entre des particules voisines. Cependant, cette approximation n'est valable que lorsque la variation des propriétés microscopiques du milieu est suffisamment brève et localisée (de faible dimension devant la longueur du lit) pour ne pas perturber les propriétés isotropes du milieu hétérogène étudié [97, 101,102].

La description macroscopique, quant à elle, est une théorie qui décrit les phénomènes microscopiques dans un milieu hétérogène à l'aide d'un tenseur de dispersion effectif, en utilisant la méthode up-scaling [103]. Cette méthode permet d'obtenir les propriétés en macro-échelle du milieu hétérogène [104-107].

De nombreuses études adoptant cette théorie ont été menées et ont toutes montré que la représentation d'un milieu hétérogène par un milieu homogène effectif tient compte de ce que l'on appelle effet de mémoire (memory effect) (Ce dernier est causé par la relaxation interne du processus de transport) [97, 101, 108-111]. De ce fait, l'approximation du milieu hétérogène par un milieu homogène effectif (EMA) n'est applicable que si la durée de processus est assez longue [104, 112].

II.3.2. Caractéristiques globales

II.3.2.1. Le volume élémentaire représentatif (VER)

L'identification de la structure d'un milieu granulaire ou de ses propriétés physiques par un milieu homogène effectif requiert implicitement que ce milieu granulaire soit macroscopiquement homogène. Ceci n'est vrai que dans une certaine gamme d'échelle de longueur, ce qui implique la définition du concept du volume élémentaire représentatif (VER). Il s'agit d'un volume délimité par une sphère de rayon r et de centre P , contenant un ensemble de pores ou de particules, suffisamment petit à l'échelle de l'observation pour que l'on puisse l'associer à un pont, mais en même temps, suffisamment grand par rapport aux

dimensions des pores ou particules pour en contenir un grand nombre et permettre le calcul de moyennes macroscopiques locales représentatives (*ch. figure II.5*) [113].

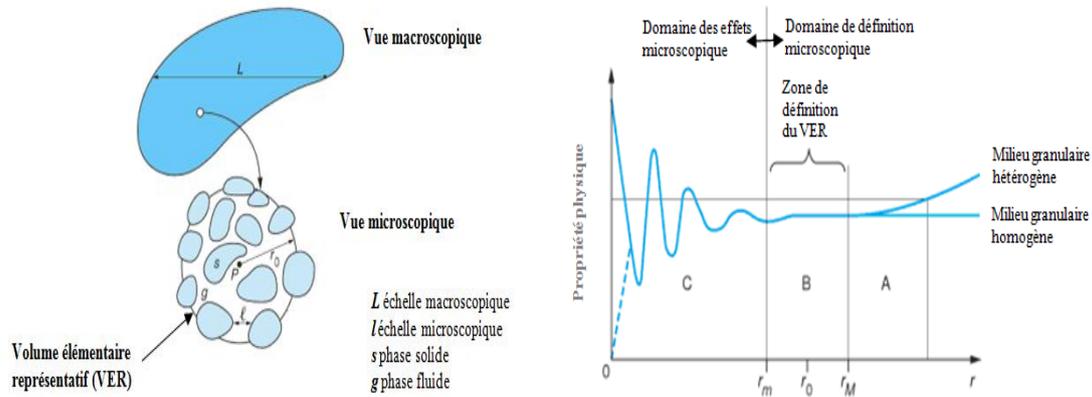


Figure II.5. Notion de volume élémentaire représentatif.

L'introduction de la notion de volume élémentaire représentatif permet l'utilisation du calcul différentiel pour décrire les processus s'y déroulant et donc l'intérêt de pouvoir formuler les changements sous forme d'équations aux dérivées partielles. Cependant la taille du VER reste assez arbitraire, Marsily, et Zhang [114,115] vérifient même expérimentalement que cette taille varie dans l'espace et en fonction de la propriété étudiée.

II.3.2.2. La porosité

Une des principales propriétés structurales d'un milieu poreux est, sans aucun doute, sa porosité : il s'agit du rapport entre le volume de la phase fluide (volume des pores) et le volume total du milieu.

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{solide}}{V_{tot}} \quad (\text{II.1})$$

Où, ε est la porosité du milieu, V_{pores} est le volume des pores, V_{tot} est le volume totale, V_{solide} est le volume de la phase solide du milieu poreux.

II.3.2.3. La distribution de diamètres de grain

Pour caractériser la phase solide granulaire, on considère généralement, la distribution de diamètres de grain, qui est exprimé en pourcentage de grains de diamètre sphérique équivalent

inférieur à d et tracée en fonction du logarithme décimal de ce diamètre [97]. Le diamètre d équivalent est donné par la loi de Stokes [98]:

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_g - \rho_{eau})}{18\mu} = \frac{h}{t} \quad (\text{II.2})$$

Où, v est la vitesse de sédimentation (m/s), g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2), d est le diamètre équivalent (m), ρ_g et ρ_{eau} sont respectivement la masse volumique des grains et de l'eau (kg/m^3), μ est la viscosité dynamique du liquide (Pa.s), h est la profondeur (m), t est le temps (s).

II.3.2.4. La fraction volumique

La fraction volumique Φ est une propriété qui caractérise l'empilement des particules. Elle est définie comme le rapport entre le volume occupé par les grains sur le volume occupé par l'empilement [99]. Elle est connue aussi sous le terme de compacité, donnée par la relation ci après :

$$C = \frac{V_{solide}}{V_{tot}} \quad (\text{II.3})$$

Selon la valeur de la compacité, il existe deux types de l'empilement : empilement de sphères monodisperses et empilement de sphères polydisperses. Dans le premier cas, représente un amas de sphère de même taille, la densité d'empilement est comprise entre deux valeurs critiques, correspondant à l'empilement aléatoire lâche « random loose packing » et l'empilement aléatoire dense « random close packing ». Dans le premier cas, la compacité est de l'ordre de 55% [100], par contre dans le second, elle est de l'ordre de 64% [101,102]. On trouve des empilements dont la densité est supérieure à celle de l'empilement aléatoire dense, c'est le cas des empilements avec organisation cristalline « cubique à face centrée » (cfc), et « hexagonal compacte » (hc), pour lesquelles la compacité est de l'ordre de 74% [103].

Par opposition, l'empilement de sphères polydisperses est un mélange de sphère de tailles différentes. La compacité de ce type d'empilement est toujours supérieure à celle de l'empilement aléatoire lâche [104]. Certains algorithmes permettent de déterminer leur densité maximale de manière numérique [116].

II.3.2.5. L'indice sphéricité

Définit comme le rapport de la surface d'une sphère de même volume que le grain sur la surface effective d'un grain, l'indice de sphéricité est donné par la formule (II.4) [117] :

$$\Psi = \frac{\pi^{1/3} (6V_g)^{2/3}}{A_g} \quad (\text{II.4})$$

Où, V_g est le volume du grain. Une forte sphéricité correspond à un indice proche de 1 (Cas des billes ou des pommes) et un indice proche de 0 indique une faible sphéricité (bâtonnets ou lamelles) (*ch. figure II.6*).

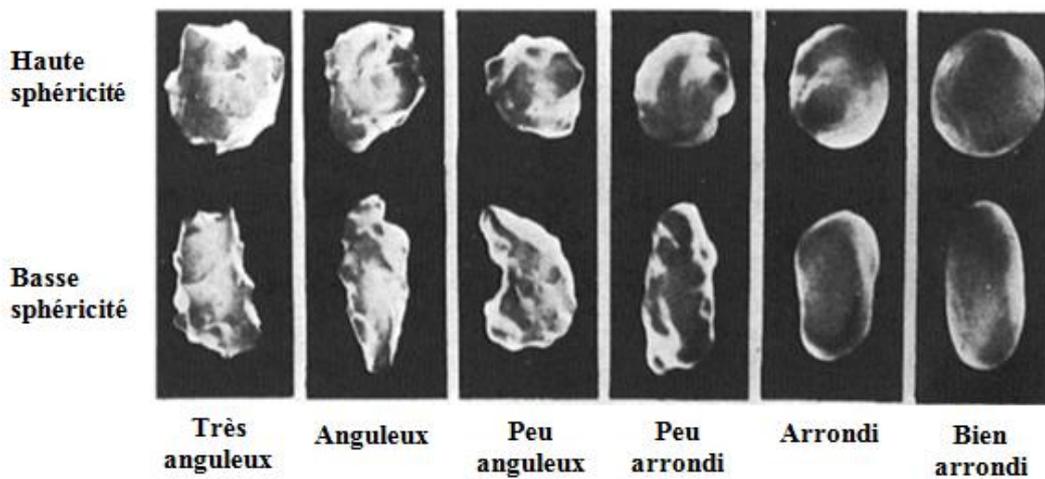


Figure II.6. Evaluation de la sphéricité de grains par la simplification de Powers.

Les propriétés citées ci-dessus présentent les propriétés les plus générales, en revanche, il existe d'autres propriétés du milieu granulaires spécifiques à chaque type d'étude mécanique, thermique et chimique.... Le tableau II.1 présente une synthèse des propriétés des milieux granulaires ainsi que les méthodes de caractérisation adaptées.

Tableau II.1 : Synthèse des propriétés des milieux granulaire avec les méthodes de caractérisation

	Propriété	Définition	Méthode	Remarque
Globales	Porosité totale	$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{tot}}$	Pycnométrie Porosimètre Mercure	Eau, Hélium... Limité au plus petit pore accessible
	Densité sèche	$D_{seche} = M_{seche}/1000.V_{tot}$	Pycnométrie Pesée	- Etat sec de référence
	Densité de grain	$D_{grain} = M_{grain}/1000.V_{grain}$	Pycnométrie	Généralement : 2,65
Matrice solide	Distribution du diamètre de grain	$X_s(d < d_o) = f(\log(d_o))$ Où X_s est la fraction massique de grains de diamètre $d < d_o$	Tamissage + Sédimentométrie	Grains supposés sphériques
	Composition minéralogique	% relatif et nature des minéraux	Analyse X	Diagramme de poudre Microscopie électronique
	Composition chimique	% relatif et nature chimique des minéraux	Analyse X	Généralement exprimée en oxydes élémentaires
Réseau poreux	Distribution du diamètre de grain	$X_p(d < d_o) = f(\log(d_o))$ Où X_p est la fraction volumique de pores de diamètre de grains $d < d_o$	Porosimètre Mercure Adsorption moléculaire Analyse d'image	Pores cylindriques Par calcul (BJH)
	Surface spécifique	Surface développée ramenée à l'unité de masse	Porosimètre Mercure Adsorption moléculaire Analyse d'image	Par calcul direct (BET)
	Géométrie du réseau poreux	Morphologies du réseau Contigüité entre phase Coordinance des grains	Analyse d'image	Performant mais peu accessible

II.3.3. Paramètres thermiques

Les paramètres thermiques qu'on cherche à définir dans le cadre de cette étude sont, la capacité calorifique et la conductivité thermique. La signification de ces deux propriétés, dans le cas d'un milieu granulaire qui un milieu composite et polyphasique est moins clair que pour un milieu homogène. C'est pourquoi, on a introduit la notion des paramètres thermiques équivalents. Qui sont des caractéristiques thermiques globales du milieu homogène équivalent au milieu granulaire et estimées à partir des constituants en tenant compte de sa structure.

II.3.3.1. Capacité calorifique équivalente

L'enthalpie d'un système est une grandeur extensive, il est donc possible d'évaluer la capacité calorifique volumique en écrivant simplement la loi des mélanges.

$$(\rho C_p)_{eq} = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (II.5)$$

II.3.3.2. Conductivité thermique équivalente

L'évaluation de l'expression de la conductivité thermique équivalente d'un milieu granulaire n'est pas aussi simple. En effet, elle ne dépend pas que des propriétés physiques des éléments constituants de milieu et de leurs proportions relatives, mais aussi, de la géométrie de l'empilement, décrit par de nombreux paramètres, qui sont parfois difficilement accessibles.

Plusieurs modèles sont proposés pour déterminer la conductivité thermique équivalente. Ces modèles considèrent généralement le milieu comme un assemblage régulier de solide. Nous allons essayer de citer quelques uns sans chercher à être exhaustif. Tous ces modèles sont conçus en se basant sur le fait que la conductivité thermique équivalente de tout milieu hétérogène est comprise entre celle d'un milieu en strate en parallèle, et celle d'un milieu en strate en série (cf. figure II.7).

$$\frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_s}} < \lambda_{eq} < \varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (II.6)$$

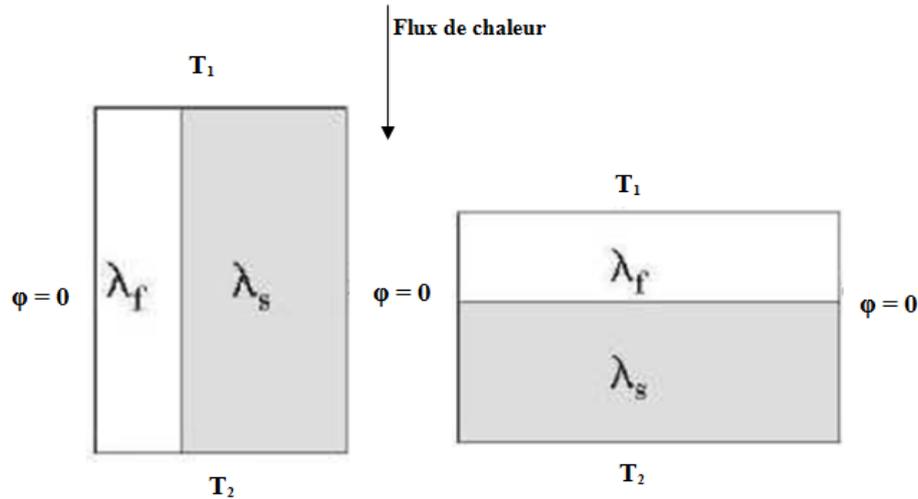


Figure II.7. Strates en série et en parallèle.

Les modèles se répartissent en trois groupes :

- les modèles des milieux périodiques, proposés par Kuni [118]. Ces modèles supposent que le milieu a une structure plus proche des structures cristallines. La conductivité thermique équivalente est obtenue par résolution de l'équation de la chaleur sur une cellule élémentaire ou par analogie électrique.
- Les modèles statistiques [119], utilisant les calculs de probabilités basés sur la distribution des points de contact entre les grains.
- Les modèles de types Maxwell [120, 121], apparus après les travaux de Maxwell [122]. Dans ces derniers, le milieu est assimilé à un empilement régulier de particules dispersées dans une matrice continue. La conductivité thermique, est donnée par la relation (II.7).

$$\frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f} = \frac{3 \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + 2\varepsilon(1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f})}{3 - \varepsilon(1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f})} \quad (\text{II.7})$$

Une analyse détaillée de ces modèles, est présentée dans la thèse d'Azizi [123].

II.4. Transfert thermique dans un milieu granulaire

Ayant détaillé les différentes propriétés physiques d'un milieu granulaire, il est important de passer en revue les principaux modes de transfert de chaleur ainsi que les différents modèles qui permettent de modéliser le transfert de chaleur au sein d'un milieu granulaire.

II.4.1. Mécanismes de transfert de chaleur

Pour décrire le transfert de chaleur dans un lit granulaire statique (lit fixe), les mécanismes suivants sont rencontrés, indépendamment de la présence d'écoulement de fluide [124,125] :

- La conduction thermique à travers le fluide stagnant ;
- La conduction thermique à travers la phase solide (granulats) ;
- La conduction à travers les surfaces de contact entre deux particules ;
- Le transfert radiatif entre les surfaces des particules ;
- Le transfert radiatif entre les pores voisins ;

En présence d'écoulement de fluide, d'autres mécanismes se manifestent, ces derniers sont (cf. figure II.8) :

- La conduction thermique à travers le film fluide au voisinage de la surface de contact entre deux particules ;
- Le transfert thermique par convection solide-fluide-solide.

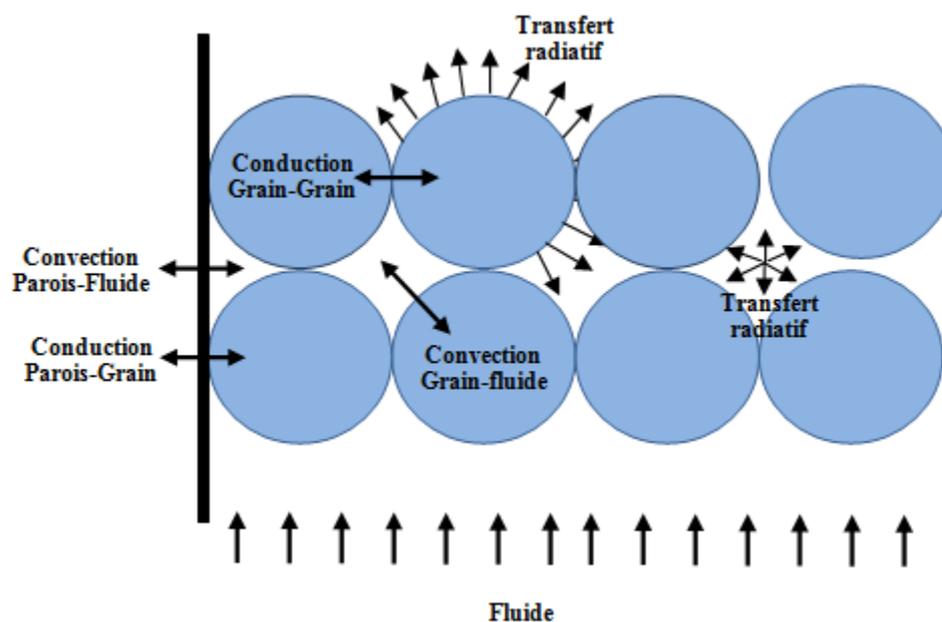


Figure II.8. Echanges de chaleur dans un lit granulaire.

Le transfert de chaleur dans un lit granulaire en mouvement (lit fluidisé), se produit par les mêmes mécanismes rencontrés dans un lit statique (contacte particule-particule, contacte particule-parois, radiation) [126,127]. Cependant, le mouvement des particules dans le lit engendre un terme advectif dans l'équation de transport de l'énergie. Dans plusieurs cas ce terme domine le transfert de chaleur dans le lit granulaire.

II.4.2. Modélisation du transfert thermique dans un milieu granulaire

La littérature fournit de nombreux modèles permettant de décrire les échanges thermiques au sein d'un milieu granulaire. Les deux modèles les plus utilisés sont, le modèle à une température et le modèle à deux températures [128,129]. Ces modèles sont basés sur l'équation de la chaleur et tiennent en compte les propriétés thermiques des deux phases, telles que les conductivités thermiques des deux phases. En outre le transfert de chaleur par advection suivant l'écoulement de la phase fluide. Il existe aussi des modèles pour décrire le transfert thermique en proche parois, il s'agit des modèles standards et dispersifs.

II.4.2.1. Moyenne prise sur un volume élémentaire représentatif

L'approche microscopique permet d'écrire facilement les équations gouvernant le champ de température dans un milieu granulaire :

$$(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) - (\rho C_p)_f u_f \nabla \cdot T_f \quad [\text{dans le volume du fluide } V_f] \quad (\text{II.8})$$

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) - (\rho C_p)_s u_s \nabla \cdot T_s \quad [\text{dans le volume du solide } V_s] \quad (\text{II.9})$$

$$T_f = T_s \quad [\text{sur l'interface solide/fluide } A_{sf}] \quad (\text{II.10})$$

$$n_{fs} \cdot \lambda_f \nabla T_f = n_{fs} \cdot \lambda_s \nabla T_s \quad [\text{sur l'interface solide/fluide } A_{sf}] \quad (\text{II.11})$$

Ces équations représentent la conservation de l'énergie de la phase fluide et solide, ainsi que les conditions d'équilibre thermique local à l'interface en température et en flux. La résolution de ces équations locales soulève en pratique beaucoup de difficulté, du fait en particulier de la méconnaissance de la structure locale du milieu granulaire. Cependant, c'est l'effet macroscopique qui présente un intérêt dans le domaine d'application qui nous intéresse. Donc on fait appel aux méthodes de prise de moyenne afin de passer à un modèle macroscopique [130,131]. Cette technique de prise de moyenne a été appliquée à la dispersion thermique en milieux poreux [132].

Considérons ψ_σ une grandeur physique défini durant la phase σ , qui occupant un volume V_σ . La moyenne de cette grandeur sur le volume élémentaire représentatif (V.E.R) s'écrit :

$$\langle \psi_\sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_\sigma} \psi_\sigma dV \quad (\text{II.12})$$

La moyenne sur le volume de la phase :

$$\langle \psi_\sigma \rangle^\sigma = \frac{1}{V_\sigma} \int_{V_\sigma} \psi_\sigma dV \quad (\text{II.13})$$

Elle vérifie donc $\langle \psi_\sigma \rangle^\sigma = \varepsilon_\sigma \langle \psi_\sigma \rangle$

L'utilisation du théorème de prise de moyenne [133], implique l'application de l'opérateur de prise de moyenne aux équations de conservation de l'énergie :

$$\langle \Delta T_f \rangle^f = \nabla \langle T_f \rangle^f + \frac{1}{V_f} \int_{A_f} n_{fs} T_f dA \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, on peut obtenir $\langle \Delta T_f \rangle^f$ et $\langle \Delta T_s \rangle^s$ sur une sphère élémentaire de diamètre D_v . Ce dernier doit vérifier $d < D_v < L$, où L représente la distance caractéristique du milieu à l'échelle macroscopique (diamètre hydraulique du lit par exemple) et d la distance caractéristique du milieu granulaire (diamètre des grains).

Une telle condition permet de considérer que les grandeurs moyennes sont indépendantes de la taille du V.E.R et que les discontinuités microscopiques n'apparaissent pas à l'échelle macroscopique.

II.4.2.2. Le modèle à deux températures

Le modèle à deux températures moyennes est celui le plus couramment rencontré dans la littérature : il fait intervenir la température des grains T_s et celle du fluide T_f . Le principe de ce modèle est que chaque champ de température peut être décomposé en une composante moyenne et une fluctuation spatiale :

$$T_f = \langle T_f \rangle^f + \tilde{T}_f \quad (\text{II.15})$$

$$T_s = \langle T_s \rangle^s + \tilde{T}_s \quad (\text{II.16})$$

Les fluctuations spatiales des températures peuvent être exprimées en fonction des températures moyennes comme suit :

$$\tilde{T}_f = f_f \cdot \nabla \langle T_f \rangle^f + g_f \cdot \nabla \langle T_f \rangle^f + h_f (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f) \quad (\text{II.17})$$

$$\tilde{T}_s = f_s \cdot \nabla \langle T_s \rangle^s + g_s \cdot \nabla \langle T_s \rangle^s + h_s (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f) \quad (\text{II.18})$$

Les fonctions f, g, et h sont des fonctions de fermeture qui ne dépendent que de la géométrie du problème, de la position considérée et du champ de vitesse local. En introduisant les expressions de T_f et T_s dans les équations moyennes pour chaque phase, on obtient le système suivant :

$$\varepsilon (\rho C_p)_f \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{ff} \nabla \langle T_f \rangle^f + \lambda_{fs} \langle T_s \rangle^s) - (u_{ff} \nabla \langle T_f \rangle^f + u_{fs} \nabla \langle T_s \rangle^s) + h a_v (\langle T_f \rangle^f - \langle T_s \rangle^s) \quad (\text{II.19})$$

$$(1-\varepsilon) (\rho C_p)_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{sf} \nabla \langle T_f \rangle^f + \lambda_{ss} \langle T_s \rangle^s) - (u_{sf} \nabla \langle T_f \rangle^f + u_{ss} \nabla \langle T_s \rangle^s) + h a_v (\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f) \quad (\text{II.20})$$

Le modèle comprend quatre tenseurs de dispersion (λ), quatre vecteurs de vitesse (u) et un coefficient h. Le paramètre a_v désigne l'air de l'interface solide/fluide par unité de volume du milieu granulaire. Dans le cas d'un lit fixe constitué de particules sphériques de diamètre d et de porosité ε , la surface caractéristique est donnée par la relation :

$$a_v = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (\text{II.21})$$

Le nombre important de paramètres existant dans ce modèle, le rend difficile à utiliser en pratique. Les travaux précédents [129,134] ont montré que dans le cas d'une géométrie monodimensionnelle et pour des temps longs, le modèle à deux températures peut être approché par les équations suivantes :

$$\frac{\partial \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial x} = \frac{\lambda_x}{\langle \rho C_p \rangle_t} \frac{\partial^2 \langle T_\sigma \rangle^\sigma}{\partial x^2} \quad (\text{II.22})$$

Où $\langle \rho C_p \rangle_t = \langle \rho C_p \rangle$ est la chaleur volumique du milieu granulaire.

On ne considère ici qu'une seule équation pour chaque phase ($\sigma = f, s$) avec la même vitesse de Darcy et un unique coefficient de dispersion λ_x . Cependant, il a été prouvé que les zones affectées thermiquement dans chaque phase sont décalées spatialement. En pratique aux temps long, le décalage reste négligeable par rapport aux dimensions spatiales macroscopiques [134]. Cette formulation simple du processus de dispersion thermique peut être généralisée par la mise en place d'un modèle à une seule température moyenne.

II.4.2.3. Le modèle à une température

Ce modèle basé sur les techniques d'homogénéisation et de prise de moyenne volumique, permet d'écrire les équations de conservation de l'énergie des deux phases en faisant intervenir une température unique, et en supposant l'équilibre thermique entre les phases solide et fluide [135], soit :

$$\langle T \rangle = \langle T_f \rangle^f = \langle T_s \rangle^s \quad (\text{II.23})$$

Cependant, comme le montre les études [103], il ne s'agit pas d'une condition nécessaire. En effet, il suffit de définir une température enthalpique $\langle T_h \rangle$ comme température moyenne des deux phases, et cela comme suit :

$$\langle T_h \rangle = \frac{1}{(\rho C_p)_t V} \int_V \rho C_p(r) T dV \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$(\rho C_p)_t = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad (\text{II.25})$$

Dans le volume élémentaire V , cette température dérive d'une moyenne volumique de l'enthalpie H du système :

$$(\rho C_p)_t T_H = \langle H \rangle \quad (\text{II.26})$$

La température moyenne enthalpique est alors donnée par l'équation suivante :

$$(\rho C_p)_t \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \langle T \rangle) - \varepsilon (\rho C_p)_f \langle u_f \rangle^f \cdot \nabla \langle T \rangle \quad (\text{II.27})$$

Avec $\langle u_f \rangle^f$ la vitesse moyenne intrinsèque de la phase telle que $u_D = \langle u_f \rangle^f$ est la vitesse de Darcy.

Le tenseur de dispersion thermique prend en compte plusieurs composantes [103] : une contribution purement conductive, une contribution due à la dispersion massique et un terme de tortuosité dépendant de la vitesse moyenne et de la géométrie du milieu.

Dans la littérature, ce modèle est utilisé avec certaines approximations concernant le tenseur de dispersion thermique : il est dans la plus part des cas pris comme un simple tenseur de conductivité effective, et calculé en considérant une conduction parallèle fluide/solide, au sein du milieu granuleux [136].

II.4.2.4. Modélisation du transfert thermique en proche parois

Dans l'étude du transfert thermique dans un lit fixe il est nécessaire de prendre en compte la présence de parois et les phénomènes engendrés. Il existe deux grandes classes pour modéliser ces phénomènes : le modèle «standard» utilisant un coefficient d'échange convectif [137] et le modèle dispersif qui utilise un coefficient de dispersion transversal dépendant de la distance aux parois [138]. Ces derniers sont plus cohérents avec l'approche utilisée dans le cœur du milieu granulaire. Le tableau II.2 résume les principaux travaux adoptant ces deux types de modèles.

Tableau II.2 : Principaux modèles de calcul du coefficient de dispersion thermique et d'échange thermique en proche paroi dans un lit granulaire fixe

	Auteurs	Corrélations	Remarques
Modèle standard	<p>Lamine et al. [139]</p> <p>Dixon [140]</p> <p>Tsotsas et al. [137]</p>	$Nu_y = \frac{h_p d}{\lambda_y} = 3Re^{-0.25}, 5 \leq Re \leq 120$ $\frac{hd}{\lambda_f} = \left(1 - 1.5 \left(\frac{D}{d} \right)^{-3/2} \right) Pr^{1/3} Re^{0.59}$ <p>Nombre de Reynolds élevés</p> $\frac{hd}{\lambda_f} = \left(1 - 1.5 \left(\frac{D}{d} \right)^{-3/2} \right) Pr^{1/3} Re^{0.59}$ $Pe = \frac{U_m d}{\lambda_f} > 8 \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_f}$	<p>Ces modèles sont Applicables pour un régime d'écoulement à haut nombre de Peclet, où le transfert pariétal se fait par mélange hydrodynamique. Ils considèrent un coefficient de dispersion λ_y constant couplé à un coefficient d'échange thermique h_p à la paroi.</p>
Modèle dispersif	Winterberg et al. [138,141]	$\lambda_y(r) = \lambda_{eq} + \lambda_f A(r) Pe$ $A(r) = K_1 \frac{u_{coeur}}{u_{moy}} f(R-r)$ $f(R-r) = \begin{cases} \left(\frac{R-r}{K_2} \right)^n & \text{si } R-r < K_2 d \\ 1 & \text{si } R-r > K_2 d \end{cases}$ <p>$K_1 = 1/8; \quad n = 2$ et</p> $K_2 = 0.44 + 4 \exp\left(-\frac{1}{70} Re\right)$	<p>Ce modèle est considéré pour des nombres de Peclet bas, où l'écoulement est laminaire. Il offre un bon ajustement du profil de la température. L'inconvénient majeur de ce modèle c'est l'interprétation physique pertinente des paramètres K_1, K_2 et n.</p>

II.5. Transfert thermique dans un écoulement granulaire

Lorsqu'un milieu granulaire est en mouvement, trois régimes d'écoulement sont définis : le régime élastique, le régime plastique et le régime visqueux (*cf. figure II.9*).

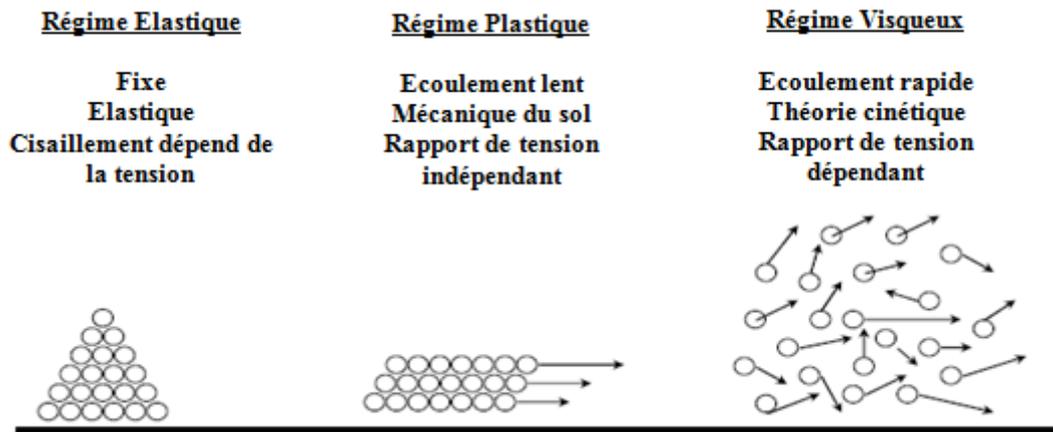


Figure II.9. Les différents régimes d'écoulement d'un milieu granulaire.

Le transfert de chaleur dans un milieu granulaire fixe dépend des propriétés thermophysiques, des particules, des parois, du fluide interstitiel, de la forme des particules, du temps de contact, ainsi que d'autres paramètres. En revanche, dans un milieu granulaire en mouvement, d'autres processus de transport apparaissent faisant intervenir d'autres paramètres. De différentes applications faites appel à des systèmes granulaires en mouvement, tels que les lits fluidisés.

A l'échelle microscopique, le mélange des particules et donc le transfert de chaleur s'accomplit par vibration des particules [142]. Par contre, macroscopiquement le mélange est induit par le mouvement aléatoire et l'advection.

Au moment où les mécanismes de mélange ont été définis par plusieurs recherches fondamentales, l'effet du mélange et des microstructures sur le transfert de chaleur est toujours sous investigation. Des études expérimentales effectuées sur des géométries différentes, ont montrés l'effet de la mise en mouvement du lit granulaire sur la conductivité effective et la viscosité effective du milieu granulaire [143], comme ils ont montré que la variation de la densité ainsi que la vitesse d'écoulement affecte le transfert de chaleur dans le milieu granulaire [144, 145]. Ces derniers travaux ont été réalisés pour un écoulement lent à grande concentration volumique des particules solides.

Cependant, les études réalisées sur les écoulements granulaires rapides, où le temps de contact est court et la fraction volumique des particules solides est relativement basse, ont illustré que le transfert de chaleur peut augmenter avec le taux de cisaillement, menant à l'amélioration du mélange thermique (homogénéisation de la température dans le milieu granulaire) [143, 144, 146].

II.5.1. Transfert de chaleur par contact

En présence de surfaces chauffées en contact avec des particules solide en mouvement, le transfert de chaleur est réalisé principalement par contact. Les travaux de recherches qui ont traité ce problème ont prouvé que l'échange de chaleur par contact augmente avec, la masse, le rayon et la vitesse des particules et diminue avec le module de Young [147-149]. De ce fait, et afin de déterminer les coefficients d'échanges thermique, particules/surfaces et surfaces/particules, des corrélations ont été proposées. Sun et Chen [149] ont proposé une relation donnant le coefficient d'échange particule/surface, en supposant que toutes les particules possèdent les mêmes propriétés :

$$h = 0.41 C \dot{N} \rho c_p A_c \sqrt{\lambda t_c} \quad (\text{II.28})$$

Avec C est un facteur de correction donné en fonction exponentielle du rapport $\alpha t_c / r_p^2$, \dot{N} est le flux du nombre de particules, ρc_p est la capacité calorifique par unité de volume, A_c est l'aire de contact entre les particules ou entre les particules et la paroi, t_c est le contact, et λ est la conductivité thermique du matériau.

Pour des temps de contact courts et intermédiaires, Schlunder [148] a proposé une relation qui permet de calculer le coefficient de transfert de chaleur en fonction des propriétés thermique effectives du milieu granulaire :

$$h = 2 \sqrt{\frac{(\rho c_p \lambda)_e}{\pi t_c}} \quad (\text{II.29})$$

Bien que, le transfert thermique par contact est le mécanisme dominant dans les systèmes granulaire dense avec écoulement lent, il peut être négligé pour les systèmes dilué avec écoulement rapide ($t_c \rightarrow 0$).

II.5.2. La théorie cinétique

En réalité, dans un écoulement granulaire, les collisions entre les particules sont inélastiques ; lors des interactions une partie de l'énergie échangée entre les particules est dissipée. Il est donc impératif de quantifier cette énergie dans l'étude du transfert de chaleur dans un système granulaire en mouvement. Ce besoin de connaître cette énergie dissipée par interaction fait la différence entre l'écoulement granulaire et l'écoulement moléculaire [150].

Dans ce but on fait appel à la théorie cinétique qui exploite l'analogie entre la nature fluctuante du mouvement granulaire rapide et le mouvement aléatoire au sein d'un gaz dense [151]. Pour cette théorie, les grains sont supposés en interaction les grains voisins à travers une collision binaire inélastique. Dans un écoulement granulaire rapide, les principaux mécanismes de transport sont : le transport cinétique par fluctuation et le transport par collision. En considérant une description statistique, il est alors possible de définir les champs de densité, vitesse, et température. Par analogie avec la théorie cinétique dans un gaz, une grandeur appelée « température granulaire » est introduite afin de caractériser le mouvement des particules. Elle est définie comme le produit du champ local de vitesse et sa magnitude, dépendant ainsi de l'écoulement et des propriétés des particules [142]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{3}{2}\theta = \frac{1}{2}\overline{\vec{u} \cdot \vec{u}} \quad (\text{II.30})$$

$$\theta = \frac{\langle (u_i - \langle u \rangle)^2 + (v_i - \langle v \rangle)^2 + (w_i - \langle w \rangle)^2 \rangle}{3} \quad (\text{II.31})$$

Avec \vec{u} est le vecteur vitesse de la particule. u_i, v_i, w_i sont les composantes du vecteur vitesse de la particule i .

De ce fait, une équation dite « équation d'énergie » se rajoute aux équations, de continuité, et de quantité de mouvement, et cela pour décrire l'écoulement d'un milieu granulaire. Cette équation d'énergie, représente la création, le transport et la dissipation de la chaleur granulaire. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\frac{3}{2}\rho \alpha \frac{D\theta}{Dt} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \Gamma \quad (\text{II.32})$$

Où, θ est la température granulaire, q_i est le flux de la chaleur granulaire et Γ est le rapport de la dissipation de la chaleur granulaire.

De nombreux développements ont été réalisés pour l'application de la théorie cinétique dans l'étude de l'écoulement granulaire. Ces développements fournissent des expressions différentes, du tenseur de cisaillement, du flux de la chaleur granulaire et du terme dissipatif. Un de ces développements le plus utilisé pour la modélisation des écoulements granulaires, et qui représente la base de tous les autres modèles, est celui de Lun et al. [152]. Parmi ces formulations, le modèle de Gidaspow [153] est recommandé pour la modélisation des lits fluidisés denses. Celui de Sinclair [154] est utilisé dans les applications des écoulements granulaires pneumatiques denses ou dilués. Syamlal [155, 156] a développé un modèle à considérer pour une large gamme d'applications.

II.6. Conclusion

Nous avons essayé de montrer à travers cette étude bibliographique sur les milieux granulaires, que le comportement hydrodynamique des matériaux granulaires pouvait être très divers, allant d'une réponse analogue à celui d'un solide à une réponse analogue à celui d'un liquide. Il peut même se comporter comme un diphasique constitués de deux ou plusieurs phases granulaires "immiscibles" (ségrégation), et présenter une analogie avec le comportement d'un gaz "gaz granulaire".

Les milieux granulaires sont donc le siège d'un certain nombre de comportements non linéaires, qui peuvent rendre leur comportement global surprenant et complexe. Afin de comprendre leur comportement, un aperçu des différents modèles décrivant l'hydrodynamique de ces milieux a été exposée.

Nous avons aussi présenté dans ce chapitre les principaux modèles de dispersion thermique dans un milieu granulaire fixe et en mouvement. Dans le but de choisir le modèle adéquat pour les applications étudié dans le cadre de cette thèse.

Chapitre III

Conception et caractérisation d'une unité de stockage à l'échelle du laboratoire

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, le choix a été fixé sur l'utilisation du sable comme milieu de stockage, sachant que ce matériau est abondant dans le sud de l'Algérie, représentant ainsi 40% de la superficie du pays [157]. Dans le cadre de ce travail, le sable utilisé est celui des dunes de la région d'El Oued située au sud de l'Algérie à une latitude de 33.50° et une longitude de 6.78° . Cette région est favorisée pour l'exploitation de l'énergie solaire [158] (cf. figure III.1).

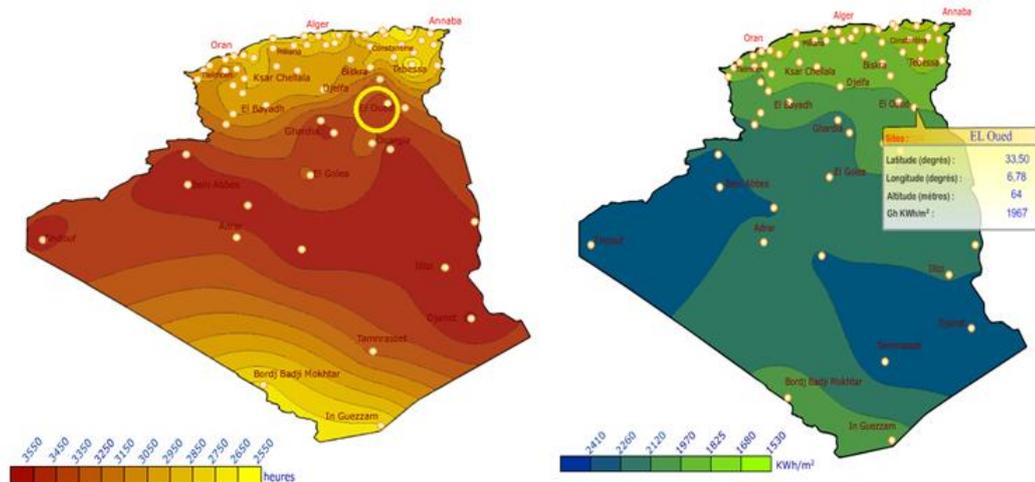


Figure III.1. Moyenne annuelle globale reçue sur une surface horizontale de la région d'El Oued.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer dans un premier temps, les caractéristiques physiques du produit telles que : sa granulométrie, sa densité et sa chaleur spécifique. Pour des raisons techniques et économiques, le dispositif expérimental est réalisé à échelle réduite.

La caractérisation du matériau de stockage, la description du montage, le mode opératoire et les résultats de l'expérimentation présentent les principaux points discutés dans ce chapitre. Les données expérimentales collectées permettent de décrire le comportement thermique du sable pendant un cycle charge/décharge et de déterminer les performances du système.

III.2. Caractérisation du matériau

Les différents tests de caractérisation sont réalisés au laboratoire VTRS à l'université d'El Oued.

III.2.1. Granulométrie

Le sable des dunes d'Oued-souf est composé de Fe_2O_3 , CaO_3 , Al_2O_3 , de quelques impuretés et de métaux légers [159]. Une des principales caractéristiques de ce type de sable est la finesse de ses grains [160]. L'analyse granulométrique permettra de déterminer les différentes tailles de grains formant le sable de la région. Pour cela une analyse par microscope optique a été adoptée (cf. figure III.2).

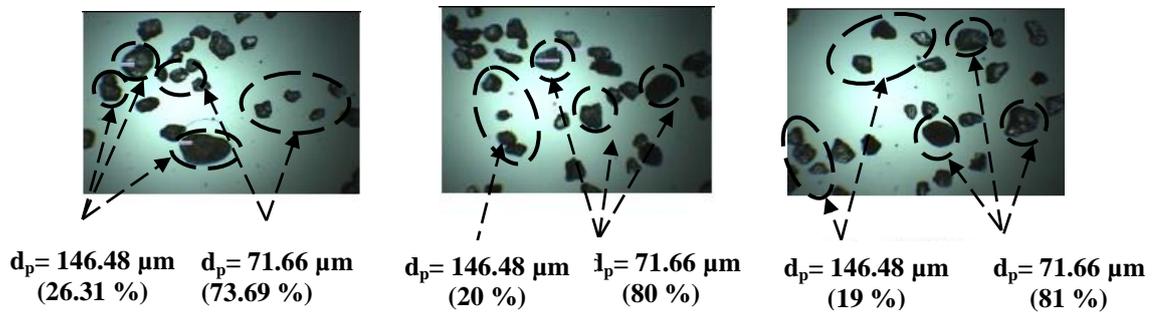


Figure III.2. Vue photographique de la distribution de la taille des grains dans les échantillons de sable.

Une particule présente trois dimensions principales qui ne sont pas exactement mutuellement perpendiculaires [161] :

- ✓ Une plus grande dimension ou « longueur » ;
- ✓ Une plus petite dimension ou « épaisseur », qu'on ne voit pas au microscope, parce qu'elle est perpendiculaire au plan de la lame, si la particule est en position de repos le plus stable,
- ✓ Une dimension intermédiaire, ou mésodiamètre, qui est la plus petite dimension visible au microscope.

En effet le microscope optique permet le dénombrement des différentes particules dans les échantillons en se référant à leur mésodiamètre.

L'analyse granulométrique des échantillons de sable (cf. *figure III.3*) montre une répartition de la taille des grains de sable entre un mésodiamètre $d = 146,48 \mu\text{m}$ (22%) et un mésodiamètre $d = 71,66 \mu\text{m}$ (78%).

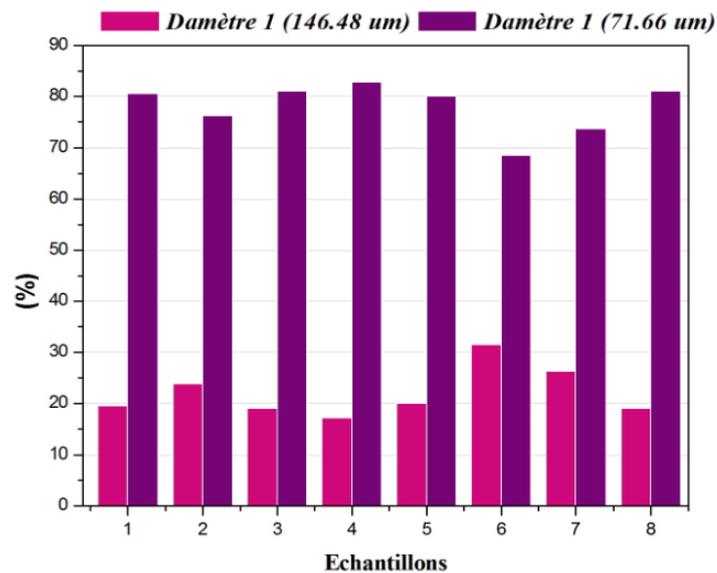


Figure III.3. Diagramme de la distribution de la taille de grains de sable.

III.2.2. Masse volumique

Pour les milieux granuleux ou pulvérulent, il existe deux types de masse volumique : la masse volumique absolue et la masse volumique apparente [162].

❖ Masse volumique absolue

La masse volumique d'un matériau, est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains (cf. *figure III.4 (a)*).

❖ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté (cf. *figure III.4 (b)*).

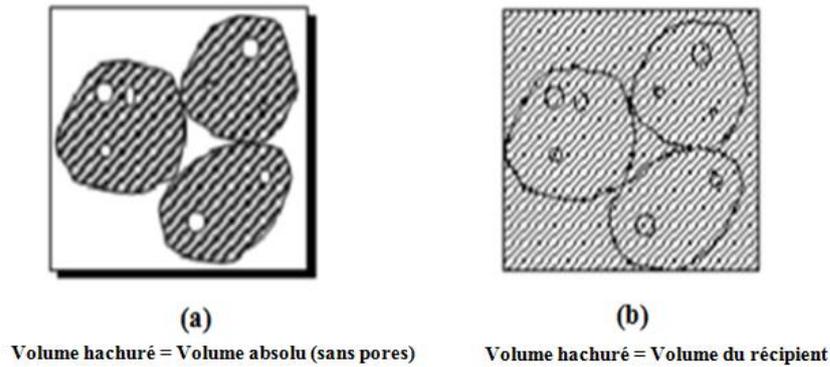


Figure III.4. Différence entre masse volumique absolue et masse volumique apparente.

La masse volumique déterminée dans le cadre de ces travaux est la masse volumique apparente. La procédure consiste à mesurer la masse (m) des différents échantillons de sable en utilisant une balance électronique, ainsi que le volume de chacun d'eux. Le calcul de la masse volumique se fait selon la relation (III.1) :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{III.1})$$

Pour mesurer le volume (V) d'un échantillon de sable, on utilise une éprouvette graduée contenant un liquide (eau) de volume initial V_0 , en ajoutant progressivement la masse de sable dans le tube, le volume du mélange eau et sable atteint la valeur V_1 , la quantité $V_1 - V_0$ représente le volume de la masse de sable.

La masse volumique du sable de la région d'El Oued est de 2700 kg/m^3 . Des travaux réalisés sur le sable de la région dans le cadre d'une étude minéralogique et géotechnique ont trouvé une valeur de 2660 kg/m^3 [163].

III.2.3. Capacité calorifique

La capacité calorifique, également appelée chaleur spécifique ou chaleur massique, correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kg de matériau de 1°C . Cette propriété du matériau se révèle indispensable lors de l'établissement du bilan de chaleur sur le lit de stockage, car la quantité de chaleur sensible emmagasinée par le solide est directement liée à sa chaleur spécifique (*cf. chapitre I, partie 2.1.1. équation I.1*).

La capacité thermique à pression constante du sable est déterminée par calorimétrie [164] selon les étapes suivantes (*cf. figure III.5*) :

- ✓ Mesurer la masse des différents échantillons de sable (balance de précision : 4 à 5 kg, précision 1 à 2 cg) ;

- ✓ Verser la masse de l'échantillon de sable dans le calorimètre et relever sa température (thermomètre électronique) ;
- ✓ A l'aide de l'éprouvette graduée, mesurer 10 ml d'eau distillée et la chauffer jusqu'à l'ébullition ;
- ✓ Verser cet eau ainsi chauffée dans le calorimètre puis agiter le mélange ;
- ✓ Relever la température du mélange après que celle-ci se stabilise (équilibre thermique établi) ;
- ✓ Refaire les essais pendant plusieurs jours.

Le matériel expérimental utilisé pour ces derniers essais est illustré dans la figure III.5 :

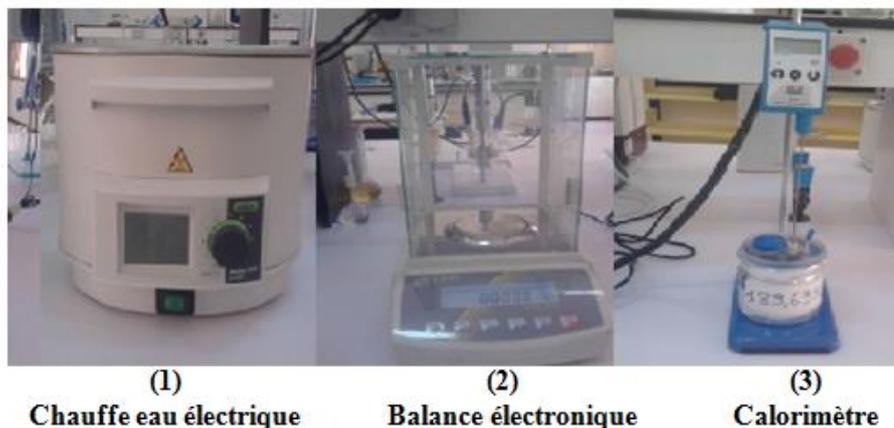


Figure III.5. Matériels utilisés pour la mesure de la capacité calorifique au laboratoire VTRS.

La chaleur spécifique du sable est calculée à partir des essais réalisés sur les différents échantillons, selon les étapes suivantes :

- ✓ Calcul de la quantité de chaleur fournie par l'eau au système (sable + calorimètre), en utilisant la relation III.2 :

$$Q = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot (T_f - T_i) \quad (\text{III.2})$$

Où, C_p , ρ , V , T_i , T_f sont respectivement la chaleur spécifique, la densité, le volume, la température initiale et la température finale de l'eau.

- ✓ Calcul de la quantité de chaleur reçue par le calorimètre avec l'équation III.2.
- ✓ La quantité de chaleur reçue par le sable est la différence entre celle qui est fournie par l'eau chaude et celle qui est reçue par le calorimètre, les détails du calcul étant présentés dans l'annexe A.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.6. Cette dernière représente la variation de la quantité de chaleur reçue par le sable en fonction de la masse du sable et la

différence de température ($T_f - T_i$). Ces résultats ont permis de déterminer que la chaleur spécifique du sable de la région d'Oued-Souf est égale à : $C_p = 920 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

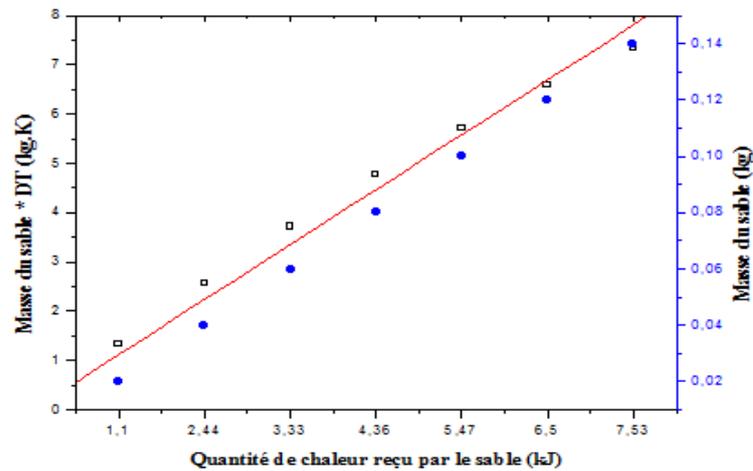


Figure III.6. Variation de la quantité de chaleur reçue par le sable en fonction de la masse de sable et la différence de température.

III.3. Conception du système de stockage

Le dispositif expérimental a été réalisé dans le laboratoire afin d'étudier le comportement thermique du sable, et ainsi déterminer sa capacité à stocker de la chaleur pour une application solaire. Pour cela, un système composé d'un capteur solaire à air et d'une cuve de stockage reliée par un échangeur de chaleur a été conçu (cf. figure III.7).

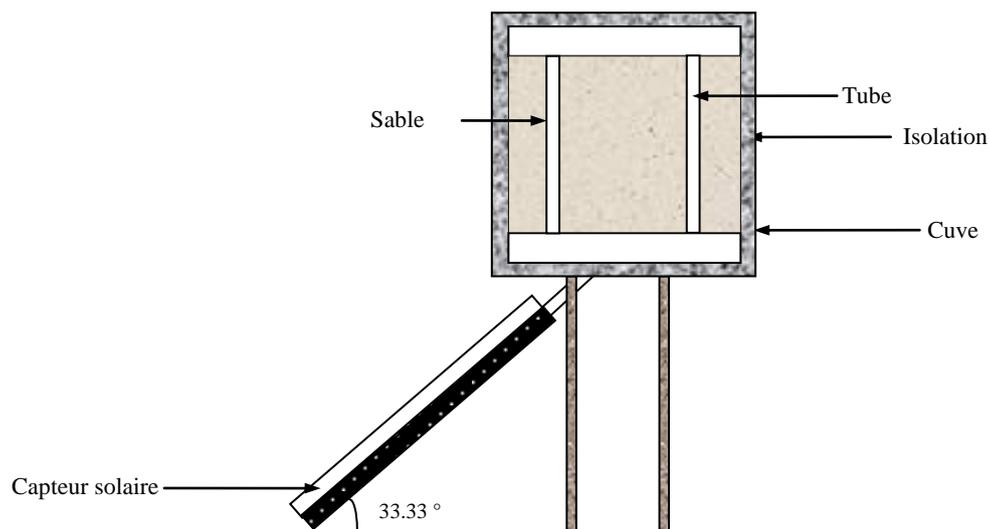


Figure III.7. Schéma de principe du système de stockage.

Le capteur solaire utilisé dans le cadre de cette expérimentation est un capteur plan à air réalisé au laboratoire, de dimension 26×35 cm. L'unité de stockage est de forme cubique, composée de deux cuves extérieure et intérieure de côtés respectivement 60 et 50 cm, séparées par une couche d'isolation en polystyrène de 5 cm d'épaisseur (cf. figure III.8).

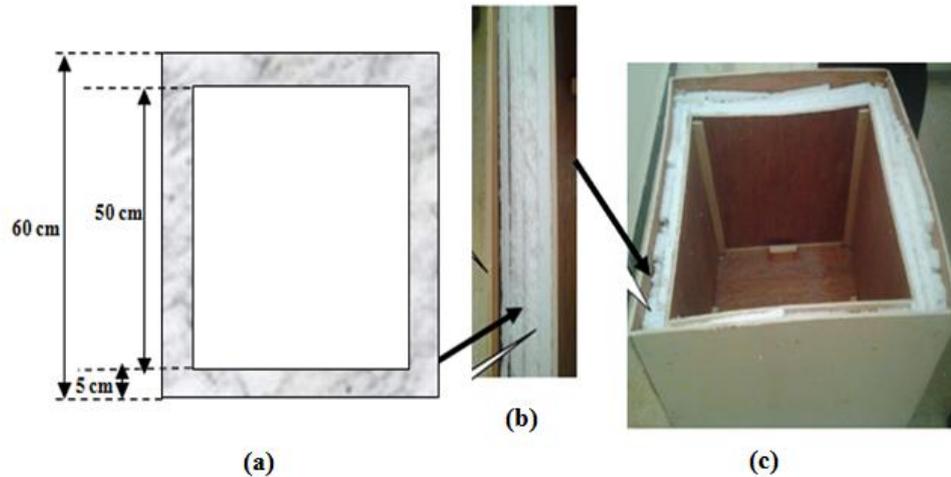


Figure III.8. Schéma de la cuve de stockage : (a) les dimensions de la cuve, (b) isolation, (c) photographie de la cuve.

Le transfert de chaleur vers le sable est assuré par échangeur de chaleur constitué de tubes en cuivre de 22 mm de diamètre extérieur et de 40 cm de longueur, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (air) qui circule entre le capteur solaire à air et la cuve de stockage de bas en haut. La configuration de l'échangeur est illustrée par la figure III.9.

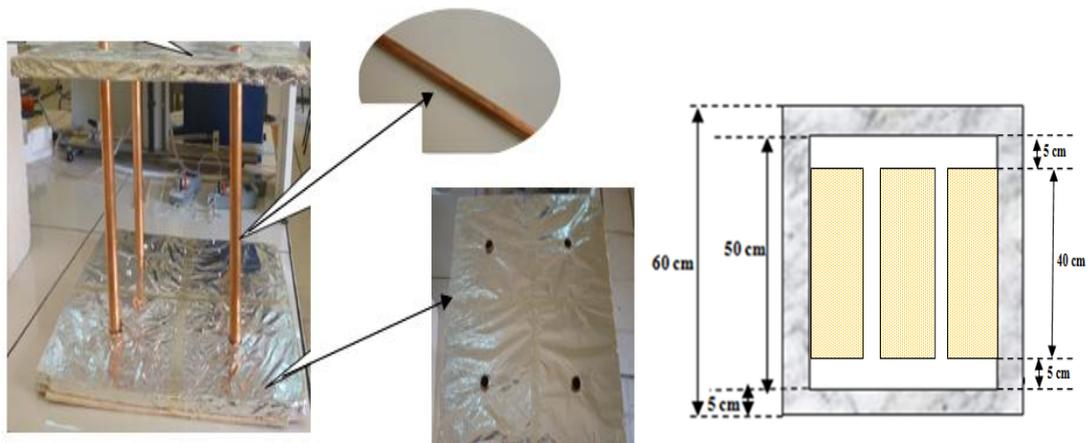


Figure III.9. Configuration de l'échangeur de chaleur dans la cuve de stockage.

Le sable qui est le milieu du stockage est placé à l'intérieur de la cuve. Il sert à accumuler la chaleur en provenance du capteur solaire plan à air, véhiculé par le fluide caloporteur (air). La figure III.10, présente un échantillon du sable caractérisé auparavant et utilisé dans le cadre de ce travail.



Figure III.10. Photographie du sable utilisé comme milieu de stockage.

III.4. Essais expérimentaux

Pour tous les essais expérimentaux, la masse du sable utilisé est de 120 kg. Le principe expérimental est le suivant : un thermocouple est installé au centre de la cuve ($H = 25$ cm) pour mesurer la température dans le sable. La température à l'extérieur du système (température ambiante) est mesurée à l'aide d'un thermomètre. Avant d'exposer le capteur solaire plan au rayonnement du soleil, on enregistre la température du sable (T_{ini}), ensuite, on expose le capteur au soleil, et on enregistre la température chaque heure dans un intervalle de temps allant de 09h jusqu'à 17h de l'après-midi. De 15h à 17h le circuit d'arrivée du fluide caloporteur à l'unité de stockage est coupé et cela pour éviter le processus inverse (déchargement du lit). Durant la deuxième journée suivante, on enregistre la température dans le sable chaque heure et cela de 09 h à 19 h en gardant le circuit d'arrivée du fluide caloporteur à l'unité de stockage coupé. Trois configurations de l'échangeur de chaleur sont testées afin de choisir une meilleure configuration.

Pour déterminer les performances du système de stockage, il est nécessaire de calculer le rendement de chargement, qui est basé sur le premier principe de la thermodynamique, défini par le rapport entre l'énergie stockée par le matériau et l'énergie maximale reçue par le système (eq. III.3) [165] :

$$\eta = \frac{T(t) - T_{ini}}{T_{inlet} - T_{ini}} \quad (\text{III.3})$$

Où $T(t)$ est la température moyenne du lit de stockage en fonction du temps, T_{ini} et T_{inlet} sont respectivement la température initiale du lit de stockage et la température d'entrée du fluide caloporteur.

Les tests expérimentaux sont réalisés durant les journées du 10 et 11 Juin 2013, dans le laboratoire de génie mécanique à l'université d'El Oued. Les données du rayonnement solaire à ciel clair de la région pendant une journée sont illustrées par la figure III.11 [158].

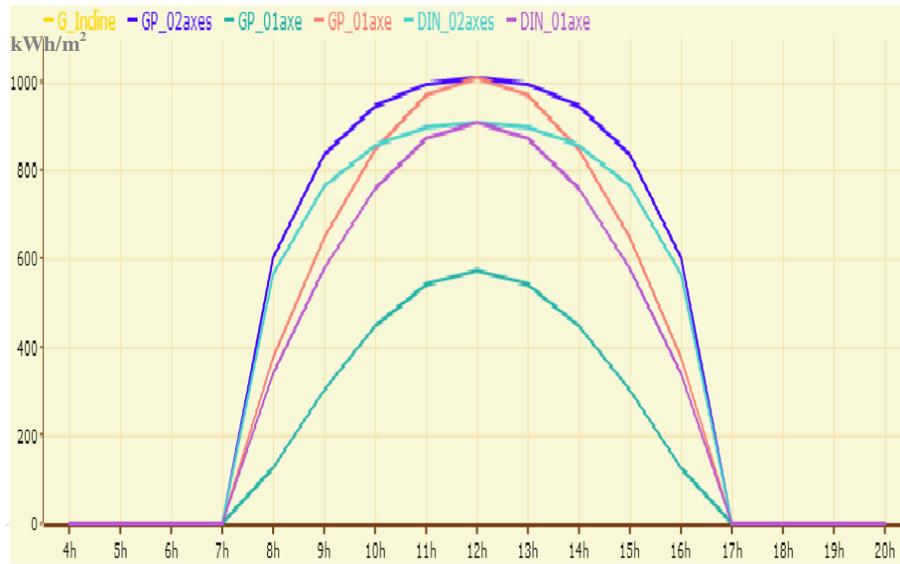


Figure III.11. Données du rayonnement solaire à ciel clair de la région d'El Oued.

La figure III.12 présente la variation de la température moyenne du sable et la température ambiante pendant le chargement, pour une température du fluide caloporteur (air) égale à 70 °C, dans le cas de la configuration à quatre tubes de chargement. Le lit est dit chargé, quand sa température devient constante [165]. Comme le montre la figure III.12, la température moyenne du lit de sable augmente progressivement entre 9h et 14h de 28 à 36 °C, puis se stabilise à ce niveau de température. L'intensité de l'ensoleillement pendant cette période de la journée varie de 835 et 945 Wh/m² (cf. figure III.11). Cette augmentation est attribuée à l'apport de la chaleur par l'air qui vient du capteur solaire. Entre 13 h et 14 h la température ambiante diminue, en revanche la température du lit de sable continue à augmenter.

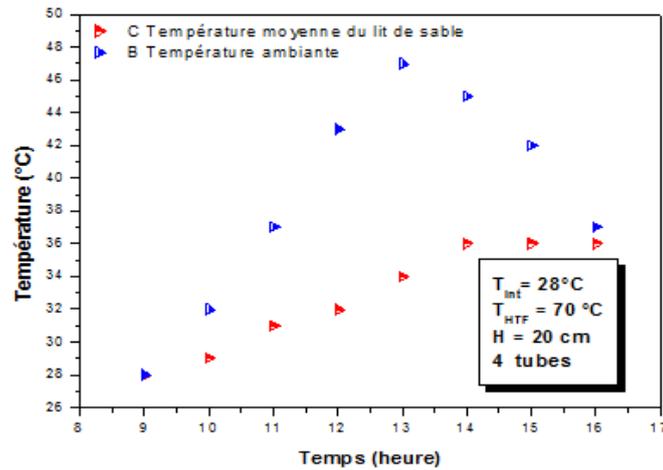


Figure III.12. Evolution temporelle de la température moyenne du sable et la température ambiante pendant le processus de chargement.

L'évolution de la température du lit de stockage pendant deux jours consécutifs, est illustrée d'après la figure III.13. Il est montré que pendant la période non ensoleillée (entre 18 h du 1^{er} jour et 09 h du jour qui suit), la température du lit diminue lentement pour atteindre 34 °C. Ce qui se manifeste par une chute de température de 2 °C pendant un intervalle de temps de 17 heures. Du fait que le circuit du fluide caloporteur été coupé durant cette période d'essai, cette baisse de température est due aux déperditions thermiques de la cuve de stockage.

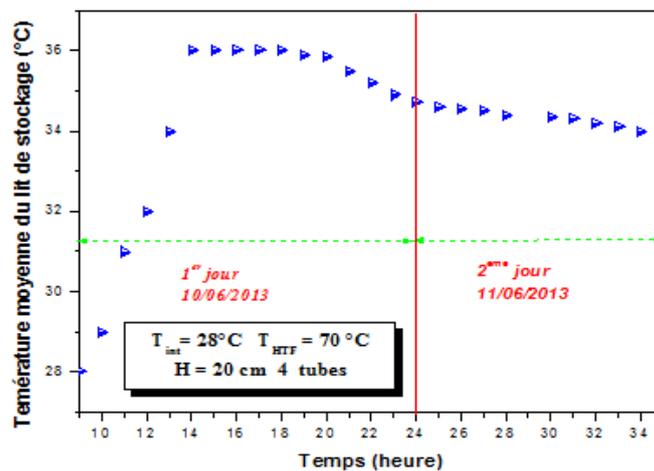


Figure III.13. Evolution de la température du lit pendant deux jours successifs.

L'énergie stockée et le rendement du lit dépendent tous deux de la température instantanée du sable, les courbes représentatives de l'énergie stockée et du rendement du lit ont la même allure (cf. figure III.14, figure III.15). L'énergie stockée est donnée par la relation :

$$Q_{stocké} = (m \cdot C_p)_{sable} \cdot (T(t) - T_{ini})_{sable} \quad (III.4)$$

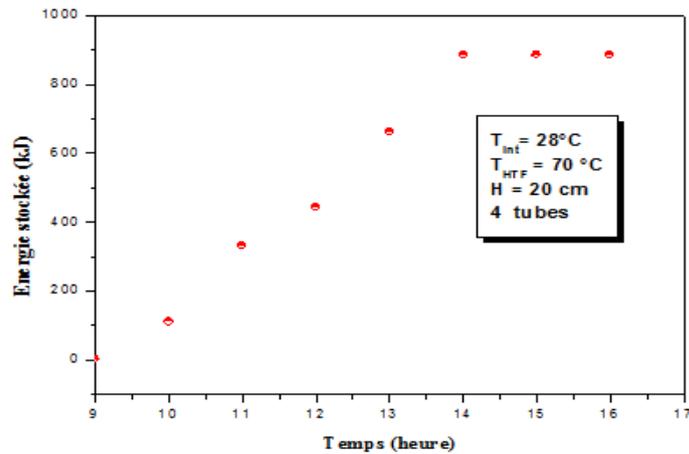


Figure III.14. Evolution de l'énergie stockée dans le lit de sable.

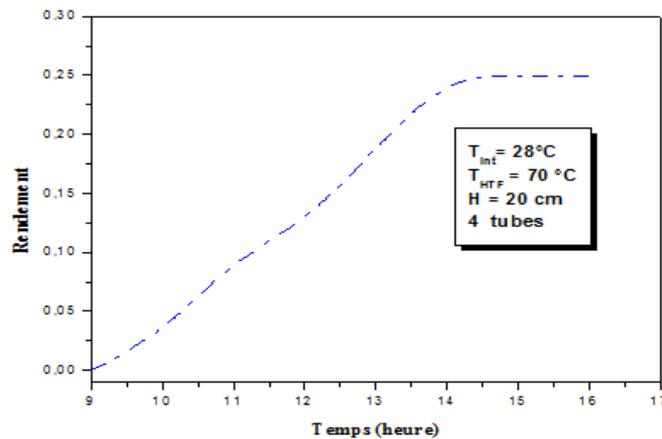


Figure III.15. Evolution du rendement instantané dans le lit de sable

Dans le but d'étudier l'effet du nombre des tubes de chargement, trois configurations sont testées (4, 9, et 16 tubes). La variation de la température moyenne du lit de sable est présentée dans la figure III.16. Il est observé que l'augmentation du nombre de tubes de chargement accélère le transfert de chaleur au sein du lit, donnant lieu à une élévation rapide de la température du sable. L'écart de température entre la configuration à 9 tubes et celle à 16 tubes n'est pas significative entre 09 h et 12 h, en revanche l'écart devient important au-delà de 12 h, et cela du à un fort ensoleillement entre 12 h et 14 h.

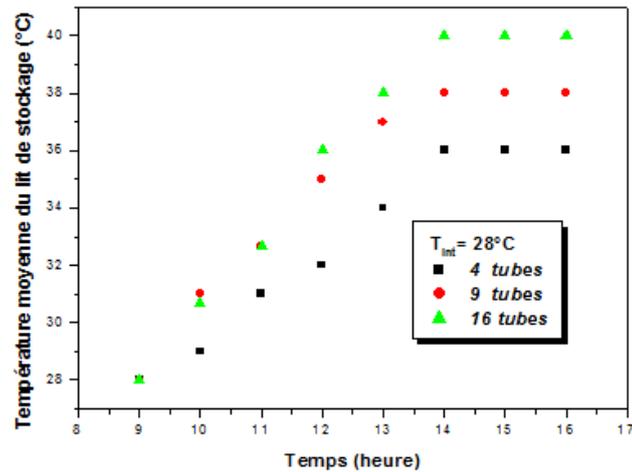


Figure III.16. Variation de la température moyenne en fonction du nombre de tubes de chargement.

L'effet du nombre de tubes sur l'énergie stockée et le rendement du lit de sable est illustré dans les figures III.17 et III.18. Dans le cas de la configuration à quatre tubes de chargement, le lit de sable est capable de stocker 20% de l'énergie transportée par le fluide caloporteur. En revanche, le rendement instantané augmente de 40% dans le cas de la configuration à 16 tubes.

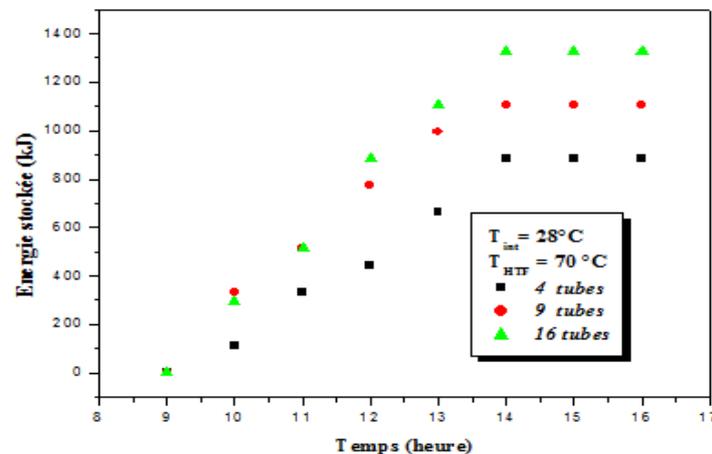


Figure III.17. Variation de l'énergie stockée en fonction du nombre de tubes de chargement.

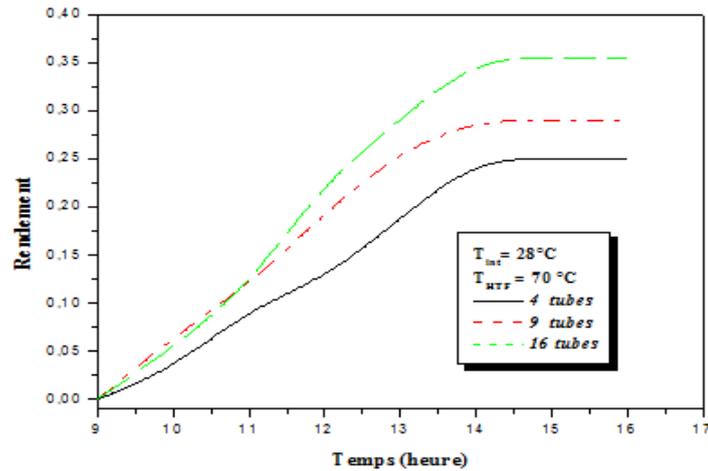


Figure III.18. Variation du rendement instantané en fonction du nombre de tubes de chargement

En parallèle à l'étude expérimentale, et pour avoir plus de détails sur le comportement thermique du sable, nous avons fait appel à la simulation numérique, qui est un outil à la fois performant et économique. De ce fait, les propriétés physiques qui ont été déterminés auparavant dans la section précédente (§2.2, page 54, §2.3, page 56), seront utilisées pour la simulation numérique.

III.5. Modélisation du comportement thermique du sable

Cette étude vise à modéliser un système de stockage sensible utilisant le sable comme milieu de stockage, à l'échelle macroscopique. Ainsi, la configuration de l'unité de stockage permet d'assimiler le sable à un à un milieu solide [76]. Au préalable, les travaux de modélisation nécessitent la définition d'un système représentatif du système de stockage réel.

III.5.1. Description de la configuration étudiée

La figure III.19 représente le schéma physique du système étudié. Il s'agit d'une cuve cubique de côtés L , formant un lit fixe contenant le matériau de stockage (sable) à l'intérieur duquel, sont installés des tubes de diamètre d , constituant l'échangeur de chaleur. Ces derniers permettent la circulation du fluide caloporteur.

Le stockage d'énergie dans la cuve, s'effectue de manière active à l'aide d'un courant d'air chaud provenant du capteur solaire plan à air.

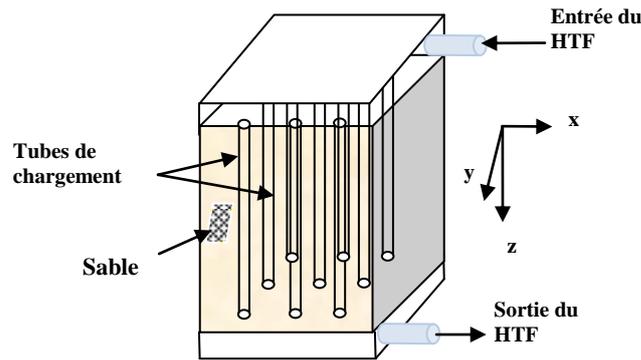


Figure III.19. Schéma physique de l'unité de stockage.

III.5.2. Modélisation 2D

III.5.2.1. Hypothèses

Dans le but d'étudier le comportement du stockage de la chaleur du système, un modèle thermique est développé en se basant sur les hypothèses suivantes :

- A l'entrée de l'unité de stockage l'écoulement est développé ;
- Les parois des tubes ont une faible épaisseur ce qui implique une résistance thermique négligeable ;
- La chute de pression dans les tubes est négligeable ;
- La cuve de stockage est parfaitement isolée ;
- Le matériau de stockage est isotrope ;
- La température des tubes en contact avec le milieu de stockage est imposée constante.

Une coupe dans le plan (xy) permet d'obtenir la configuration en deux dimensions du système de stockage (ch. figure III.20 (a)). En tenant compte de la symétrie existante, le domaine d'étude à considérer en deux dimensions est présenté dans la figure II.20 (b).

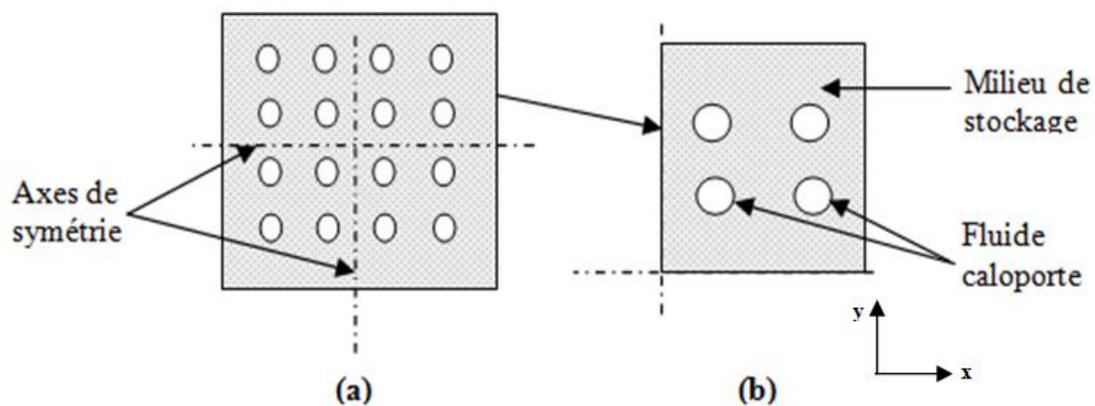


Figure III.20. Configuration en 2D du domaine d'étude ((a) coupe dans le plan xy, (b) symétrie considérée).

III.5.2.2. Equations gouvernantes

En adoptant les hypothèses citées ci-dessus, le transfert de chaleur dans le sable est géré par l'équation de la chaleur en régime transitoire dans un solide donnée par l'équation

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \nabla^2 T \quad (\text{III.4})$$

Avec,

ρ_s est la densité du solide [kg/m^3];

C_{ps} est la capacité thermique à pression constante du solide [J/kg.K];

K_s est la conductivité thermique du solide [W/m.K];

T est la température du milieu solide [K].

Cette équation est accompagnée des conditions aux limites suivantes :

$$\text{A, } x = 0, y = 0 \text{ (symétrie)} \quad -n (-K_s \cdot \Delta T) = 0 \quad (\text{III.4.a})$$

$$\text{A, } x = l/2, y = l/2 \text{ (parois isolées)} \quad -n (-K_s \cdot \Delta T) = 0 \quad (\text{III.4.b})$$

Sur les parois circulaires, représentant la surface des tubes en contact avec le milieu de stockage une température est imposée :

$$T = T_p \quad (\text{III.4.c})$$

A l'état initial ($t = 0$), la température du lit de sable est T_{ini} .

III.5.2.3. Modélisation numérique

Pour mettre en évidence la formulation mathématique du problème, une investigation numérique à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics est effectuée. La solution numérique apportée est confrontée aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude pour évaluer le comportement thermique et afin de valider le modèle.

Pour effectuer la comparaison, nous utilisons les propriétés du sable tel qu'ils ont été évaluées expérimentalement (*tableau III.1*). La discrétisation du domaine d'étude est schématisée dans la figure III.21, un maillage triangulaire de 1950 éléments a été adopté.

Tableau III.1. Paramètre d'entrée du modèle

	C_p	ρ	K
	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	kg.m^{-3}	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Sable	920	2700	1

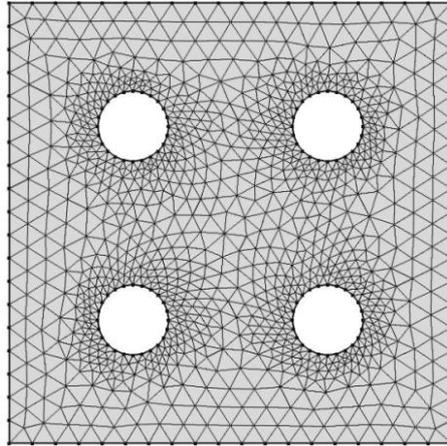


Figure III.21. Maillage du domaine d'étude.

III.5.2.4. Résultats de la simulation

Comme il a été indiqué dans le paragraphe précédant de ce chapitre, les propriétés physiques du matériau de stockage sont mentionnées dans le tableau III.1. Le chargement d'un lit de sable de 50 cm de chaque côté est simulé. Ce dernier est initialement à une température de 28 °C (même condition expérimentale), par contre la température des parois des tubes de chargement est imposée à 60 °C.

Dans le but de visualiser le comportement thermique du lit de sable, la distribution de la température des surfaces du lit pour différents cycles de chargement est présentée dans la figure III.22.

A $t = 0$ s, la température du lit est uniforme et égale à la température initiale, avec l'avancement du temps, le matériau commence à s'échauffer progressivement.

La figure III.23 montre la direction de la propagation du flux de chaleur ainsi que les contours des températures. Le temps de chargement du lit de stockage est présenté dans la figure III.24, qui montre que le temps nécessaire pour que le lit soit complètement chargé est 5 heures (18000 s).

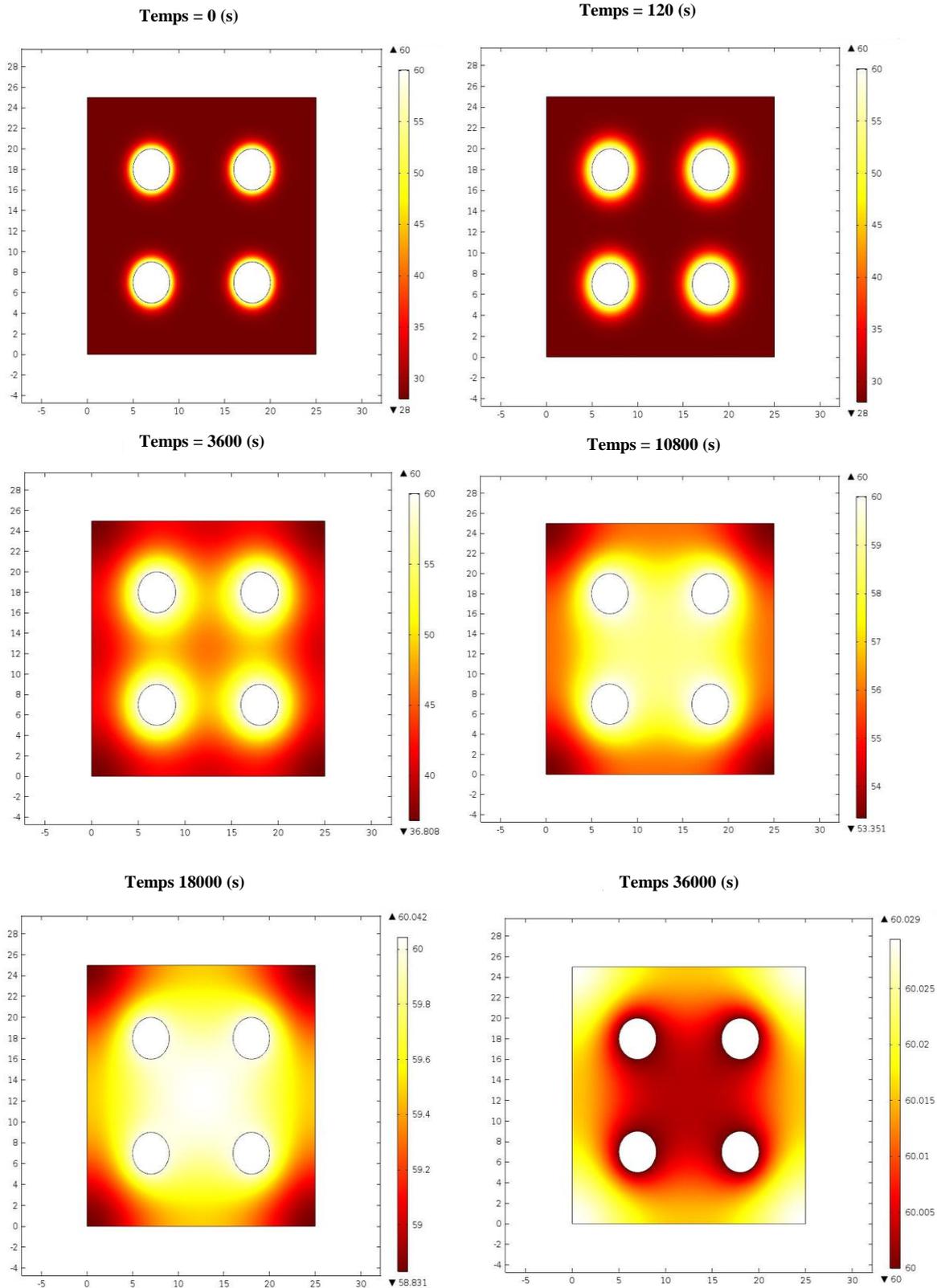


Figure III.22. Distribution de la température dans le lit de sable pendant le chargement.

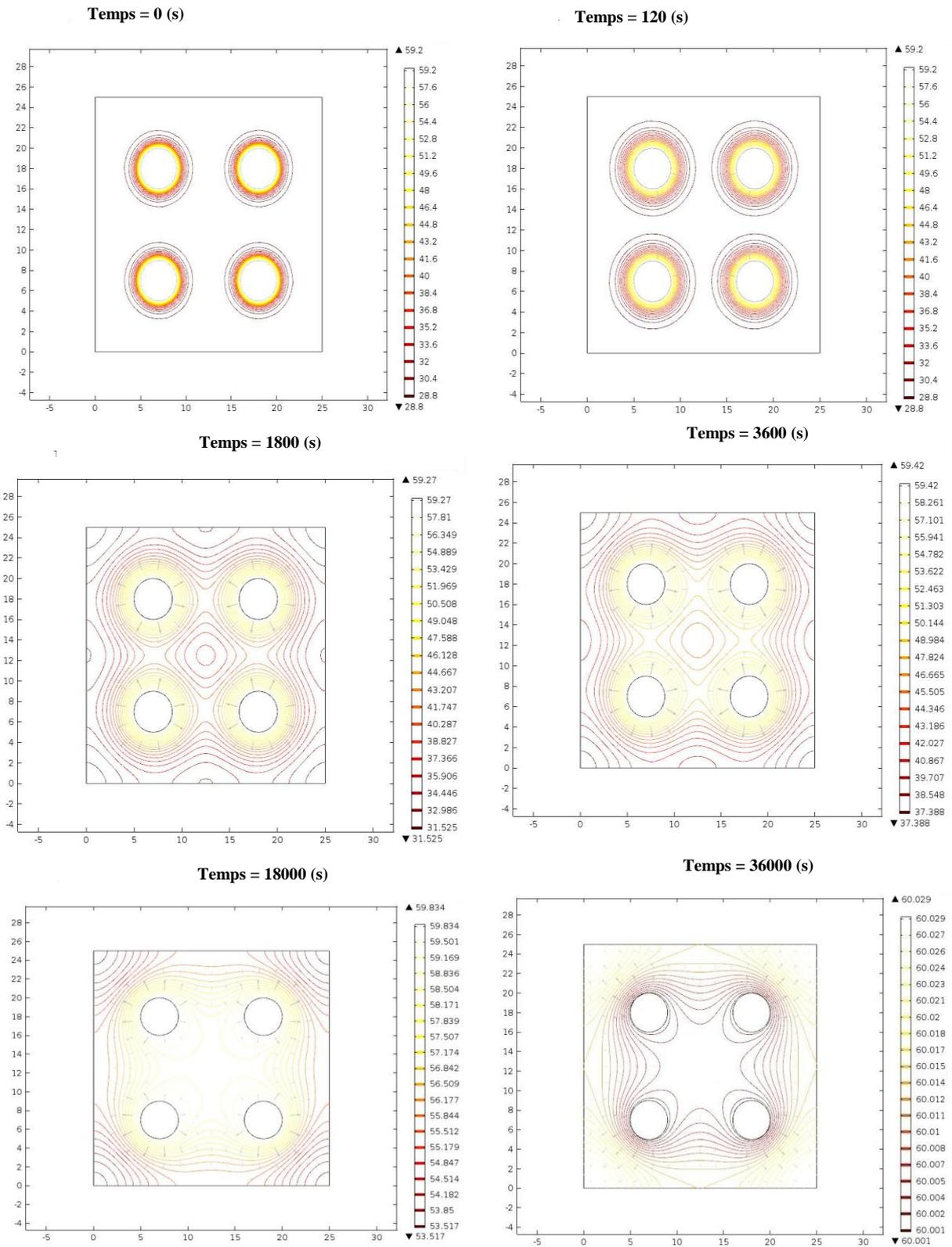


Figure III.23. Contour de la température dans le lit de sable et direction du flux de chaleur total pendant le chargement.

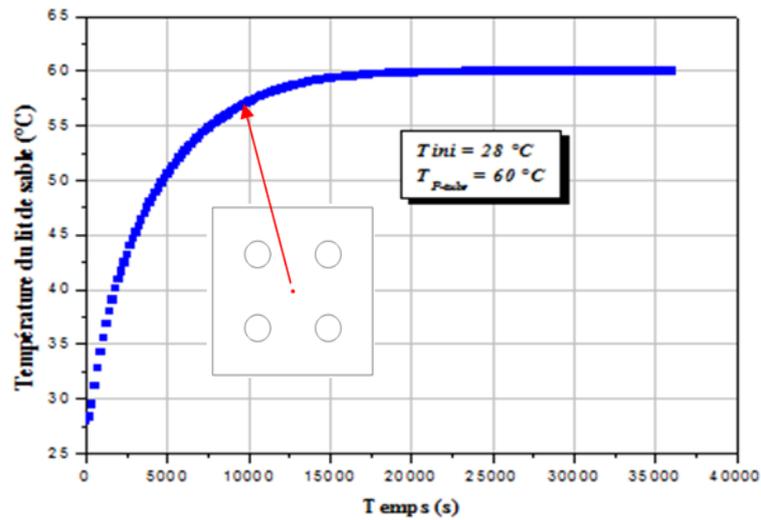


Figure III.24. Profile de la température dans le lit de sable pendant le chargement (calculée au centre de la géométrie $x = y = 12.5$).

La figure III.25 montre la variation de l'énergie thermique stockée dans le lit de sable. La quantité d'énergie est calculée d'après la relation III.4. Durant le temps de chargement l'énergie stockée est de 10 MJ.

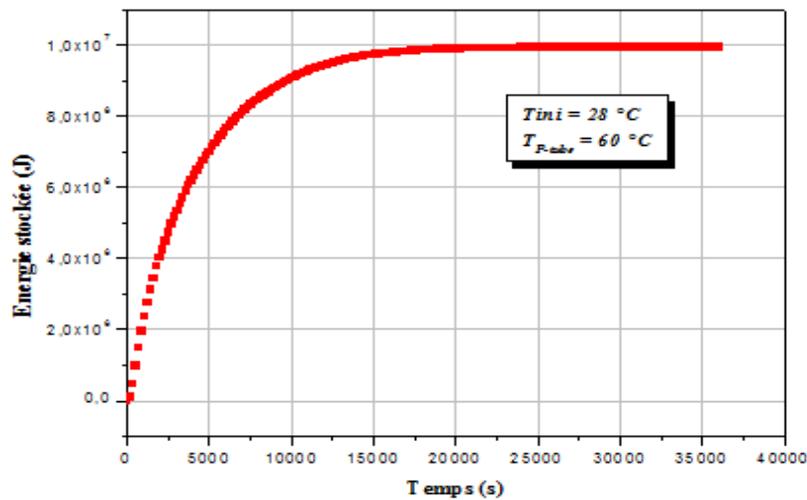


Figure III.25. Variation de l'énergie stockée dans le lit de sable pendant le chargement.

La Variation du rendement de chargement de la cuve de stockage est illustrée dans la figure III.26. le rendement est initialement à zéro ensuite il augmente progressivement par absorption de la chaleur du fluide caloporteur (air) jusqu'à ce que le lit soit complètement chargé.

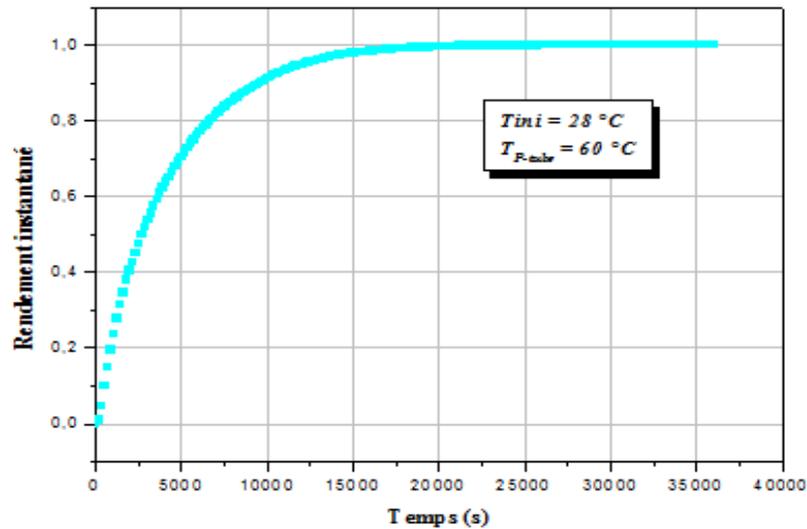


Figure III.26. Rendement instantané du chargement du lit de sable.

Dans le but de déterminer le temps de déchargement du lit de sable, la cuve de stockage est parcourue à travers les tubes par un fluide caloporteur (air) à température $T = 25\text{ °C}$. Pour le calcul on considère que la température initiale du lit est celle atteinte à la fin du chargement ($T_{\text{ini}} = 60\text{ °C}$). Le temps nécessaire pour que le lit soit déchargé est de 2,7 h (*ch. figure III.27*). Ce dernier est plus court que le temps de chargement, ce qui montre l'intérêt de l'utilisation du sable comme milieu de stockage.

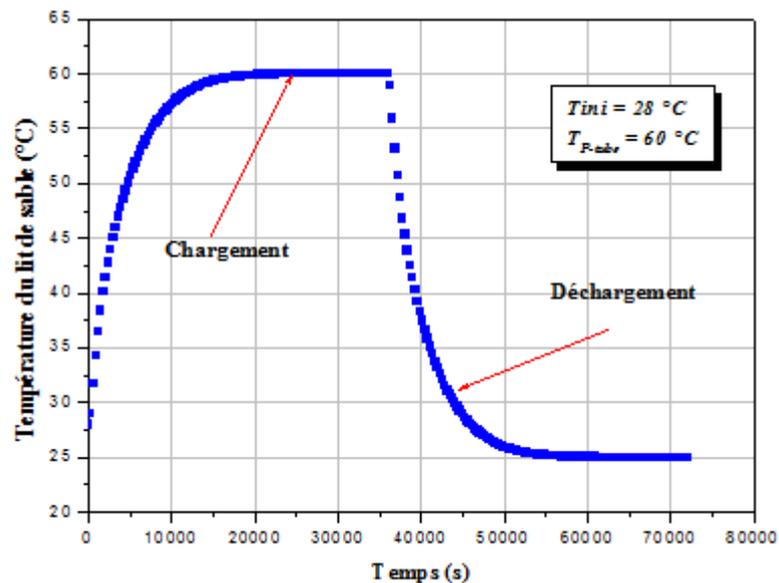


Figure III.27. Profil de la température du lit de sable pendant un cycle complet charge/décharge.

Afin, d'avoir des résultats qui reflète la réalité de la configuration choisie, on a opté pour une simulation en 3D.

III.5.3. Modélisation 3D

Dans le cas de la modélisation 3D, le mode de transfert de chaleur dans le milieu solide et le milieu fluide est couplé, et la température du fluide caloporteur varie le long du lit de stockage, ainsi l'écoulement du fluide est non-isotherme. En plus des hypothèses considérées dans la modélisation 2D, la conduction axiale dans le fluide caloporteur est négligée dans le cas de la modélisation 3D. Par conséquent, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, ainsi que la conservation de l'énergie, pendant le processus de chargement peuvent être écrites comme suit :

- **L'écoulement du fluide :**

L'écoulement du fluide caloporteur est modélisé par l'équation de continuité ainsi que les équations de Navier-stocks simultanément, en considérant un régime d'écoulement laminaire (Le nombre de Reynolds calculé à base du diamètre des tubes de chargement et dans l'intervalle de vitesses utilisées dans la cadre de ce travail est $Re \in [32, 256]$).

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_f \vec{v}) = 0 \quad (\text{III.5})$$

Où ρ_f et \vec{v} sont la masse volumique et le vecteur vitesse du fluide caloporteur respectivement.

$$\rho_f \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (\text{III.6})$$

Où P et μ sont la pression motrice et la viscosité dynamique du fluide caloporteur respectivement.

- **Le transfert de chaleur dans le fluide :**

Le transfert de chaleur dans le fluide est modélisé par l'équation de l'énergie comme suit :

$$\rho_f C_{pf} \frac{DT}{Dt} = \lambda_f \nabla^2 T + h (T_{ext} - T) \quad (\text{III.7})$$

Où C_{pf} et λ_f sont la capacité calorifique et la conductivité thermique du fluide caloporteur. h est le coefficient de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et les parois des tubes. T_{ext} est la température du milieu extérieur (milieu solide dans ce cas).

- **Le transfert de chaleur dans la région solide :**

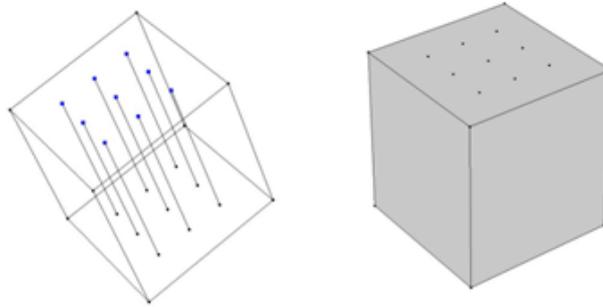
Le transfert de chaleur entre les tubes de chargement et le milieu de stockage est régit uniquement par conduction, par conséquent l'équation d'énergie à résoudre s'écrit :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T \quad (\text{III.8})$$

Où ρ_s et C_{ps} sont la masse volumique et la capacité calorifique du milieu solide respectivement.

II.5.3.1. Conditions aux limites et initiales

A $t = 0$, la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur dans les tubes est nulle ($\vec{v} = 0$), et tout le domaine solide est à une température constante T_{ini} . Comme présenté sur la figure III.28, la température à l'entrée des tubes est T_e , et le fluide s'écoule au niveau de cette entrée, pour toute valeur du rayon à une vitesse constante à tout moment ($t > 0$). La surface extérieure est considérée parfaitement isolée.



Entrée :	parois extérieures isolées :
A t ($t = 0$): $\vec{v} = 0$; $T = T_{ini}$;	$n \cdot (k \nabla T) = 0$
A t ($t > 0$): $\vec{v} \neq 0$; $T = T_e$	n : vecteur normal à la surface

Figure III.28. Conditions aux limites et initiales appliquées.

III.5.3.2. Discrétisation du domaine

Deux types de maillage, tétraédrique et triangulaire ont été considérés pour discrétiser l'interface séparant la région solide et la région fluide respectivement. Le maillage de la géométrie du lit de sable est illustré d'après la figure III.29.

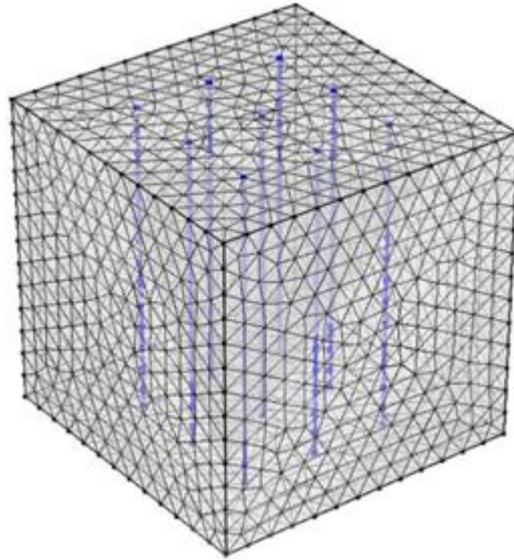


Figure III.29. Maillage de la géométrie du lit de sable avec 9 tubes de chargements.

III.5.3.3. Résultats et discussion

Les paramètres de simulation utilisés dans le cadre de cette étude, comprenant les propriétés thermo-physiques, les conditions aux limites et initiales sont présentés dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Paramètres utilisés pour la simulation

SI. No.	Paramètres	Valeurs
1.	Densité du sable (Kg/m^3)	2700
2.	Capacité calorifique du sable (J/Kg K)	920
3.	Conductivité thermique du sable (W/m K)	1
4.	Diamètre des tubes (m)	0.02
5.	T_{ini} ($^{\circ}\text{C}$)	25
6.	T_e ($^{\circ}\text{C}$)	80
7.	V (m/s)	2

Afin de déterminer les propriétés du processus de chargement du lit de sable, une simulation numérique a été réalisée pour trois configurations de chargement respectivement 09, 12 et 16 tubes,

Les contours de température du lit de stockage avec 9 tubes sont illustrés dans la figure III.30, pour différents intervalles de chargement, 0 s, 1 h, 10 h, 24 h, 5 jours et 10 jours. Au début la totalité du volume de stockage est maintenue à T_{ini} . Le processus de stockage est initié aussitôt que le fluide caloporteur alimente les tubes de chargement à une température T_e , par l'échauffement de la portion du matériau de stockage en contact direct avec la surface des tubes. Il est observé également que c'est la partie haute du lit qui est chargée en premier, par rapport à la partie basse, du fait que l'écoulement du fluide caloporteur est dans le sens allant du haut vers le bas.

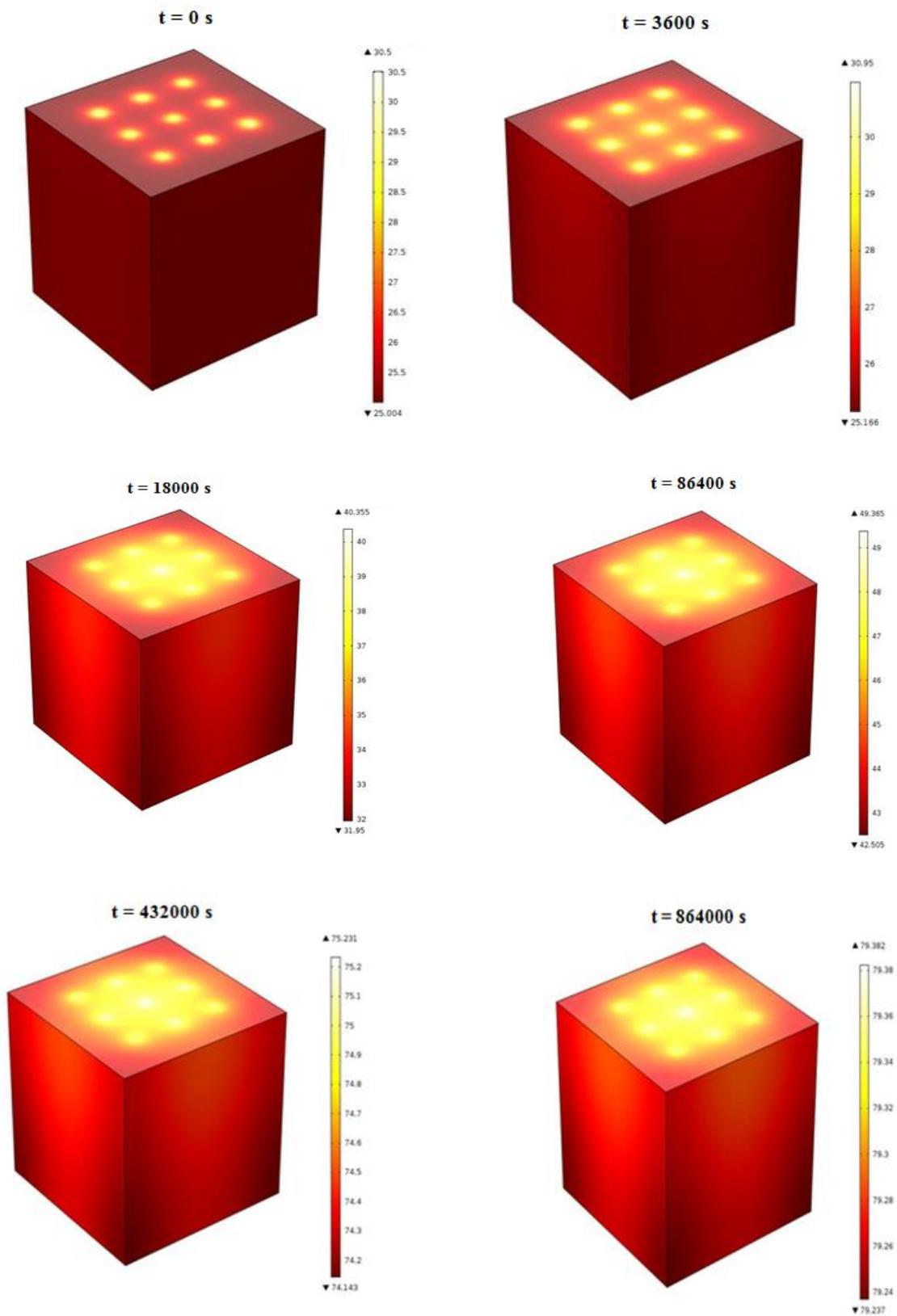


Figure III.30. Contours de température dans le lit de sable pendant le chargement.

Le temps de chargement du lit de stockage est présenté d'après la figure III.31, il est estimé à 8 jours environ.

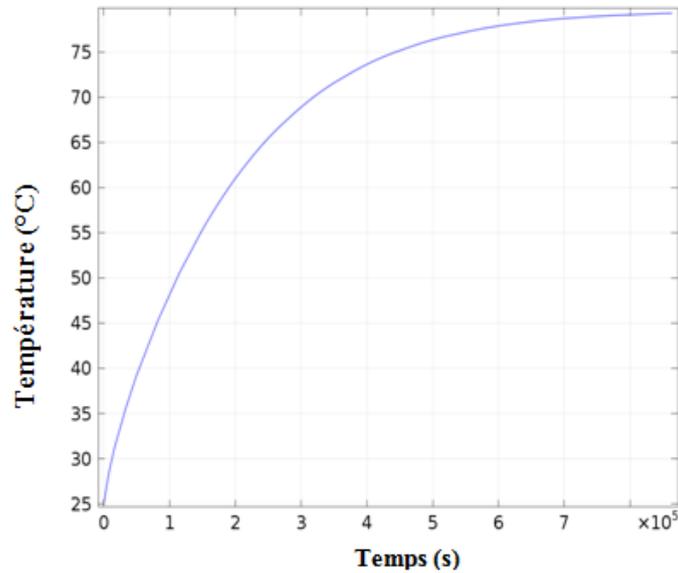


Figure III.31. Temps de chargement du lit de sable.

La variation de l'énergie thermique stockée dans le lit de sable est présentée par la figure III.32. Quand le processus atteint le régime établi, la quantité d'énergie stockée est de 12.69 MJ. Le profil du rendement instantané de chargement est illustré dans la figure III.33. Initialement, il est égal à zéro puis il augmente progressivement pour atteindre la valeur de 1, qui correspond à un lit de stockage complètement chargé. Comme le rendement est une fonction de la température moyenne du lit de stockage, ils ont la même allure.

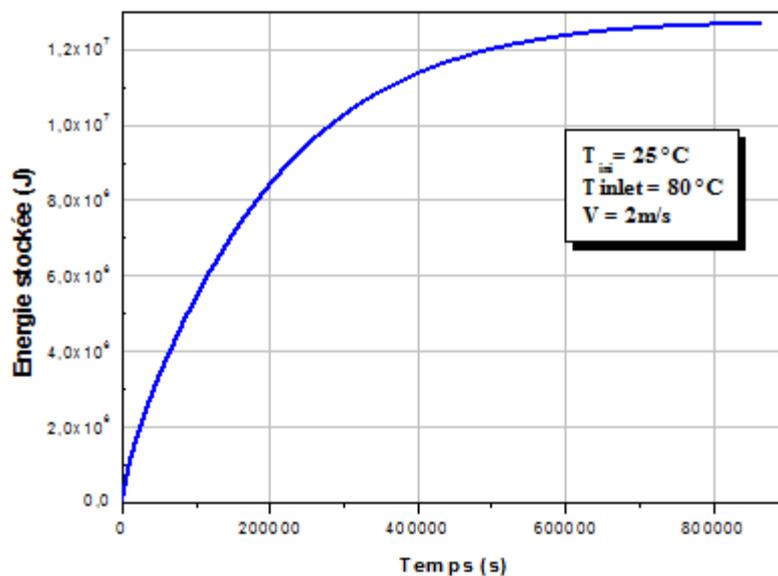


Figure III.32. Variation de l'énergie stockée dans le lit de sable.

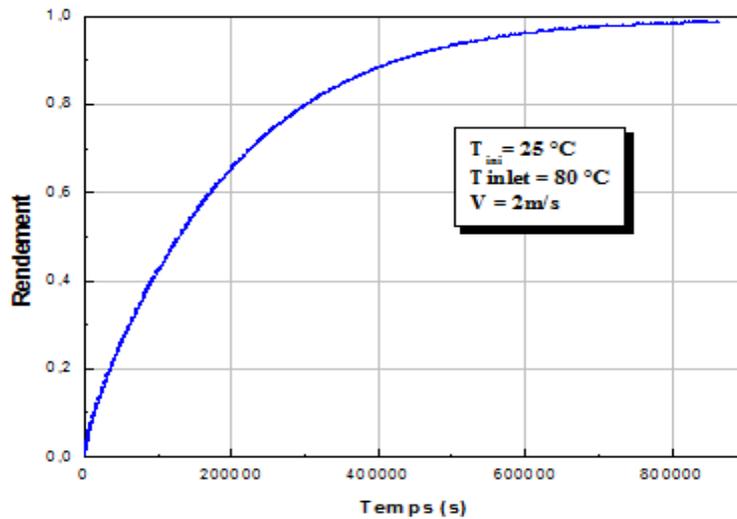


Figure III.33 : Rendement de stockage du lit de sable.

La figure III.34 montre l'effet du nombre de tubes de chargement, une augmentation considérable de la température moyenne du sable est observée dans le cas d'une configuration à 16 tubes.

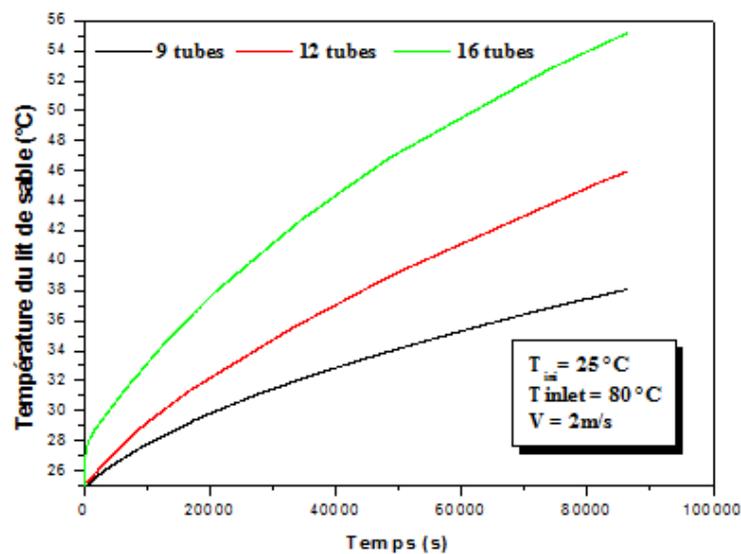


Figure III.34. Variation de la température du lit de sable pour trois configurations des tubes de chargement.

Dans le but d'illustrer la variation de la température du fluide caloporteur le long des tubes de chargement, la température de ce derniers est estimée selon la hauteur du lit de stockage pour de différents intervalles de temps (1, 2, 5, 24 heures) (ch. figure III.35).

Initialement la température du lit de stockage est inférieure à celle du fluide caloporteur. Avec le déclenchement du processus de chargement par l'arrivée du fluide caloporteur, sa

température chute le long de la hauteur du lit et arrive à la sortie avec une température T_{outlet} . Cette dernière température traduit la capacité d'extraction de l'énergie par le matériau de stockage.

Pendant une heure de chargement la température du fluide caloporteur chute de 12 °C. En revanche, après 24 heures cette chute de température est de 0.1 °C. Il est observé que la chute de température du fluide caloporteur est significative durant la période initiale du chargement puis devient constante. Progressivement aucune chute de température n'est enregistrée au moment où la température du stockage continue à augmenter. A cet effet le potentiel de transfert par conduction est ralenti.

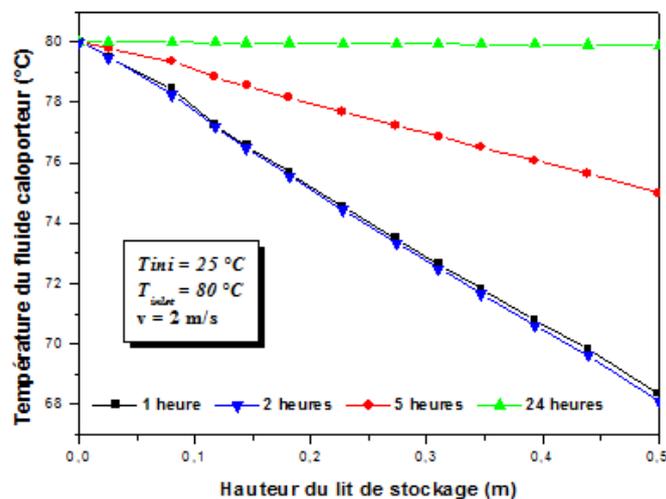


Figure III.35. Variation de la température du fluide caloporteur selon la hauteur du lit de sable pour différents temps de chargement.

III.5.3.4. Confrontation des résultats

La confrontation entre les résultats issus des simulations 2D et des mesures expérimentales, ainsi qu'entre les simulations 2D et 3D a été réalisée. Il s'agit de comparer la distribution de la température dans le lit de stockage et le temps de chargement.

Selon cette comparaison, le profil de la température dans le lit de sable est identique pour les résultats obtenus de la simulation et de l'expérimentation. Cependant une différence dans la température de stockage maximale atteinte est observée. En outre le temps de chargement déterminé expérimentalement est similaire à celui calculé par la simulation 2D. Toutefois le temps de chargement issu de la simulation 3D est plus long. Dans l'ensemble, une similitude de la distribution de la température entre l'expérimental et la modélisation est constatée.

III.6. Conclusion

Ce chapitre constitue une analyse de faisabilité d'un système de stockage à lit fixe, utilisant le sable comme milieu de stockage. Deux approches : expérimentale et numérique ont été développées pour analyser le comportement thermique du sable ainsi que les performances du système de stockage.

Dans une première partie de ce chapitre, une caractérisation du sable de la région d'El Oued a été réalisée. Ceci a permis de déterminer les propriétés physiques de ce matériau. En plus, un système de stockage (capteur solaire, cuve de stockage, tubes de chargement) a été réalisé au laboratoire. Trois configurations des tubes de chargement ont été testées. Les résultats expérimentaux ont abouti à la détermination, de la distribution de la température dans le lit de sable, le temps de chargement, ainsi que la configuration la plus performante.

Dans une deuxième partie nous avons réalisé une simulation 2D puis 3D du comportement thermique d'un système de stockage de la chaleur utilisant le sable. Cette simulation a été, réalisée avec trois configurations de chargement avec respectivement 09, 12 et 16 tubes.

D'après les résultats de la simulation 2D, le temps de chargement du lit de sable est de 5 heures. Une capacité de stockage de 1.15 MJ a été trouvée.

Les résultats de la simulation 3D indiquent que le temps nécessaire pour le chargement du lit de sable est de 8 jours avec la configuration à 9 tubes. Dans ce cas, la capacité de stockage est de 12.96 MJ. L'effet du nombre de tubes sur la température de stockage et le temps de chargement a été analysé. Avec la configuration à 16 tubes un maximum de température de stockage est atteint.

Il a été conclu que les performances de l'unité de stockage dépendent de la température maximale de stockage ainsi que de la température du fluide caloporteur.

Cette étude de faisabilité montre l'intérêt de l'utilisation de sable comme milieu de stockage surtout pour les régions où ce matériau est disponible de façon abondante.

Chapitre IV

Comportement thermo–fluidique du sable dans un lit fluidisé

IV.1. Introduction

Lors de l'étude bibliographique, le deuxième procédé choisi pour mettre en œuvre le stockage thermique dans le sable, est le procédé du lit fluidisé. La technique des réacteurs à lits fluidisés est largement répandue dans de différents secteurs industriels tels que : l'industrie chimique, mécanique, hydrocarbure et minière. Cette technique a été envisagée récemment pour le captage/stockage de l'énergie solaire et pour la récupération de l'énergie fatale [166]. Les lits fluidisés gaz-solide présentent un choix attractif pour les applications liées au stockage thermique comparés à d'autres types de réacteurs (liquide-solide), car ils favorisent le transfert de chaleur entre la phase gazeuse (air) et la phase solide (sable) en augmentant la surface de contact entre les deux phases [86]. Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement fluidique et thermique du sable dans un lit fluidisé.

Dans un premier temps nous présentons quelques généralités sur la fluidisation, et la classification des matériaux fractionnés plus ou moins finement qui peuvent y être employés. Nous exposerons les différents régimes décrivant l'hydrodynamique des lits fluidisés, ainsi que les paramètres clés permettant le contrôle de la fluidisation. Dans un second temps, la formulation mathématique utilisée pour modéliser le comportement hydrodynamique et thermique du lit fluidisé, et les résultats de la simulation numérique menée sont présentées. Enfin nous étudierons l'effet de l'hydrodynamique sur la thermique du sable utilisé en lit fluidisé.

IV.2. Considération fondamentale de la fluidisation

Le phénomène de fluidisation se produit quand un gaz ou un liquide est forcé à traverser verticalement (de bas en haut) un lit de particules. Les forces de traînée imposées par ce fluide supportent complètement le poids des particules, les mettant ainsi dans un état de flottaison [167]. De ce fait des régimes d'écoulement apparaissent. La description du comportement du mélange fluide-solide par des régimes d'écoulement est basée sur des caractéristiques particulières et ceci selon plusieurs paramètres qui sont entre autres : les propriétés physiques de la phase solide, la nature du fluide constituant la phase fluide et son débit, les dimensions de la colonne de fluidisation.

IV.2.1. Classification des particules

Le comportement hydrodynamique des particules lors de la fluidisation dépendra bien évidemment de plusieurs facteurs, entre autres, la nature et la taille des particules. Plusieurs classifications ont été citées dans la littérature. Les plus pertinentes sont celle de Geldart [168] qui fournit un outil de base pour examiner la qualité de la fluidisation, et celle de Sexana et Ganzha [169] qui est la plus récente. Geldart a classé les particules en quatre groupes clairement identifiables (A, B, C, D). Cette classification est basée sur la différence de densité entre les particules et le gaz ($\rho_p - \rho_f$) et le diamètre des particules d_p (cf. figure IV.1) [170]. En revanche la classification de Sexana et Ganzha est basée sur l'analyse de l'écoulement autour d'une particule.

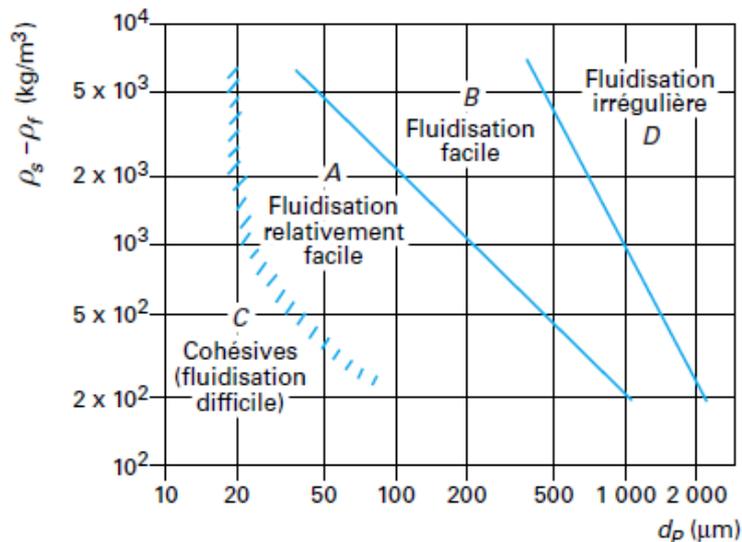


Figure IV.1. Classification des particules selon Geldart [170].

Classification de Geldart

Les différents groupes proposés par Geldart sont les suivants :

Groupe C : Ce groupe correspond aux particules cohésives (farine, ciment, talc). La fluidisation de telles particules qui ont une tendance à s'agglomérer est très difficile. En effet les forces interparticulaires sont plus importantes que les forces hydrodynamiques. Ces particules sont en générale de très faibles dimensions :

$$d_p < 30 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Groupe A : Cette catégorie regroupe les matériaux composés de particules de relativement petit diamètre, compris entre 20 et 100 μm , et de faible densité (masse volumique inférieure à 1400 kg/m^3). Ces particules sont facilement fluidisées et se caractérisent par une zone de fluidisation homogène avant l'apparition de petites zones de bulles.

Groupe B : Les matériaux regroupés dans cette classe présente la majeure partie des solides fluidisables. Ces particules se fluidisent relativement facilement et sont caractérisées par un bullage important. Ils s'agit des particules dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$1400 < \rho_p < 4000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$40 \cdot 10^{-6} < d_p < 600 \text{ (}\mu\text{m)}$$

On peut remarquer d'emblée (*cf. chapitre III*) que le sable de Oued-Souf rentre dans cette catégorie B.

Groupe D : Ce groupe rassemble les grosses particules et/ou les particules très denses (gravier, céréales). Ces solides sont difficiles à fluidiser et se caractérisent par un mouvement erratique donnant naissance à de grosses bulles explosives ou chemins préférentiels :

$$d_p > 600 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Classification de Sexana et Ganzha

Par contre, la classification de Sexana et Ganzha traduit les transitions en termes des valeurs de nombres adimensionnels caractérisant la fluidisation (nombre de Reynolds, nombre d'Archimède) (*cf. tableau IV.2*). Ces nombres seront détaillés dans la section (§2.2.3, page 84). Dans ce cas, les particules sont réparties en quatre groupes (*cf. figure IV.2*) :

Groupe I	$1 \leq \text{Re}_{\text{mf}} \leq 10 ;$	$3.35 \leq \text{Ar} \leq 21700$	Régime laminaire
Groupe IIA	$10 \leq \text{Re}_{\text{mf}} \leq 40 ;$	$21700 \leq \text{Ar} \leq 1,3 \cdot 10^5$	Régime transitoire
Groupe IIB	$40 \leq \text{Re}_{\text{mf}} \leq 200 ;$	$1,3 \cdot 10^5 \leq \text{Ar} \leq 1,3 \cdot 10^6$	Régime transitoire
Groupe III	$\text{Re}_{\text{mf}} > 200 ;$		Régime turbulent

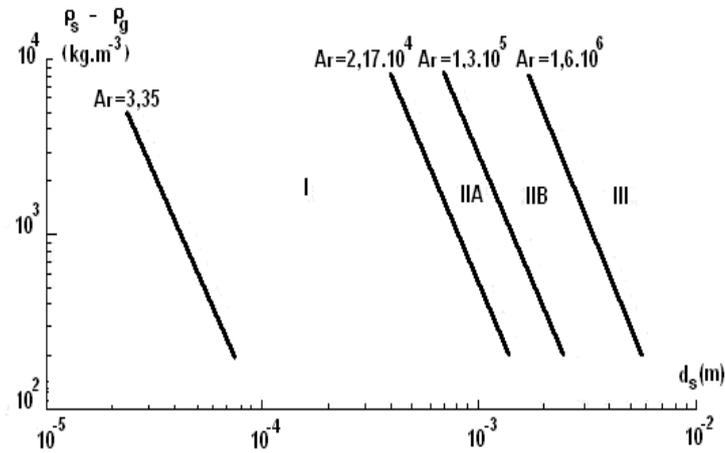


Figure IV.2. Classification de Sexana et Ganzha [169].

Signalons que les particules de sable de granulométrie moyenne de $162 \mu\text{m}$, que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude, appartiennent au groupe B de la classification de Geldart.

IV.2.2. Régimes de fluidisation

IV.2.2.1. Vitesse minimale de fluidisation et vitesse de transport

Le suivi des pertes de charge dans un lit de particules permet la caractérisation quantitative de la fluidisation et cela à travers deux paramètres qui sont la vitesse minimale de fluidisation et la vitesse de transport. La vitesse minimale de fluidisation (u_f) est la vitesse les à laquelle les particules bougent légèrement et se mettent en suspension. Cependant, à une vitesse égale à la vitesse de transport (u_t), les particules quittent le lit avec le courant du gaz. L'évolution de la perte de charge d'un lit de particules soumis à un flux de gaz ascendant est présentée sur la figure IV.3 [170].

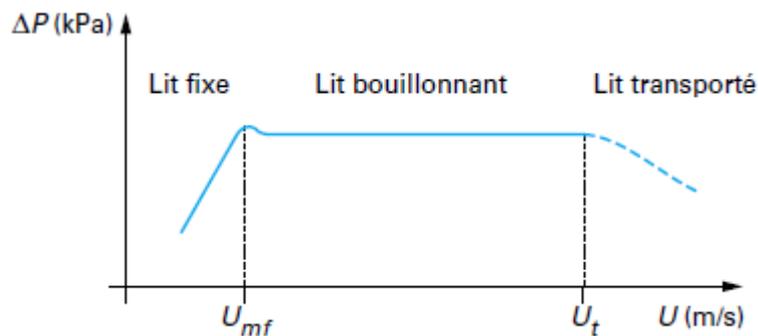


Figure IV.3. Variation de la perte de charge dans un lit de particules en fonction de la vitesse superficielle [170].

Le calcul de la vitesse minimale u_{mf} résulte du postulat qu'à cette vitesse, les pertes de charge sont exactement équilibrées par le poids surfacique du lit fluidisé. La perte de charge qui est donc un préalable du calcul de cette vitesse est obtenu par la corrélation semi empirique d'Ergun [78] :

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \times \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu_g \cdot u}{\phi_s \cdot d_p^2} + 1,75 \times \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{\phi_s \cdot d_p} \quad (\text{IV.1})$$

Où, ΔP est la perte de charge dans le lit (Pa), L est la hauteur du lit (m), u est la vitesse superficielle ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), ε est la porosité du lit de particules, μ_g est la viscosité dynamique du gaz ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), ρ_g ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), d_p est le diamètre des particules (m) et ϕ_s est le facteur de forme des particules, ce facteur est introduit pour prendre en compte des formes différentes de particules ($\phi_s = 1$ pour les particules sphériques).

On suppose donc qu'à la vitesse minimale de fluidisation, les pertes de charge sont équilibrées par le poids surfacique du lit. Nous avons donc en ramenant à la hauteur L du lit :

$$150 \times \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\mu_g \cdot u_{mf}}{\phi_s \cdot d_p^2} + 1,75 \times \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_{mf}^2}{\phi_s \cdot d_p} = \frac{m \cdot g}{S} \quad (\text{IV.2})$$

Où, m est la masse du lit de particules (kg), g est l'accélération de la pesanteur ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) et S est la section de passage (m^2). L'indice mf désigne l'état du lit au minimum de fluidisation.

Un résumé des différentes corrélations donnant la vitesse minimale de fluidisation est consigné dans le tableau IV.1, où Ga représente le nombre de Galilé (dit encore nombre d'Archimède) (cf. tableau IV.2) donné par la relation ci après :

$$Ga = \frac{d_g^3 \mu_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (\text{IV.3})$$

Dans le cas de faible nombre de Reynolds ($Re_{p,mf} < 20$), ce qui est notre cas, la corrélation de Tanguier et al. [171] est considérée pour notre travail.

Tableau IV.1. *Corrélation pour le calcul de la vitesse minimale de fluidisation*

Auteurs	Corrélations
Tanguier et al. [171]	$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{1441 \mu}$
Goroshko et al. [172]	$u_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left(\frac{Ga}{1400 + 5.2 \sqrt{Ga}} \right)$
Richardson et al. [173]	$u_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[(25.7^2 + 0.0365 Ga)^{0.5} - 25.7 \right]$
Thonglimp al. [174]	$u_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[7.169 \times 10^{-4} \cdot Ga^{0.98} \right]$
Leva et al. [175]	$u_{mf} = \frac{7.169 \times 10^4 d^{1.82} (\rho_p - \rho_g)^{0.94} g}{\rho_p^{0.06} \mu^{0.88}}$
Luca et al. [176]	$Re_{mf} = \sqrt{29.5^2 + 0.0357 Ar} - 29.5$
Bena et al. [177]	$u_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \frac{1.38 \times 10^{-3} Ga}{(Ga + 19)^{0.11}}$
Wu et Bayens. [178]	$Re_{mf} = 7.33 \times 10 \left[8.24 \log_{10} Ar - 8.81 \right]^{0.5}$
Coltters et Rivas. [179]	$u_{mf} = K \left[\frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1.23} \right]$
Hartman et Svoboda. [180]	$Re_{mf} = \left[\frac{(72.45(1 - \varepsilon_{mf}))^2}{A \varepsilon_{mf}} + \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s Ar}{A} \right]^{0.5} - \frac{72.45(1 - \varepsilon_{mf})}{A}$
Pillai et al. [181]	$u_{mf} = \frac{7.01 \times 10^{-4} d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu}$
Botterill et al. [182]	$Re_{mf} = \frac{Ar}{150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf}^3)}{\varepsilon_{mf}^3} + \left(\frac{1.75 \times Ar}{\varepsilon_{mf}^3} \right)^{0.5}}$
Doichev et al. [183]	$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left(1.08 \times 10^{-3} Ar^{0.947} \right)$
Kamura [184]	$Re_{mf} = \sqrt{33.95^2 + 0.0465 Ar} - 33.95$

La vitesse de transport u_t désigne la vitesse des particules lorsque celles-ci sont entraînées par le fluide et commencent à quitter la colonne de fluidisation. Elle correspond à la vitesse terminale de chute de la particule dite encore vitesse de Stokes. Elle est obtenue en écrivant l'égalité entre les forces de trainée exercée par le fluide sur la particule et le poids de cette dernière. Elle s'exprime [170] par la relation suivante :

$$u_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (\text{IV.4})$$

Où, C_d est le coefficient de trainée donné en fonction du nombre de Reynolds rapporté au diamètre de la particule (cf. *tableau IV.2*) :

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{\text{Re}_p} & \text{Re}_p < 0.4 \\ C_d = \frac{10}{\sqrt{\text{Re}_p}} & 0.4 < \text{Re}_p < 500 \\ C_d = 0.43 & 500 < \text{Re}_p < 20000 \end{cases}$$

IV.2.2.2. Etats de fluidisation

Pour des vitesses de fluide comprises entre les limites inférieure et supérieure utiles qui sont respectivement la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} et la vitesse de terminale de chute u_t , le lit fluidisé gaz-solide va présenter plusieurs régimes de fluidisation qui sera homogène ou hétérogène. Les différents états ou régimes de fluidisation que l'on peut rencontrer sont résumés ci-dessous (figure IV.4) :

- Lit fixe : à faible vitesse, le gaz passe à travers les espaces interstitiels présents entre les particules sans les faire déplacer. Les particules restent tassées au fond du réacteur.
- Régime particulaire : En augmentant progressivement le débit, l'écartement entre les particules, quelques vibrations et des mouvements locaux apparaissent. C'est ce que l'on appelle un « lit expansé ». Pour une vitesse encore plus élevée, les forces de trainée s'équilibrent avec le poids des particules. A ce moment, la vitesse minimale de fluidisation est atteinte, et le lit est à son état de « minimum de fluidisation ».
- Régime bouillonnant : pour une vitesse du fluide légèrement supérieure à U_{mf} , des bulles apparaissent. Ce régime se caractérise par la formation de bulles du fluide près de la grille de fluidisation qui coalescent, grossissent puis atteignent la surface et éclatent.

- Régime piston : au fur et à mesure que la vitesse du fluide augmente, et lorsque la taille des bulles approche le diamètre de la colonne de fluidisation, le régime piston est atteint. La surface apparente du lit entreprend des mouvements réguliers de montée et de descente en fonction de l'ascension des bulles.
- Régime turbulent : à des vitesses encore plus importantes, l'agitation des particules devient très violente et les bulles deviennent de forme irrégulière. La surface du lit se distingue difficilement et des passages préférentiels du fluide à travers des canaux dans le lit apparaissent.
- Régime de fluidisation rapide : ce régime est caractérisé par une surface du lit indiscernable et par l'entraînement, c.à.d le transport, des particules hors du lit. A cet état la vitesse du fluide a atteint la vitesse terminale de chute.
- Régime pneumatique : enfin, si on augmente la vitesse du fluide au-delà de la vitesse terminale de chute, on quitte le domaine de fluidisation pour atteindre celui du transport pneumatique et les particules quittent complètement le lit.

Le diagramme présenté dans la figure IV.5 reprend ces derniers régimes de fluidisation et la classification proposée par Geldart (1973).

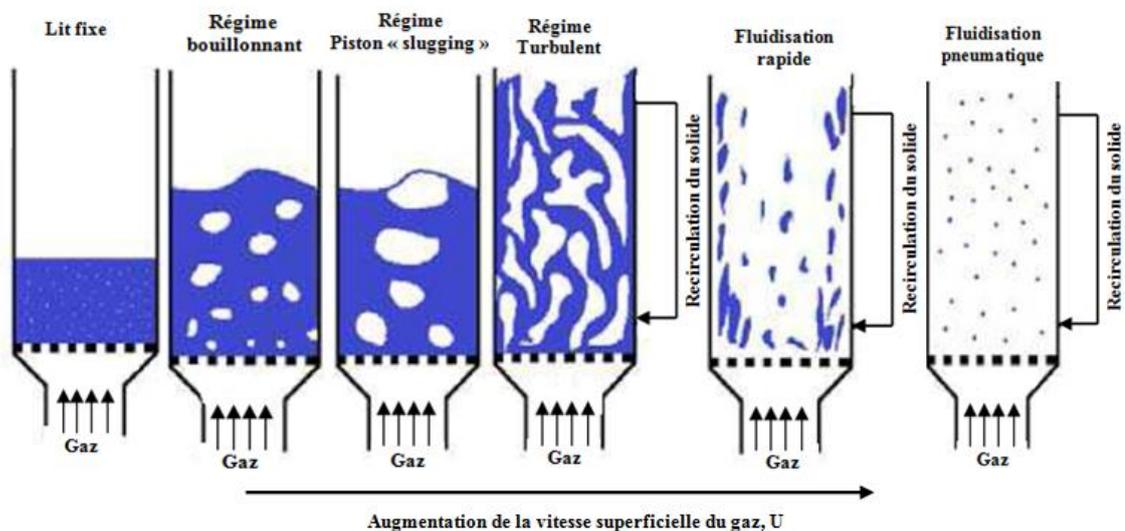


Figure IV.4. Principaux états de fluidisation d'un lit de particule solide soumis à un flux de gaz ascendant.

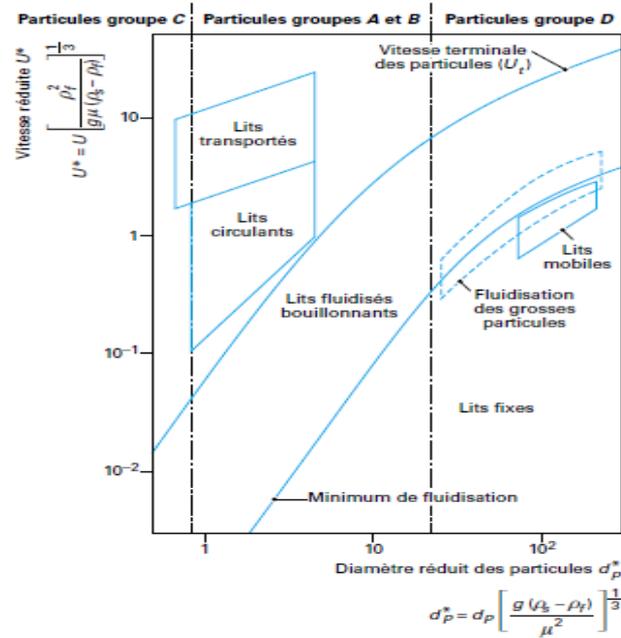


Figure IV.5. Diagramme de fluidisation de Reh [170].

IV.2.2.3. Nombres adimensionnels

L'existence de multiples régimes de fluidisation avec des structures d'écoulement distincts et qui dépendent de plusieurs paramètres, (masse volumique, viscosité, débit, propriétés des particules solides, concentration), conduit à l'utilisation de nombres adimensionnels qui regroupent ces paramètres pour l'étude du comportement des lits fluidisés. Le tableau IV.2 récapitule les nombres adimensionnels utilisés :

Tableau IV.2. Liste des nombres adimensionnels utilisés pour le calcul de la vitesse minimale de fluidisation

Nombre adimensionnel	Expression
Reynolds particulaire	$\text{Re} = \frac{\rho_g u d_p}{\mu_g}$
Reynolds du lit	$\text{Re}_{\text{lit}} = \frac{\rho_g U D}{\mu_g}$
Reynolds terminale	$\text{Re}_t = \frac{\rho_g u_t d_p}{\mu_g}$
Reynolds au minimum de fluidisation	$\text{Re}_{\text{mf}} = \frac{\rho_g U_{\text{mf}} d_p}{\mu_g}$
Archimède	$\text{Ar} = \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2}$
Zenz	$\text{Ze}_s = \frac{4}{3} \text{Ar}^{1/3}$ $\text{Ze}_v = \left(\frac{3 \text{Re}^3}{4 \text{Ar}} \right)^{1/3}$

IV.2.2.4. Transfert de chaleur dans un lit fluidisé

De nombreux processus industriels qui utilisent les lits fluidisés mettent en jeu des phénomènes qui génèrent des transferts thermiques. Les processus les plus courants sont ceux qui font intervenir des réactions chimiques dont la combustion du charbon. Le stockage thermique fait partie des nouvelles applications des lits fluidisés. Trois types de transfert de chaleur sont recensés dans les lits fluidisés [185] : entre particules, entre les particules et le gaz et enfin entre la colonne de fluidisation et l'extérieur. Le transfert de chaleur dans un lit fluidisé est la contribution des trois modes de transfert conductif, convectif, et radiatif. L'importance d'un mode par rapport à un autre dépend de paramètres opératoires du lit fluidisé, tels que la vitesse de fluidisation, la taille et la nature des particules, et la température de la suspension. En effet, l'expérience a montré que les processus mis en jeu dépendent du régime de fluidisation considéré.

Plusieurs auteurs ont proposé des diagrammes récapitulant les modes de transfert prépondérants. Fan et Zhu [186] ont proposé un diagramme qui présente l'effet de la

température du lit et de la taille des particules sur le mode de transfert de chaleur (*cf. figure IV.6*). Ainsi pour des particules de moins de $200\ \mu\text{m}$ et des applications à basse et à moyenne température, les transferts de chaleur se feront par convection autour des particules, cependant pour des applications à haute température, le transfert de chaleur par rayonnement est dominant.

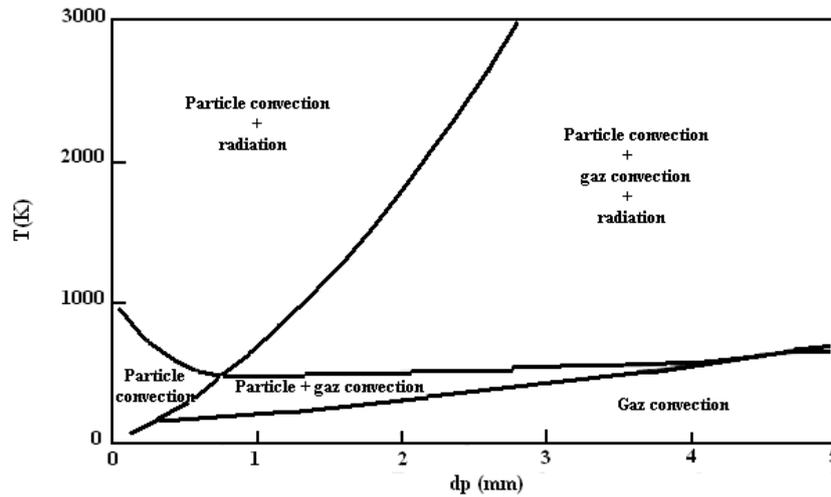


Figure IV.6. Mode de transfert de la chaleur en fonction du diamètre et de la température des particules [186].

Dans la littérature, on trouve de nombreuses corrélations exprimant le nombre de Nusselt qui permettent le calcul du transfert de chaleur dans un lit fluidisé. Le tableau IV.3 résume les principales corrélations trouvées dans la littérature.

Tableau IV.3. *Corrélation pour le calcul du nombre de Nusselt.*

Auteurs	Corrélation ¹
Ranz et Marshall [187] Lit fixe Lit fluidisé	$Nu = 2 + 1.88 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$ $Nu = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$
Nelson et Galloway [188] Lit fixe, lit fluidisé	$Nu = \frac{2\xi + \left\{ \frac{2\xi^2 (1 - \alpha_g)^{1/3}}{[1 - (1 - \alpha_g)^{1/3}]^2} - 2 \right\} \tanh \xi}{\frac{\xi}{1 - (1 - \alpha_g)^{1/3}} - \tanh \xi}$ $\xi = \left[\frac{1}{1 - (1 - \alpha_g)^{1/3}} - 1 \right] \frac{\varepsilon}{2} Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$
Cybulski et al. [189] Lit fixe	$Nu = 0.07 Re_p$
Gunn [190] Lit fixe, lit fluidisé	$Nu = (7 - 10\alpha_g + 50\alpha_g^2)(1 + 0.7 Re_p^{0.2} Pr^{1/3}) +$ $(1.33 - 2.4\alpha_g + 1.2\alpha_g^2) Re_p^{0.7} Pr^{1/3}$
Wakao et al. [191] Lit fixe	$Nu = 2 + 1.1 Re_p^{0.6} Pr^{1/3}$

¹ Dans toutes ces corrélations le Re_p désigne le nombre de Reynolds calculé à base du diamètre des particules solides

IV.3. Modélisation du procédé de fluidisation

IV.3.1. Présentation du dispositif expérimentale modélisé

Le dispositif expérimental (*figure IV.7*) est composé d'une colonne en verre qui représente le corps du réacteur, d'un diffuseur et d'une cuve en acier inoxydable. La colonne en verre, qui constitue le volume contenant les particules à fluidiser, a une hauteur de 850 mm pour un diamètre intérieur de 230 mm.

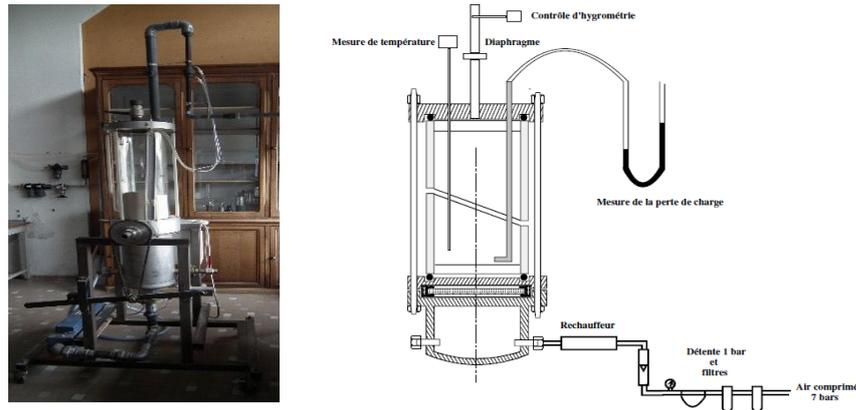


Figure IV.7. Dispositif expérimental du lit fluidisé étudié.

IV.3.2. Configuration géométrique

Le système physique considéré dans le cadre de cette étude est schématisé sur la figure IV.8. Il s'agit d'un lit fluidisé de configuration rectangulaire de largeur L et de hauteur H , dont la hauteur initiale de la phase solide (sable) est H_0 .

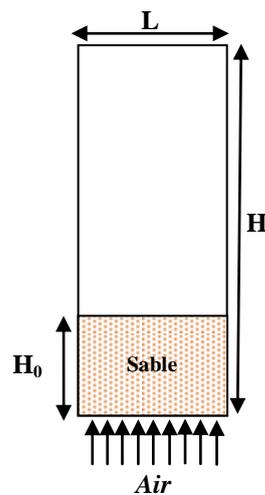


Figure IV.8. Schéma simplifié du lit fluidisé étudié.

IV.3.3. Mise en équations

L'approche Eulérienne adoptée dans le cadre de cette étude décrit le système comme une mixture à deux phases : phase continue (phase gazeuse) et phase dispersée (phase solide). L'écoulement des deux phases est incompressible et la vitesse du gaz à l'entrée du lit (bas du lit) est supposée uniforme. Le modèle Euler-Euler [192] est utilisé pour décrire le comportement hydrodynamique et thermique du lit fluidisé. La phase solide est supposée constituée de particules sphériques de diamètre uniforme. Les fluctuations des particules et les collisions inter-particules sont modélisées par la théorie cinétique des écoulements granulaires.

Les équations sont données dans le cas particulier d'un écoulement laminaire. Pour le cas turbulent le modèle est présenté en détail dans les travaux de M. Hamzehei [193]. Les équations moyennées qui régissent l'écoulement gaz-particule s'écrivent :

- Equation de la conservation de la masse :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) = 0 \quad (\text{IV.5})$$

α_k , ρ_k et u_k sont respectivement la fraction volumique, la densité et la vitesse de la phase k.

avec :

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (\text{IV.6})$$

$\alpha_k = 1$ ou 0, selon, $n = 2$ car on a deux phases, la phase continue (le fluide), et la phase dispersée (le solide). Nous noterons c pour la phase Continue et d pour la phase Dispersée.

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement (phase continue) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c \mathbf{u}_c) = -\alpha_c \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_c + \alpha_c \rho_c \mathbf{g} - \beta_{cd} (\mathbf{u}_c - \mathbf{u}_d) \quad (\text{IV.7})$$

P est la pression, g est l'accélération de la gravité, β_{cd} est le coefficient du transfert de quantité de mouvement. Il est donné par l'équation IV.12. τ_k est le tenseur de contrainte de la phase k.

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement (phase dispersée) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_d \mathbf{u}_d) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d \mathbf{u}_d \mathbf{u}_d) = -\alpha_d \nabla p - \nabla p_d + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_d + \alpha_d \rho_d \mathbf{g} - \beta_{cd} (\mathbf{u}_c - \mathbf{u}_d) \quad (\text{IV.8})$$

p_d est la pression de la phase dispersée, elle est exprimée par la relation IV.15.

- Equation de l'énergie (phase continue) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c H_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c H_c) = \nabla \cdot \alpha_c \lambda_c \nabla T_c - h_{dc} (T_d - T_c) \quad (\text{IV.9})$$

H_k , k_k , T_k , sont respectivement, l'enthalpie, la conductivité thermique et la température de la phase k. h_{dc} est le coefficient d'échange thermique entre les deux phases, donné par la relation IV.16.

- Equation de l'énergie (phase dispersée) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_d \rho_d H_d) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d u_d H_d) = \nabla \cdot \alpha_d \lambda_d \nabla T_d + h_{dc} (T_d - T_c) \quad (\text{IV.10})$$

L'effet de la fluctuation de l'énergie cinétique des particules solide est exprimé en par température granulaire (§II.5.2, page 59). Dans cette étude la forme algébrique de la température granulaire est considérée, et cela pour optimiser le coût et assurer l'exactitude de calcul. Elle est applicable dans les cas du lit fluidisé dense, où les termes convectif et diffusif peuvent être négligés sous la condition d'équilibre entre les termes production et dissipation de l'énergie granulaire :

$$0 = (-p_d \bar{I} + \bar{\tau}_c) : \nabla u_d - \gamma_d - 3\beta_{cd} \theta_d \quad (\text{IV.11})$$

γ_d est la dissipation de l'énergie par collision entre particules, θ_d est la température granulaire.

Le coefficient de transfert de quantité de mouvement entre les deux phases est calculé en utilisant le modèle de Syamlal O'Brien [192] est utilisé :

$$\beta_{cd} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_d \alpha_c \rho_c}{v_{rd}^2 d_d} C_D \left(\frac{Re_d}{v_{rd}} \right) |u_g - u_s| \quad (\text{IV.12})$$

C_D est le coefficient de traînée

Le tenseur de contraintes est exprimé par les équations (IV.13) et (IV.14) pour la phase continue et dispersée respectivement :

$$\bar{\tau}_c = \alpha_c \mu_c [\nabla u_c + (u_c)^T] - \frac{2}{3} \alpha_c \mu_c (\nabla \cdot u_c) \bar{I} \quad (\text{IV.13})$$

$$\bar{\tau}_d = \alpha_d \mu_d [\nabla u_d + (u_d)^T] - \frac{2}{3} \alpha_d (\lambda_d - \frac{2}{3} \mu_d) (\nabla \cdot u_d) \bar{I} \quad (\text{IV.14})$$

La pression de la phase dispersée est formulée par le modèle de Luna et al. [152] :

$$p_d = \alpha_d \rho_d [1 + 2(1 + e_d) \alpha_d g_0] \theta_d \quad (\text{IV.15})$$

e_s et g_0 sont respectivement le coefficient de restitution particule-particule, et le coefficient de distribution radiale.

Dans le travail présent, le coefficient de transfert de chaleur entre les deux phases est modélisé par la corrélation de Gunn [194] :

$$\square \text{Nu} = (7 - 10\alpha_c + 50\alpha_c^2) \left(1 + 0.7Re_d^{0.2}Pr^{1/3}\right) + (1.33 - 2.4\alpha_c + 1.2\alpha_c^2)Re_d^{0.7}Pr^{1/3} \quad (\text{IV.16})$$

IV.3.4. Conditions initiales et aux limites

Les conditions aux limites appliquées à ce cas d'étude sont présentées sur la figure. IV.9. Les conditions initiales imposées sont V_{0k} , T_{0k} , pour la phase k (continue et dispersée).

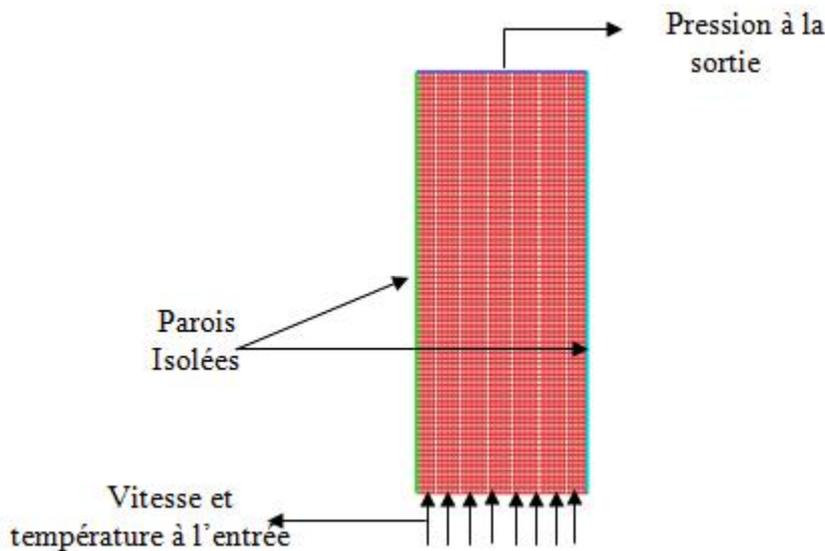


Figure IV.9. Maillage du domaine d'étude avec les conditions aux limites appliquées.

IV.4. Simulation numérique

IV.4.1. Description numérique

Les équations différentielles décrivant l'hydrodynamique et la thermique des lits fluidisés étudiés dans ce travail, sont résolues par la méthode des volumes finis en utilisant le logiciel industriel Ansys Fluent. La solution de la pression obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement de la phase gazeuse nécessite une équation de correction de la pression et de la vitesse après chaque itération. L'algorithme SIMPLE proposé par Patankar [195] est utilisé.

Les propriétés physiques des deux phases ainsi que les paramètres de simulation sont résumés dans les tableaux, IV.4 et IV.5.

Tableau IV.4. *Propriétés physiques des phases continue et dispersée*

	C_p	ρ	μ	D
	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	kg.m^{-3}	Pa.s	μm
Air	994	1,2	1.78E-05	-
Sable	830	2650	-	162

Tableau IV.5. *Paramètres de simulation utilisés*

Type d'écoulement	Laminaire
Modèle gaz-solide	Euler-Euler, avec la théorie cinétique
Conditions aux limites aux parois	Non glissement
Pas de temps	0.001 s
Critère de convergence	10^{-3}
Vitesse superficielle de l'air	0.25 m/s
Fraction volumique solide maximale	0.60
Température initiale de l'air	473 K
Température initiale du sable	300 K
Hauteur initiale du sable	40 cm

IV.4.2. La physique du phénomène de la fluidisation vue par la simulation

IV.4.2.1. Variation de la fraction volumique de la phase solide

La figure IV.10 présente la distribution que nous obtenons avec notre simulation de la fraction volumique de la phase solide (dispersée) dans le lit fluidisé dans un intervalle de temps allant de 0 s à 5 s, pour une vitesse superficielle de l'air de 0.25 m/s. Une expansion du lit et une variation de fraction du vide peuvent être remarquée. A $t = 0$ s, le lit fluidisé est à sa hauteur initiale H_0 , avec l'avancement du temps, la hauteur du lit augmente avec la formation de bulles d'air qui se déplacent le long du lit jusqu'à atteindre sa surface. Une perte de symétrie est observée dans le lit après $t = 2$ s, donnant lieu à la génération transitoire et chaotique des bulles d'air dans le lit fluidisé. Les petites bulles coalescent et donnent naissance à des bulles de plus grandes tailles. Ces dernières en entrant en contact entre elles et avec les parois du lit deviennent plus étendues.

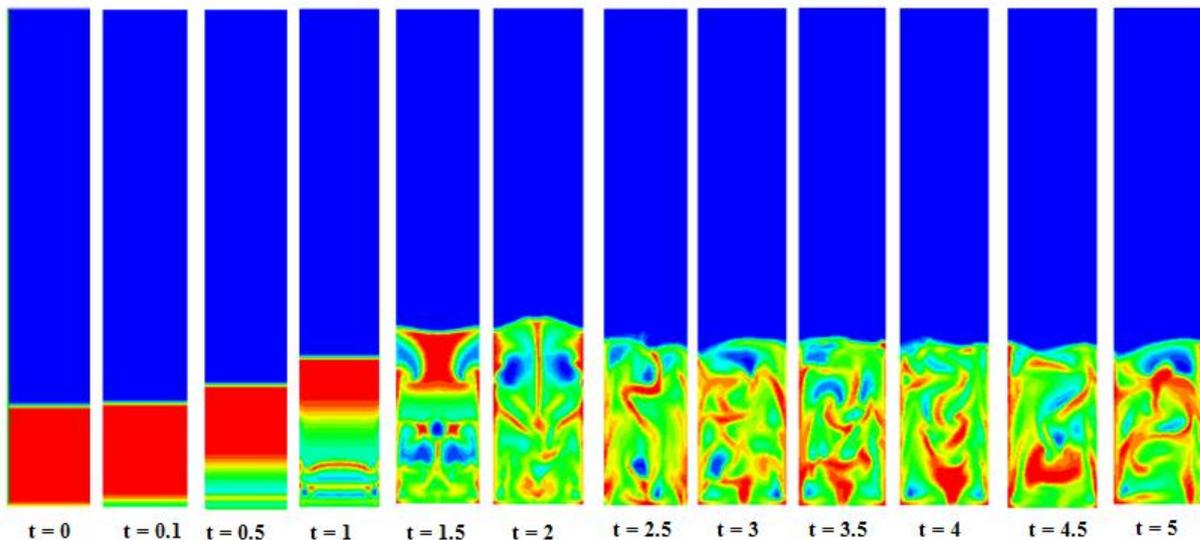


Figure IV.10. Distribution de la fraction volumique solide dans le lit fluidisé dans un intervalle de temps de 5 s.

La visualisation de la fluidisation par les essais expérimentaux présentés dans la figure IV.11, montre une similarité avec les résultats des simulations numériques obtenues. L'expérimentation indique la formation de bulles de petites tailles qui grandissent au fur et à mesure de son déplacement dans le lit. En effet, l'allongement des bulles est observé au voisinage des parois du lit, ce qui vérifie l'effet de celle-ci sur la taille des bulles d'air obtenu par simulation. Généralement les tailles des bulles prédites par la simulation sont similaires à celles observées expérimentalement. Les divergences remarquées sont dues à la conception du distributeur de l'air situé à la base du lit, et qui n'est pas pris en compte dans la simulation numérique du lit fluidisé étudié. Comme le montre les deux figures (*cf. figure IV.11, figure IV.12*), l'expansion du lit et la variation importante de la fraction volumique est observée avec ces particules solides de diamètre $d = 162 \mu\text{m}$. Selon l'évidence expérimentale, ce type de particules solides devrait exhiber un comportement de bouillonnement, dès que la vitesse superficielle du gaz de fluidisation excède les conditions au minimum de fluidisation. La symétrie est aussi observée dans les résultats expérimentaux (*cf. figure IV.12*) avec une légère asymétrie qui résulte du développement de certain modèle d'écoulement dans le lit fluidisé. Une asymétrie identique est observée dans d'autres travaux de simulation de lit fluidisé trouvés dans la littérature [196,197].



Figure IV.11. Photos des états de la fluidisation observés pendant les essais expérimentaux.

La variation de la fraction volumique de la phase solide (sable) dans la lit fluidisé, calculé à $H = 15$ cm, est illustrée dans la figure IV.12. Initialement, la fraction volumique de la phase solide est à sa valeur maximale (0.6), ce qui correspond avec le lit fixe. Avec l'avancement du temps une chute brusque est observée, est causée par le début de la fluidisation, phase durant laquelle le lit fluidisé, qui se trouve en état de lit dense, s'étend progressivement sous l'effet de l'écoulement de l'air à travers le lit et à partir de l'entrée. A partir de $t = 1$ s, l'apparition des bulles et leur passage dans le lit causent une élévation soudaine de la fraction volumique solide. Par la suite, des fluctuations sont remarquées et correspondent à des bulles d'air traversent le lit. Dès 2 s la phase continue (air) se disperse rapidement dans la phase dense (solide) du lit fluidisé. Après 10 s un certain équilibre dynamique macroscopique est atteint dans le lit.

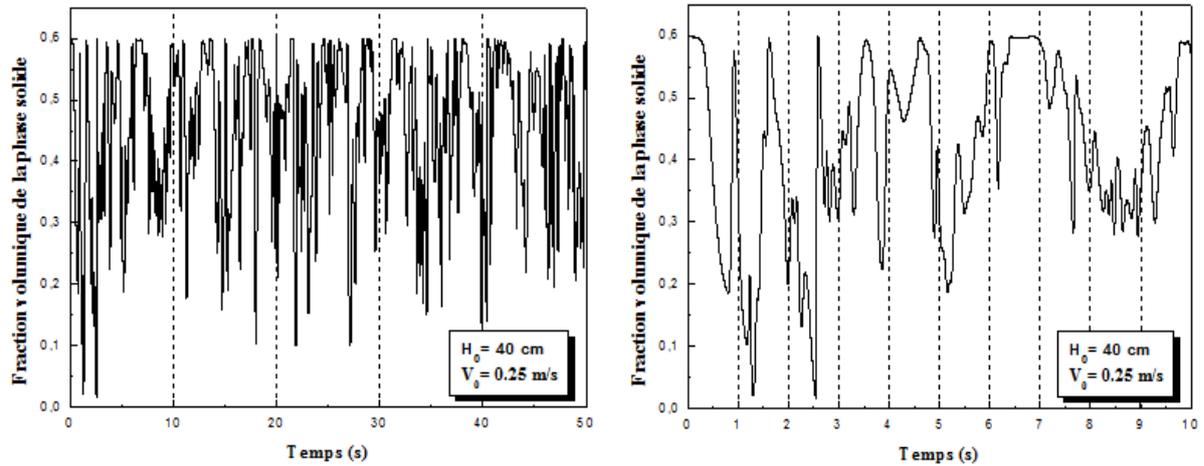


Figure IV.12. Variation de fraction volumique de la phase solide dans le lit fluidisé (calculé à $H = 15$ cm).

IV.4.2.2. Variation de la vitesse de la phase solide

La figure VI.13 présente les résultats de la simulation du champ de vitesse de la phase solide pour différents temps. Initialement les particules solides se déplacent verticalement. À $t = 1$ s, deux bulles se sont formées dans le lit et se déplacent jusqu'à la surface du lit. Les bulles explosent quand elles atteignent la surface du lit et les vecteurs de la vitesse des particules solides qui étaient en contact ou proches de la bulle changent de direction. De ce fait, le mouvement ascendant et descendant de ces particules solides dans le lit, conduit à un fort mélange entre phases et au sein de la phase solide elle-même. Ces mélangent contribuent à améliorer les phénomènes de transferts entre phases et à homogénéiser la température de la phase solide.

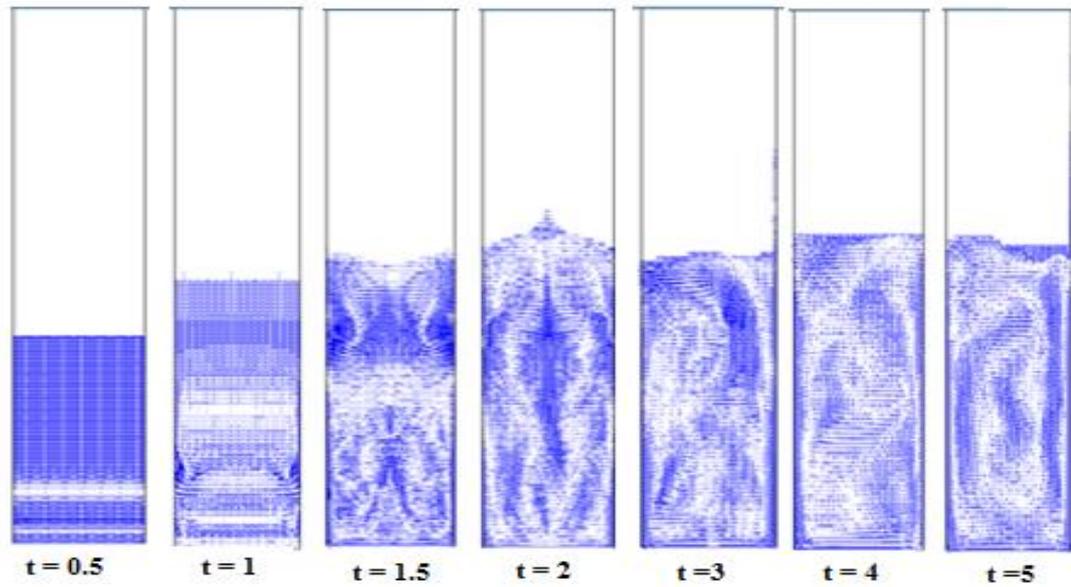


Figure IV.13. Présentation des vecteurs du champ de vitesse de la phase solide dans le lit fluidisé à différents temps.

Le profil de la vitesse moyenne de la phase solide à $t = 2$ s et pour deux niveaux de hauteur différents ($H = 30$ cm, $H = 40$ cm) est illustré dans la figure IV.14. Cette figure montre que les bulles se déplacent avec des vitesses plus importantes au voisinage de l'axe du lit pour atteindre la surface, et cela pour les deux hauteurs choisies. En revanche, la vitesse diminue au voisinage des parois. En outre, la vitesse augmente en avançant vers le haut du lit. La symétrie est bien mise en évidence par cette figure.

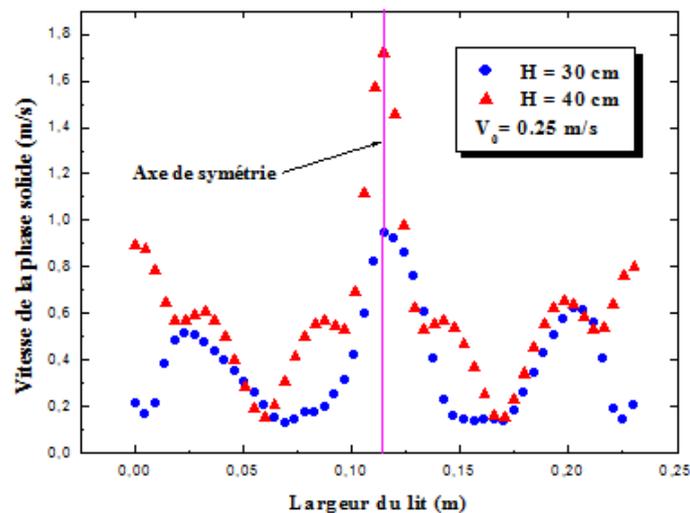


Figure IV.14. Profil de la vitesse de la phase solide dans le lit fluidisé à $t = 2$ s pour deux hauteurs différentes.

IV.4.2.3. Chute de pression dans le lit

La chute de pression dans le lit fluidisé à une hauteur $H = 15$ cm est schématisée dans la figure IV.15. Elle diminue significativement au début de la fluidisation et fluctue aux alentours d'une valeur proche d'un état stable après $t = 3$ s. Les fluctuations de la pression sont observées tant que les bulles d'air continuent à se désintégrer et à coalescer de manière transitoire dans le lit fluidisé.

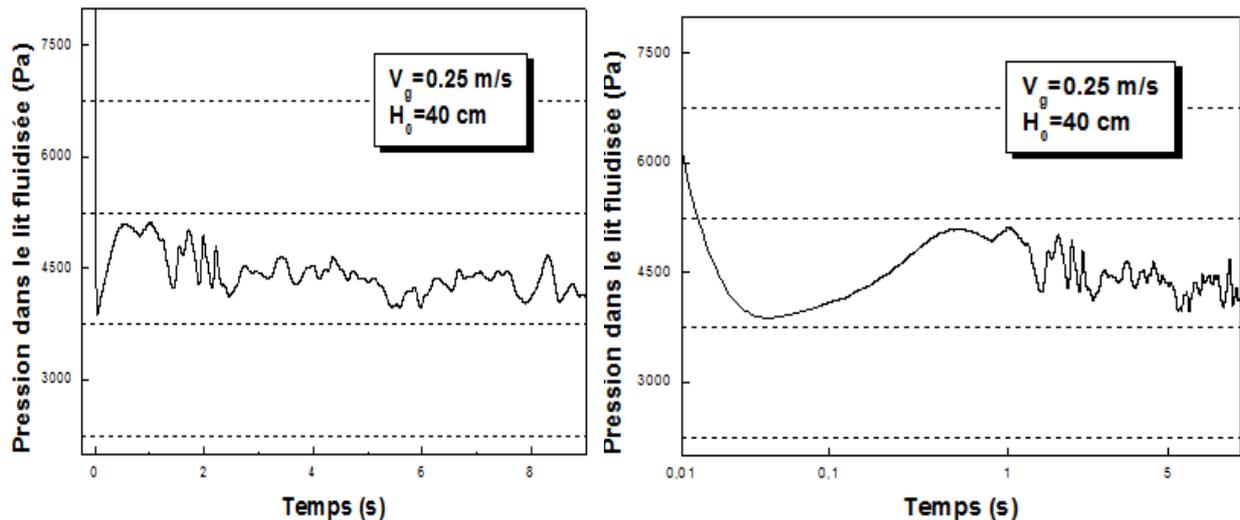


Figure IV.15. Variation de la pression dans le lit fluidisé (calculé à $H = 15$ cm).

IV.4.2.4. Profils de la température de la phase solide

la distribution de la température de la phase solide pour de différents temps de simulation est illustrée dans la figure IV.16. l'arrivée de l'air chaud en bas du lit mène à l'augmentation de la température des particules solides. Il est observé que pendant le stade précoce de la fluidisation (lit fluidisé dense), les particules solides en bas du lit restent les plus froides. Avec la formation des bulles les particules solides en contact avec ces bulles d'air chaud se réchauffent au fur à mesure que ces bulles montent dans le lit fluidisé. Progressivement et avec le changement de l'état de la fluidisation (régime chaotique) la température du lit augmente et devient plus uniforme.

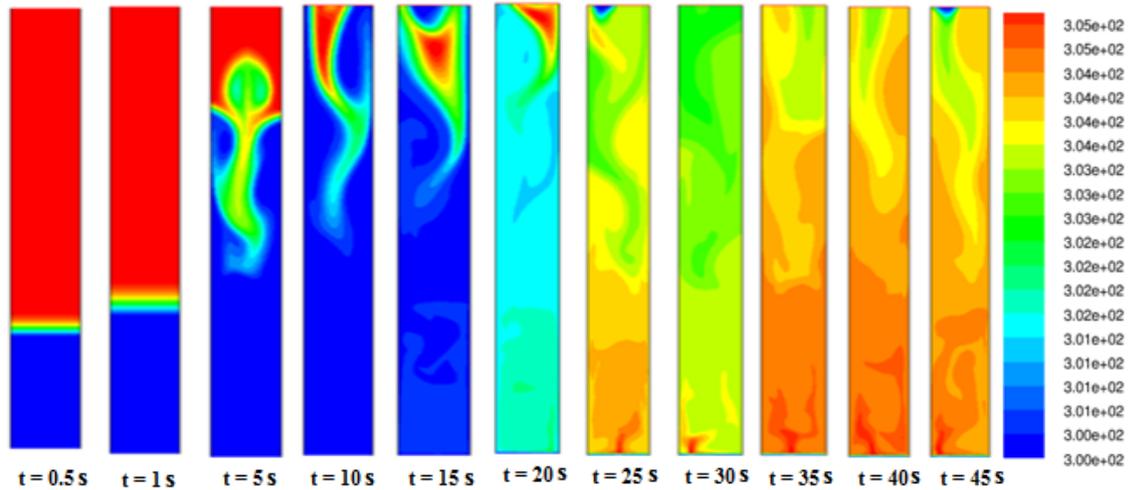


Figure IV.16. Contours de la température de la phase solide dans le lit fluidisé.

La figure IV.17 présente l'évolution de la température de la phase dispersée dans un intervalle de temps de 9 s calculé à $H = 15$ cm. La température de la phase solide (sable) augmente progressivement dans le temps, avec un gain de 1°C dans un intervalle de temps de 9 s. Les fluctuations observées sont dues au passage des bulles dans le lit permet à la fois le rafraîchissement et l'échauffement des particules du sable. Dans un intervalle de 60 s, le profil de la température moyenne de la phase solide est présenté dans la figure IV.18. La température de la phase solide augmente de 6°C .

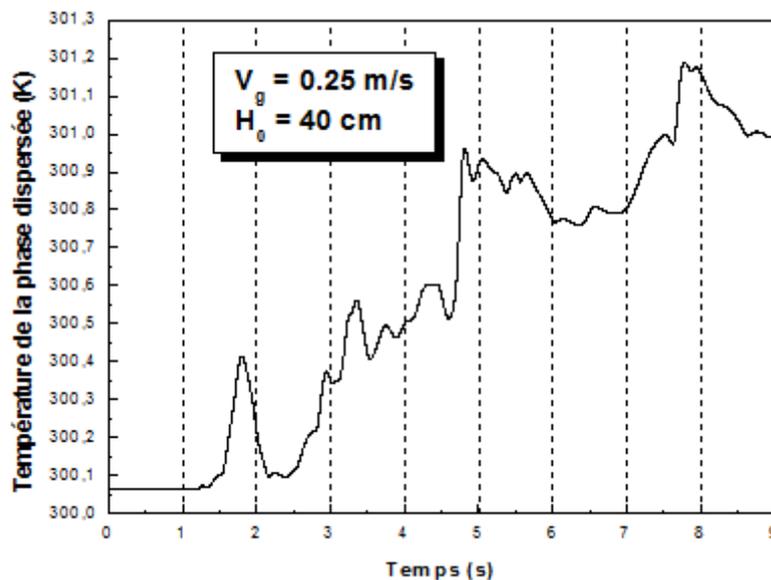


Figure IV.17. Evolution de la température de la phase dispersée dans le lit fluidisé dans un temps de 9 s (calculé à $H = 15$ cm).

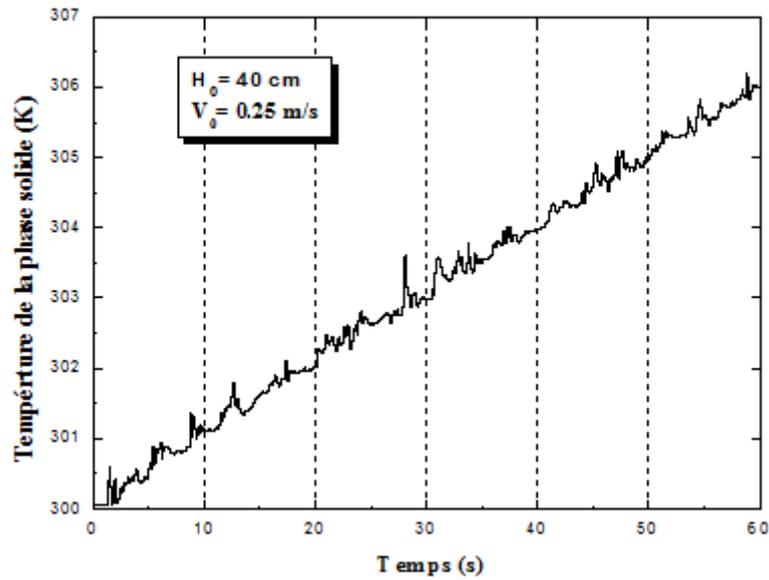


Figure IV.18. Evolution de la température de la phase dispersée dans le lit fluidisé dans un temps de 60 s (calculé à $H = 15 \text{ cm}$).

La variation de la température de la phase dispersée en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 2 \text{ s}$ pour deux hauteurs différentes (10 cm, 30 cm) est présentée dans la figure IV.19. Une symétrie par rapport à l'axe du lit fluidisé est observée à $t = 2 \text{ s}$, ce qui vérifie les résultats obtenus précédemment (*ch. figure IV.14*). Cette figure montre que les particules solides se situant à $H = 10 \text{ cm}$ sont plus froides que celles à $H = 30 \text{ cm}$. En revanche à cette dernière, les particules solides au voisinage de l'axe sont les plus chaudes.

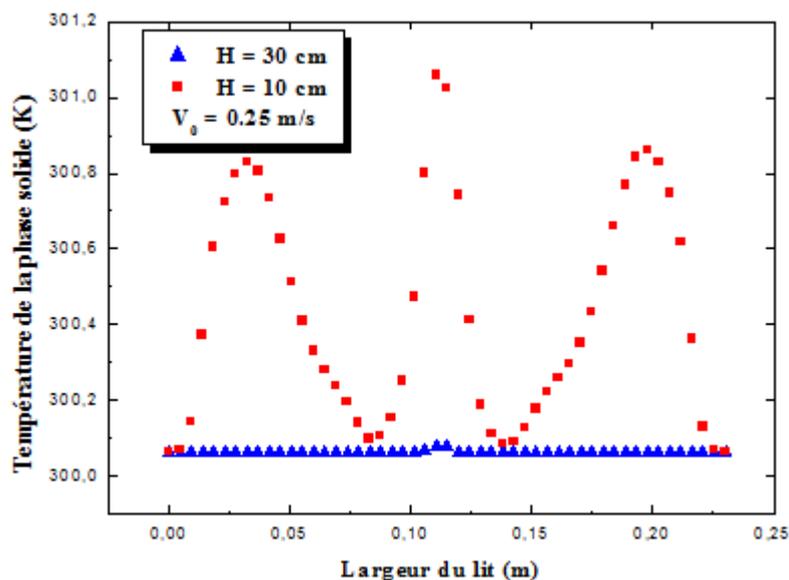


Figure IV.19. Variation de la température de la phase dispersée en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 2 \text{ s}$, pour deux hauteurs différentes.

La figure IV.20. présente la variation de la températures de la phase solide en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 45$ s, pour de différentes hauteurs. Il est observé qu' que la température est uniforme dans tout le lit. A ce moment là le régime chaotique est déjà atteint dans le lit fluidisé, favorisant ainsi l'échange de chaleur dans le lit fluidisé.

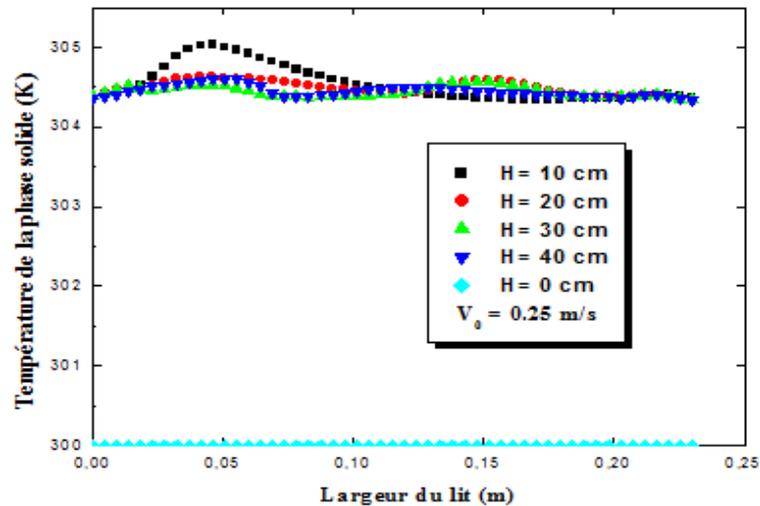


Figure IV.20. Variation de la température de la phase dispersée en fonction de l'abscisse transversale du lit fluidisé à $t = 45$ s.

IV.4.2.5. Effet de la vitesse superficielle de l'air

La figure IV.21. présente l'expansion et la formation des bulles dans le lit fluidisé pour de différentes vitesses superficielle de l'air ($V_{\text{air}} = 0.25-0.5-1$ m/s). Il est observé qu'avec l'augmentation progressive de la vitesse superficielle de l'air, la taille des bulles d'air dans le lit augmente. A des vitesses élevées, des groupes de petites bulles se libèrent du distributeur d'air et coalescent donnant naissance à des poches d'air. En se déplaçant dans le lit, ces poches d'air interagissent entre elles formant ainsi des poches de grandes tailles. Il est remarqué que la taille moyenne des bulles augmente avec la distance qui les sépare du distributeur d'air.

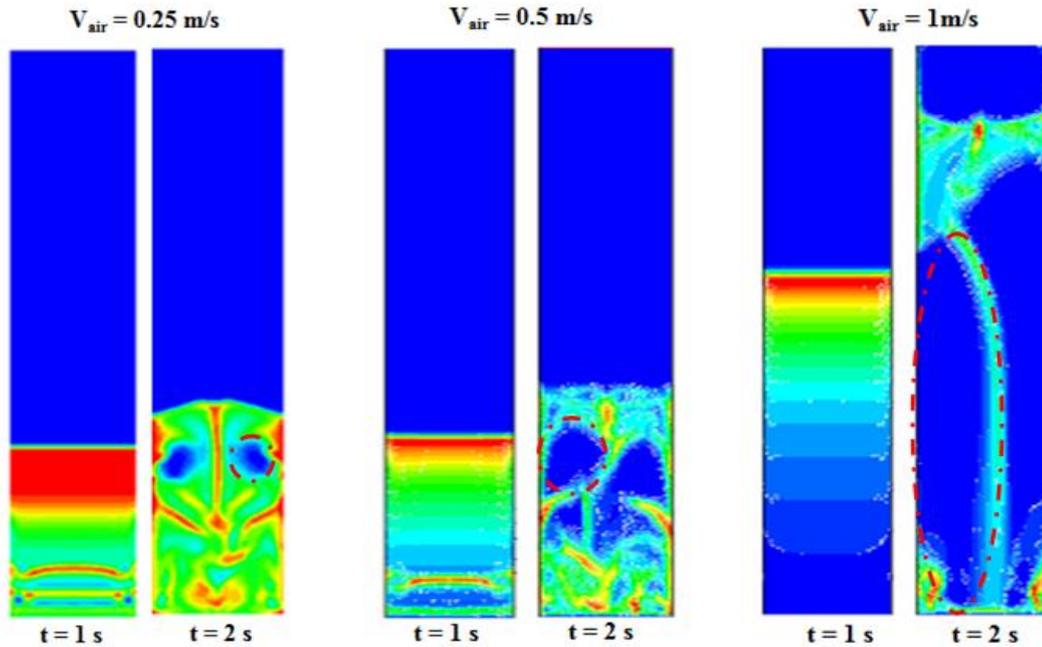


Figure IV.21. Effet de la vitesse superficielle de l'air sur la fluidisation.

IV.5. Extension vers l'échelle industrielle

IV.5.1. Présentations du dispositif industriel

Dans le but de caractériser et d'optimiser un dispositif à lit fluidisé à l'échelle industrielle (cf. figure IV.22), destiné au stockage de la chaleur, des tests de simulation ont été réalisés sur les différentes parties de ce dispositif, notamment le bac de fluidisation et l'échangeur de chaleur. Le milieu de stockage utilisé dans ce lit fluidisé est le sable. Le principe de fonctionnement du dispositif est illustré dans la figure IV.23.



Figure IV.22. Description de l'installation du dispositif à lit fluidisé (Lermab de Longwy).

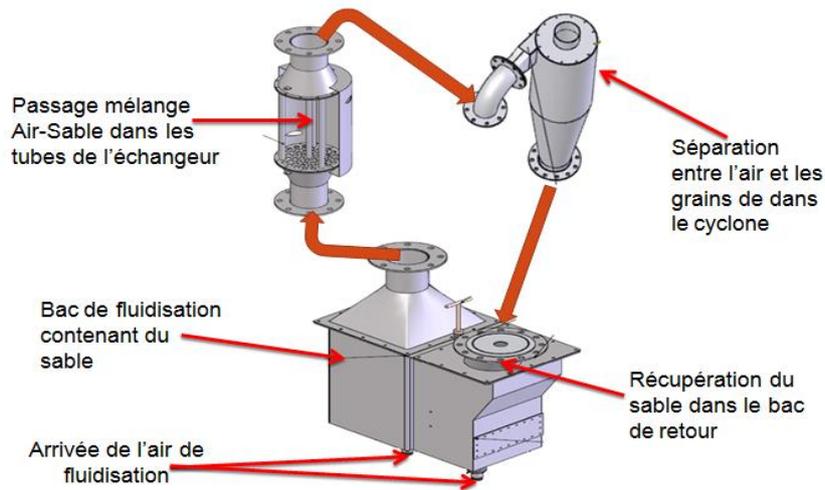


Figure IV.23. Principe de fonctionnement du dispositif à lit fluidisé (Lermab de Longwy).

IV.5.1. Configurations géométriques

Avant d'arriver à la configuration finale du lit fluidisé de différentes configuration géométrique ont été testées. Les conditions de simulation sont identiques pour toutes les configurations considérées.

➤ Configuration avec un jet uniforme :

La configuration du lit fluidisé étudié est présentée par la figure IV.24.

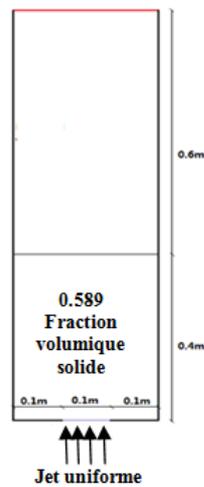


Figure IV.24. Schéma d'un lit fluidisé avec un jet uniforme centré.

Afin de testé l'effet du maillage sur les résultats de la simulation, deux maillage sont considérés (maillage 1 : 0.005×0.00416 , maillage 2 : 0.005×0.00625). Nous avons constaté que les résultats sont peu affectés par le maillage (cf. figure IV.25). De ce fait nous considérons un seul maillage pour le reste des tests. Les détails des résultats obtenus sont présenté dans l'annexe B.

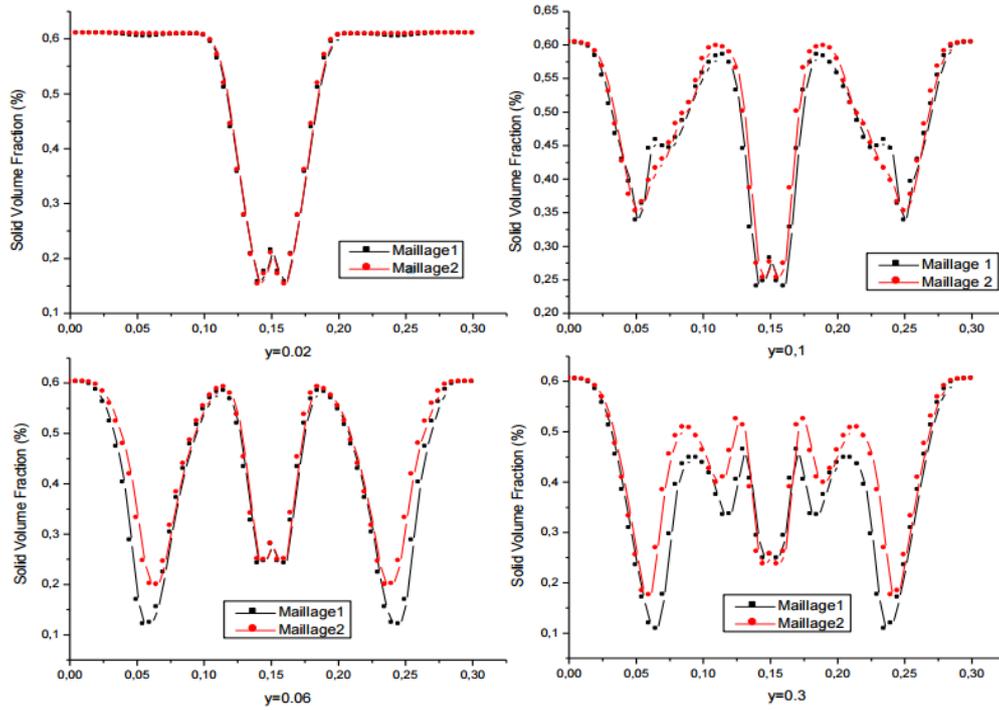


Figure IV.25. Effet du maillage sur la fraction volumique de la phase solide en fonction de la position dans le lit.

➤ Configurations avec des formes différentes du lit fluidisé :

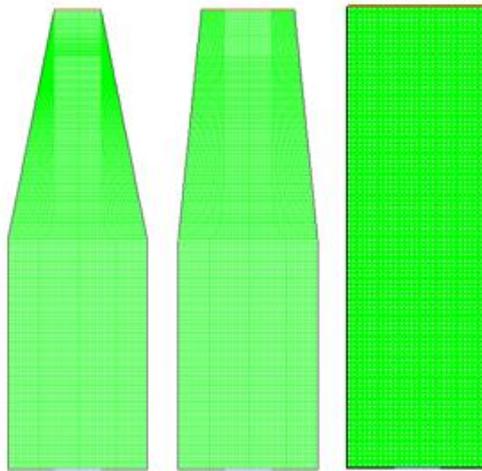


Figure IV.26. Schémas du domaine de simulation pour les différentes géométries du lit fluidisé.

➤ *Configuration convergent/divergent avec des tubes :*

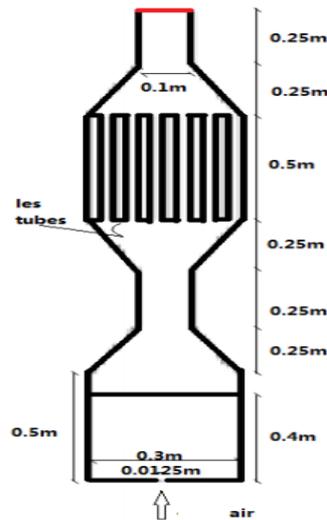


Figure IV.27. Schéma du lit fluidisé avec une configuration convergent/divergent avec des tubes.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les phénomènes hydrodynamiques et thermiques dans un lit fluidisé ainsi que leurs modélisations. A l'issue de l'étude bibliographique, un modèle reposant sur la physique des milieux continus (modèle Euler-Euler), combiné avec la théorie cinétique des écoulements granulaires (température granulaire) a été adopté pour modéliser la phase continue (air) et la phase dispersée (solide).

En premier lieu une simulation numérique en 2D d'un lit fluidisé rectangulaire utilisant le sable comme phase solide a été réalisée. L'analyse du comportement hydrodynamique du lit à travers les contours de la fraction volumique de la phase solide a permis l'identification des différents régimes de fluidisation. Une perte de symétrie est observée après un temps de 2 s de la fluidisation. De ce fait, un régime chaotique est atteint. La visualisation des contours de température a montré une forte dépendance entre la thermique et l'hydrodynamique du lit fluidisé. Une uniformité de la température du lit fluidisé est obtenue en atteignant le régime chaotique. Une confrontation qualitative entre les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux réalisés sur un dispositif à lit fluidisé à l'échelle de laboratoire présente un accord acceptable. L'effet de la vitesse superficielle de l'air sur l'hydrodynamique du lit est investigué. Cette vitesse représente un paramètre clé pour la caractérisation d'un lit fluidisé.

En suite, et afin de caractériser un dispositif à lit fluidisé à l'échelle industrielle, des configurations géométriques différentes ont été testées.

Il a été conclu que l'uniformité de la température qu'offre la technique du lit fluidisé, ce qui est favorable pour le stockage de la chaleur, est obtenue pour des régimes de fluidisation chaotiques.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse constituent une contribution à l'étude de faisabilité d'un système de stockage thermique destiné à stocker l'énergie solaire, en utilisant un matériau économique et écologique, qui est le sable. Ce dernier est également abondant dans les régions arides et semi arides. Cette étude de faisabilité a été entreprise à travers une analyse du comportement thermique du sable, et cela via une étude expérimentale et numérique.

Dans un premier temps nous avons réalisé une étude détaillée sur les systèmes de stockage thermiques à base de matériaux solides, dont les résultats des travaux sont largement publiés, comme nous avons consacré une partie dans cette étude aux matériaux granulaires solides. A l'issue de cette investigation, nous avons constaté que le sable présente des avantages qui favorisent son utilisation comme matériau de stockage thermique (coût, disponibilité et caractéristiques thermo-physiques).

Par la suite, deux procédés ont été choisis pour mettre en œuvre le stockage thermique dans le sable. Il s'agit des procédés, du lit fixe et du lit fluidisé.

Pour la technique du lit fixe, nous avons procédé à la conception d'un système de stockage composé d'un capteur solaire à air et d'une cuve de stockage de forme cubique, avec des tubes cylindriques faisant circuler le fluide caloporteur (air), les tubes sont intégrés dans la structure de la cuve qui contient le sable. En premier lieu, une étude de caractérisation du sable utilisé dans le cadre de ce travail a été réalisée. Cette caractérisation a permis de déterminer les propriétés thermo-physiques du sable (granulométrie, capacité calorifique, densité). Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer les profils de la température dans le lit de sable, de l'énergie stockée dans le lit ainsi que son rendement, respectivement pour trois configurations des tubes de chargement (9, 12 et 16 tubes).

Nous avons également réalisé une modélisation numérique en 2D puis 3D pour la même configuration considérée dans la partie expérimentale. Dans le cas de la modélisation en 2D, un modèle simplifié basé sur le fait, que le sable se comporte comme un milieu solide a été adopté. Cette hypothèse est validée par plusieurs travaux. De ce fait, le mode de transfert de chaleur considéré dans ce cas est la conduction. Par contre, pour la modélisation en 3D, un modèle couplé qui tient compte de transfert de chaleur dans le sable ainsi que de l'écoulement

et du transfert de chaleur dans le fluide caloporteur a été considéré. Les résultats obtenus exprimés en termes de température du sable, d'énergie stockée et du rendement instantané du lit, ont permis de déterminer le temps de chargement; temps pendant lequel le maximum d'énergie est stockée. En outre, le système de stockage étudié exhibe une inertie thermique importante. Ces résultats ont montré l'intérêt de l'utilisation du sable, comme matériau à la fois écologique et économique dans des applications de stockage thermique, notamment des applications solaires.

La deuxième technique choisie pour mettre en œuvre le stockage thermique dans le sable, est la technique du lit fluidisé. Celle-ci, montre un comportement hydrodynamique avec différents régimes, qui influe directement sur le comportement thermique. Dans ce cadre, une modélisation en 2D d'un réacteur cylindrique basée sur la méthode Euler-Euler laminaire a été réalisée. En parallèle une étude expérimentale réalisée sur un dispositif ayant les mêmes dimensions que la configuration étudiée numériquement a permis une comparaison qualitative.

Les résultats de la simulation ont permis de visualiser les différents régimes de fluidisation dans le lit de sable, et cela à travers le profil de la fraction volumique de la phase solide (sable) ainsi que sa vitesse. A partir de ces résultats, nous avons constaté que le lit montre un comportement symétrique jusqu'à un moment donné (2 s), après lequel une perte de symétrie apparaît et un régime chaotique est atteint. L'effet de l'hydrodynamique sur la thermique du lit fluidisé est schématisé par le profil de la température de la phase solide, cette dernière montre des fluctuations qui reflètent les différents régimes de fluidisation qui apparaissent dans le lit. Une étude paramétrique a montré l'effet de certains paramètres opératoires tel que, la vitesse superficielle de la phase fluide (air) et la hauteur du lit, sur l'hydrodynamique et notamment sur la thermique.

Ce travail de thèse qui a aboutit au développement et à une démonstration de faisabilité d'un système de stockage thermique utilisant le sable comme milieu de stockage, ouvre également la voie sur de nombreuses perspectives :

- ✓ Etudier d'autres configurations géométriques de l'échangeur de chaleur intégré dans le lit fixe (serpentin, cylindroïde...etc.) qui implique plusieurs autres phénomènes physiques.
- ✓ Exploitation des résultats obtenus pour étudier un dispositif à lit fluidisé à l'échelle industrielle installé récemment dans les locaux du laboratoire LERMAB de Logwy, avec une géométrie complexe et cela dans le but de l'optimiser.

- ✓ Envisager une application à la biomasse par une étude exégétique du système.
- ✓ Exploiter d'autres formulations analytiques afin d'améliorer les modèles théoriques existants.

Ce travail incite alors une dynamique de coopération en France avec l'université de Lorraine (équipe de la section Efficacité Energétique du LERMAB à l'IUT de Longwy), avec l'ENS de Cachan (laboratoire de mécanique et technologie), mais aussi à l'échelle internationale (l'université de Queensland et l'université des Comores). La collaboration avec ces différents chercheurs a permis de participer avec des travaux communs à des congrès en France (Ecobat-2013, SFT-2013) et Internationaux (Cifem-2014 au Comores, COFMER-2014 à Rabat au Maroc, ICOME-2015 à Tetouan au Maroc, Cifq-2015 à Sherbrooke au Canada)

Références

- [1] (12/10/2015). Statistical Review [Online]. Available: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [2] (12/10/2015). Preface de l'Aperçu général du GIEC. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/French/ipcc_90_92_assessments_far_overview_fr.pdf
- [3] I. Dincer and M. Rosen, "Thermal energy storage: systems and applications," 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 84-141.
- [4] (12/10/2015). Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité. [Online] <http://www.ifpennergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite#4>.
- [5] F. Bai and C. Xu, "Performance analysis of a two-stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 2764-2771, 2011.
- [6] J. Xu, R. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage," *Solar energy*, vol. 103, pp. 610-638, 2014.
- [7] A. Fernandez, M. Martínez, M. Segarra, I. Martorell, and L. Cabeza, "Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, pp. 1723-1729, 2010.
- [8] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L. F. Cabeza, "State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 56-72, 2010.
- [9] M. E. Navarro, M. Martínez, A. Gil, A. Fernández, L. F. Cabeza, R. Olives, and X. Py, "Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 107, pp. 131-135, 2012.
- [10] A. El-Sebaili, S. Yaghmour, F. Al-Hazmi, A. S. Faidah, F. Al-Marzouki, and A. Al-Ghamdi, "Active single basin solar still with a sensible storage medium," *Desalination*, vol. 249, pp. 699-706, 2009.
- [11] X. Py, "Stockage de l'énergie thermique," *Lab. Procédés, matériaux et énergie solaire (PROMES, CNRS), Univ. de Perpignan Via Domitia, Tech. Rep. Fév. 2013.*

- [12] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [13] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1139-1153, 1998.
- [14] G. P. Henze, and M. Krarti, "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory," University of Nebraska ,Lincoln, University of Colorado, Boulder, Tech. Rep. Ap. 2003.
- [15] J. C. Hadorn et al. , "Thermal energy storage for solar and low energy buildings, State of the art by IEA Solar Heating and Cooling Task 32," Typeset by Servei de Publicacions (UdL). ISBN 84-8409-877-X, 2005.
- [16] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [17] L. F. Cabeza, "Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications," Woodhead Publishing, 2014.
- [18] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes ," vol. 3, Wiley, New York, 1980.
- [19] D. Laing, W.-D. Steinmann, P. Viebahn, F. Gräter, and C. Bahl, "Economic analysis and life cycle assessment of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 132, p. 041013, 2010.
- [20] D. Laing, W.-D. Steinmann, R. Tamme, and C. Richter, "Solid media thermal storage for parabolic trough power plants," *Solar energy*, vol. 80, pp. 1283-1289, 2006.
- [21] F. Kuznik, J. Virgone, and J.-J. Roux, "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation," *Energy and buildings*, vol. 40, pp. 148-156, 2008.
- [22] J. Fukai, Y. Hamada, Y. Morozumi, and O. Miyatake, "Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: experiments and modeling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 4513-4525, 2003.
- [23] M. Ibanez, A. Lazaro, B. Zalba, and L. F. Cabeza, "An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 1796-1807, 2005.

- [24] H. H. Öztürk, "Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating," *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 1523-1542, 2005.
- [25] K. E. N'Tsoukpoe, H. Liu, N. Le Pierrès, and L. Luo, "A review on long-term sorption solar energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2385-2396, 2009.
- [26] M. Azpiazu, J. Morquillas, and A. Vazquez, "Heat recovery from a thermal energy storage based on the Ca (OH) 2/CaO cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 733-741, 2003.
- [27] I. Fujii, K. Tsuchiya, Y. Shikakura, and M. Murthy, "Consideration on thermal decomposition of calcium hydroxide pellets for energy storage," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 111, pp. 245-250, 1989.
- [28] M. Scheffler, "Investigation of the Feasibility of a Parabolic Trough Driven Solar Energy Storage System Using Ammonia," Ph.D. dissertation, Stuttgart University, 2001.
- [29] K. Lovegrove, A. Luzzi, and H. Kreetz, "Solar Ammonia Energy Storage—Finishing the Acre Project," in *Annual Conf. of the Australian & New Zealand Solar Energy Society (ANZSES)*, 1999.
- [30] R. Tamme, T. Bauer, and E. Hahne, "Heat storage media," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.
- [31] Y. KATO, "Possibility of chemical heat storage in thermal energy transportation market," in *First Workshop of IEA/ECES Annex 18, Japan*, vol. 1, 2006.
- [32] D. J. Matyas, T. Ohji, X. Liu, et al., "Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies II," *Lab.Oak Ridge National (ORNL), Tech. Rep.*, 2013.
- [33] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo, "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 327-349, 2013.
- [34] S. Relloso and J. Lata, "Molten salt thermal storage: a proven solution to increase plant dispatchability," *Experience in Gemasolar Tower Plant, Solar Paces, Granada, Spain*, 2011.
- [35] D. Fernandes, F. Pitié, G. Cáceres, and J. Baeyens, "Thermal energy storage: How previous findings determine current research priorities," *Energy*, vol. 39, pp. 246-257, 2012.

- [36] K. Hollands and M. Lightstone, "A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems," *Solar energy*, vol. 43, pp. 97-105, 1989.
- [37] S. Kalaiselvam and R. Parameshwaran, "Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications," Elsevier, 2014.
- [38] E. G. Kovach, "Thermal Energy Storage: The Report of a NATO Science Committee Conference Held at Turnberry, Scotland, 1st-5th March, 1976," Pergamon Press, 2013.
- [39] (10/03/2015). Thermal energy storage, Technology Brief. [Online]. Available: <http://www.irena.org/Publications>.
- [40] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems-characteristics and comparison," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.
- [41] N. Siegel, M. Gross, C. Ho, T. Phan, and J. Yuan, "Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1015-1023, 2014.
- [42] M. Hadjieva, R. Stoykov, and T. Filipova, "Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage," *Renewable Energy*, vol. 19, pp. 111-115, 2000.
- [43] T. E. Schumann, "Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 208, pp. 405-416, 1929.
- [44] A. Klinkenberg, "Numerical evaluation of equations describing transient heat and mass transfer in packed solids," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1992-1994, 1948.
- [45] E. Ledoux, "Dynamic Cooling of Adsorbent Beds", *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1970-1977, 1948.
- [46] F. W. Larsen, "Rapid calculation of temperature in a regenerative heat exchanger having arbitrary initial solid and entering fluid temperatures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 10, pp. 149-168, 1967.
- [47] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar energy thermal processes," 4 th. ed., John Wiley & Sons, Canada, 2013.
- [48] S. Mumma and W. Marvin, "A method of simulating the performance of a pebble bed thermal energy storage and recovery system," in *American Society of Mechanical Engineers and American Institute of Chemical Engineers, Heat Transfer Conference*, St. Louis, Mo., ASME 6 pp.78-86, Aug. 9-11, 1976.

- [49] P. Hughes, S. Klein, and D. Close, "Packed bed thermal storage models for solar air heating and cooling systems," *Journal of Heat Transfer*, vol. 98, pp. 336-338, 1976.
- [50] S. Klein, "Mathematical models at thermal storage," in *Proc. Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, 1975, pp. 119.
- [51] E. Sowell and R. Curry, "A convolution model of rock bed thermal storage units," *Solar energy*, vol. 24, pp. 441-449, 1980.
- [52] A. Saez and B. McCoy, "Dynamic response of a packed bed thermal storage system-a model for solar air heating," *Solar energy*, vol. 29, pp. 201-206, 1982.
- [53] A. R. Balakrishnan and D. C. Pei, "Heat Transfer in Gas-Solid Packed Bed Systems. 1. A Critical Review," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 18, pp. 30-40, 1979.
- [54] B. Pomeroy, "Thermal energy storage in a packed bed of iron spheres with liquid sodium coolant," *Solar energy*, vol. 23, pp. 513-515, 1979.
- [55] O. E. Ataer, "Storage of thermal energy," in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 2008.
- [56] H. E. Fath, "Technical assessment of solar thermal energy storage technologies," *Renewable Energy*, vol. 14, pp. 35-40, 1998.
- [57] C. Wyman, J. Castle, and F. Kreith, "A review of collector and energy storage technology for intermediate temperature applications," *Solar energy*, vol. 24, pp. 517-540, 1980.
- [58] S. Aly and A. El-Sharkawy, "Effect of storage medium on thermal properties of packed beds," *Heat Recovery Systems and CHP*, vol. 10, pp. 509-517, 1990.
- [59] G. Zhou and J. He, "Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes," *Applied Energy*, vol. 138, pp. 648-660, 2015.
- [60] N. Mahfoudi, A. Moumami, and M. E. Ganaoui, "Sand as a Heat Storage Media for a Solar Application: Simulation Results," *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 214-220.
- [61] N. Mahfoudi, A. Khachkouch, A. Moumami, B. Benhaoua, and M. El ganaoui, "Design and characterization of a portable heat storage facility," *Mechanics & Industry*, vol. 16, pp. 411, 2015.
- [62] D. Laing and S. Zunft, "4 - Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage (TES) systems," in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, L. F. Cabeza, Ed., Woodhead Publishing, 2015, pp. 65-86.

- [63] D. Crandall and E. Thacher, "Segmented thermal storage," *Solar energy*, vol. 77, pp. 435-440, 2004.
- [64] C. Choudhury, P. Chauhan, and H. Garg, "Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy," *Solar energy*, vol. 55, pp. 29-37, 1995.
- [65] O. Maaliou and B. McCoy, "Optimization of thermal energy storage in packed columns," *Solar energy*, vol. 34, pp. 35-41, 1985.
- [66] P. Chauhan, C. Choudhury, and H. Garg, "Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air-heater-cum-rockbed storage," *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, pp. 475-486, 1996.
- [67] B. Amer, M. Hossain, and K. Gottschalk, "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 813-820, 2010.
- [68] G. Tiwari, P. Bhatia, A. Singh, and R. Goyal, "Analytical studies of crop drying cum water heating system," *Energy Conversion and Management*, vol. 38, pp. 751-759, 1997.
- [69] G. Tiwari, P. Bhatia, A. Singh, and R. F. Sutar, "Design parameters of a shallow bed solar crop dryer with reflector," *Energy Conversion and Management*, vol. 35, pp. 535-542, 1994.
- [70] J. Butler and J. Troeger, "Drying peanuts using solar energy stored in a rockbed," *Agricultural energy vol I, solar energy, selected papers and abstracts*. St Joseph, MI: ASAE Publication, Michigan, 1980.
- [71] J. Dilip, "Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, pp. 170-178, 2005.
- [72] A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow," *Solar energy*, vol. 59, pp. 121-126, 1997.
- [73] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar energy thermal processes," 1st. ed., John Wiley & Sons, 1991.
- [74] A. P. Colburn, "Heat Transfer and Pressure Drop in Empty, Baffled, and Packed Tubes 1," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 23, pp. 910-913, 1931.
- [75] C. C. Furnas, "Heat Transfer from a Gas Stream to a Bed of Broken Solids-II," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 22, pp. 721-731, 1930.
- [76] G. Löf and R. Hawley, "Unsteady-state heat transfer between air and loose solids," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1061-1070, 1948.

- [77] P. Chandra and D. Willits, "Pressure drop and heat transfer characteristics of air-rockbed thermal storage systems," *Solar Energy*, vol. 27, pp. 547-553, 1981.
- [78] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," *Chemical engineering progress*, vol. 48, 1952.
- [79] H. Littman, R. Barile, and A. Pulsifer, "Gas-particle heat transfer coefficients in packed beds at low Reynolds numbers," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 7, pp. 554-561, 1968.
- [80] N. Standish and J. Drinkwater, "The effect of particle shape on flooding rates in packed columns," *Chemical Engineering Science*, vol. 25, pp. 1619-1621, 1970.
- [81] H. Torab and D. Beasley, "Optimization of a packed bed thermal energy storage unit," *Journal of solar energy engineering*, vol. 109, pp. 170-175, 1987.
- [82] J. P. Coutier and E. Farber, "Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds," *Solar Energy*, vol. 29, pp. 451-462, 1982.
- [83] A. M. Waked, "Solar energy storage in rocks," *Solar & wind technology*, vol. 3, pp. 27-31, 1986.
- [84] H. Singh, R. Saini, and J. Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1059-1069, 2010.
- [85] A. A. Jalalzadeh-Azar, W. G. Steele, and G. A. Adebisi, "Performance comparison of high-temperature packed bed operation with PCM and sensible-heat pellets," *International journal of energy research*, vol. 21, pp. 1039-1052, 1997.
- [86] A. Brems, G. Caceres, R. Dewil, J. Baeyens, and F. Pitié, "Heat transfer to the riser-wall of a circulating fluidised bed (CFB)," *Energy*, vol. 50, pp. 493-500, 2013.
- [87] M. M. Elsayed, I. Megahed, and M. El-Refaee, "Experimental testing of fluidized bed thermal storage," *Solar & wind technology*, vol. 5, pp. 15-25, 1988.
- [88] G. G. Silva, N. P. Jiménez, and O. F. Salazar, "Fluid Dynamics of Gas-Solid Fluidized Beds," Chapter 3, *Advanced in fluid dynamic*, INTECH, Rijika, Croatia, 2012.
- [89] M. A. I. Barrientos, C. Sobrino, and J. A. A. Ibáñez, "Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM," *Chemical Engineering Journal*, vol. 230, pp. 573-583, 2013.
- [90] J. Chang, G. Wang, J. Gao, K. Zhang, H. Chen, and Y. Yang, "CFD modeling of particle-particle heat transfer in dense gas-solid fluidized beds of binary mixture," *Powder technology*, vol. 217, pp. 50-60, 2012.
- [91] K. Wagialla, A. Fakeeha, S. Elnashaie, and A. Almaktary, "Modeling and simulation of energy storage in fluidized beds using the two-phase model," *Energy Sources*, vol. 13, pp. 189-201, 1991.

- [92] I. E. M. M.M. Elsayed, M.M. El-Refae, "Experimental testing of fluidized bed thermal storage," *Solar and Wind Technology*, vol. 5 pp. 15-25., 1989.
- [93] L. Armstrong, S. Gu, and K. Luo, "Study of wall-to-bed heat transfer in a bubbling fluidised bed using the kinetic theory of granular flow," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 53, pp. 4949-4959, 2010.
- [94] A. Wu and Y. Sun, "Granular dynamic theory and its applications," in Springer, 2008.
- [95] A. Mehta, "Granular physics" Cambridge University Press, 2007.
- [96] H. M. Jaeger, S. R. Nagel, and R. P. Behringer, "Granular solids, liquids, and gases," *Reviews of Modern Physics*, vol. 68, p. 1259, 1996.
- [97] M. Sahimi and T. T. Tsotsis, "Transient diffusion and conduction in heterogeneous media: Beyond the classical effective-medium approximation," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 36, pp. 3043-3052, 1997.
- [98] P.-G. de Gennes, "Granular matter: a tentative view," *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, p. S374, 1999.
- [99] R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot, and R. E. Meredith, "Transport Phenomena," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 108, pp. 78C-79C, 1961.
- [100] J. C. Slattery, "Advanced transport phenomena," Cambridge University Press, 1999.
- [101] J. D. Goddard, "History effects in transient diffusion through heterogeneous media," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 31, pp. 713-721, 1992.
- [102] S. Kirkpatrick, "Percolation and conduction," *Reviews of Modern Physics*, vol. 45, p. 574, 1973.
- [103] C. Moyne, S. Didierjean, H. A. Souto, and O. Da Silveira, "Thermal dispersion in porous media: one-equation model," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 43, pp. 3853-3867, 2000.
- [104] R. P. Batycky and H. Brenner, "On the need for fictitious initial conditions in effective medium theories of transient nonconservative transport phenomena. Some elementary unsteady-state heat conduction examples," *Chemical Engineering Communications*, vol. 152, pp. 173-187, 1996.
- [105] R. P. Batycky and H. Brenner, "Thermal macrotransport processes in porous media. A review," *Advances in water resources*, vol. 20, pp. 95-110, 1997.
- [106] H. Brenner, "Dispersion resulting from flow through spatially periodic porous media," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 297, pp. 81-133, 1980.
- [107] H. Brenner, "Macrotransport processes," Butterworth-Heinemann, New York, 1993.

- [108] D. Joseph and L. Preziosi., "Heat waves," *Rev. Mod. Phys*, vol. 61, pp. 41–73, 1989.
- [109] M. Ozisik and D. Tzou, "On the wave theory in heat conduction," *Journal of Heat Transfer*, vol. 116, pp. 526-535, 1994.
- [110] D. Y. Tzou, "The generalized lagging response in small-scale and high-rate heating," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 38, pp. 3231-3240, 1995.
- [111] D. Y. Tzou and J. Chen, "Thermal lagging in random media," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 12, pp. 567-574, 1998.
- [112] N. Antonishin, L. Simchenko, and V. Lushchikov, "Discrepancy between theoretical and experimental data on nonsteady heat conduction in disperse systems," *Journal of engineering physics*, vol. 13, pp. 165-169, 1967.
- [113] C. Langlais, "Isolation thermique à température ambiante," *Techniques de l'Ingénieur*, 1997.
- [114] D. Zhang, R. Zhang, S. Chen, and W. E. Soll, "Pore scale study of flow in porous media: Scale dependency, REV, and statistical REV," *Geophysical research letters*, vol. 27, pp. 1195-1198, 2000.
- [115] G. d. MARSILY, "Hydrogéologie quantitative," Masson, Paris, 1981.
- [116] R. Al-Raoush and C. Willson, "Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems," *Journal of Hydrology*, vol. 300, pp. 44-64, 2005.
- [117] M. C. Powers, "A new roundness scale for sedimentary particles," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 23, 1953.
- [118] J. M. S. D. Kuni, "Physical properties of rocks and minerals," *AIChE Journal* ,vol. 10, 230-241, 1960.
- [119] J. H. Huang, "Effective thermal conductivity of porous rocks," *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, pp. 6420-6427, 1971.
- [120] E. U. S. P. Zehner, "Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures," *Chem. Ing.-Tech*, vol. 42, pp. 933–941, 1970.
- [121] L. Rayleigh, "LVI. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 34, pp. 481-502, 1892.
- [122] M. J. Clerk, "A treatise on electricity and magnetism," vol. 1, Oxford Clarendon Press, 1873.

- [123] S. Azizi, "Conductivité thermique des matériaux poreux humides: mesure par méthode flash et interprétation," PhD dissertation, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 1988.
- [124] J. Borkink and K. Westerterp, "Influence of tube and particle diameter on heat transport in packed beds," *AIChE journal*, vol. 38, pp. 703-715, 1992.
- [125] G. F. Froment, K. B. Bischoff, and J. De Wilde, *Chemical reactor analysis and design* vol. 2, Wiley, New York, 1990.
- [126] A. Boateng and P. Barr, "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 39, pp. 2131-2147, 1996.
- [127] Y. Ding, R. Forster, J. Seville, and D. Parker, "Scaling relationships for rotating drums," *Chemical Engineering Science*, vol. 56, pp. 3737-3750, 2001.
- [128] R. G. Carbonell and S. Whitaker, "Heat and mass transfer in porous media," in *Fundamentals of transport phenomena in porous media*, ed: Springer, 1984, pp. 121-198.
- [129] J. Levec and R. Carbonell, "Longitudinal and lateral thermal dispersion in packed beds. Part I: Theory," *AIChE journal*, vol. 31, pp. 581-590, 1985.
- [130] M. Y. Corapcioglu, "Land Subsidence-A. A State-of-the-Art Review," in *Fundamentals of transport phenomena in porous media*, Springer, 1984, pp. 369-444.
- [131] S. Whitaker, "Diffusion and dispersion in porous media," *AIChE journal*, vol. 13, pp. 420-427, 1967.
- [132] M. Quintard, M. Kaviany, and S. Whitaker, "Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective properties," *Advances in water resources*, vol. 20, pp. 77-94, 1997.
- [133] J. C. Slattery, "Flow of viscoelastic fluids through porous media," *AIChE journal*, vol. 13, pp. 1066-1071, 1967.
- [134] F. Zanotti and R. Carbonell, "Development of transport equations for multiphase systems—III: Application to heat transfer in packed beds," *Chemical Engineering Science*, vol. 39, pp. 299-311, 1984.
- [135] P. Cheng and D. Vortmeyer, "Transverse thermal dispersion and wall channelling in a packed bed with forced convective flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 43, pp. 2523-2532, 1988.
- [136] J. S. Hong, M. C. Kim, D.-Y. Yoon, B.-J. Chung, and S. Kim, "Linear stability analysis of a fluid-saturated porous layer subjected to time-dependent heating," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 51, pp. 3044-3051, 2008.

- [137] E. Tsotsas and E.-U. Schlünder, "Heat transfer in packed beds with fluid flow: remarks on the meaning and the calculation of a heat transfer coefficient at the wall," *Chemical Engineering Science*, vol. 45, pp. 819-837, 1990.
- [138] M. Winterberg and E. Tsotsas, "Modelling of heat transport in beds packed with spherical particles for various bed geometries and/or thermal boundary conditions," *International journal of thermal sciences*, vol. 39, pp. 556-570, 2000.
- [139] A. Lamine, M. C. Serrano, and G. Wild, "Hydrodynamics and heat transfer in packed beds with liquid upflow," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 31, pp. 385-394, 1992.
- [140] A. G. Dixon, "The length effect on packed bed effective heat transfer parameters," *The Chemical Engineering Journal*, vol. 31, pp. 163-173, 1985.
- [141] M. Winterberg, "Modellierung des Wärme- und Stofftransports in durchströmten Festbetten mit homogenen Einphasenmodellen," *FORTSCHRITT BERICHTE-VDI REIHE 3 VERFAHRENSTECHNIK*, 2000.
- [142] C. S. Campbell, "Self-diffusion in granular shear flows," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 348, pp. 85-101, 1997.
- [143] D. G. Wang and C. S. Campbell, "Reynolds analogy for a shearing granular material," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 244, pp. 527-546, 1992.
- [144] V. Natarajan and M. Hunt, "Heat transfer in vertical granular flows," *experimental heat transfer International Journal*, vol. 10, pp. 89-107, 1997.
- [145] W. N. Sullivan, & Sabersky, R. H. , "Heat transfer to flowing of granular media," *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 97-107, 1975.
- [146] V. Natarajan and M. Hunt, "Kinetic theory analysis of heat transfer in granular flows," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 41, pp. 1929-1944, 1998.
- [147] O. Molerus, "Heat transfer in moving beds with a stagnant interstitial gas," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 40, pp. 4151-4159, 1997.
- [148] E. Schlünder, "Heat transfer to moving spherical packings at short contact times," *International Chemical Engineering*, vol. 20, pp. 550-554, 1980.
- [149] J. Sun and M. Chen, "A theoretical analysis of heat transfer due to particle impact," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 31, pp. 969-975, 1988.
- [150] S. Savage, "Analyses of slow high-concentration flows of granular materials," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 377, pp. 1-26, 1998.

- [151] C.-S. Chou, "The steady inhomogeneous rapid granular shear flow of nearly elastic spheres," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 287, pp. 127-152, 2000.
- [152] C. Lun, S. Savage, D. Jeffrey, and N. Chepurniy, "Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 140, pp. 223-256, 1984.
- [153] D. Gidaspow, *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*: Academic press, 1994.
- [154] J. Sinclair and R. Jackson, "Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interactions," *AIChE journal*, vol. 35, pp. 1473-1486, 1989.
- [155] M. Syamlal, O'Brien, T.J, "Computer simulation of bubbles in a fluidized bed," *A.I.Ch.E. Symposium Series*, vol. 85, pp. 22–31, 1989.
- [156] M. Syamlal and T. J. O'Brien, "Fluid dynamic simulation of O₃ decomposition in a bubbling fluidized bed," *AIChE journal*, vol. 49, pp. 2793-2801, 2003.
- [157] (10/07/2015), *Géographie*[Online]. Available: http://www.edelo.net/sahara/gen_geo.htm.
- [158] (27/12/2015), *Cartes solaires* <http://portail.cder.dz/spip.php?rubrique66>.
- [159] C. A. Bigelow, D. C. Bowman, and D. K. Cassel, "Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green rootzones," *Crop Science*, vol. 44, pp. 900-907, 2004.
- [160] M. Dhia, "Quelques particularites de l'utilisation du sable de dune en construction routiere en milieu saharien," *bulletin-laboratoires des ponts et chaussees*, pp. 33-42, 1997.
- [161] P. Besançon, B. Fosse-Lemarchand, and A. Lafaye, "Granulométrie par croisement de la microscopie et du tamisage," *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 157, pp. 47-55, 1988.
- [162] P. A. Webb, "Volume and density determinations for particle technologists," *Micromeritics Instrument Corp*, vol. 2, p. 01, 2001.
- [163] Y. Khakha and A. Chafou, "Contribution à l'étude Minéralogique et géotechnique des sables de l'erg oriental de Ouargla," *Ph.D. dissertation*, 2014.
- [164] F. R. J. Rouquerol, P. Llewellyn, R. Denoyel. (12/07/2015). *Calorimétrie : principes, appareils et utilisation*. [Online]. Available: <http://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [165] L. Prasad and P. Muthukumar, "Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application," *Solar Energy*, vol. 97, pp. 217-229, 2013.

- [166] E. Union, "7th Framework program for research and technical development CSP2 concentrated solar power in particles," EU Grant, 2011.
- [167] O. L. D. Kunni, *Fluidization Engineering*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- [168] J. Baeyens and D. Geldart, "Predictive calculations of flow parameters in gas fluidised beds and fluidization behaviour of powders. Fluidization and its applications," Cepadues Edition, vol. 263, 1973.
- [169] S. Saxena and V. Ganzha, "Heat transfer to immersed surfaces in gas-fluidized beds of large particles and powder characterization," *Powder technology*, vol. 39, pp. 199-208, 1984.
- [170] K. Shakourzadeh, "Techniques de fluidisation," *Techniques Ingénieur*, 2002.
- [171] J.-L. Tangier, R. Benelmir, and M. El Ganaoui, "Fluidization of wood particles in a mixed bed: faisability and process control," *Mechanics & Industry*, vol. 13, pp. 69-76, 2012.
- [172] V. Goroshko, R. Rozenbaum, and O. Toedes, "Approximate relationships for suspended beds and hindered fall," *Izvestiya Vuzov, Nefti Gaz*, vol. 1, p. 125, 1958.
- [173] J. Richardson and M. d. S. Jeronimo, "Velocity-voidage relations for sedimentation and fluidisation," *Chemical Engineering Science*, vol. 34, pp. 1419-1422, 1979.
- [174] V. Thonglimp, "Contribution à l'étude hydrodynamique des couches fluidisées par un gaz: vitesse minimale de fluidisation et expansion," Ph.D. Dissertation, ENSIGC-INP, France, 1981.
- [175] T. S. M. Leva, C.Y. Wen, "La prévision du début de fluidisation dans les lits solides granulaires," *Génie Chimique* vol. 75, pp. 33-42 1956.
- [176] A. Lucas, J. Arnaldos, J. Casal, and L. Puigjaner, "Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 25, pp. 426-429, 1986.
- [177] D. Vacher, "detection, en temps reel, d'elements metalliques presents dans les rejets atmospheriques industriels par torche a plasma a couplage inductif," Ph.D. Dissertation, Chemicky Prumysl, Université blaise pascal, 2001.
- [178] S. Wu and J. Baeyens, "Effect of operating temperature on minimum fluidization velocity," *Powder technology*, vol. 67, pp. 217-220, 1991.
- [179] R. Coltters and A. Rivas, "Minimum fluidation velocity correlations in particulate systems," *Powder technology*, vol. 147, pp. 34-48, 2004.

- [180] M. Hartman and K. Svoboda, "Predicting the effect of operating temperature on the minimum fluidization velocity," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 25, pp. 649-654, 1986.
- [181] B. Pillai and M. R. Rao, "Pressure drop and minimum fluidization velocities in air-fluidized beds," *Indian Journal of Technology*, vol. 9, pp. 77-87, 1971.
- [182] J. S. M. Botterill, "Fluid-bed heat transfer. Gas-fluidized bed behaviour and its influence on bed thermal properties," Academic Press, 1975.
- [183] A. N. S. Doichev K., "Fluidization of polydisperse systems," *Chemical Engineering Science*, vol. 34, pp. 1357-1359, 1979.
- [184] M. Nakamura, Y. Hamada, S. Toyama, A. Fouda, and C. Capes, "An experimental investigation of minimum fluidization velocity at elevated temperatures and pressures," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 63, pp. 8-13, 1985.
- [185] M. Stein, Y. Ding, J. Seville, and D. Parker, "Solids motion in bubbling gas fluidised beds," *Chemical Engineering Science*, vol. 55, pp. 5291-5300, 2000.
- [186] L.-S. Fan, J. Zhang, and C. Zhu, *Principles of Gas Solid Flows: Solutions Manual*: Cambridge University Press, 1998.
- [187] W. Ranz and W. Marshall, "Evaporation from drops," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 48, pp. 141-146, 1952.
- [188] P. A. Nelson and T. R. Galloway, "Particle-to-fluid heat and mass transfer in dense systems of fine particles," *Chemical Engineering Science*, vol. 30, pp. 1-6, 1975.
- [189] A. Cybulski, M. Van Dalen, J. Verkerk, and P. Van Den Berg, "Gas-particle heat transfer coefficients in packed beds at low Reynolds numbers," *Chemical Engineering Science*, vol. 30, pp. 1015-1018, 1975.
- [190] M. Lungu, J. Wang, and Y. Yang, "Numerical simulations of flow structure and heat transfer in a central jet bubbling fluidized bed," *Powder technology*, vol. 269, pp. 139-152, 2015.
- [191] N. Wakao, S. Kaguei, and T. Funazkri, "Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: correlation of Nusselt numbers," *Chemical Engineering Science*, vol. 34, pp. 325-336, 1979.
- [192] M. Syamlal and T. J. O'Brien, "Computer simulation of bubbles in a fluidized bed," in *AIChE Symp. Ser.*, 1989, pp. 22-31.
- [193] M. Hamzehei, "Study of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Fluidized Bed Reactors," *Heat Transfer–Mathematical Modelling, Numerical Methods and Information Technology*, Rijeka. InTech, pp. 331-382, 2011.

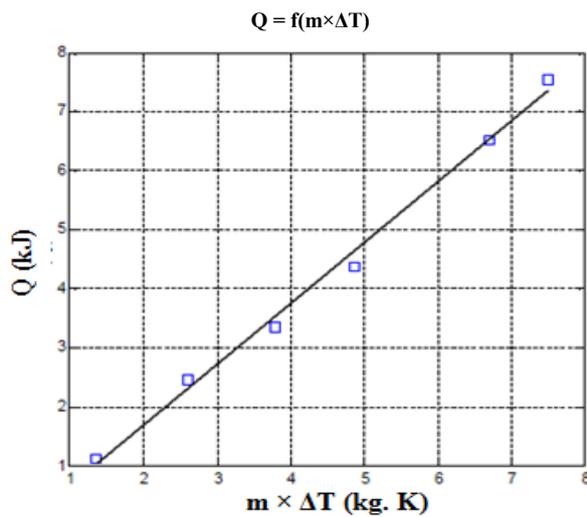
- [194] D. Gunn, "Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 21, pp. 467-476, 1978.
- [195] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*: CRC Press, 1980.
- [196] J. R. Grace and F. Taghipour, "Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds," *Powder technology*, vol. 139, pp. 99-110, 2004.
- [197] F. Taghipour, N. Ellis, and C. Wong, "Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, pp. 6857-6867, 2005.

Annexe A

Essais expérimentaux pour déterminer de la capacité calorifique du sable

1^{er} Essai : $T_{ini} = 26\text{ °C}$

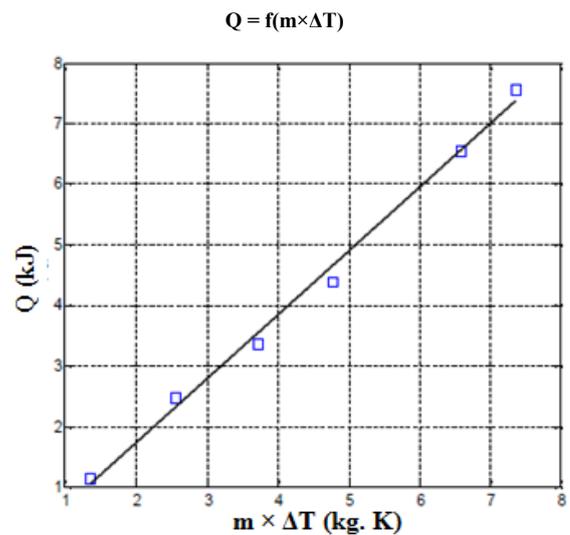
m (kg)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.12	0.14
T_r (°C)	96	93.5	91	89	84	82



$C_p = 790\text{ J/kg.K}$

2^{ème} Essai : $T_{ini} = 26\text{ °C}$

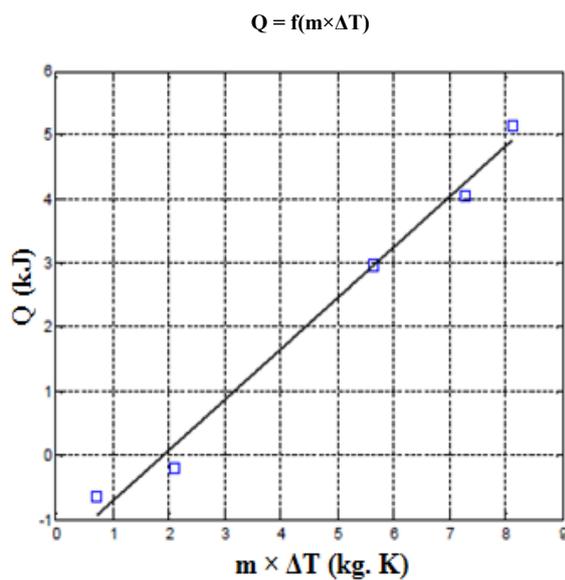
m (kg)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.12	0.14
T_r (°C)	93	90	88	85.7	80.9	78.6



$C_p = 1050\text{ J/kg.K}$

3^{ème} Essai : $T_{ini} = 26\text{ °C}$

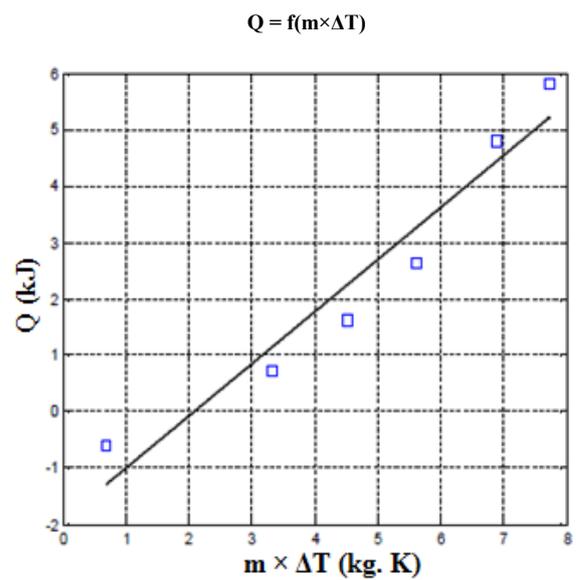
m (kg)	0.01	0.03	0.09	0.12	0.14
T_r (°C)	97	96	88.9	86.5	84



$C_p = 870\text{ J/kg.K}$

4^{ème} Essai : $T_{ini} = 27.4\text{ °C}$

m (kg)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.12	0.14
T_r (°C)	97	94	92	85	84.9	82.6



$C_p = 850\text{ J/kg.K}$

Les valeurs de la capacité calorifique du sable obtenus des essais expérimentaux pendant des jours différents sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau A.1. Valeurs de la capacité calorifique du sable

Date	06/06/2013	09/06/2013	12/06/2013	13/06/2013	14/06/2013
C_p (J/kg)	1040	1050	870	850	790

Pour le calcul de masse volumique un programme sous Matlab a été développé :

```
function[s,Q]=cp(Tf,Ti,m)
%% Constants
cpl=0.9;ml=0.03;ro=1;v=0.1;cpH=4.2;
%calcul*****Q(H2O)*****
% Ti(H2O)=100deg ;s=m*dt
QH=4.2*0.1*(100-Tf)
%calcul*****Q(cal)*****
dt=Tf-Ti
Qc=cpl*ml*dt
%calcul*****Q(sable)*****
Q=QH- Qc
s=m.*dt
plot(s,Q,'s')
a=polyfit(s,Q,1);
slope=a(1);
b=linspace(s(1),s(end),10000);dond=a(1)*b+a(2);
hold on
h1=plot(b,dond,'black');set(h1,'lineWid',[2]);
xlabel('m*dt(kg*k)','FontSize',13);ylabel('Q(kj)','FontSize',13);title('Q=
f(m*dt)','FontSize',13);
grid on;hold off;
end
```

Annexe B

Extension vers d'autres géométries

➤ Configuration avec un jet uniforme :

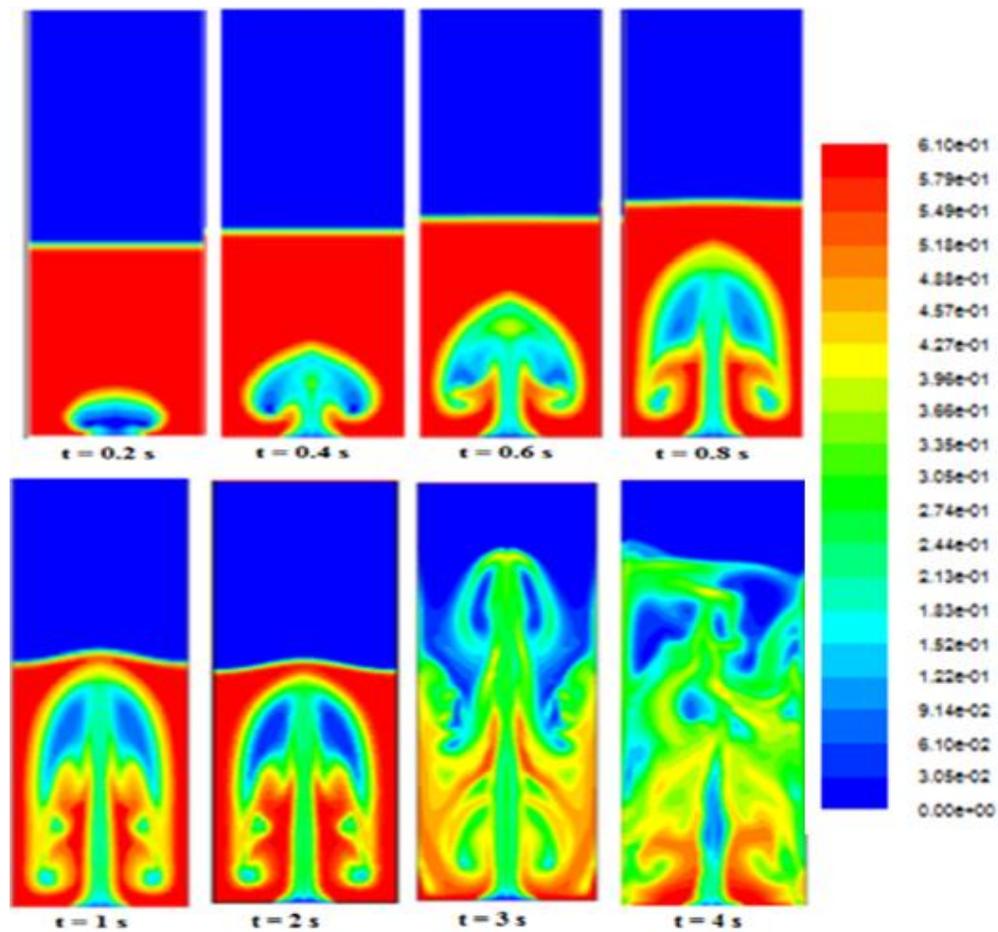


Figure B.1. Contours de la fraction volumique de la phase solide dans un lit fluidisé avec jet centré uniforme ($V_{air} = 0.25\text{ m/s}$).

➤ Configurations avec des formes différentes du lit fluidisé :

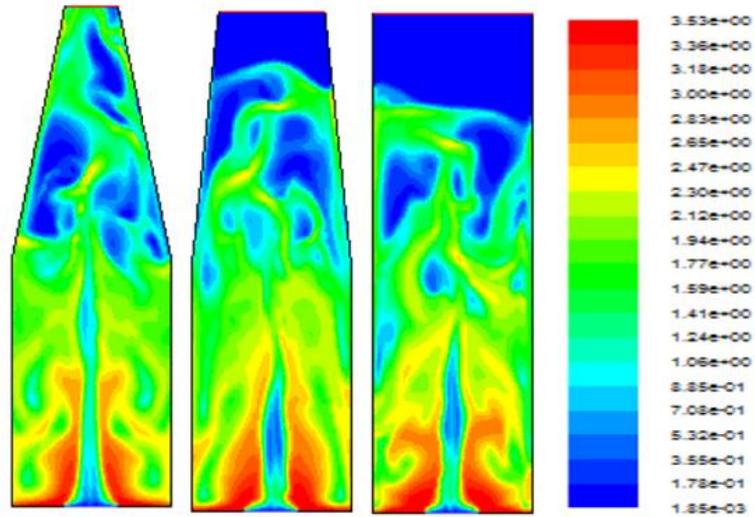


Figure B.2. Contours de la fraction volumique de la phase solide pour trois configurations du lit fluidisé ($V_{air} = 0.25$ m/s, $t = 3$ s).

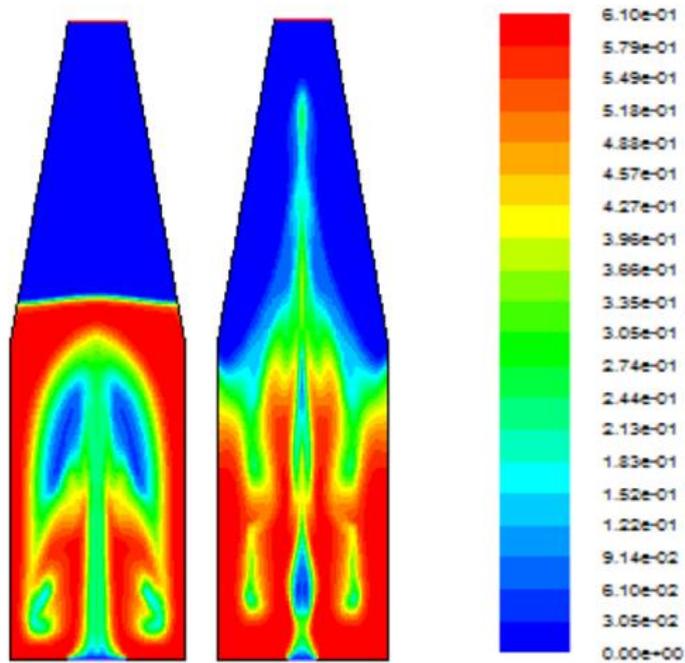


Figure B.3. Effet de la dimension de la fente du jet sur la distribution de la fraction volumique de la phase solide dans le lit fluidisé.

➤ Configuration convergent/divergent avec des tubes :

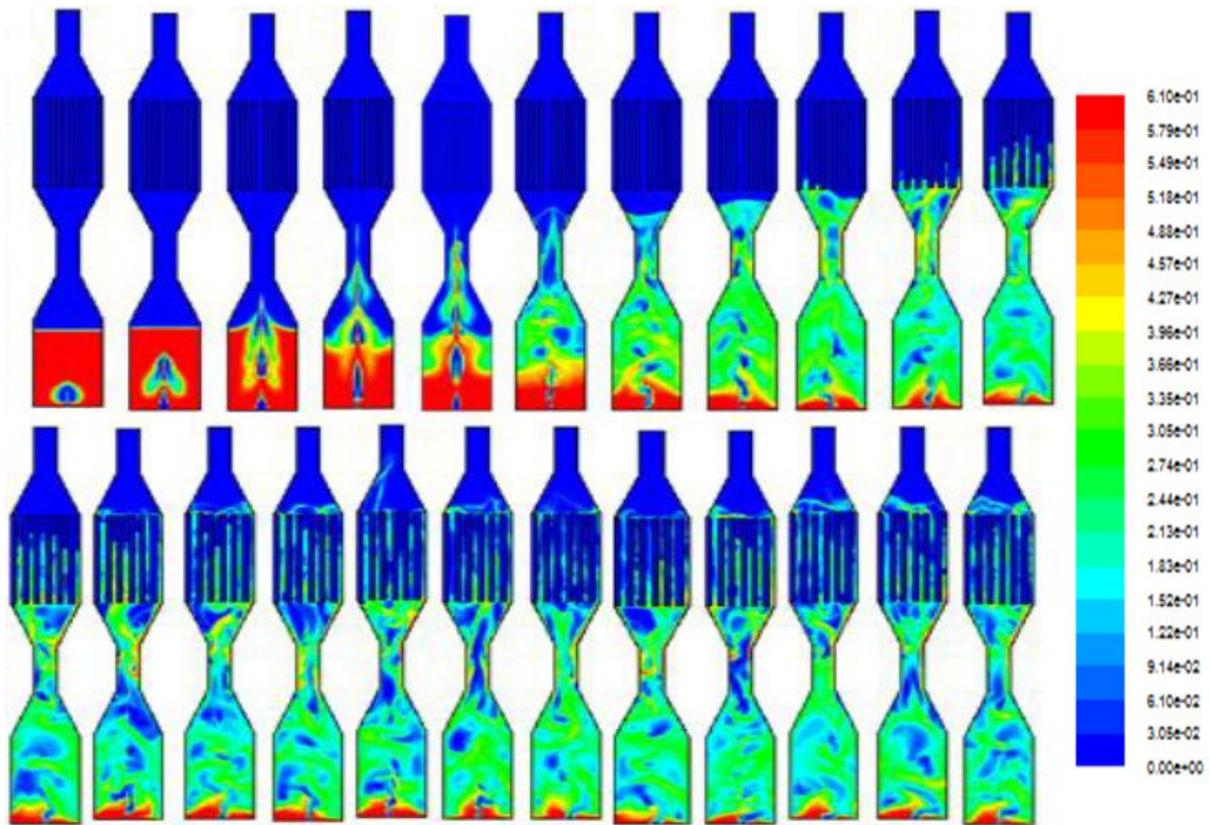


Figure B.4. Contours de la fraction volumique de la fraction solide.

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'étude du comportement thermique d'un matériau à la fois écologique et économique, qui est le sable, pour une application destinée au stockage thermique de l'énergie solaire. Cette étude de faisabilité est réalisée par modélisation, simulation et expérimentation.

Un état de l'art des technologies de stockage thermique a permis de choisir les procédés à utiliser pour mettre en œuvre le stockage thermique dans le sable. Ainsi, le choix s'est fixé sur la technologie du lit fixe et du lit fluidisé. Une étude expérimentale a permis la caractérisation du sable utilisé dans le cadre de cette thèse et la conception du système de stockage à lit fixe. En Parallèle une étude numérique a été menée. Les résultats obtenus ont montré l'intérêt de l'utilisation du sable pour le stockage thermique, et cela à travers l'analyse de son comportement thermique pendant un cycle charge/décharge. Cette analyse a permis de déterminer les performances de la configuration étudiée.

Pour la technique du lit fluidisé, un modèle Euler-Euler a été adopté pour modéliser le comportement hydrodynamique du lit. Les résultats de la simulation ont montré que la thermique du lit est fortement affectée par son comportement hydrodynamique.

Mots clés : stockage thermique, énergie solaire, lit fixe, lit fluidisé, milieu granuleux, simulation numérique.

Abstract

The purpose of this thesis is to study the thermal behavior of an ecologically and economically material, which is the sand, intended for thermal storage of solar energy. This study feasibility is carried out by modeling, simulation and experimentation.

A state of the art of thermal storage technologies has allowed to choose the processes which used for the thermal storage in the sand. Thus, the fixed bed and fluidized bed technologies have been used. Concerning the experimental part, the interest is to characterize the sand used in this work and to design the fixed bed storage system. Moreover a numerical study was conducted. The results show the interest to use sand as a storage material, by an analysis of the thermal behavior during a charge / discharge cycle. This analysis allowed to determine the system performances.

For the fluidized bed process, an Euler-Euler model has been adopted to describe the hydrodynamic of the bed. The simulation results show that the heat transfer in the bed is strongly affected by its hydrodynamic behavior.

Keywords: Heat storage, solar energy, fixed bed, fluidized bed, granular media, numerical simulation

ملخص

في هذه الأطروحة قمنا بدراسة السلوك الحراري لمادة الرمل كوسط بيئي و اقتصادي ، بغرض استخدامه كوسط تخزين للطاقة الحرارية الشمسية، و ذلك من خلال النمذجة / المحاكاة والتجربة. الدراسة النظرية لتكنولوجيات التخزين، مكنتنا من اختيار تقنيتين لتخزين الحرارة في الرمل، وهما السرير الثابت و السرير المميع.

الجزء التجريبي لهذه الدراسة يتمثل في تحديد خصائص الرمل، و تصميم نظام التخزين. وبالموازاة لذلك أجريت دراسة عديدة. أظهرت النتائج والفائدة لاستخدام الرمل كمادة التخزين، عن طريق تحليل السلوك الحراري خلال دورة شحن/تفريغ. هذا التحليل يسمح لتحديد أداء النظام.

بالنسبة لتكنولوجيا السرير المميع، تم اعتماد نموذج أويلر-أويلر لوصف هيدروديناميكية السرير. وتبين من خلال نتائج المحاكاة أن انتقال الحرارة في السرير يتأثر بسلوكه الهيدروديناميكي.

الكلمات المفتاحية : التخزين الحراري، الطاقة الشمسية، السرير الثابت، السرير المميع، الوسط الحبيبي، محاكاة رقمية