

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

AYACHI Mohammed El Amine

et

BENDIAF Walid

Sujet

**SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE THERMIQUE PAR
LA CHALEUR SENSIBLE**

Soutenu publiquement, le 12 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

M Korti Abdel Illah Nabil

Pr

Université de Tlemcen

Président

Mme Mostefaoui Amina

MCB

Université de Tlemcen

Examinatrice

Mme Sari Hassoun Hind

MAA

Université de Tlemcen

Encadrante

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir aidé, donné le savoir, la force et la patience pour réaliser ce travail.

À nos parents qui ont été nos complices, nos confidents et nos meilleurs supporters. Votre présence a été un réconfort constant.

En effet, ce mémoire représente bien plus que de simples travaux. Ce mémoire est la finalité de cinq longues années d'études.

Nous tenons ensuite à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près à la bonne réalisation de ce mémoire. C'est pourquoi nous adressons également nos remerciements à Mme SARI HASSOUN HIND, qui a su nous guider, nous orienter et nous apporter un grand soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier membres de jury Mr KORTI NABIL ABDELILLAH et Mme MOSTEFAOUI AMINA pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Et tous les professeurs de département de Génie mécanique.



Dédicaces

Nous dédions humblement ce travail à nos chers parents, qui ont été nos piliers, notre inspiration et notre motivation tout au long de ce parcours. À nos pères, pour leur soutien indébranlable, et à nos mères, pour leur lumière, leur amour inconditionnel et leur patience infinie. Que Dieu les protège et les bénisse.

À Mme Sari Hassoun Hind, notre encadrant, dont les conseils avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.

À nos frères et sœurs qui ont été nos complices, nos confidentiels et nos meilleurs supporters. Votre présence a été un réconfort constant.

À nos familles élargies, à nos tantes, oncles, cousins et cousines, dont le soutien et les encouragements ont été une source de force et de courage.

À notre promo de génie mécanique énergétique, pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui nous a unis.

Enfin, nous dédions ce travail à toutes les personnes qui nous ont aimé(e) et soutenu(e), qui ont cru en nous et nous ont encouragé(e). Votre confiance en nous a été notre plus grande motivation et nous vous en suis infiniment reconnaissant(e)."

ملخص:

يركز عملنا على المحاكاة العددية لتدفق الهواء العابر والمضطرب ثنائي الأبعاد الذي يمر عبر قناة مستطيلة تحتوي على وسط مسامي كمنطقة تخزين حرارية معقولة. تم تصميم الوسط المسامي بواسطة صيغ دارسي فورشهايم وتم اختيار فرضية التوازن الحراري المحلي (LTE). تم استخدام برنامج ANSYS Fluent 15.0.7 لحل المعادلات المرافقة لتحليل تأثير تدفق الهواء والمسامية على السلوك الديناميكي والحراري للمخزن. وتكشف النتائج التي تم الحصول عليها أن معدل التدفق يجعل من الممكن تقييم وقت التخزين بشكل عملي أكثر، في حين تؤثر المسامية أيضًا على كمية الطاقة المخزنة. الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري، الحرارة المحسوسة، دراسة عددية، الوسط المسامي، الصخور، التوازن الحراري المحلي (LTE)، دارسي فورشهايمر.

Abstract:

Our work focuses on the numerical simulation of a transient and turbulent two-dimensional air flow which crosses a rectangular channel containing a porous medium as a sensible heat storage zone. The porous medium is modeled by the Darcy-Forchheimer formulation and the local thermal equilibrium (LTE) hypothesis has been opted. ANSYS Fluent 15.0.7 software was used to solve the governing equations to analyze the effect of air flow and porosity on the dynamic and thermal behavior of the store. The results obtained reveal that the flow rate makes it possible to more practically evaluate the storage time, while the porosity also influences the quantity of energy stored.

Key words: thermal storage, sensible heat, numerical study, porous medium, rocks, local thermal equilibrium (LTE), Darcy-Forchheimer.

Résumé :

Notre travail porte sur la simulation numérique d'un écoulement d'air bidimensionnel transitoire et turbulent qui traverse un canal rectangulaire contenant un milieu poreux comme une zone de stockage par la chaleur sensible. Le milieu poreux est modélisé par la formulation de Darcy-Forchheimer et l'hypothèse d'équilibre thermique local (LTE) a été optée. Le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 a été utilisé pour résoudre les équations gouvernantes afin d'analyser l'effet du débit d'air et de porosité sur le comportement dynamique et thermique du stockeur. Les résultats obtenus révèlent que le débit permet d'évaluer de manière plus pratique le temps de stockage, tandis que la porosité influence également sur la quantité d'énergie stockée.

Mots clés : stockage thermique, chaleur sensible, étude numérique, milieu poreux, roches, équilibre thermique local (LTE), Darcy-Forchheimer.

Table de matière

Table de matière

Chapitre III : Modélisation mathématique et numérique

III.1	Introduction.....	39
III.3	Hypothèses simplificatrices	41
III.4	Modèle mathématique.....	41
III.5	Conditions initiale et aux limites.....	44
III.5.1	Condition initiale	44
III.5.2	Conditions aux limites	45
III.6	Calcul de Reynold Re	45
III.6.1	Calcul du diamètre hydraulique Dh	45
III.6.2	Profil de vitesse axiale.....	45
III.6.3	Calcul des débits d'air pour différentes vitesses initiales.....	46
III.7	Simulation numérique	46
III.7.1	Création de la géométrie et le maillage.....	46
III.7.2	Procédure du calcul numérique.....	47

Chapitre IV : Résultats et Interprétations.

IV.1	Introduction.....	49
IV.2	Validation numérique.....	49
IV.2.1	Test de maillage	49
IV.2.2	Test de pas du temps (dt)	52
IV.3	Etude dynamique	53
IV.3.1	Profil de vitesse dans différentes sections du canal de stockage.....	53
IV.3.2	Effet de la variation de débit q_m sur la vitesse axiale d'air.....	55
IV.3.3	Effet de la variation de porosité ε sur la vitesse axiale d'air.....	57
IV.4	Etude thermique.....	58
IV.4.1	Contour de température en fonction du temps.....	58
IV.4.2	Variation de température en fonction du temps.....	60
IV.4.3	Variation de Débit..	62
IV.4.4	Variation de porosité.....	64
IV.4.5	Stockage et déstockage..	64

Table de matière

IV .5 Energie stocké.....	67
IV .5.1 Variation de débit.....	67
IV .5.2 Variation de porosité.....	68
Conclusion générale.....	69

Liste des figures

Figure 1.1 : Système de stockage d'énergie thermique.....	4
Figure 1.2 : Evolution de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide)....	5
Figure 1.3 : Classification des Matériaux de changement de phase.....	7
Figure 1.4 : Organigramme de conception d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente.....	8
Figure I.5 . Schéma de principe du stockage thermochimique.....	10
Figure I.6 : Station de stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible.....	11
Figure I.7 : Huile.....	13
Figure I.8 : Brique.....	14
Figure I.9 : Béton.....	14
Figure I.10 : Acier.....	15
Figure I.11 : Cuivre.....	15
Figure I.12 : Fer pure.....	15
Figure I.13 : Aluminium	15
Figure I.14 : Bronze	15
Figure I.15 : Schéma d'un système de stockage à lit entassé.....	17
Figure I.16 . Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.....	18
Figure I.17 . Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidiser.....	18
Figure I.18 : (a) Principe de fonctionnement du stockage thermocline sur lit de solides (b) Schéma décrivant le déplacement de la zone thermocline dans la cuve.....	19
Figure I.19 : Schéma des principaux phénomènes physiques impliqués dans le comportement thermique des systèmes de stockage thermocline.....	20
Figure I.20 : Centrale solaire thermique de Souan Dunhuang dans le désert de Gansu (Chine).....	22
Figure I.21 : (a)Diagramme 3D.....	22
(b) photo du sécheur de pompe à chaleur solaire intégré au Stockage de l'énergie thermique.....	23
Figure I.22 : système de climatisation.....	23

Liste des figures

F

ure

Liste des figures

Figure II.15 : Résultats numériques et données expérimentales :	
a) Evolution de la température du fluide à différents endroits de la ligne centrale axiale ;	
b) Différences de température du fluide et déviations normales correspondantes	
(case 1: $T_f/T_c = 20/50$ °C; $D_p = 7$ mm; $q_v = 0.5$ L/min; $Pe = 12$; $Re = 3$; $Bi = 0.76$;	
fonction de charge).....	34
Figure II.16 : Changement des propriétés thermiques des roches (magmatiques, métamorphes et sédimentaires) avec la température ; (a) et (b) la conductivité thermique λ ,	
(c) la diffusivité thermique α d) capacité thermique volumétrique.....	36
Figure II.17 : Capacité thermique spécifique des roches de quartzite et de flint mesurée expérimentalement.....	37
Figure II.18 : a) Profils de température de sortie, b) Les valeurs de performance des matériaux et efficacité sont comparées pour différents matériaux.....	38
 Chapitre III : Modélisation mathématique et numérique.	
Figure III.1 : Géométrie du problème considéré.....	40
Figure III.2 : Conditions initiales et aux limites.....	44
Figure III.3 : Profil de vitesse axiale d'un écoulement turbulent.....	45
Figure III.4 : Maillage de canal horizontal bidimensionnel.....	46
Figure III.5 : Modèle de turbulence utilisé.....	47
Figure III.6 : Zone poreuse.....	47
Figure III.7 : Facteur de relaxions.....	48
 Chapitre IV : Résultats et Interprétations.	
Figure IV.1 : Sections choisies.....	49
Figure IV.2 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x = 0.58$ m.....	50
Figure IV.3 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x = 1.03$ m.....	50
Figure IV.4 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x = 1.73$ m.....	51
Figure IV.5 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x = 0.58$ m.....	52
Figure IV.6 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x = 1.03$ m.....	52

Liste des figures

Figure IV.7 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x=1.73$ m.....	53
Figure IV.8 : Sections sélectionnées.....	53
Figure IV.9 : Variation de la vitesse axiale à différentes distances du canal de stockage.....	54
Figure IV.10 : Sections sélectionnées.....	55
Figure IV.11 : Effet de la variation du débit sur la vitesse axiale à $x= 1.03$ m.....	56
Figure IV.12 : Effet de la variation du débit sur la vitesse axiale à $x=1.28$ m.....	56
Figure IV.13 : Effet de la variation de la porosité ε sur la vitesse axiale à $x=1.03$ m.....	57
Figure IV.14 : Effet de la variation de la porosité ε sur la vitesse axiale à $x=1.28$ m.....	57
Figure IV.15 : Contours de température pendant la phase de stockage.....	59
Figure IV.16 : Contours de température pendant la phase de déstockage.....	59
Figure IV.17 : Sections choisies.....	60
Figure IV.18 : Evolution temporelle de la température de l'air.....	61
Figure IV.19 : Evolution temporelle de la température pour différents.....	62
Figure IV.20 : Evolution temporelle de la température pour différents Débits à $x=0.9$ m et $x=1.4$ m.....	63
Figure IV.21 : Evolution temporelle de la température pour différentes porosités à $x=1.03$ m et $x=1.28$ m.....	64
Figure IV.22 : Evolution temporelle de la température pour différentes Porosités à $x=0.9$ m et $x=1.4$ m.....	65
Figure IV.23 : Evolution temporelle de la température à $x=0.9$ m et $x=1.4$ m pendant la période du stockage et déstockage.	66
Figure IV.24 : Variation temporelle de l'énergie stockée pour différents débits	
Figure IV.25 : Variation temporelle de l'énergie stockée pour différents porosités.....	68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients des différents changements d'état.....8

Tableau I.2 : Propriétés des différents matériaux de stockage de chaleur.....16

Tableau I.3 : Caractéristiques des différents types de stockage de chaleur.....21

Chapitre II : Recherche bibliographique.

Tableau II.1 : Propriétés thermo-physiques et mécaniques des roches potentielles.....35

Chapitre III : Modélisation mathématique et numérique.

Tableau III.1 : Dimensions de la géométrie étudiée.....40

Tableau III.2 : Propriétés de L'air.....40

Tableau III.3 : Propriétés de la roche (matériau de stockage).....40

Nomenclature

Symboles	définition	unités
n_A	Nombre de mole	[mol]
Q	Quantité d'énergie stockée	[J]
C_p	Capacite calorifique	[J/kg.K]
m	Masse du matériau de stockage	[kg]
cp_s	Chaleurs spécifiques des matériaux solide	[J/kg. K]
cp_i	Chaleurs spécifiques des matériaux liquide	[J/ kg. K]
dT	Variation de la température durant l'étape de charge	[K]
T_f	Température finale	[K]
T_i	Température initiale	[K]
T_{fr}	Température froid	[K]
T_c	Température chaud	[K]
T_F	Température du fusion	[K]
qv	Débit volumique	[l/min]
Bi	Numéro de Biot	[-]
h	Coefficient de transfert thermique par convection	[W/m ² .k]
V_c	Volume de resavoir	[m ³]
A_c	Surface de réservoir	[m ²]
α	Diffusivité thermique	[m ² /s]
D_p	Diamètre	[mm]
H	Hauteur du canal	[cm]
L	Longueur du canal	[cm]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
t	Temps	[s]
e	Epaisseur de canal	[cm]
ε	Porosité du milieu	[-]
u	Composant de la vitesse dans direction x	[-]
v	Composant de la vitesse dans direction y	[-]
μ_t	Viscosité turbulence.	[kg/m·s]

Nomenclature

K	Perméable du milieu.	[-]
C_F	Facteur de résistance inertiel	[-]
E	Energie thermique stockée	[J]
s	Surface du canal	[m ²]
v	Vitesse initial	[m/s]
$(\rho C_p)_{eff}$	Capacité thermique volumique effective	[J/m ³ ·K]
$(\rho C_p)_f$	Capacité thermique volumique du fluide	[J/m ³ ·K]
$(\rho C_p)_s$	Capacité thermique volumique du solide.	[J/m ³ ·K]
A	Surface du canal	[m ²]
C ₁	Model constant	[-]
C ₂	Model constant	[-]
G_k	Energie cinétique turbulente	[m ² /s ⁻³]
Symboles grecs		
ρ	Densité volumique	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique du fluide	[kg/m·s]
λ	Conductivité thermique effective.	[W/m.K]
λ_{eff}	Conductivité thermique effective.	[W/m.K]
λ_f	Conductivité thermique de phase fluide.	[W/m.K]
λ_s	Conductivité thermique de phase solide.	[W/m.K]
Symboles latins		
ΔH_r	Enthalpie de la réaction	[J/mol]
ΔH_{Lf}	Enthalpie de changement de phase	[J/ kg]

Abréviations

MCP : Matériaux de changement de phase.

TES : Stockage d'énergie thermique.

LTE : Equilibre Thermique Locale.

Introduction

Générale

Introduction générale

La demande d'énergie sous toutes ses formes n'a cessé de croître au cours des dernières décennies, en raison de l'expansion et de la croissance de l'industrie et de la demande de confort dans la vie quotidienne, notamment dans le domaine du transport, du chauffage et de la climatisation. Les énergies fossiles, telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, sont actuellement responsables de la majorité des besoins mondiaux en énergie.

La transition énergétique est un processus complexe nécessitant des efforts coordonnés en recherche, développement technologique, et politiques publiques. Les innovations dans les nouvelles sources d'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont essentielles pour atteindre un avenir durable, résilient et à faible émission de carbone. Ainsi, la recherche de nouvelles sources d'énergie constitue l'enjeu majeur de notre époque, étant donné les publications et les recherches menées dans ce domaine pour améliorer l'efficacité énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, l'utilisation de rayonnement, mais l'énergie solaire présente des difficultés de stockage en raison de sa nature intermittente. Des systèmes de stockage doivent être mis au point pour permettre le transfert d'énergie des périodes de surplus aux périodes de déficit et ainsi ajuster sa production à sa consommation. Depuis les années 70, on étudie la technologie du stockage thermique de l'énergie solaire qui repose sur l'exploitation des processus internes d'un matériau lorsque son énergie interne varie suite à un chauffage ou un refroidissement, ce qui permet différentes méthodes de stockage.

Il y a trois façons de stocker l'énergie sous forme de chaleur : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage thermochimique. Il y a une grande diversité de matériaux disponibles pour chaque système de stockage, en fonction de la plage de température et de l'utilisation.

Les systèmes sensibles de stockage thermique de chaleur stockent l'énergie dans un support auquel la chaleur est ajoutée ou enlevée, ce qui offre un stockage d'énergie simple, économique et facile à contrôler. La capacité de stockage de ces systèmes varie de 10 à 50 kWh/t avec une efficacité comprise entre 50 et 90 %, selon le matériau. On considère que la technologie de stockage sensible est simple, économique et relativement développée, ce qui lui permet d'être utilisée. Cependant, la conception du système de stockage thermique et d'identifier le matériau le plus efficace pour une application donnée ainsi que le fluide caloporteur utilisé revêt une importance capitale, ce qui rend l'utilisation des outils de CFD dans le stockage

thermique sensible indispensable, afin d'améliorer les performances du système et des économies d'énergie,

Notre travail porte sur une étude numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air bidimensionnel, transitoire et turbulent qui traverse un canal rectangulaire contenant un milieu poreux, tel qu'une zone de stockage sensible Afin d'analyser les performances thermiques du stockeur. Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

- Au cours du premier chapitre, nous avons exposé des informations générales sur le stockage thermique ainsi que les diverses techniques et matériaux employés.
- Le deuxième chapitre est éclairé par une étude bibliographique qui présente les recherches expérimentales et numériques réalisées dans le domaine du stockage thermique par la chaleur sensible, en utilisant différentes configurations et méthodes de simulation numérique.
- Le troisième chapitre traite la position du problème, formulation mathématique, ainsi que des conditions initiales et aux limites.
- Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique, présentation et interprétation des résultats.
- Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur

Stockage

d'énergie thermique

III.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie thermique est essentiel pour optimiser l'utilisation de la chaleur résiduelle industrielle et des ressources énergétiques renouvelables, tout en réduisant les coûts de l'énergie solaire [1].

Le système de stockage d'énergie thermique doit respecter les critères techniques suivants :

- Une densité d'énergie élevée.
- Un transfert de chaleur adéquat entre le fluide et le milieu de stockage.
- Une stabilité mécanique et chimique, avec une perte de chaleur réduite.
- Une réversibilité totale pour de nombreux cycles de charge/décharge.
- Une compatibilité chimique avec le fluide caloporteur et le transport de chaleur par échangeurs.

III.2 Définition stockage thermique :

Il est également possible de conserver l'énergie sous sa forme thermique et de la renvoyer sous forme de chaleur. L'intérêt des solutions de stockage de l'énergie thermique réside dans leur capacité à séparer l'utilisation de la production d'énergie [2].

On peut accumuler de l'énergie thermique en refroidissant, en chauffant, en fusionnant, en vaporisant, en solidifiant ou en rendant disponible l'énergie sous forme de chaleur lorsque le processus est inversé.

III.3 Systèmes de stockage de l'énergie thermique :

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classées selon divers critères. En fonction du critère de la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ». Lorsqu'il s'agit de la durée de stockage, on peut identifier deux types de stockage : le stockage à long terme et le stockage à court terme, ainsi que selon le type de stockage [3].

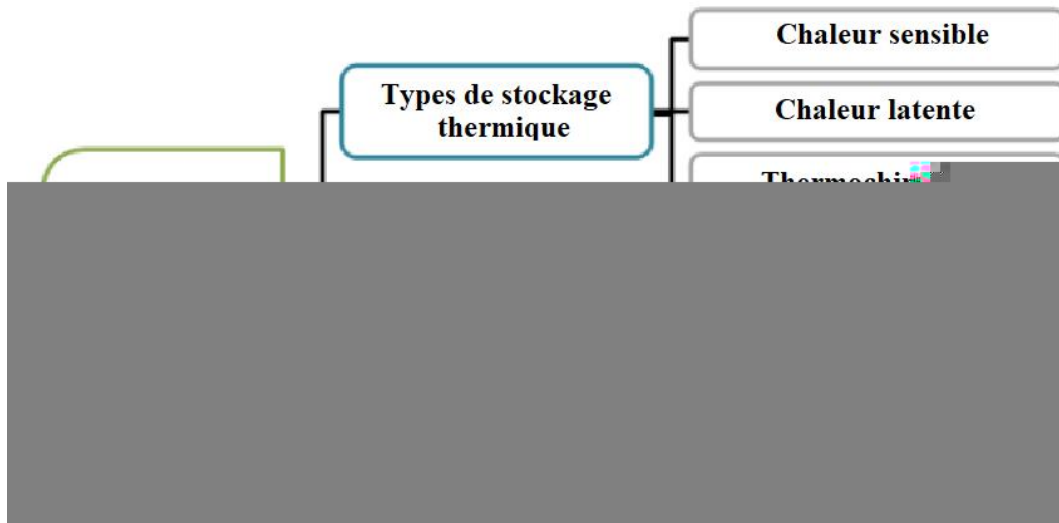


Figure I.1 : Système de stockage thermique.

III.4 Types de stockage de chaleur :

Trois types de stockage de la chaleur peuvent être utilisés :

- ✓ Par chaleur latente.
- ✓ Par voie thermochimique.
- ✓ Par chaleur sensible.

III.4.1 Stockage par chaleur latente :

L'énergie thermique peut être stockée de manière isotherme en raison des changements de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur. Pendant la phase de charge, l'énergie thermique apportée au fluide provoque un échauffement, puis un changement de phase et éventuellement une surchauffe. Conservez-le ensuite à la température de charge. Lorsque l'énergie revient, elle change à nouveau de phase pour restaurer l'énergie stockée et revenir à son état d'origine. La figure (I.2) représente les différentes étapes d'un tel système de stockage [5].

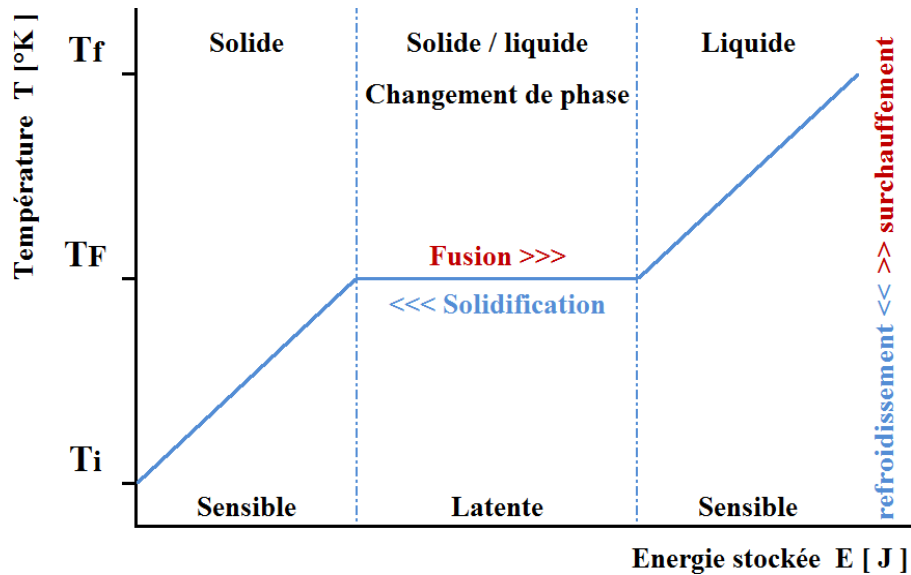


Figure I.2 : Evolution de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (Solide/liquide).

La quantité d'énergie conservée dans le matériau est calculée en combinant l'énergie sensible et l'énergie latente selon la relation (1.2). L'énergie stockée est principalement contenue dans l'enthalpie de changement de phase du matériau suivant l'équation ci-dessus :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_{p_s} dT + m \Delta H_{L_f} + \int_{T_i}^{T_f} c_{p_l} dT \quad (1.2)$$

Où,

- Q : quantité d'énergie stockée (J).
- m : masse du matériau de stockage (kg).
- c_{p_s} : chaleur spécifique de matériau solide (J/kg.K).
- c_{p_l} : chaleur spécifique de matériau liquide (J/kg.K).
- ΔH_{L_f} : enthalpie de changement de phase (J/kg).
- dT : variation de la température durant l'étape de charge (K).

III.4.1.1 Matériaux à changement de phase :

Un matériau de changement de phase désigne tout matériau qui peut évoluer dans un état physique particulier à une plage de température restreinte. Cette plage oscille entre environ 10 et 80 degrés. La transition de phase dominante dans cette plage de température est toujours là fusion/solidification. On trouve naturellement ces températures et elles sont présentes dans notre vie quotidienne (température ambiante dans les maisons, température corporelle, eau chaude sanitaire), et les matériaux à changement

de phase ont la capacité de stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente ; la chaleur du liquide est absorbée ou libérée pendant la transformation, et inversement.

La quantité d'énergie stockée dépend donc de la chaleur latente et de la quantité de matière stockée. La figure ci-dessous montre la classification des matériaux à changement de phase [6].

L'utilisation d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente. Se fait en trois principales étapes [7] :

- Choix du réservoir de stockage.
- Choix du MCP.
- Choix de l'échangeur de chaleur.

Il y a trois principales catégories de MCP :

- Matériaux ayant un changement de phase solide-solide.
- Matériaux ayant un changement de phase solide-liquide.
- Matériaux ayant un changement de phase liquide-gazeux.

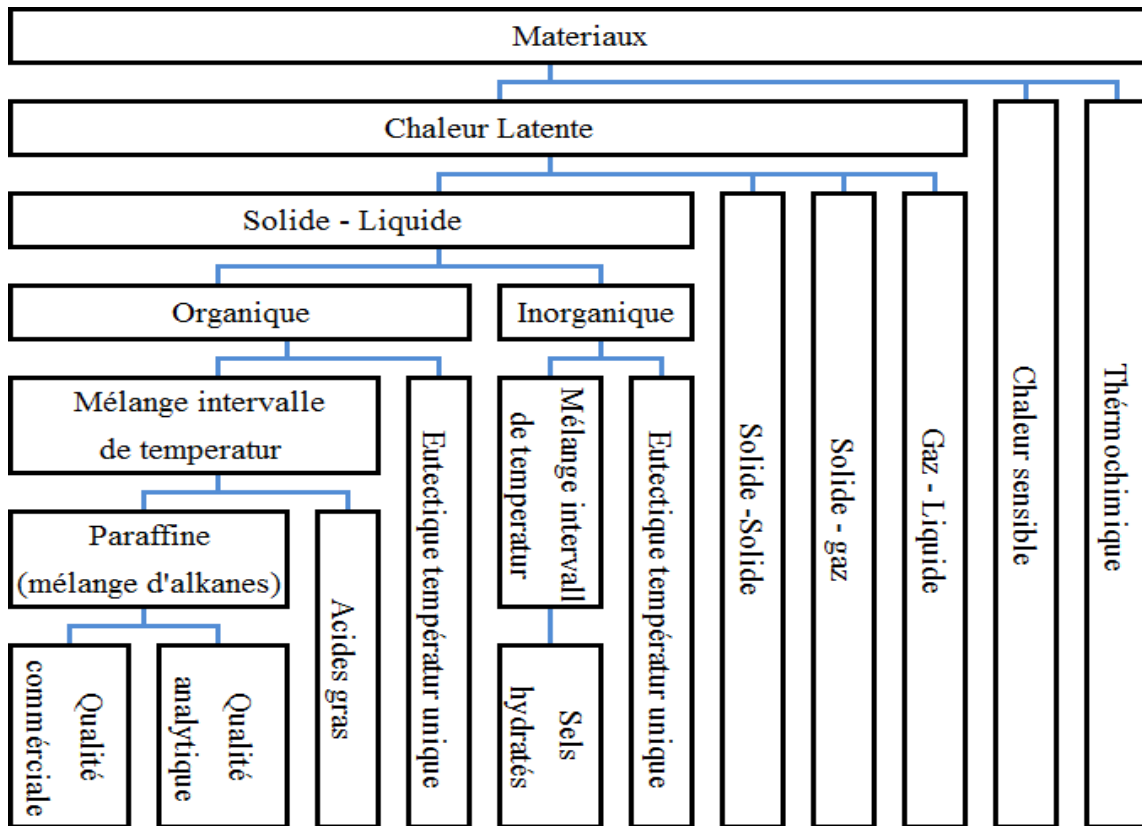


Figure I.3 : Classification des MCP [7].

La figure 1.4 montre la méthodologie de conception qui devrait être utilisée pour un (élément de stockage d'énergie par chaleur latente) [8].

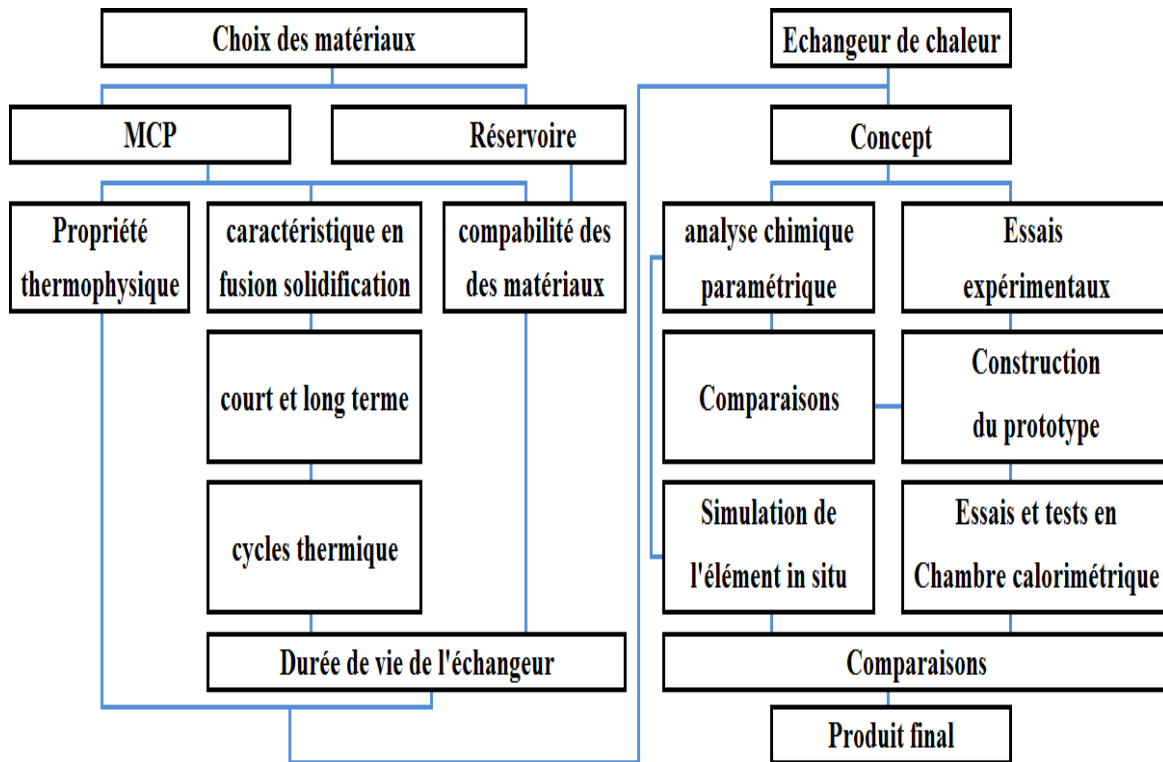


Figure 1.4: Organigramme de conception d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des types de changement d'état.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état [9].

Changement de phase	Avantages	Inconvénients
Solide-solide	Faible changement de volume Pas de formation de fluide	Valeur faible de la chaleur latente
Solide-liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente
Solide-gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume
Liquide-gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume

III.4.1.2 Avantages et inconvénients de stockage thermique par chaleur latente :

Avantages :

- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.
- Lorsque l'énergie thermique est déchargée, la température de la surface de MCP reste proche de la température de changement d'état. La température de la surface est donc contrôlée de manière passive. La décharge n'est donc énergétiquement dépendante que de la température de l'environnement.
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.

Inconvénients :

- La conception et l'installation de systèmes de stockage thermique par chaleur latente peuvent être complexes en raison de la nécessité de contrôler précisément les températures et les flux de chaleur pour garantir un fonctionnement efficace.
- Les systèmes de stockage thermique par chaleur latente peuvent subir des pertes thermiques au fil du temps, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système.

III.4.2 Stockage thermochimique :

La réversibilité de certaines réactions chimiques exothermiques est utilisée dans ce mode de stockage pour conserver l'énergie. En règle générale, les réactions sont de la nature suivante :



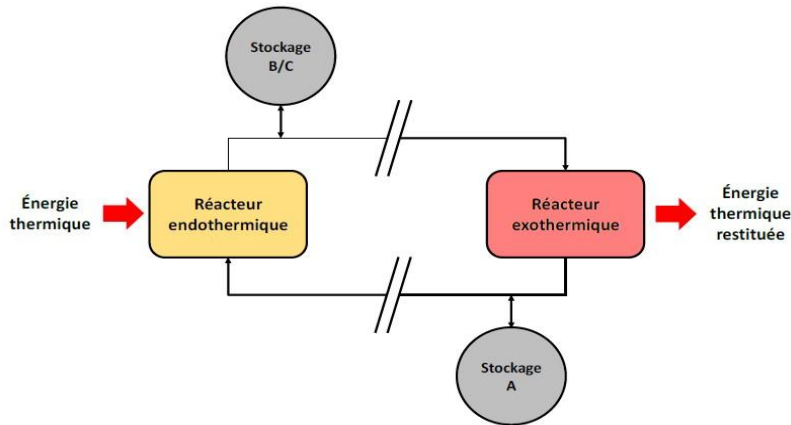


Figure I.5 : Schéma de principe du stockage thermo-chimique [10].

Deux réservoirs de stockage et deux réacteurs sont utilisés pour le processus de stockage. Au moment de la charge, le réacteur endothermique reçoit l'énergie thermique supplémentaire du champ solaire, qui est à l'origine de l'espèce chimique de départ A. On déclenche ainsi la réaction endothermique qui entraîne la libération des produits B et C qui sont conservés séparément.

Quand on doit restituer l'énergie thermique, on met en contact les deux produits (B et C) et on restitue le produit résultant (A). L'enthalpie de réaction associée est donc proportionnelle à l'énergie thermique stockée pour ce type de réaction, comme le montre l'équation I .4.

$$E=n_A \cdot \Delta H_r \tag{I .4}$$

Avec n_A représentant le nombre de moles de A utilisés (mol) et ΔH_r l'enthalpie de la réaction (J/mol).

III.4.3 Stockage thermique par chaleur sensible :

Le stockage d'énergie thermique sensible implique l'augmentation de l'enthalpie d'un matériau pendant la phase de stockage, avec la chaleur restituée lors de la phase de déstockage. Ce type de stockage peut se faire avec des liquides ou des solides, et il se caractérise par un changement de température. L'énergie stockée est définie par la relation suivante (I.5) [11] :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m Cp dT = m Cp (T_f - T_i) \tag{I.5}$$

Avec :

Q : Quantité de chaleur qui pénètre dans le matériau de stockage (J).

m : Masse de matériau de stockage (kg).

C_p : Capacité thermique spécifique du matériau (J/kg.K).

T_f : Température finale (K).

T_i : Température initiale (K).

En outre, il n'y a pas de transition de phase pendant le fonctionnement. Afin qu'un matériau puisse être qualifié de moyen de stockage de chaleur sensible, il doit satisfaire aux critères suivants [12] :

- ❖ Compatibilité avec son conteneur.
- ❖ Capacité thermique spécifique élevée.
- ❖ Les principaux matériaux utilisés sont sous forme liquide ou solide.
- ❖ Faible coût.

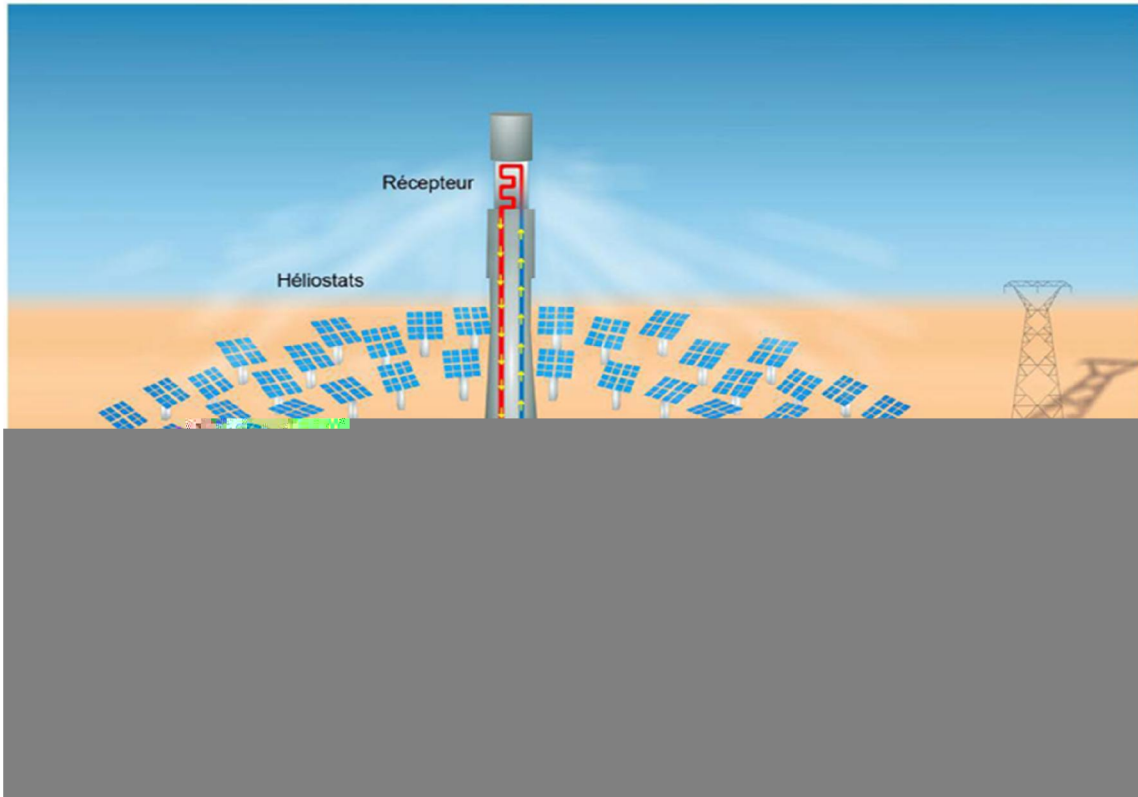


Figure I.6 : Station de stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible.

III.4.3.1 Matériaux de stockage sensible :

III.4.3.1.1 Matériaux liquides :

Les matériaux liquides sont des fluides idéals pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. Leur forme liquide favorise habituellement une meilleure adhésion au système de transfert de chaleur. En outre, la restitution thermique est habituellement plus rapide en raison des effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. En revanche, cette caractéristique propre aux matériaux liquides leur confère une capacité d'autodécharge accrue, ce qui entraîne une autonomie réduite pour une puissance spécifique. L'eau et les huiles thermiques sont les principaux liquides employés [13].

A. Eau :

Comme l'un des matériaux les plus facilement accessibles et abondants à travers le monde, l'eau a rapidement été prise en compte pour une utilisation dans le stockage thermique sous forme sensible. Pour certaines situations, l'essai a été concluant, car son utilisation présente de nombreux bénéfices. Cependant, certains désavantages peuvent entraîner une préférence pour d'autres matériaux dans certains systèmes.

Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible [14].

Avantages :

- Il a efficacité élevée.
- Haute chaleur spécifique.
- Il est disponible partout.
- Aucune détérioration.

Inconvénients :

- Corrosif à certains contenants.
- Autodécharge élevée.
- Haut pression de vapeur.

➤ **Roches, béton et briques :**

Les roches, le béton et les briques, qui présentent des caractéristiques très similaires, constituent une catégorie à fort potentiel d'utilisation comme matériaux dans un système de stockage thermique sensible. Effectivement, leur durabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font des candidats intéressants. En revanche, grâce à leur faible conductivité thermique et à leur faible spécificité thermique, d'autres matériaux sont souvent privilégiés [14].

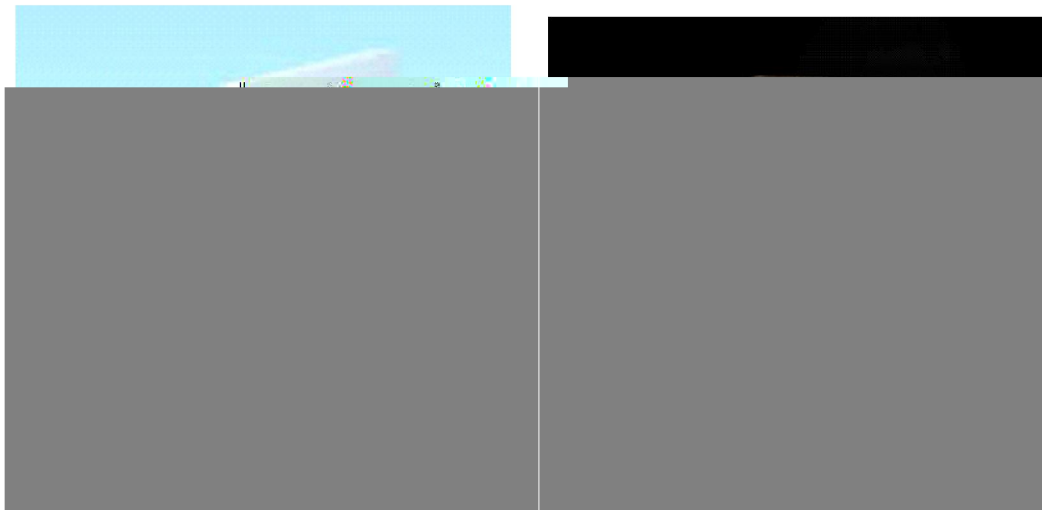
Avantages:

Ils sont :

- Chimiquement stable.
- Abordable.
- Excellente stabilité cyclique.
- Disponible.

Inconvénient:

- Faible chaleur spécifique.
- Faible conductivité thermique.



➤ Métaux :

Les métaux sont principalement intéressants pour un système de stockage de chaleur sous-sensibles est leur capacité thermique élevée. Cela leur permet d'absorber rapidement la chaleur, mais aussi de la dissiper rapidement, ce qui signifie une autodécharge élevée, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront principalement utilisés pour des applications à court terme. Les matériaux plus utilisés sont bronze, cuivre, acier, aluminium et fer pure.

Avantages:

- Ils ont une conductivité thermique élevée.
- Ils sont disponibles, recyclables et chimiquement stables.

Inconvénients:

- Coût élevé.



Figure I.10 : Acier.



Figure I.11 : Cuivre.

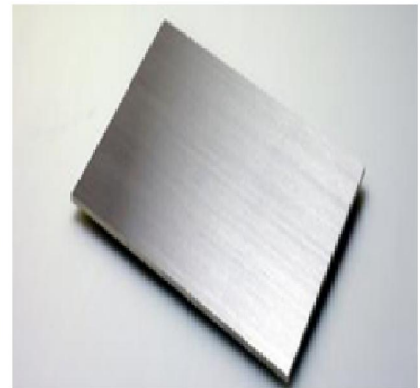


Figure I.12 : Fer pure.

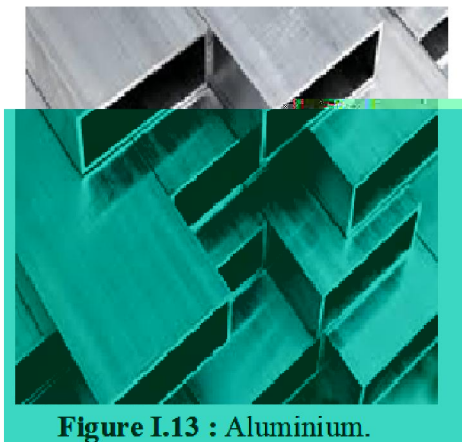


Figure I.13 : Aluminium.



Figure I.14 : Bronze.

Tableau I.2 : Propriétés des différents matériaux de stockage thermique par chaleur sensible [15] :

Matériau	Masse Volumique (kg/m^3)	C_p (J/kg.K)	Capacité thermique Volumétrique ($10^6 \text{J/m}^3.\text{K}$)
Aluminium	2710	896	2,43
Argile	1458	879	1,28
Acier	7840	465	3,68
Grès	2200	712	1,57
Bois	700	2390	1,67
Béton	2000	880	1,76
Brique	1800	837	1,51
Fer	7900	452	3,57
Verre	2710	837	2,27
Eau	988	4182	4,17

III.4.3.2 Différents procédés de stockage sensible solide :

III.4.3.2.1 Lit fixe entassé :

La méthode des lits entassés consiste à accumuler un matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut être entraîné. Ce dernier traverse le lit de haut en bas, ce qui permet de transmettre la chaleur au matériau pendant la durée de charge. Lors de la décharge, le fluide caloporteur circule dans le sens opposé. Cette méthode est généralement employée avec un capteur solaire à air (voir figure I.15). Dans certains cas, des conduites sont employées afin de garantir le déplacement du fluide caloporteur. [16]

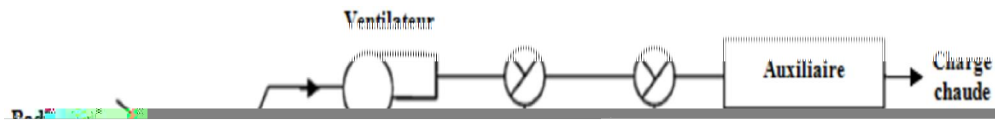


Figure I.15 : Schéma d'un système de stockage à lit entassé.

III.4.3.2.2 Lit fluidisé :

Le processus de fluidisation implique la suspension de particules solides sous l'effet d'un courant fluide ascendant (voir figure I.16). La compensation du poids des particules par l'action du fluide sur celles-ci est responsable de cet état. La création de l'écoulement diphasique entraîne une instabilité naturelle qui engendre une dynamique complexe. Le transfert de chaleur entre les particules solides et le fluide est davantage favorisé par cette technique, ce qui est avantageux.

Dans le domaine du stockage thermique, en particulier dans les applications solaires (voir figure I.17).

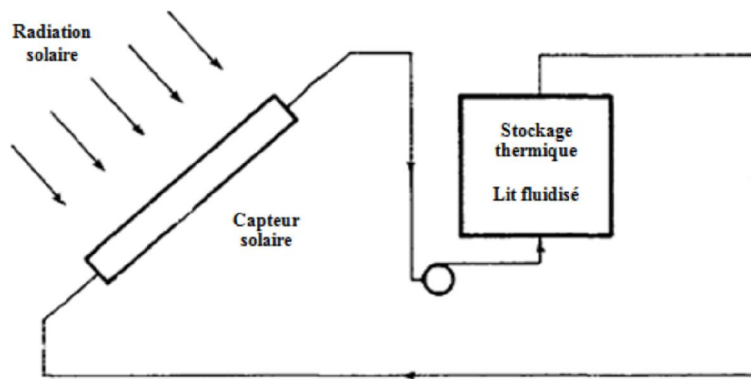


Figure I.16 : Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.

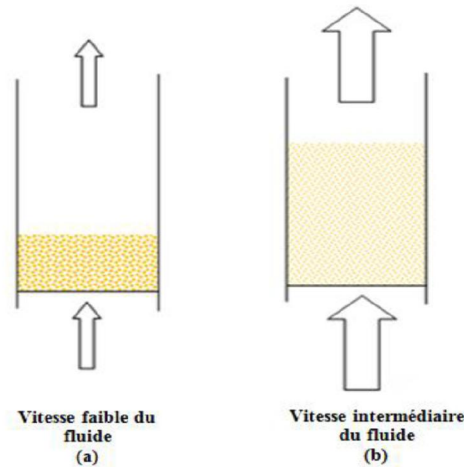


Figure I.17 : Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.

III.4.3.2.3 Stockage thermique de type thermocline:

La Figure I.18 (a) présente le principe de fonctionnement d'un stockage thermocline. Un fluide caloporteur que ce soit un liquide ou un gaz traverse un lit de particules solides appelé garnissage (matériau de stockage d'énergie thermique) en circulation. Celui-ci se divise en deux étapes :

Lors de la phase de charge, le fluide chaud de température (T_c) est introduit par le haut de la cuve tandis que le fluide froid est extrait par le bas. Ainsi, une zone chaude presque isotherme se forme à l'entrée de la cuve. Elle se déplace vers le bas à mesure que de la chaleur est introduite dans la cuve, comme illustré dans la Figure I.18 (b). La zone chaude est séparée de la zone froide par un gradient thermique qui forme la thermocline, dont l'épaisseur peut atteindre jusqu'à un tiers de la hauteur de la cuve.

Lors de la phase de décharge, le flux du fluide est inversé. Par conséquent, on injecte le

fluide froid à température par le bas de la cuve et on extrait le fluide chaud par le haut. Une zone froide quasi-isotherme se forme alors et se déplace de bas en haut, jusqu'à combler l'ensemble de la cuve. Après la sortie de la cuve de la thermocline, qui sépare les zones chaudes extraites et froides injectées, la température de sortie diminue progressivement, jusqu'à atteindre la température T_f Figure I.18 (b).

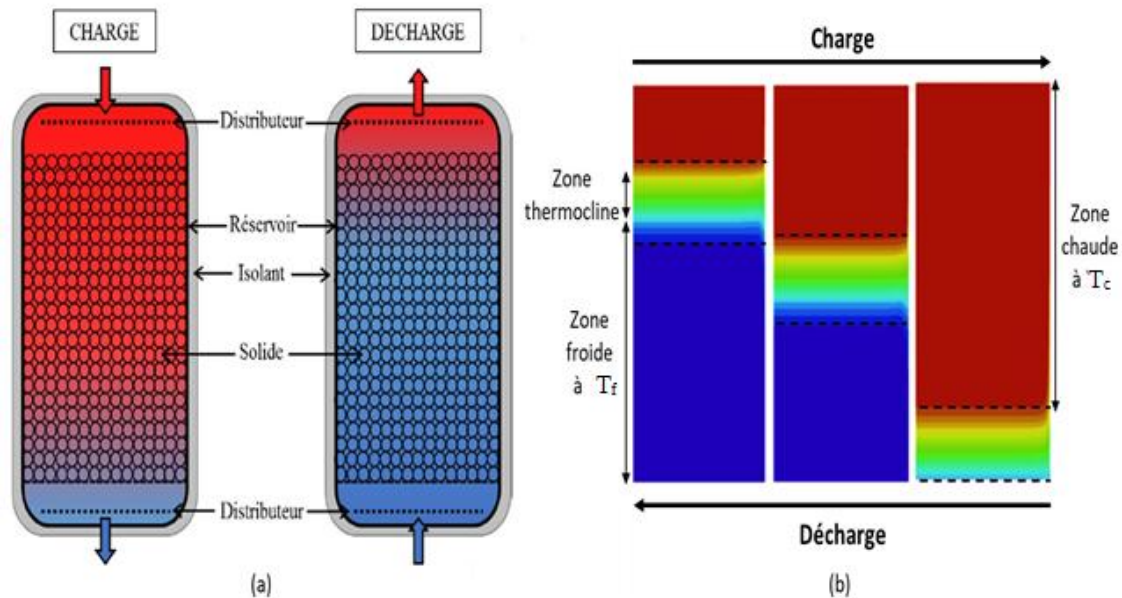


Figure I.18 : (a) Principe de fonctionnement du stockage thermocline sur lit de solides. (b) Schéma décrivant le déplacement de la zone thermocline dans la cuve [17].

L'emploi d'une seule cuve engendre de nouvelles limitations. Les résultats d'une thermocline de stockage d'énergie thermique sont fortement liés aux phénomènes thermiques qui interagissent dans le réservoir, tels que les échanges thermiques entre le caloporteur et le garnissage, la diffusion de la chaleur dans le lit fixe de solides, les pertes de charge vers l'extérieur et dans les solides... Ces manifestations physiques, illustrées dans la Figure I.19.

Les puissances des phases de charge et de décharge sont perturbées, ainsi que la qualité de la chaleur disponible, connue sous le nom d'exergie. Au sein du stockage thermocline, la stratification thermique, qui sépare le réservoir en couches de températures et de densités variées, joue un rôle essentiel dans les performances du système.

- Différence de températures disponibles.

III.5 Comparaison entre les différents types de stockage thermique :

Le Tableau I.3 recense les propriétés des trois systèmes de stockage d'énergie thermique exposés. Nous avons sélectionné six paramètres essentiels :

- Densité énergétique.
- Température de stockage.
- Durée de stockage.
- Transport de l'énergie.
- Technologie du système.

Tableau I.3 : Caractéristiques des différents types de stockage thermique [19] :

	par chaleur sensible	par chaleur latente	par voie thermochimique
Technologie	Simple	Moyenne	Complexe
Densité Volumétrique	Faible (15 ~60 KWh.m ⁻³)	Moyenne (50~100 KWh.m ⁻³)	Elevée (100~500 KWh.m ⁻³)
Durée de stockage	Pertes thermiques Limitée	Pertes thermiques Limitée	Théoriquement illimitée
Transport de L'énergie	Distance Faible	Distance Faible	Distance théoriquement illimitée

III.6 Domaines d'utilisation le stockage thermique :

III.6.1 Énergies renouvelables :

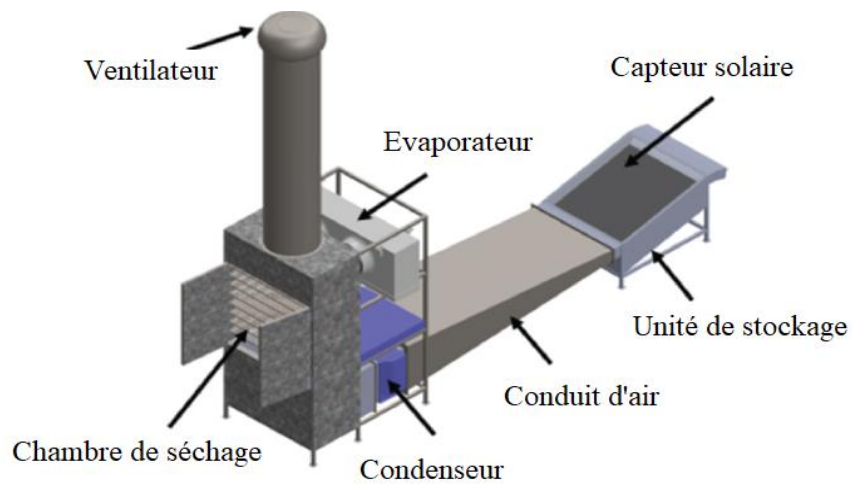
Le stockage thermique est souvent utilisé dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, tels que les centrales solaires thermiques et les centrales géothermiques, pour stocker l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de faible demande et la libérer lorsque la demande est élevée.



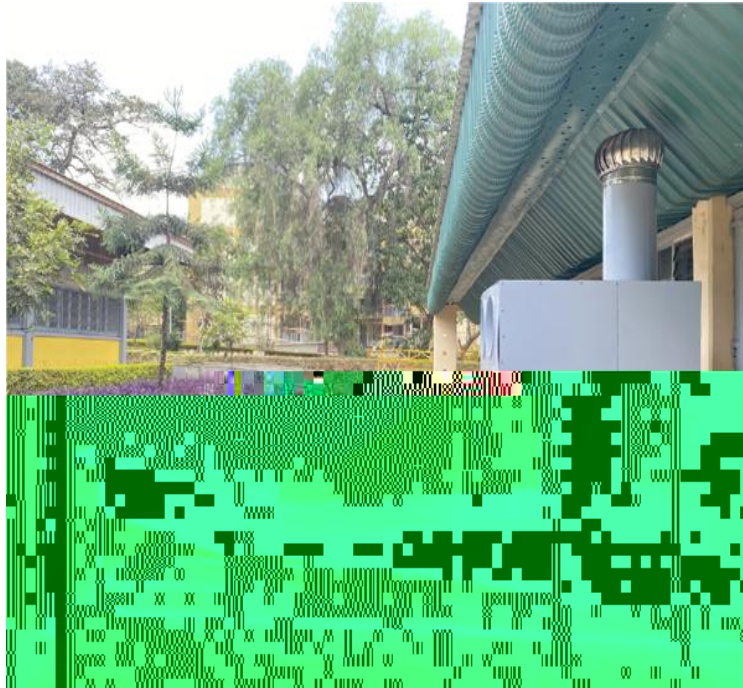
Figure I.20 : Centrale solaire thermique de Souan Dunhuang dans le désert de Gansu (Chine) [20].

III.6.2 Industrie :

Dans l'industrie, le stockage thermique est utilisé pour optimiser les processus de fabrication en stockant la chaleur excédentaire produite pendant les phases de production et en l'utilisant ultérieurement pour des opérations telles que le séchage, la pasteurisation ou la génération de vapeur.



(a)



(b)

Figure I.21 : (a) Diagramme 3D (b) photo du sécheur de pompe à chaleur solaire intégré au stockage de l'énergie thermique [21].

III.6.3 Climatisation :

Les systèmes de stockage thermique peuvent être utilisés dans les systèmes de climatisation pour stocker la chaleur ou le froid pendant les périodes de faible demande et la libérer lorsque la demande est élevée, contribuant ainsi à réduire la charge sur le réseau électrique.

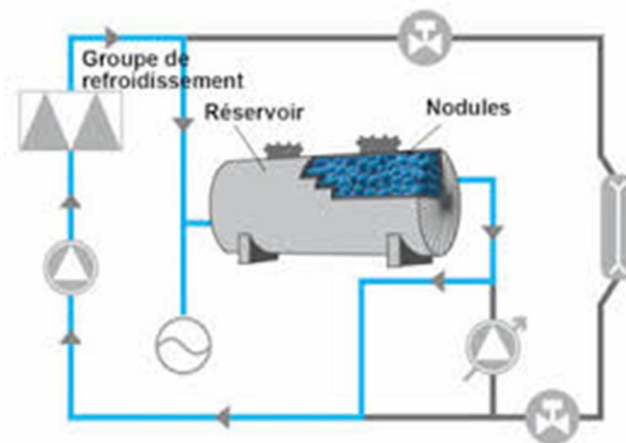


Figure I.22 : système de climatisation [22].

III.6.4 Résidentiel :

Le stockage thermique peut également être utilisé dans les maisons pour stocker la chaleur solaire pendant la journée et la libérer pendant la nuit pour le chauffage domestique ou pour produire de l'eau chaude sanitaire.

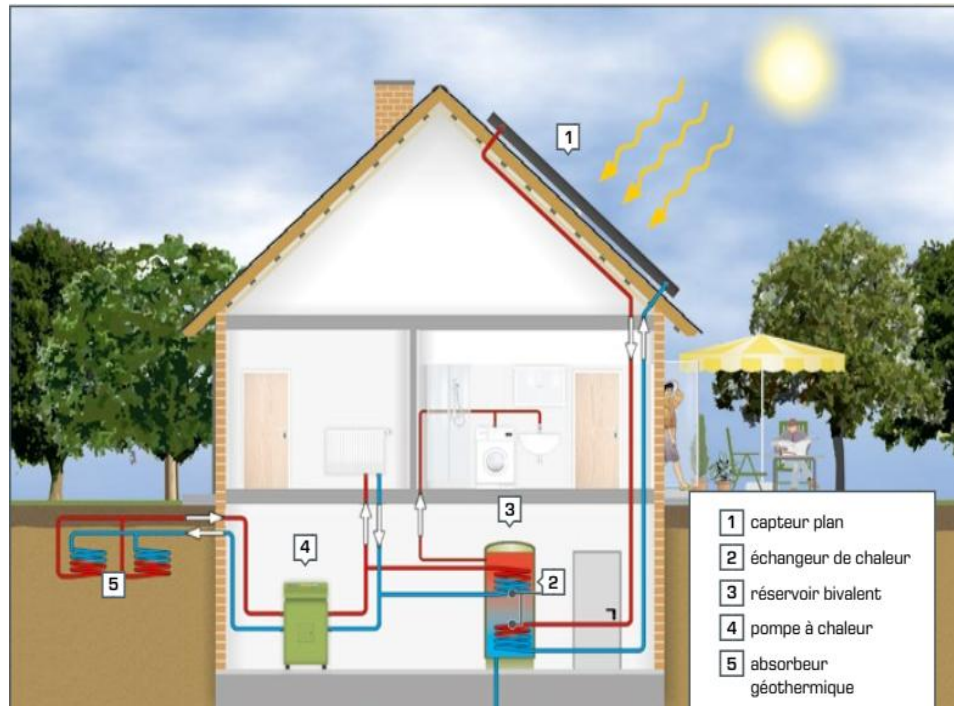


Figure I.23 : Stockage thermique à domicile.

Chapitre II

Recherche

Bibliographie

IV.1 Introduction :

Plusieurs groupes de recherche se sont penchés sur les principaux éléments qui influencent les performances du stockage thermique sensible afin de développer cette technique pour améliorer les performances de leur système global. Cela nécessite des études sur les divers éléments de ce système, tels que les caractéristiques du matériau de stockage, le fluide caloporteur, la forme de la cuve de stockage. L'outil CFD a été largement employé afin de réaliser ces tâches, qu'il s'agisse de tests expérimentaux ou non.

Dans cette partie, nous exposons et examinons les conclusions des études précédentes sur les éléments essentiels d'un système de stockage thermique sensible.

IV.2 Travaux antérieurs :

Assunta Andreozzi et al. [23] ont étudié numériquement un stockage thermique à haute température dans une matrice solide en nid d'abeille afin de procéder à une analyse paramétrique. La géométrie du système est cylindrique et les propriétés thermiques du liquide et du solide sont indépendantes de la température et l'effet de la gravité est négligé. Le fluide est l'air et le matériau solide est la cordiérite. L'évaluation des comportements dynamiques et thermiques des fluides est réalisée en supposant que le nid d'abeille soit un milieu poreux. Le modèle Brinkman Forchheimer extended Darcy est utilisé dans les équations dominantes et l'équilibre thermique local est assumé. Le logiciel CFD Fluent est utilisé pour résoudre les équations régissant dans le régime transitoire. Des simulations numériques sont effectuées avec des supports de stockage pour différents taux de débit de masse de l'air et différentes valeurs de porosité. Des résultats sous forme de profils de température, de champs températures et d'énergie thermique stockée en fonction du temps ont été présentés.

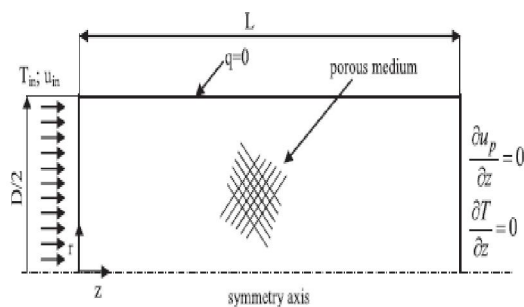


Figure II.1 : Géométrie de modèle.

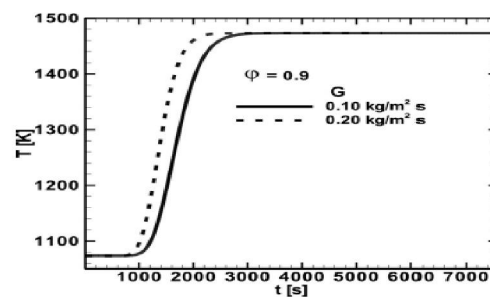


Figure II.2 : Effet de débit sur les profils de température.

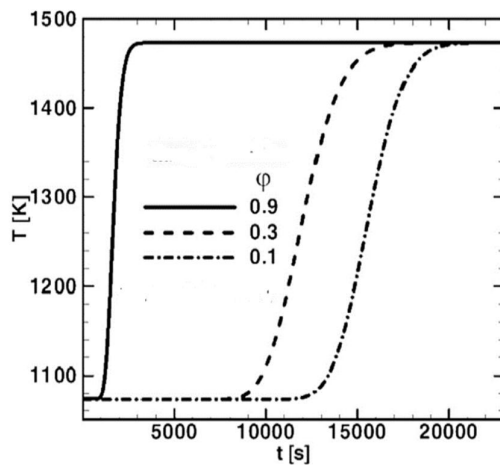


Figure II.3 : Evolution de température en fonction de temps pour des différentes porosité.

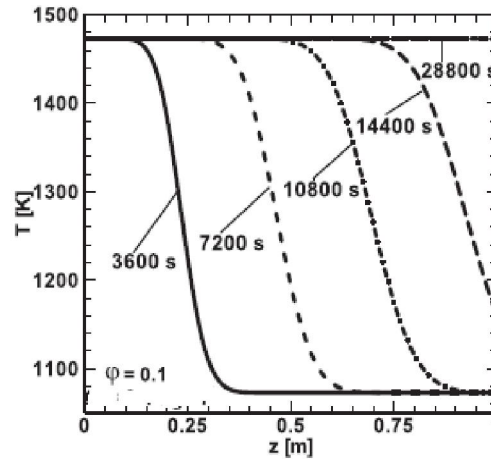


Figure II.4 : Evolution de température en fonction de la longueur.

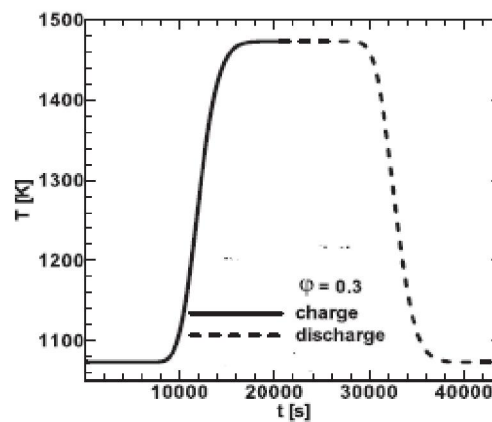
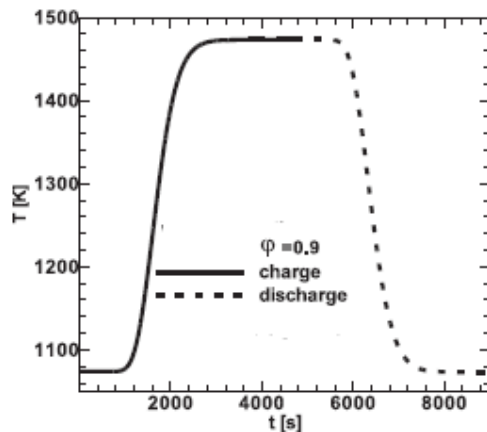


Figure II.5 : Evolution de température en fonction de temps (phase stockage et déstockage pour deux porosités différentes.

En analysant les profils de température de la section de sortie en fonction du temps, il est possible de déterminer les conséquences de la porosité, du débit de masse sur le temps de stockage et le déstockage. Les temps ont augmenté à mesure que la porosité, le débit massique ont diminué. L'impact principal réside dans la porosité qui influence également la capacité de stockage de l'énergie thermique. Où le stockage d'énergie augmente de manière plus importante, passant de 0,9 à 0,3 plutôt que de 0,3 à 0,1.

Diane Le Roux et al [24] dans leur étude, ont évalué des performances expérimentales et numériques d'un stockage thermique à lit emballé horizontal à l'échelle industrielle. Pour simuler les conditions d'intégration des champs de chaleur de déchets dégradés, des contraintes élevées de température et de débit ont été appliquées. La thermocline horizontale a été testée avec neuf cas différents pour déterminer la robustesse du stockage à des variations de température et de débit individuelles ou simultanées. Ils ont présenté l'importance de récupérer la chaleur résiduelle industrielle et la mise en place de stockage thermique étant devenue nécessaire. L'objectif est de mesurer l'influence des variations de température et de débit sur les performances de stockage, afin de simuler un véritable processus de stockage thermique. Les résultats ont montré que l'Eco-Stock® est capable de stocker des champs de chaleur dégradés et de restaurer la chaleur à la température moyenne du champ de chauffage. En outre, le modèle numérique prédit très précisément les performances de stockage, prouvant sa capacité à absorber les contraintes de haute température et de débit.

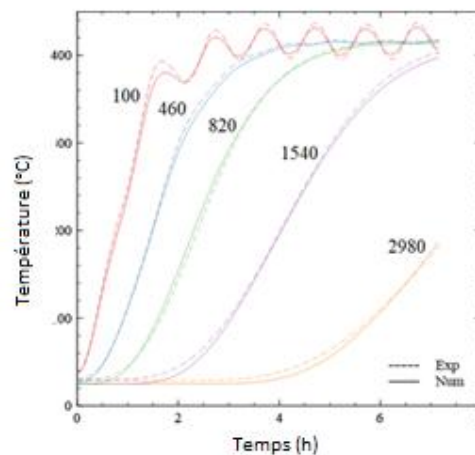


Figure II.6 : Variation de la température pour différentes positions.

Irfan Anjum Badruddin et al [25] ont étudié le transfert de chaleur en régime permanent dans un milieu poreux fixé dans un cylindre annulaire vertical en utilisant le modèle de non-équilibre thermique à deux températures. Le modèle de Darcy a été employé. La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations différentielles partielles. Les résultats montrent que les isothermes de la phase liquide et solide se déplacent vers la surface chaude et s'éloignent de la surface froide lorsque le ratio de rayon est augmenté. On constate que lorsque le coefficient de transfert de chaleur interphase et le rapport de conductivité modifié prennent une valeur élevée, l'équilibre thermique est approché avec des phases solides et liquides ayant une température similaire.

Mohammad Parhizi et al [26] ont présenté un modèle local de non-équilibre thermique pour un flux pleinement développé dans un canal rempli d'un milieu poreux où Bi elle-même varie à travers le canal. Ont conclu que le modèle de non-équilibre thermique local est un modèle important pour comprendre et optimiser les phénomènes thermiques et de débit dans un milieu poreux. Avec l'avènement de matériaux fonctionnellement classifiés, il devient possible de concevoir des matériaux poreux avec des propriétés spatialement distribuées. Cela nécessite l'élaboration de modèles LTNE qui permettent une telle distribution spatiale. Le présent travail répond à cette nécessité en tenant compte de la variation spatiale du nombre Biot qui dans les travaux passés a toujours été supposé être invariant. Les équations sont résolues pour une variété de fonctions Bi . Plus précisément, pour Bi périodique, Les résultats ont montré que si la conductivité thermique des phases fluide et solide sont similaire, le modèle local de non-équilibre thermique peut être simplifié en modèle local d'équilibre thermique et des équations beaucoup moins compliquées pourraient donc être envisagées.

Walid Foudhil et al [27] Ont étudié dans ce travail les performances d'un système de stockage énergétique thermique dans un canal poreux vertical sont analysées pour deux modes de stockage : sensible et latente. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Ont conclu que l'évolution de la température pendant les cycles de charge et de décharge, ainsi l'énergie stockée pendant ces deux processus a été mise en évidence. Une concordance satisfaisante entre les résultats numériques et expérimentaux est démontrée. Les différentes études montrent que les billes de verre formant la matrice poreuse peuvent être avantageusement remplacées par des capsules contenant un matériau à changement de phase. Cette approche permet d'améliorer l'inertie thermique ainsi que la quantité d'énergie totale stockée dans ce type de réservoir thermique.

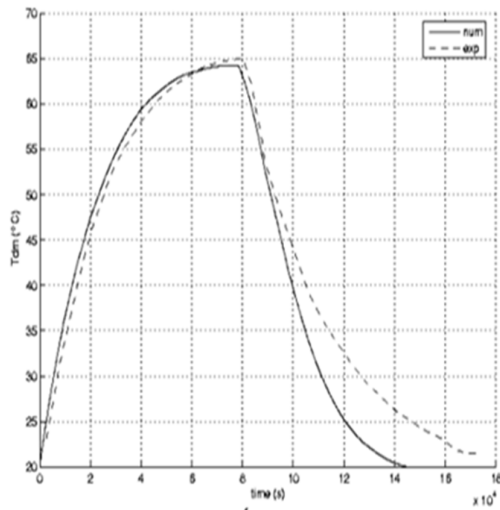


Figure II.7 : Evolution de température moyenne du milieu poreux, Pour les deux cycles de charge et décharge [$q=250 \text{ W/m}^2$; $A=5.7$; $d=10\text{mm}$ (verre)].

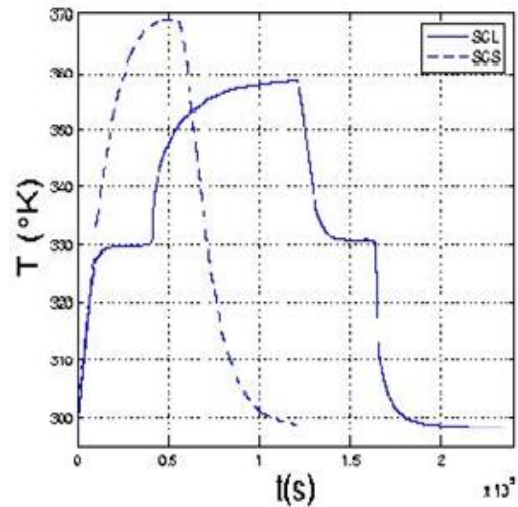


Figure II.8 : Evolution du stockage thermique par chaleur sensible et latente ($q=250 \text{ W/m}^2$; $A=5$).

Shobhana Singh et al [28] ont examiné numériquement un stockage d'énergie thermique à haute température de $175\,000 \text{ m}^3$ tranché en forme de cône. Un modèle unidimensionnel à deux phases est développé pour simuler le comportement transitoire du stockage. Ils ont trouvé que l'épaisseur initiale de l'isolation peut être réduite jusqu'à 40 % l'efficacité et les performances du stockage à un niveau notable étendue. L'analyse paramétrique indique que le stockage en forme de conique avec un diamètre de roche de 3 cm, une épaisseur d'isolation initiale jusqu'à 0,6 m et vitesse de charge-décharge de 553 kg/s conduit à des pertes thermiques inférieures estimées à moins de 1% de l'énergie récupérée lors de la décharge dans les conditions opératoires étudiées. En outre, l'efficacité énergétique et exergetique des cycles thermiques dépasse 98 % pour la plupart des paramètres sélectionnés dans l'étude.

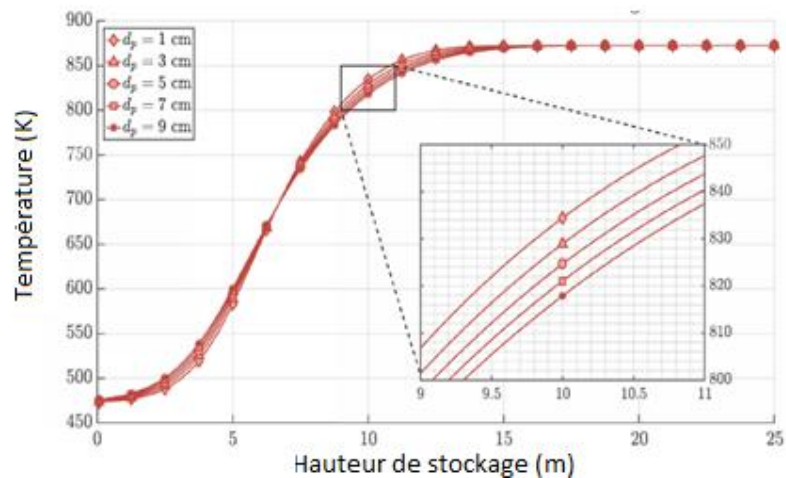


Figure II.9 : Front de chaleur de TES tronconiques après la phase de charge pour différents diamètres de roche.

Rohit Kothari et al [29] ont présenté des recherches numériques et expérimentales d'un système de stockage de l'énergie thermique à base d'air pour des applications à haute température à grande échelle. L'objectif de l'étude est de prédire l'instabilité et d'analyser l'effet des différentes quantité et temps du stockage sur l'instabilité du système de lit emballé à base d'air. En raison des pertes de chaleur des zones préférentielles des systèmes de stockage de l'énergie en lit emballé, des variations de température transversales peuvent se produire pendant les processus de recharge, de décharge et de standby. En outre, les pertes de chaleur des zones préférentielles du réservoir de stockage entraînent une diminution de la pression dans ces zones, ce qui entraîne un débit de masse accru et un refroidissement supplémentaire, et donc une variation de température transversale accrue. Les variations de température transversale peuvent détériorer les performances et, par conséquent, la faisabilité économique des systèmes de stockage de l'énergie à lit emballé. Des modèles de dynamique des fluides de calcul axisymétriques transitoires ont été élaborés pour les processus d'attente et de décharge des systèmes de stockage de l'énergie thermique de lit emballé.

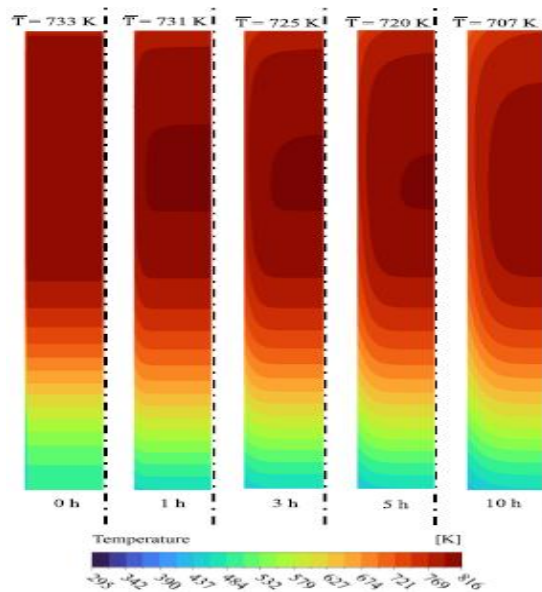


Figure II.10 : Contours de température pendant les intervalles de temps différents du processus de décharge.

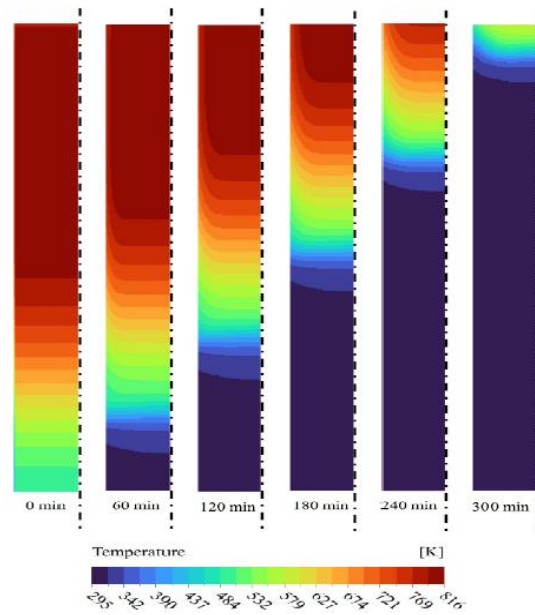


Figure II.11 : Contours de température à la fin du processus de veille de durée différentes.

Bouali Rahmouna [30] dans son travail, elle a examiné le comportement thermique et la capacité de stockage d'un système par investigation numérique en 1D. Le système sensible de stockage compose d'une cuve cylindrique remplie de galets comme milieu de stockage, où des tubes sont placés pour permettre la circulation du fluide caloporteur (air). On peut connecter cette cuve à un capteur solaire à air en utilisant un circuit fermé. Les résultats obtenus lui ont permis de tirer quelques conclusions, qui peuvent être résumées par les points suivants :

- La vitesse de fluide caloporteur influe sur la température des galets, alors une augmentation de la vitesse de fluide provoque une augmentation de température des galets.
- La nature de fluide caloporteur influe sur le temps stockage c'est-à-dire le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'eau est plus grand que le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'air, donc le stockage de chaleur avec l'eau est plus rapide que l'air.
- Aucun effet de diamètre de galet sur le stockage de chaleur.

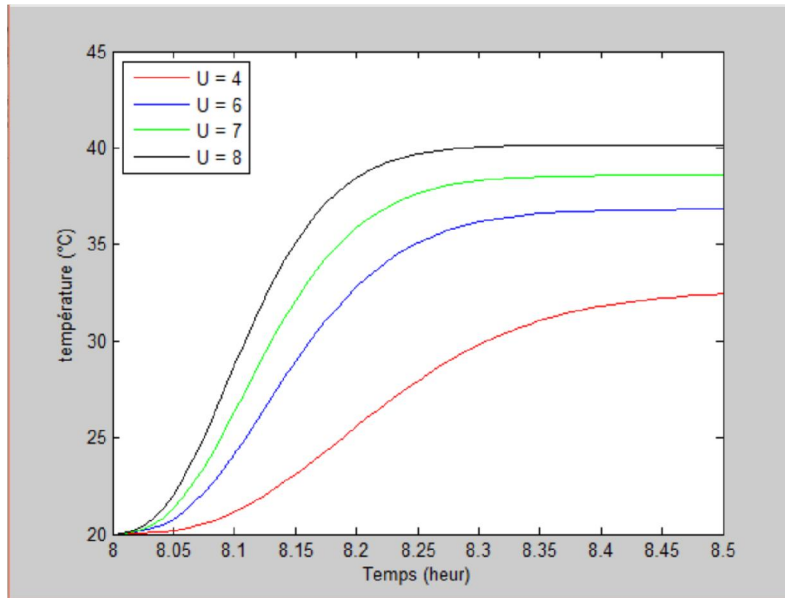


Figure II.12 : Evolution de température en fonction de temps pour des différentes vitesses de fluide.

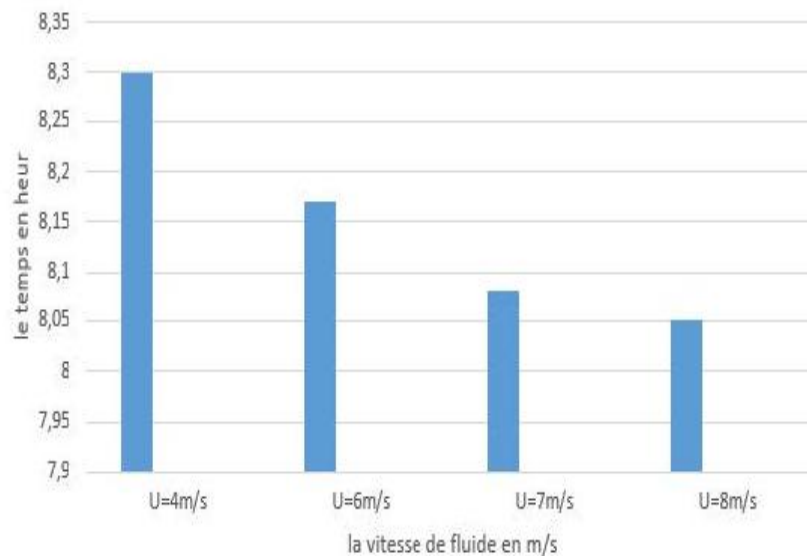


Figure II.13 : Variation du temps en fonction de la vitesse de fluide.

Lamamra Farid et Bouzerba Faouzi [31] à fin d'analyser le refroidissement à air des sources de chaleur, ont fait une simulation numérique de la convection mixte est réalisée en simulant des composants électroniques enveloppés dans une matrice poreuse dans un canal bidimensionnel. Selon les résultats obtenus, il est démontré que le nombre de Reynolds, l'insertion d'une plaque horizontale entre les sources de chaleur et la paroi supérieure du canal, la position de la plaque ainsi que la conductivité thermique des sources de chaleur ont un impact significatif sur le champ d'écoulement et le champ thermique, et donc sur le taux d'enlèvement

de la chaleur au niveau des composants électroniques poreux. D'après les résultats obtenus, il est également démontré que l'augmentation du nombre de Reynolds (vitesse d'entrée) favorise un transfert de chaleur plus efficace et donc un refroidissement optimal des composants électroniques.

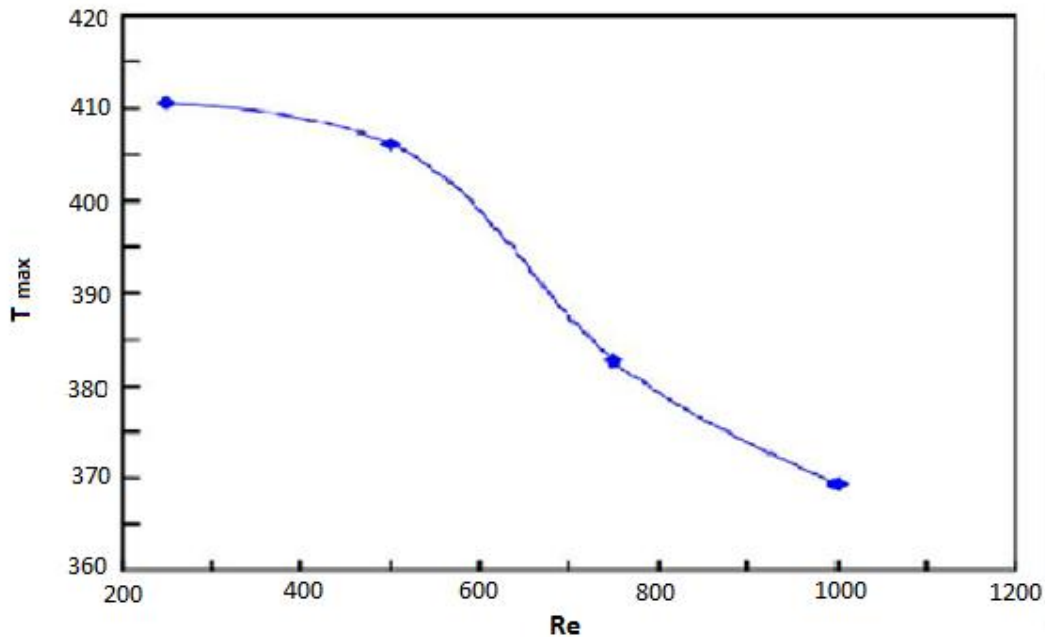


Figure II.14 : Variation de la température maximale en fonction du nombre de Reynolds.

Baoshan Xie et al [32] ont analysé expérimentalement et numériquement l'impact de la configuration d'entrée et de l'isolation sur l'expansion de la thermocline dans un réservoir d'échelle de laboratoire sous différents paramètres de fonctionnement. Le réservoir thermocline à lit emballé avec des remplisseurs raisonnables est une option rentable pour le stockage de l'énergie thermique. Parallèlement, un modèle numérique DC-3P a été développé et comparé avec les données expérimentales dans diverses conditions de fonctionnement. Les principales conclusions sont résumées comme suit.

- L'écart de température standard et la différence d'efficacité énergétique peuvent être maintenues sous 2,5 °C et dans les limites de 3%, respectivement, sous la plage applicable de $Re < 15$ et $Bi < 1.3$.
- L'injection de liquide dans le lit emballé provoque la distribution radiale non uniforme de la température et l'expansion de la thermocline près de la région d'entrée, en particulier à un débit plus élevé.

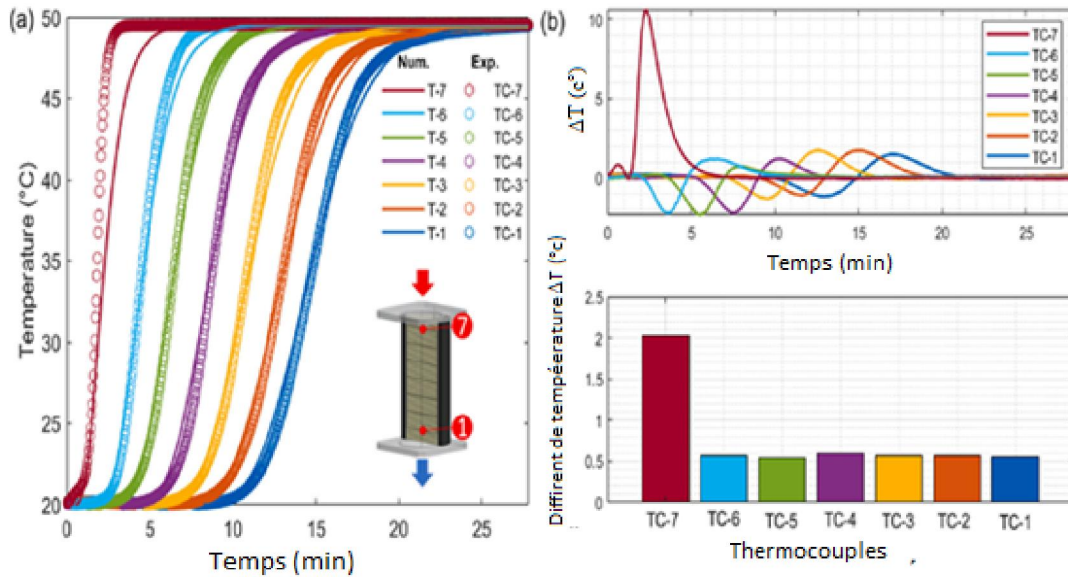


Figure II.15 : Résultats numériques et les données expérimentales : a) Evolution de la température du fluide à différents endroits de la ligne centrale axiale ; b) Différences de température du fluide et déviations normales correspondantes (case 1 : $T_f/T_c=20/50$ °C ; $D_p=7$ mm ; $q_v=0.5$ L/min ; $Pe=12$; $Re=3$; $Bi=0.76$; fonction de charge)

Khadija El Alami et al [33] dans son article un résumé de dix études disponibles évaluant la durabilité à long terme et les mécanismes de dégradation des matériaux déstockage (roches), en contact direct avec différents fluides caloporteurs (huiles et sels fondus) dans une gamme de températures de fonctionnement, a été présenté et discuté. Les résultats obtenus ont montré que, pour les deux essais (cyclisme isotherme et thermique), les fluides de transfert de chaleur (huiles et sel fondus) subissent un changement de couleur. Ce changement pourrait être dû à plusieurs causes telles que l'oxydation, et la présence d'impuretés ou de réarrangement moléculaire. En outre, certaines roches sont dans un état stable pendant les essais isothermes, contrairement à leur comportement thermique observé dans le cyclisme thermal. Il a été conclu que la compatibilité des roches ne pouvait pas être déterminée de manière fiable par des essais isothermes, mais aussi par le cyclage thermique puisqu'elle a l'avantage d'être proche des conditions de fonctionnement réelles du système TES.

Dans un autre article, **Khadija El Alami et al [34]** ont présenté une étude comparative exhaustive de trois types de roches marocaines (ignées, métamorphiques et sédimentaires). Cette évaluation s'est concentrée sur plusieurs propriétés et caractéristiques spécifiques des roches afin de sélectionner les plus potentielles parmi d'autres, susceptibles d'être utilisées comme un matériau de stockage thermique à haute température. Ainsi, sur la base des résultats expérimentaux existants dans la littérature de chaque roche étudiée, des corrélations empiriques de propriétés thermiques telles que la capacité thermique, la capacité thermique volumétrique

et la conductivité thermique ont été établies. En outre, d'autres roches marocaines nouvelles ont été identifiées et localisées sur la carte géologique du Maroc.

Tableau II.1 : Propriétés thermo-physiques et mécaniques des roches potentielles.

Type	Roche	Densité [g/cm ³]	Conductivité thermique à 20 °C [W/m K]	Chaleur spécifique à 20 °C [J/kg K]	Capacité thermique [kJ/m ³ K]	Diffusivité thermique α [mm ² /s]	Porosité [%]
<i>Igneous</i>	Peridotite	2.74-3.19		705-1005	1930-3210		0.2-5.0
	Andesite	2.5-2.8	2.3-2.8	815	2127-2167		0.20-8.0
	Dolerite	2.7-2.9	2.2-3.0	870-900	2305-2610	0.6-1.3	3.44
	Diorite	2.8-3.0	2.5	1000	2800-3000		0.10-0.50
<i>Metamorphic</i>	Amphibolite	2.96-3.01		700-1134	2110-3410	0.96-1.33	4.08
	Serpentinite	2.78	1.7-2.3	800		0.8-1.1	
	Schist	2.6-2.8	2.1-3.0	790-1100	2085-3080		10-30
<i>Sedimentary</i>	Quartzitic-sand	2.63-2.64	5-5.2	652	1714-1721		
	Dolomite	2.3-2.826	2.1	802	2205-2269		0.20-4.0

Farah Anjum et al [35] ont examiné les propriétés thermo physiques des roches sous l'influence de l'humidité et de la température. Étant donné que les briques d'argile tirées subissent plusieurs changements physiques et chimiques lors de la synthèse, un examen de la littérature existante sur l'effet de la minéralogie de l'argile, du temps de synthèse et de la température sur les propriétés thermiques et physiques des briques est également présenté dans cet article, et ont conclu que différents paramètres tels que la température, la pression et la saturation des liquides sont nécessairement impliqués dans l'augmentation de la consommation d'énergie dans les bâtiments. En bref, une étude précise des propriétés physiques telles que la porosité, la densité, les composants minéraux, la taille des grains, l'orientation du lit, l'anisotropie, les valeurs d'ondes P et les propriétés mécaniques sont importantes pour l'évaluation de la conductivité thermique des pierres de construction.

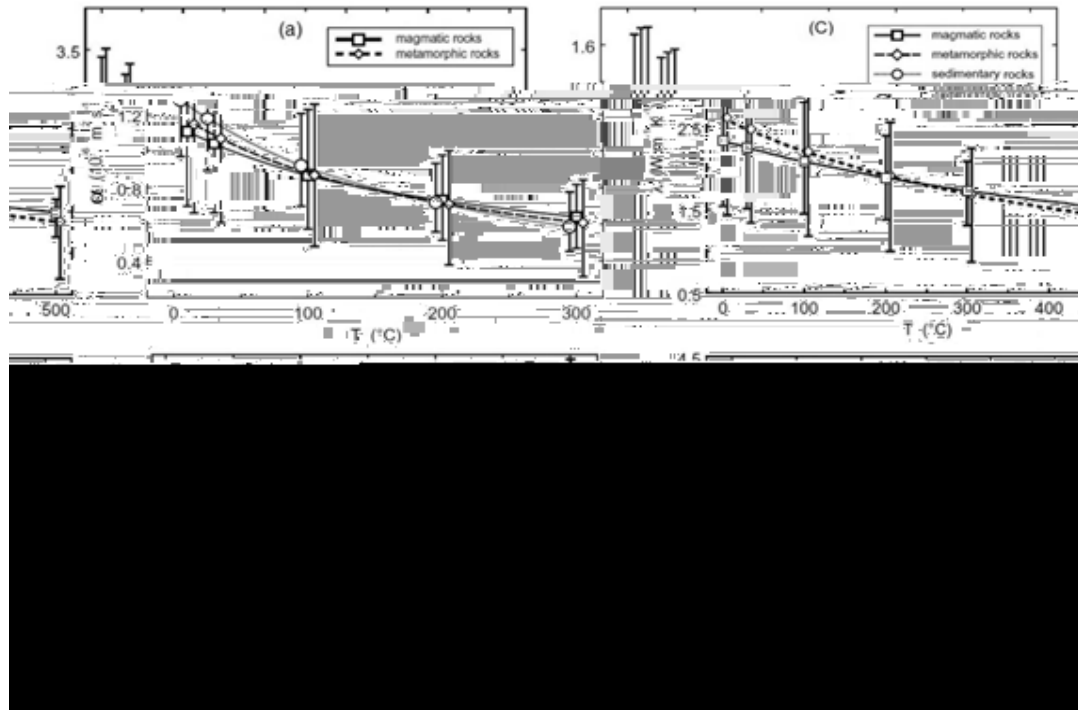


Figure II.16 : Changement des propriétés thermiques des roches (magmatiques, métamorphes et sédimentaires) avec la température ; (a) et (b) la conductivité thermique λ , (c) la diffusivité thermique α d) capacité thermique volumétrique [35].

Yousra Jemmal et al [36] ont axé leurs études sur les caractéristiques des roches siliceuses à fin de l'utiliser comme un matériau de stockage de chaleur sensible dans les systèmes de lit emballé. Ils ont étudié l'influence de la température élevée sur ces caractéristiques. Les résultats obtenus fournissent des données importantes pour la modélisation et la conception d'un système de stockage de l'énergie thermique du lit rocheux. En outre, ils ont conclu que ces roches sont des candidates potentielles car leurs propriétés thermo physiques sont similaires aux autres matériaux de stockage utilisés ou développés. Ils ont même des conductivités thermiques plus élevées (jusqu'à 6 W/m K à température ambiante) et peuvent être considérés comme des matériaux respectueux de l'environnement et à faible coût.

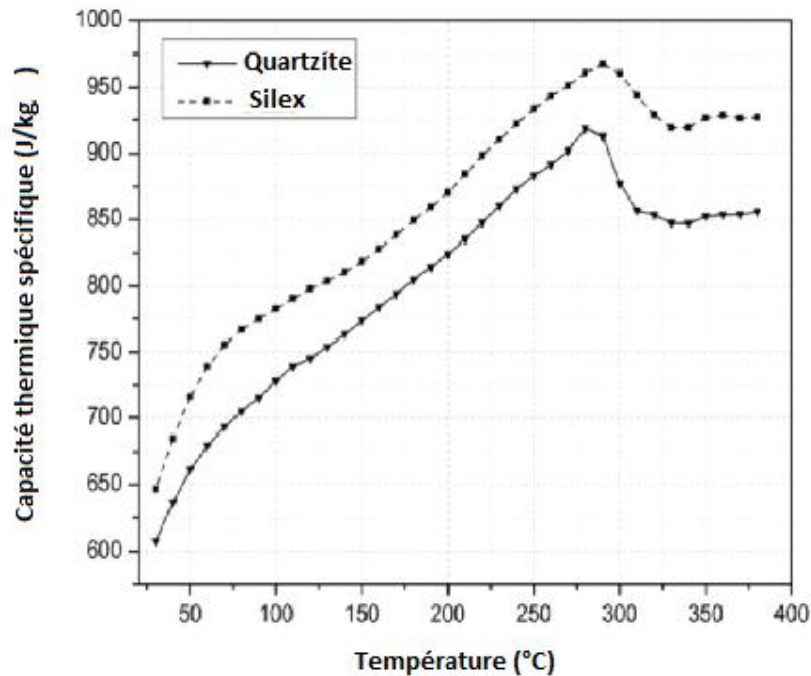


Figure II.17 : Capacité thermique spécifique des roches de quartzite et de flint mesurée expérimentalement.

Tawfiq Chekifi et Moustafa Boukraa [37] ont présenté un document qui fournit un aperçu complet de l'utilisation des outils de CFD (Computational Fluid Dynamics) dans le stockage thermique sensible. Il souligne les avantages de cette approche, tels que l'amélioration des performances du système et des économies d'énergie, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour améliorer ses performances. En outre, les derniers développements en matière d'intégration des systèmes d'énergie thermique sont présentés, ce qui inclut la conception de systèmes hybrides qui incorporent des énergies renouvelables.

En outre, ce document suggère des domaines de recherche future qui pourraient améliorer les performances et l'efficacité des systèmes de stockage thermique raisonnables de la chaleur. Par exemple, les recherches futures pourraient se concentrer sur le développement de matériaux avec une capacité de stockage thermique plus élevée, l'optimisation de la conception du système et l'amélioration des taux de transfert de chaleur. Enfin, le document fournit des orientations pour les applications futures de la technologie, en soulignant les principales caractéristiques qui devraient être prises en considération dans les projets actuels, tels que la sélection des matériaux de stockage, la conception du système et l'utilisation d'outils CFD pour l'optimisation.

La figure II.18 montre que CFD peut être utilisé pour simuler le flux et le transfert de chaleur au sein de systèmes de stockage thermique et permettant l'évaluation de la distribution de la température pour différents matériaux de stockage.

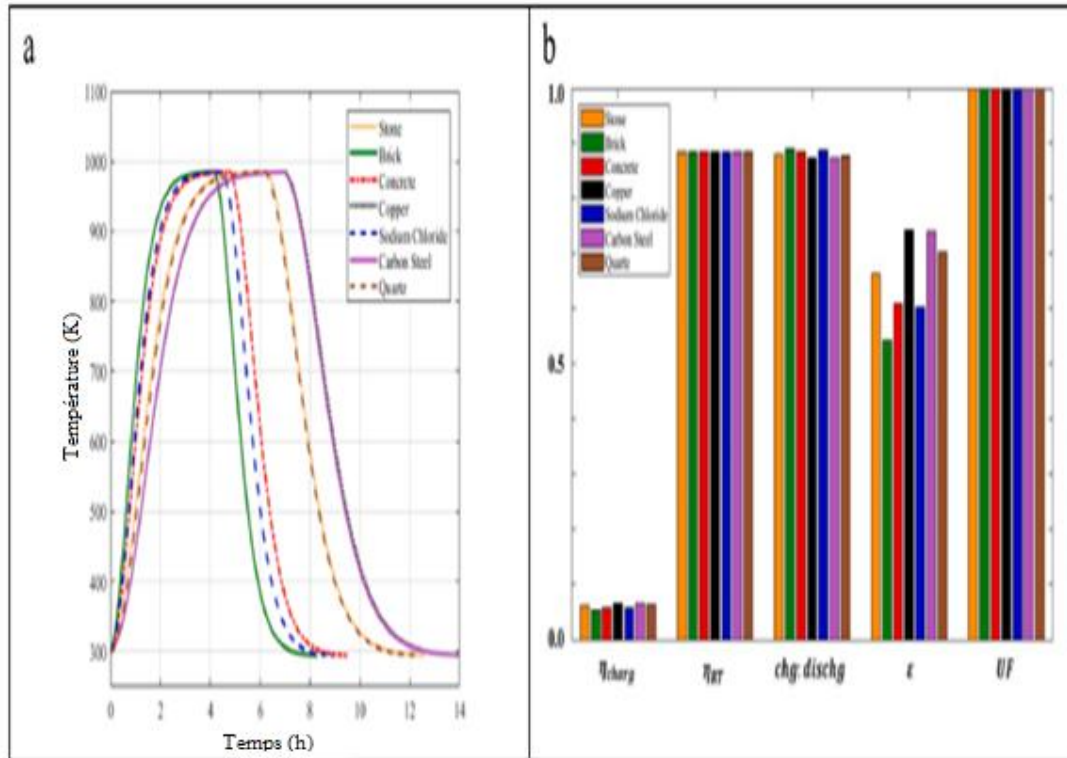


Figure II.18 : a) Profiles de température de sortie, b). Les valeurs de performance des matériaux et efficacité sont comparées pour différents matériaux.

Chapitre III

Modélisation

Mathématique

et Numérique

III.1 Introduction :

Le stockage thermique sensible est une méthode de stockage d'énergie thermique où la chaleur est stockée en augmentant ou en diminuant la température d'un matériau. Ce processus repose sur la capacité calorifique spécifique du matériau. C'est une méthode efficace et relativement simple pour stocker et utiliser l'énergie thermique.

Utiliser un milieu poreux comme zone de stockage thermique sensible est une méthode efficace pour stocker de l'énergie thermique en modifiant la température du matériau poreux et du fluide qu'il contient. Cette approche combine les avantages des matériaux solides et fluides pour le stockage de chaleur et est utilisée dans diverses applications, notamment les systèmes de chauffage solaire et les réservoirs thermiques souterrains

Dans ce chapitre, nous effectuons une simulation numérique utilisant le logiciel ANSYS Fluent 15.0 afin d'analyser le comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air bidimensionnel, transitoire et turbulent qui traverse un canal rectangulaire contenant un milieu poreux, tel qu'une zone de stockage sensible. Les informations concernant le modèle étudié (géométrie, condition initiale et les sections de mesures sélectionnées) sont basées sur une expérience déjà menée à l'université de Tlemcen (ABOU BEKR BELKAID) au sein du laboratoire de recherche énergétique et thermique appliquée n°63 ETAP [38].

III.2 Modèle physique :

Le domaine étudié est un canal de forme rectangulaire d'une longueur de 200 cm, une hauteur de 13 cm et une largeur de 17 cm, contient un milieu poreux comme une zone de stockage thermique appelée lit thermique. Cette zone est située à 90 cm de l'entrée du canal, de dimensions 50 cm de longueur.

L'air chaud de température initiale de 90°C et d'une vitesse uniforme entre dans le canal qui contient des roches à une température de 20°C. Les parois supérieure et inférieure de canal sont isolées. Le système de coordonnées et le modèle physique du canal de stockage sont illustrés dans la figure III.1 et le tableau III.1.

Les tableaux III.2, III.3 présentent les caractéristiques thermo-physiques de l'air et des roches utilisée dans les calculs.

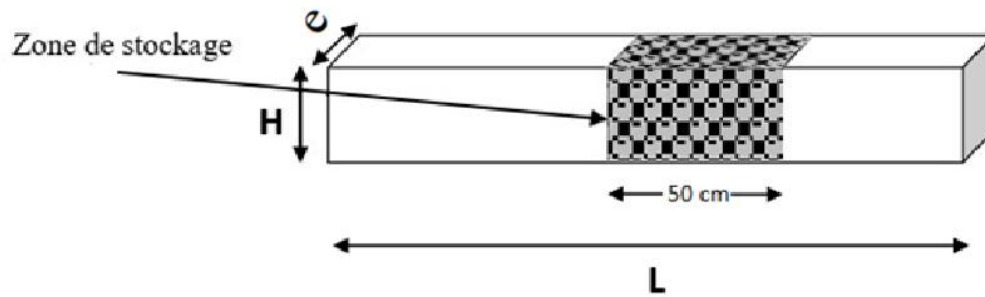


Figure III.1 : Géométrie du modèle considéré.

Tableau III.1 : Dimension de la géométrie étudiée.

Longueur (L)	200 cm
La zone de stockage (milieux poreux)	50 cm
Epaisseur (e)	17 cm
Hauteur (H)	13 cm

Tableau III.2 : Propriétés de l'air.

Chaleur spécifique C_p	1006,43 (J /kg.K)
Conductivité thermique λ	0,0242 (W/m.K)
Masse volumique ρ	1,225 (kg/m ³)

Tableau III.3 : Propriétés de la roche (matériau de stockage) [39].

Masse volumique ρ	2750 (kg/m ³)
Chaleur spécifique C_p	970 (J/kg K)
Conductivité thermique λ	3.2 (W/m K)

III.3 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été adoptées :

- L'écoulement est supposé bidimensionnel, instationnaire et en régime turbulent.
- L'air est supposé incompressible, visqueux et newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques de l'air et de la roche sont considérées constantes.
- Le milieu poreux est isotrope, homogène, perméable et non déformable, il est saturé par un seul fluide (air) qui est en équilibre thermique avec le milieu poreux.

III.4 Modèle mathématique :

Le système d'équations qui gouverne l'écoulement convectif de l'air à travers le canal de stockage est basé sur les principes de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle k-ε epsilon standard est choisi pour la description de l'écoulement turbulent.

(a) Dans l'air :

- Equation de la continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{III.1}$$

Ou u et v représente les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y , respectivement

- Equation de la quantité de mouvement :

Suivant l'axe ox :

$$\rho \left(\frac{\partial(u)}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{III.2}$$

Suivant l'axe oy :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{III.3}$$

- Equation de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(ku)}{\partial x} + \frac{\partial(kv)}{\partial y} \right) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{III.4}$$

- Equation du taux de dissipation ε :

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon v)}{\partial y} \right) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon) \tag{III.5}$$

Avec

$$\mu_t = \frac{\rho c_\mu k^2}{\varepsilon} \text{ et } G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} \quad \text{III.6}$$

Les constantes intervenant dans le modèle $k - \varepsilon$ sont données par :

$$c_\mu = 0,09, c_1 = 1,44, c_2 = 1,92 ; \sigma_k = 1 ; \sigma_\varepsilon = 1,3 \text{ et } \sigma_t = 1.$$

- Equation d'énergie:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right) = (\lambda) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{III.7}$$

(b) Dans la zone de stockage (milieu poreux) :

Afin de simuler la capacité du stockage des galets, nous avons modélisé la zone de stockage comme un milieu poreux. Ce dernier se caractérise par un certain nombre de grandeurs moyennes, géométriques ou statistiques [40] : porosité ε qui caractérise le rapport du volume des vides au volume apparent du milieu poreux.

- La perméabilité K qui mesure l'aptitude d'un milieu poreux à se laisser traverser Par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression ou d'un champ de gravité.

Les lois des écoulements en milieu poreux ne constituent que des approximations. On s'intéresse en général qu'au phénomène à l'échelle macroscopique. Plusieurs lois phénoménales sont utilisées, la plus importante est la loi de Darcy. Lorsque la vitesse débitante augmente, les forces d'inertie ne sont plus négligeables. Forchheimer a proposé une modification empirique de la loi de Darcy en rajoutant une relation non linéaire du second ordre entre le gradient de pression et la vitesse de filtration. Cette formulation est appelée de Darcy-Forchheimer. Les milieux poreux sont modélisés par l'addition d'un terme de source (Si) aux équations de la conservation de quantité de mouvement :

- Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{III.8}$$

- Equation de conservation la quantité de mouvement :

Suivant l'axe ox :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \mu \frac{u}{K} - \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |u|u \quad \text{III.9}$$

Suivant l'axe oy :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_t}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \mu \frac{v}{K} - \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |v|v \quad \text{III.10}$$

$$\text{Avec ;} \quad K = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad \text{et} \quad C_F = \frac{3,5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad \text{III.11}$$

- C_F est le facteur de résistance inertiel.
- K est La perméabilité du milieu poreux, détermine la facilité avec laquelle l'air peut passer à travers. Une perméabilité élevée signifie moins de résistance.

- Equation de conservation d'énergie:

Dans notre étude le milieu poreux (roches) et le fluide(air) sont supposés être en équilibre thermique, on suppose que les températures du fluide et du solide sont égales à chaque point du milieu poreux. L'analyse du transfert de chaleur est simplifiée par cette hypothèse qui permet d'utiliser une seule équation de température pour décrire le système, en prenant en compte les propriétés thermiques combinées du solide et du fluide.

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_{eff} \left(u_f \frac{\partial T}{\partial x} + v_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_{eff} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{III.12}$$

➤ *Conductivité Thermique Effective λ_{eff}*

La conductivité thermique effective λ_{eff} est utilisée pour modéliser la conduction de la chaleur à travers le milieu poreux. Elle représente une moyenne pondérée des conductivités thermiques des phases fluide λ_f solide λ_s , en tenant compte de la porosité ε du milieu poreux.

$$\lambda_{eff} = \varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad \text{III.13}$$

➤ *Terme Transitoire et Inertie Thermique*

En analyse transitoire, le terme temporel de l'équation de l'énergie doit inclure l'inertie thermique, c'est-à-dire la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. Lorsqu'on suppose que

le milieu poreux et le fluide sont en équilibre thermique, l'inertie thermique combinée des deux phases est prise en compte.

La capacité thermique volumique effective $(\rho C_p)_{eff}$ est définie comme suit :

$$(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon(\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon)(\rho C_p)_s \quad \text{III.14}$$

$(\rho C_p)_f$: Capacité thermique volumique du fluide.

$(\rho C_p)_s$: Capacité thermique volumique du solide.

III.5 Conditions initiale et aux limites :

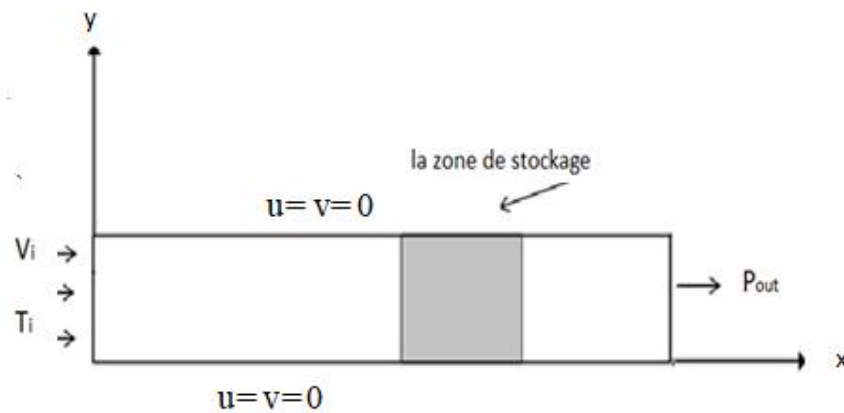


Figure III. 2 : Conditions initiales et aux limites.

III.5.1 Condition initiale :

La température initiale dans le canal est fixée à 20 °C.

A l'entrée de canal : $T_i=90^\circ\text{C} = 363 \text{ K}$ et $V_i=0,25 \text{ m/s}$.

A la sortir de canal : condition Pressure **Outlet**.

III.5.2 Conditions aux limites :

- Les parois supérieure et inférieure du canal sont supposées isolées $\partial T / \partial y = 0$.
- Ainsi que la condition de non glissement (**Type Wall**) est imposée (vitesses nulles sur les parois supérieure et inférieure) : $u = v = 0$.

III.6 Calcul de Reynold Re :

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad \text{III.15}$$

III.6.1 Calcul du diamètre hydraulique D_h :

$$a=0.17 \text{ (m)}$$

$$b=0.13 \text{ (m)}$$

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{section de passage}}{\text{Perimetre mouille}} \quad \text{III.16}$$

$$D_h=0.1473 \text{ (m)}$$

Pour $V_i=0.21 \text{ m/s}$:

$$Re = \frac{1,225 \cdot 0,21 \cdot 0,1473}{1.7894e-05} = 2117,63$$

Pour $V_i=0.25 \text{ m/s}$:

$$Re = \frac{1,225 \cdot 0,25 \cdot 0,1473}{1.7894e-05} = 2396,05$$

Pour $V_i=0.29 \text{ m/s}$:

$$Re = \frac{1,225 \cdot 0,29 \cdot 0,1473}{1.7894e-05} = 2924,35$$

Pour les trois vitesses $Re \geq 2100$ donc l'écoulement est turbulent.

III.6.2 Profil de vitesse axiale :

Le profil de vitesse axiale d'un écoulement bidimensionnel transitoire et turbulent dans un canal rectangulaire est présenté sur la figure III.4. Il est caractérisé par une vitesse maximale au centre du canal, une diminution progressive vers les parois, et des variations temporelles dues aux conditions transitoires.

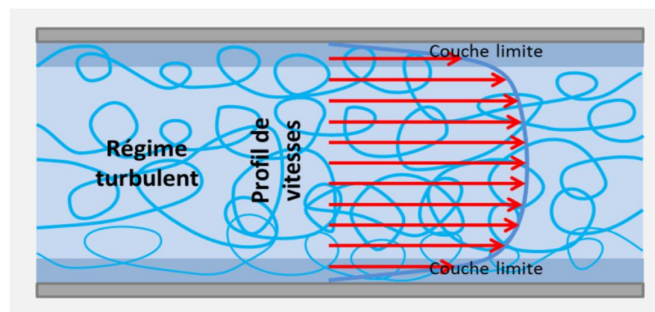


Figure III.3 : Profil de vitesse axiale d'un écoulement turbulent.

III.6.3 Calcul des débits d'air pour différentes vitesses initiales :

$$\dot{m}_1 = \rho s v_1 = 1,225 * 0,0221 * 0,21 = 0,00568 \text{ (kg/s)}$$

$$\dot{m}_2 = \rho s v_2 = 1,225 * 0,0221 * 0,25 = 0,00676 \text{ (kg/s)}$$

$$\dot{m}_3 = \rho s v_3 = 1,225 * 0,0221 * 0,29 = 0,00785 \text{ (kg/s)}$$

III.7 Simulation numérique :

Les calculs numériques ont été effectués par le code du calcul ANSYS Fluent 15.0

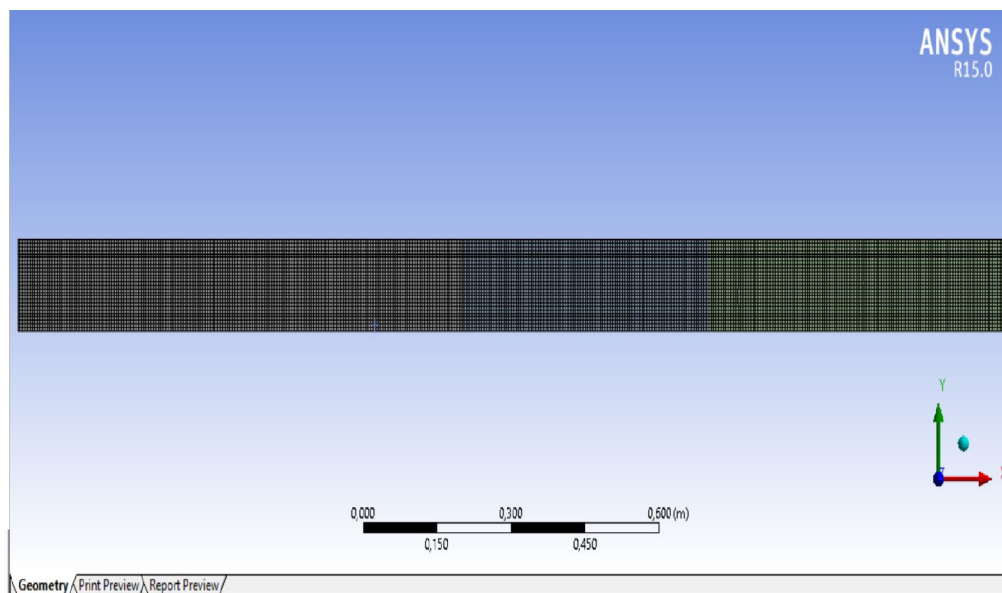
III.7.1 Création de la géométrie et le maillage :

Figure III.4 : Maillage de canal horizontal bidimensionnel.

III.7.2 Procédure du calcul numérique :

Pour les calculs numériques réalisés avec FLUENT, les configurations suivantes sont utilisées.

1. Le modèle du solveur utilisé est Pressure Based (isolée), cette formulation permet de résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement et celle de l'énergie toutes isolées les unes des autres.
2. La formulation Time : Transient ; pour l'étude instationnaire du problème physique.
3. On a choisi le model de turbulence k-epsilon.

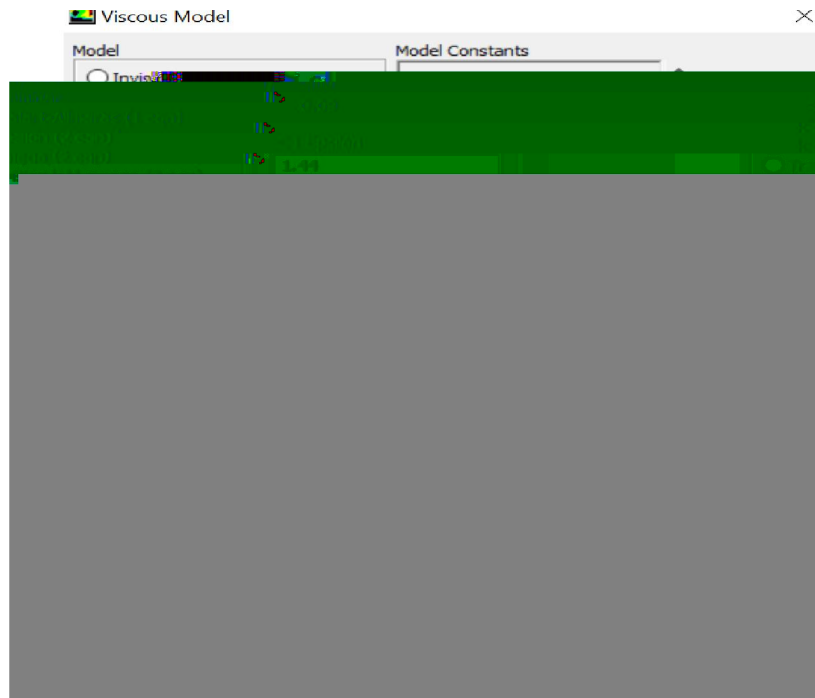


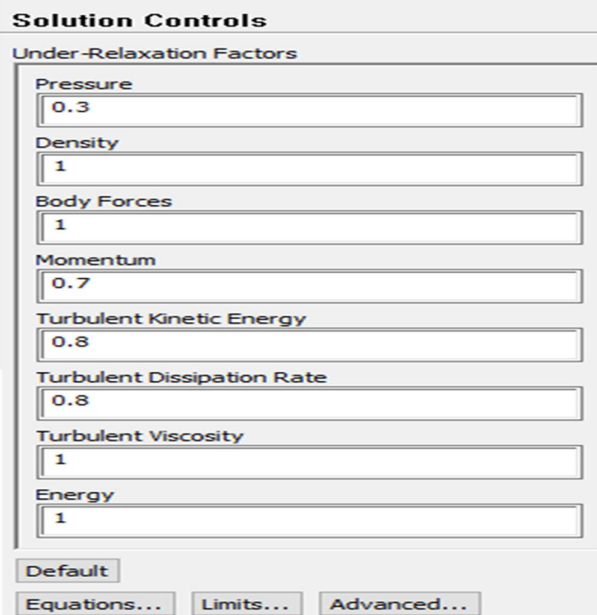
Figure III.5 : Modèle de turbulence utilisé.

- Le modèle Darcy-Forchheimer est adapté pour la modélisation du milieu poreux.



Figure III.6 : Zone poreuse.

1. Le schéma SIMPLE est adopté Pour le couplage pression-vitesse dans l'équation de Navier-Stokes.
2. Les facteurs de sous relaxation qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure III.7



The image shows a software interface titled "Solution Controls" with a sub-section "Under-Relaxation Factors". It contains several input fields with the following values:

Variable	Value
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
Energy	1

At the bottom of the dialog, there are three buttons: "Default", "Equations...", "Limits...", and "Advanced...".

Figure III.7 : Facteurs de relaxation utilisés.

Chapitre IV

Résultats

et

Interprétations

VI.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on expose les résultats de simulation numérique obtenus en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT 15.0, ainsi que les divers phénomènes dynamiques et thermiques observés. Cela permet de mieux comprendre le processus de stockage et de déstockage par la chaleur sensible.

VI.2 Validation numérique :**VI.2.1 Test de maillage :**

On a réalisé un test de maillage afin de trouver les temps de calcul les plus appropriés pour une approximation plus précise (convergence, précision). On a testé quatre tailles de maillage différentes 28681, 12876, 10400 et 7326 cellules.

Les profils de vitesses sont tracés pour trois sections de distances situées à des positions différentes à travers la longueur du canal de stockage, à savoir $x=0.58$ m, $x=1.03$ m et $x=1.73$ m, respectivement avant, au sein et après la zone de stockage occupée par le milieu poreux (figure IV.1).

Figure IV.1 : Sections choisies.

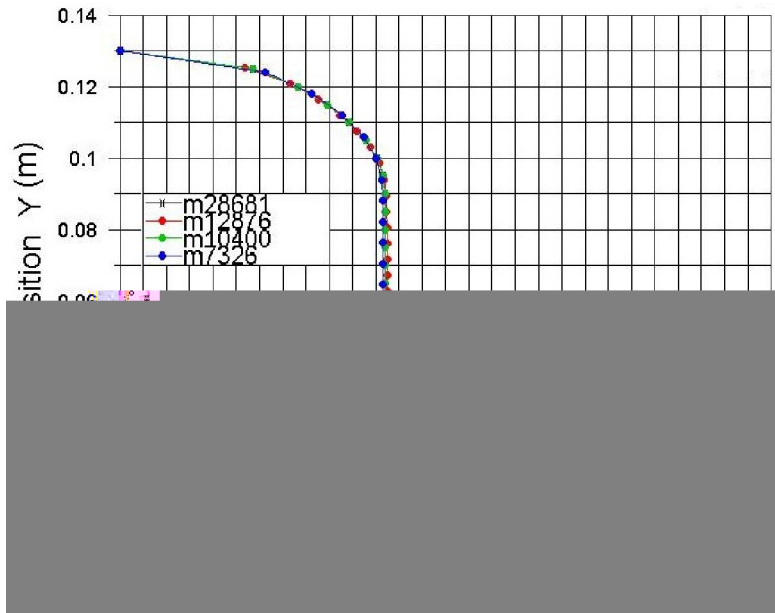


Figure IV.2 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x=0.58$ m.

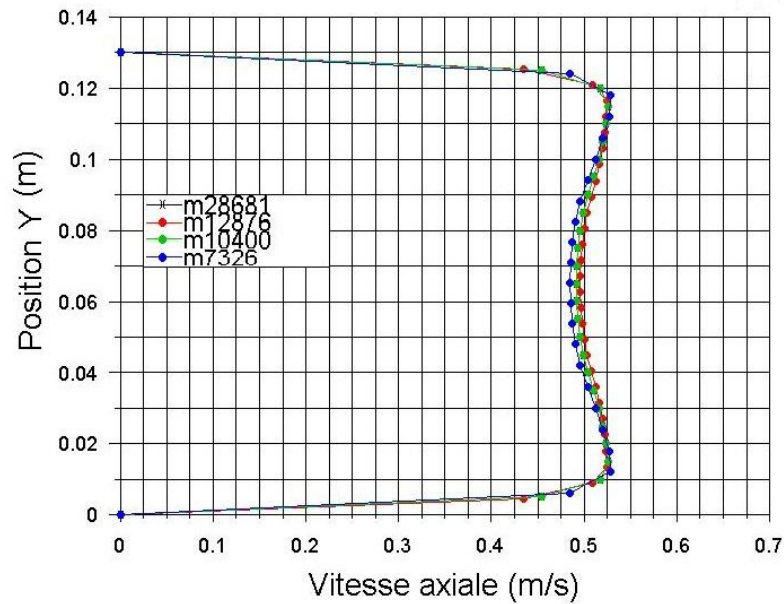


Figure IV.3 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x=1.03$ m.

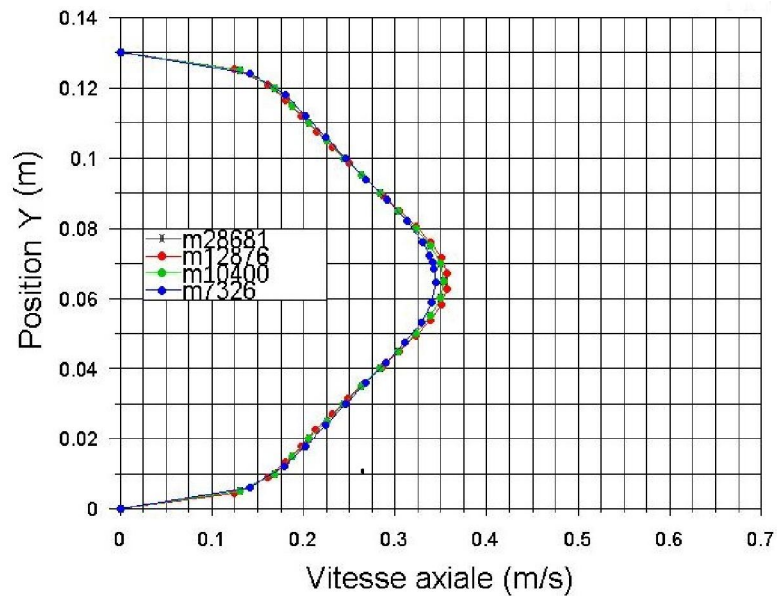


Figure IV.4 : Variation de la vitesse axiale pour quatre maillages différents à $x=1.73$ m.

L'évolution de la vitesse axiale pour les quatre maillages testés (28681, 12876, 10400 et 7326 cellules) est illustrée dans les figures IV.2, IV.3 et IV.4. Le pas du temps $\Delta t=3$, la vitesse initiale étant de 0.25 (m/s) et la porosité de 0.5. Il est observé que tous les maillages évoluent de manière semblable au début, avec une légère différence se produit à niveau du centre du canal pour les maillages de 12876 et 7326 ce qui entraîne leur suspension. Cependant, les maillages de 10400 et 28681 présentent une proximité remarquable, ce qui conduit à la sélection du maillage de 10400 pour obtenir une précision suffisante tout en réduisant le temps de calcul.

VI.2.2 Test de pas du temps (dt) :

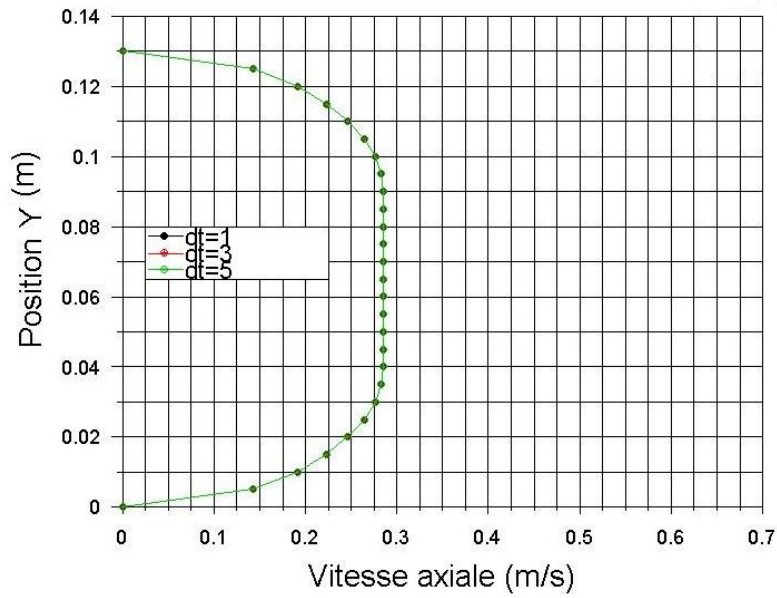


Figure IV.5 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x=0.58$ m.

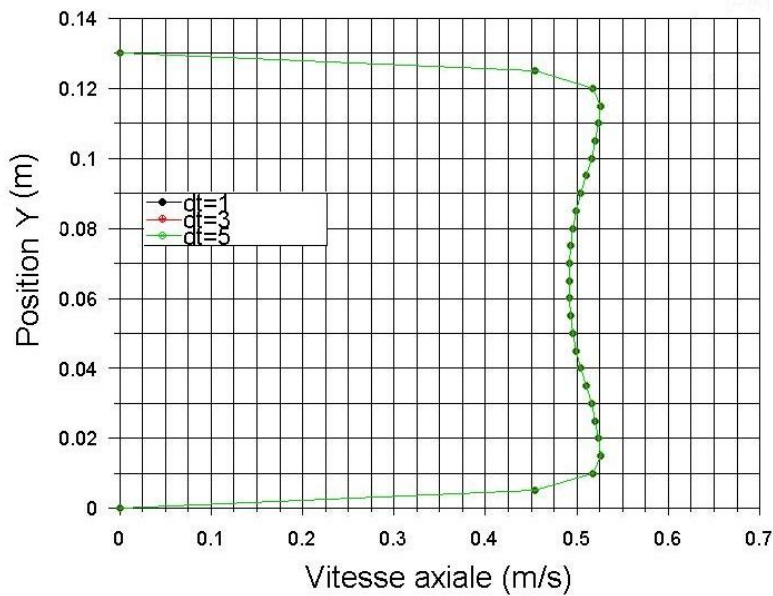


Figure IV.6 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x=1.03$ m.

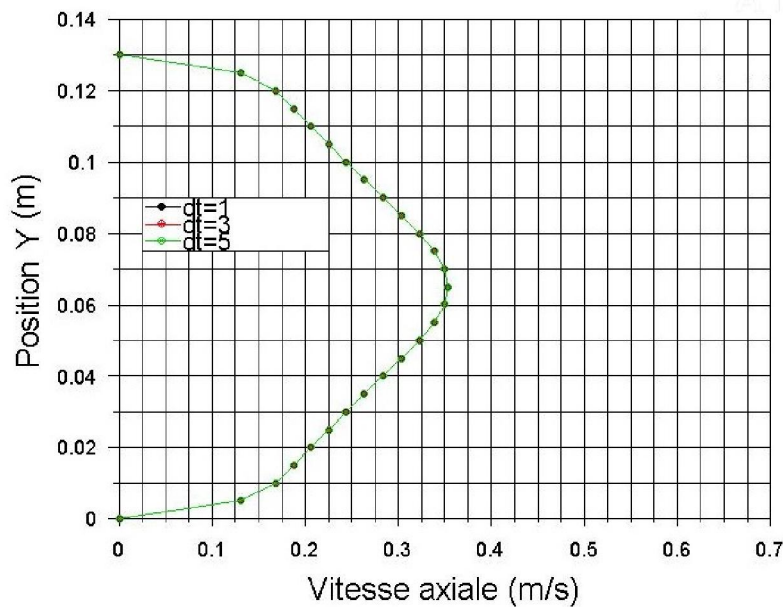


Figure IV.7 : Variation de la vitesse axiale pour différents pas du temps à $x=1.73$ m.

Les figures (IV.5, IV.6 et IV.7) représentent l'évolution de vitesse axiale pour différents pas de temps avec un maillage de 10400 cellules. On remarque que les trois pas de temps sont très similaires. Ainsi, on a opté pour le pas de temps de 3.

VI.3 Etude dynamique :

VI.3.1 Profil de vitesse dans différentes sections du canal de stockage :

Nous allons tracer les profils de vitesses pour les conditions initiales suivantes et :

Vitesse initiale (m/s)	0.25
Température (K)	393
Porosité	0.5

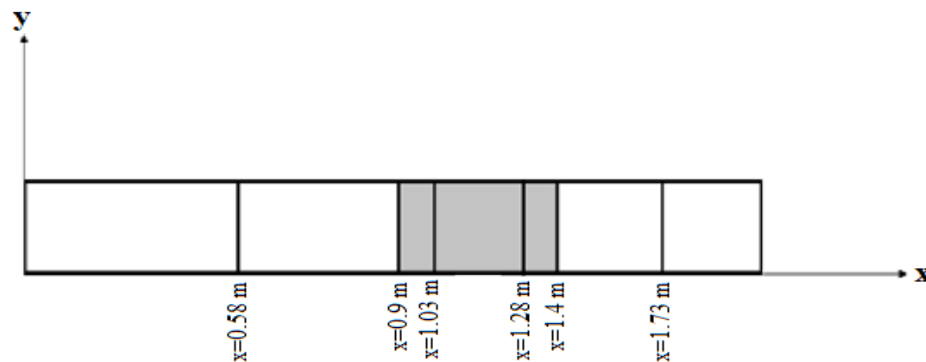


Figure IV.8 : Sections sélectionnées.

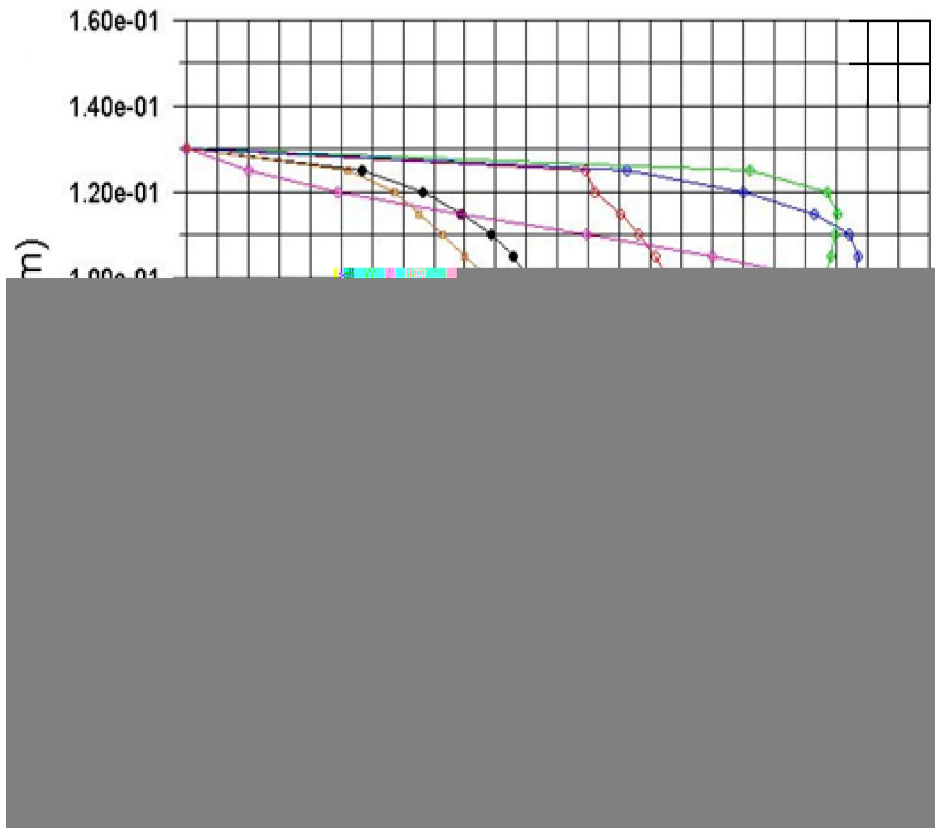


Figure IV.9 : Variation de la vitesse axiale à différentes distances du canal de stockage.

La figure IV.9 illustre la variation de vitesse axiale à différentes distances sélectionnées le long du canal de stockage, avec des valeurs respectives de $x = 0.58$ m, $x = 0.9$ m, $x = 1.03$ m et $x = 1.28$ m, $x = 1.4$ m, et $x = 1.73$ m (figure IV.8).

Initialement, l'air entre avec une vitesse uniforme $V_i = 0.25$ m/s où le profil de vitesse est plat ($x=0$). Au fur et à mesure que l'air progresse dans le canal ($x=0.58$ m), des couches limites se forment le long des parois supérieure et inférieure, réduisant la vitesse près des parois à zéro, mais au centre du canal, loin des parois, la vitesse est maximale et relativement uniforme atteignant 0.29 (m/s). Le profil de vitesse axiale prend la forme parabolique aplatie (écoulement turbulent).

Nous avons remarqué qu'avant d'atteindre le milieu poreux, le profil de vitesse axiale se développe de manière similaire à un canal sans obstacle. En approchant du milieu poreux, ($x=0.9$ m) le profil de vitesse commence à se déformer et la vitesse atteint un maximum de $0,4$ (m/s).

À l'intérieur du milieu poreux ($x= 1.03, 1.28 \text{ m}$), Il est observé que la vitesse continue de croître en raison de la réduction de la surface, avec une diminution notable au centre du canal, ce qui entraîne une forme concave du profil de vitesse, due à une diminution de la turbulence à l'intérieur du milieu poreux.

On remarque aussi que le profil de vitesse change progressivement sa forme à la sortie du milieu poreux ($x=1.4 \text{ m}$), avec une réformation des couches limites.

À une distance de $x=1.73\text{m}$, juste avant la sortie du canal et après la zone poreuse, la vitesse a considérablement diminué de 0.53 (m/s) à $x=1.4$ jusqu'à 0.36 (m/s) , en raison de l'augmentation soudaine de la surface. La forme parabolique du profil de vitesse confirme l'ignorance de l'impact de la turbulence dans le milieu poreux.

VI.3.2 Effet de la variation de débit q_m sur la vitesse axiale d'air :

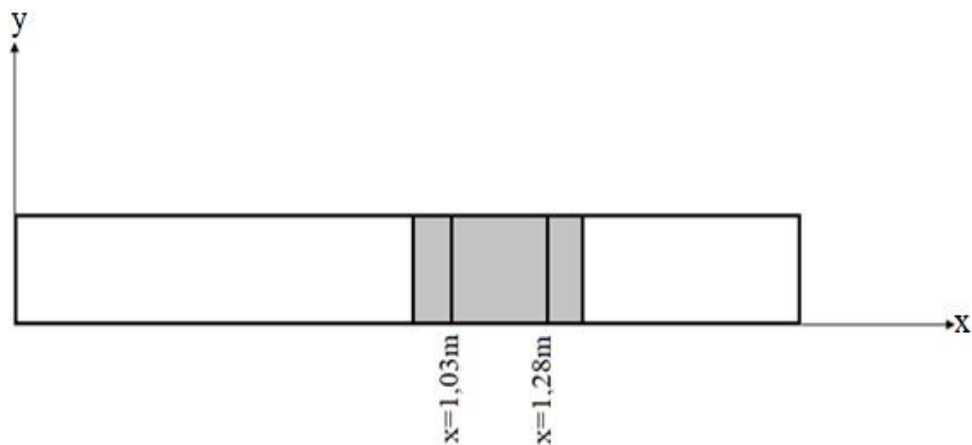


Figure IV.10 : Sections sélectionnées.

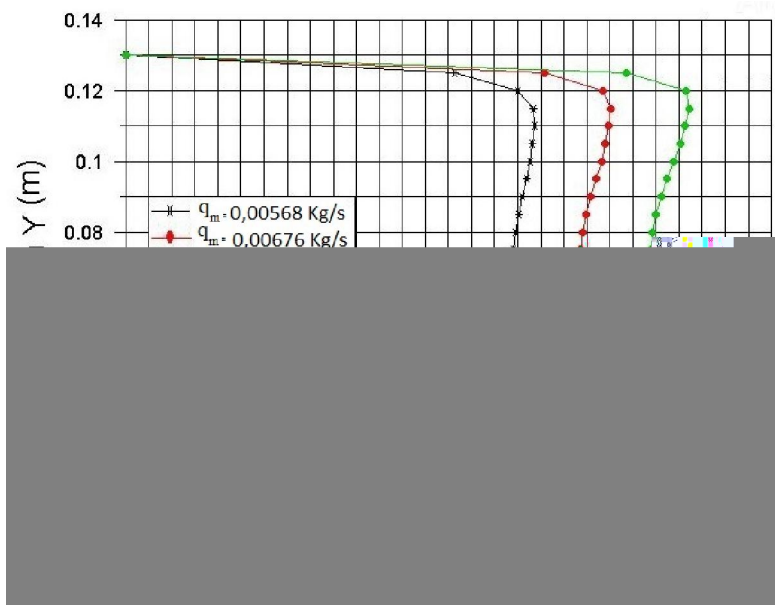


Figure IV.11 : Effet de la variation du débit sur la vitesse axiale à x= 1.03 m.

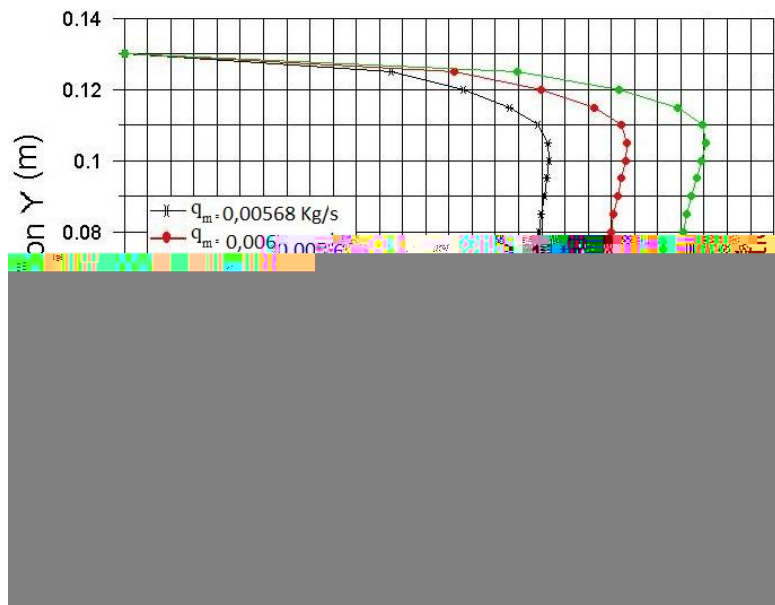


Figure IV.12 : Effet de la variation du débit sur la vitesse axiale à x=1.28 m.

Les figures (IV.11 et IV.12) présentent l’effet de la variation du débit sur la vitesse axiale au sein de la zone de stockage. Une augmentation proportionnelle du débit et de la vitesse axiale de l’air dans le canal de stockage est observée pour les deux positions sélectionnées, x=1.03 m et x=1.28 m, tandis que la forme du profil de vitesse axiale reste inchangée.

IV.3.3 Effet de la variation de porosité ϵ sur la vitesse axiale d'air :

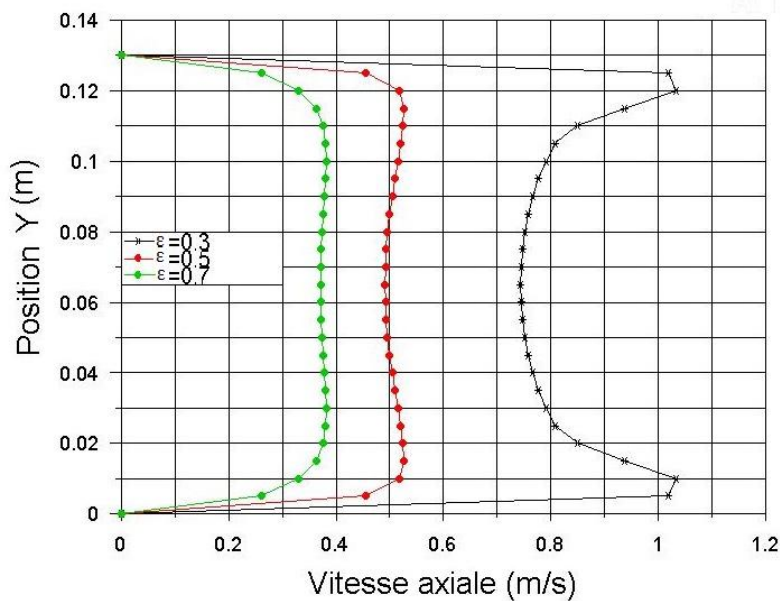


Figure IV.13 : Effet de la variation de la porosité ϵ sur la vitesse axiale à x=1.03 m.

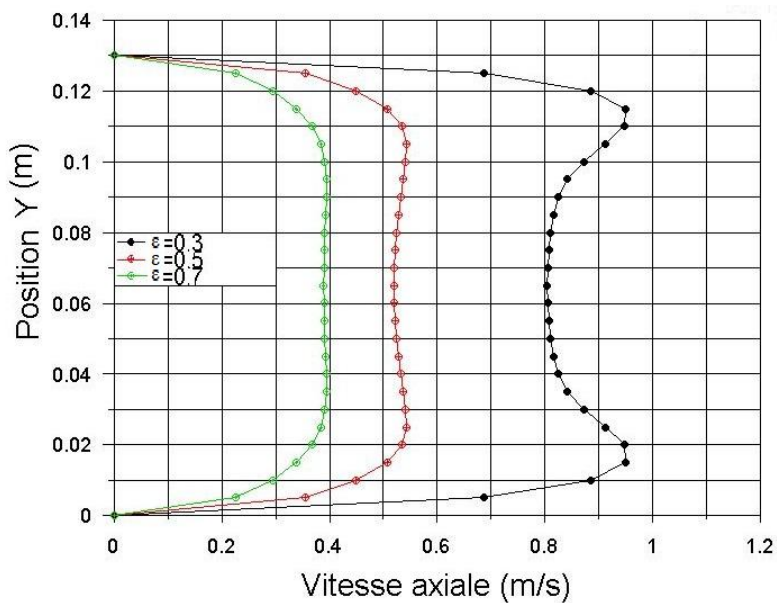


Figure IV.14 : Effet de la variation de la porosité ϵ sur la vitesse axiale à x=1.28 m.

Les figures IV.13 et IV.14 montrent l'influence de la porosité ε sur la variation de la vitesse axiale d'air au sein de la zone de stockage.

En réalité, une réduction de la porosité correspond à une réduction de l'espace d'air dans le milieu poreux (la surface d'échange), ce qui entraîne une augmentation de la vitesse d'air et inversement.

Nous avons remarqué que la forme du profil de vitesse est identique pour les porosités de 0,7 et 0,5, avec une légère diminution de la vitesse au centre du canal. Cependant, pour une porosité de 0,3, la diminution est beaucoup plus significative.

VI.4 Etude thermique :

L'évolution temporelle de la température dans un milieu poreux implique la dynamique de transfert de chaleur dans les deux phases, fluide (air) et solide(roche), ainsi que l'interaction entre ces phases. Pour simplifier la modélisation, Nous avons adopté l'hypothèse d'équilibre thermique local (LTE), c'est-à-dire que la température du fluide et du solide est la même à tout moment et en tout point du milieu poreux.

VI.4.1 Contour de température en fonction du temps :

La variation de la température de l'air le long d'un canal contenant un milieu poreux est modélisée en tenant compte des mécanismes de transfert de chaleur par convection et conduction. Le milieu poreux agit comme une zone d'échange thermique, où la chaleur est transférée entre l'air et le matériau poreux, modifiant ainsi la température de l'air au fur et à mesure qu'il se déplace le long du canal.

Phase de stockage :

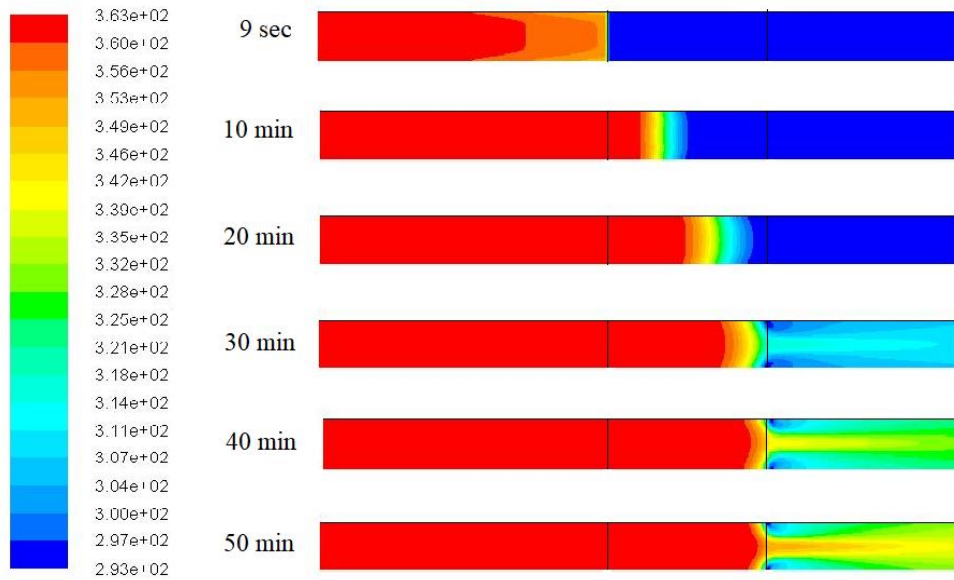


Figure IV.15 : Contours de température pendant la phase de stockage.

Phase de déstockage :

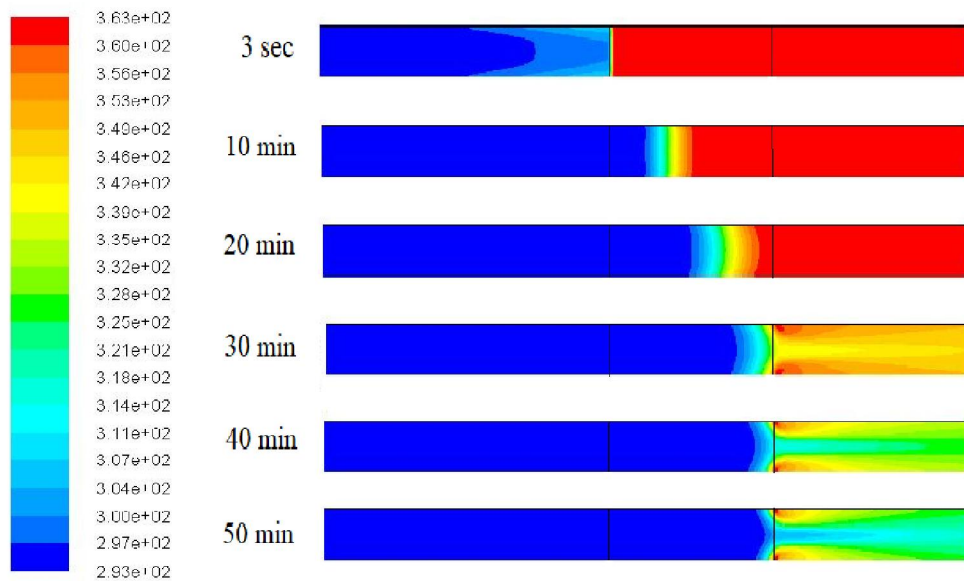


Figure IV.16 : Contours de température pendant la phase de déstockage.

Les figures **IV.15** et **IV.16** représentent la variation de la température de l'air à long du canal en fonction du temps.

Il est évident que le milieu poreux joue le rôle d'une zone d'échange thermique, où la chaleur est transférée entre l'air et le matériau poreux, modifiant ainsi la température de l'air au fur et à mesure qu'il se déplace le long du canal.

Pendant la phase de stockage, on remarque que La chaleur se propage rapidement le long du canal avant d'arriver à la zone de stockage (milieu poreux), ce qui entraîne une augmentation de température qui atteint 363 K à l'entrée du milieu poreux après 1 minute. Il est également observé que les isothermes présentent une forme courbée où la convection forcée est dominante.

Au fur et à mesure que l'air chaud avance et pénètre dans la zone de stockage, la propagation de la chaleur se ralentisse, car le milieu poreux commence à stocker cette chaleur en augmentant sa température. Les isothermes sont parallèles en raison de l'influence de la conduction.

Plus en approchant de la sortie de la zone de stockage, la température du milieu poreux tend à se stabiliser pour atteindre les 363 K après une durée de stockage de 60 min.

Pendant la phase de déstockage, On observe les mêmes étapes et phénomènes dans le sens de refroidissement.

VI.4.2 Variation de température en fonction du temps :

La section de sortie du milieu poreux $x = 1.4\text{cm}$ est prise en considération dans l'analyse afin d'évaluer le temps de stockage, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la section de sortie atteigne la température d'air d'entrée 363 K et atteigne l'état de stabilité.

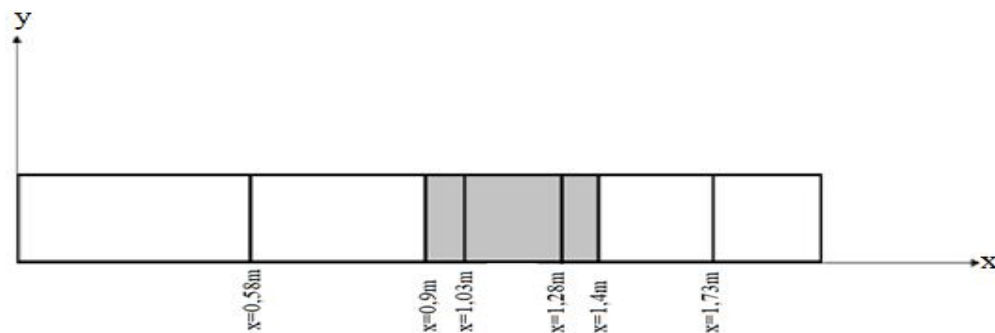


Figure IV.17 : Sections choisies.

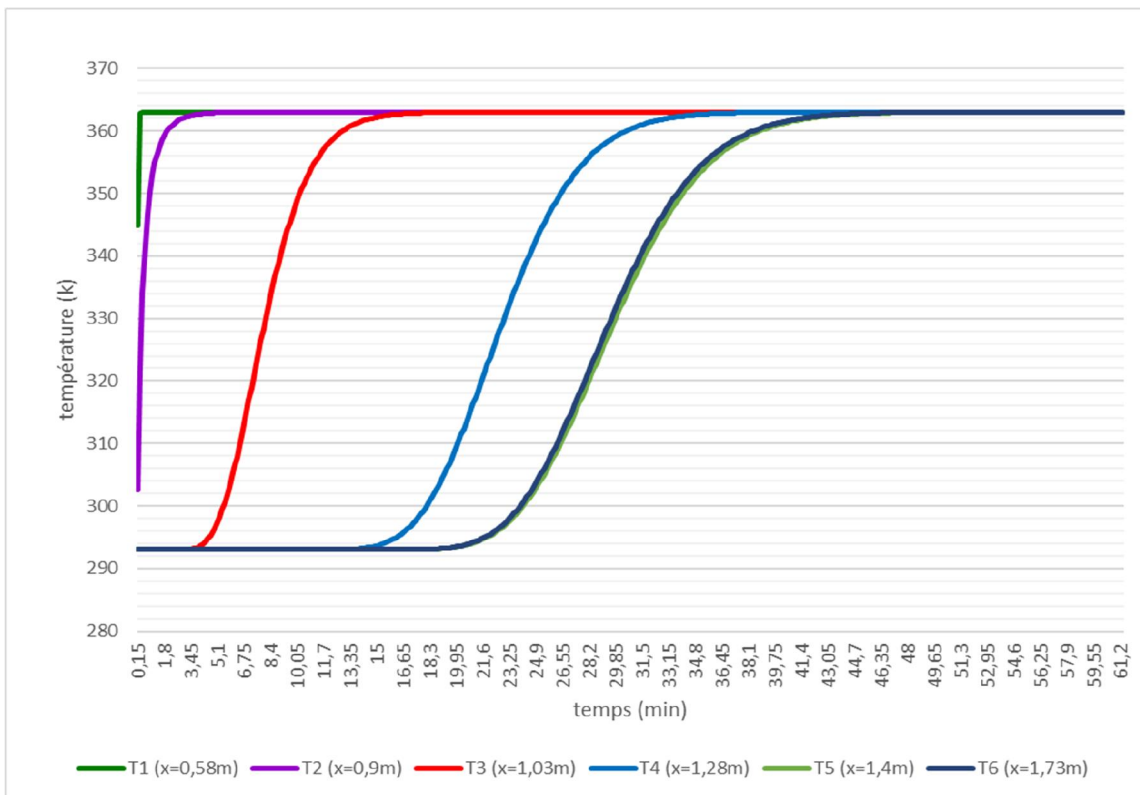


Figure IV.18 : Evolution temporelle de la température de l’air.

La figure IV.18 présente évolution temporelle de la température de l’air pour les positions $x= 0.58, 0.9, 1.03, 1.28, 1.4, 1.73$ m.

On remarque que les températures T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 et T_6 augmentent exponentiellement en fonction du temps. Après 0.6 min, T_1 se stabilise à 363 K. Cependant, la vitesse d’échauffement au niveau de T_1 est plus importante. Cela est dû à la position qui se trouve plus proche à l’arrivée de l’air chaud et avant la zone de stockage. Ensuite, T_2 augmente moins rapidement et atteint 363 K après 15.45 min, juste à l’entrée de la zone de stockage (début de stockage) la vitesse d’échauffement diminue jusqu’à la fin du stockage 66 min et les valeurs des températures T_3, T_4, T_5, T_6 se stabilisent autour de 363 K à 30.45, 53.4, 66 et 65.5 min respectivement.

VI.4.3 Variation de Débit :

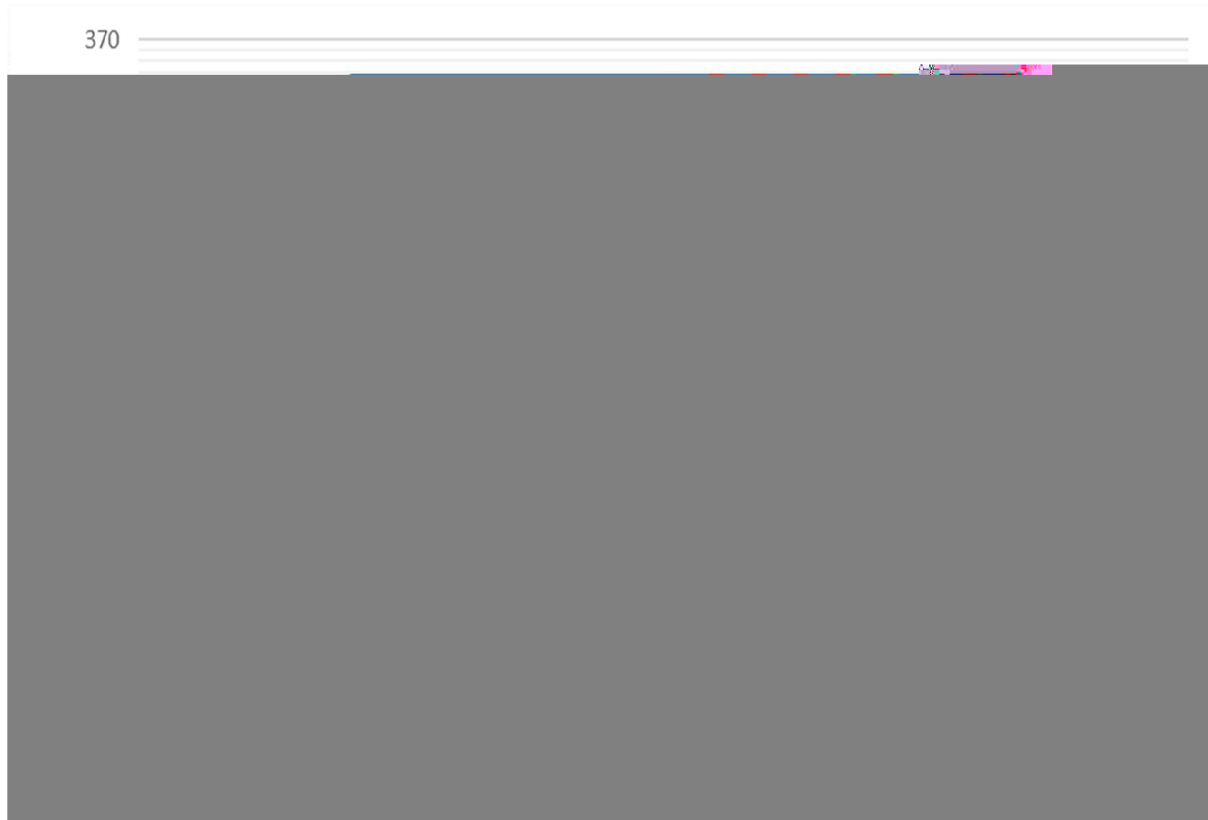


Figure IV.19 : Evolution temporelle de la température pour différents Débits à $x= 1.03$ m et $x= 1.28$ m.

La figure IV.19 présente l'effet du débit 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s) sur l'évolution de la température à $x= 1.03$ m et $x= 1.28$ m,

Au début de stockage (5 min), les températures au niveau de $x=1.03$ m augmentent avec l'augmentation du débit et atteignent 294.6, 296.6 et 301.2 K pour les débits de 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement. Les courbes de températures commencent à se stabiliser vers 363 K après 39.75, 30.45 et 24.45 min. pour 0.00568, 0.00676 et 0.00785(kg/s), respectivement.

Au niveau de $x=1.28$ m, après 16 min les températures augmentent avec l'augmentation du débit et atteignent 293.20, 294.3 et 301.3 K pour les débits 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement. Les courbes de températures commencent à se stabiliser vers 363 K après 67.95, 53.4 et 43.8 min. pour 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement. Le temps de stockage thermique diminue avec l'augmentation du débit.

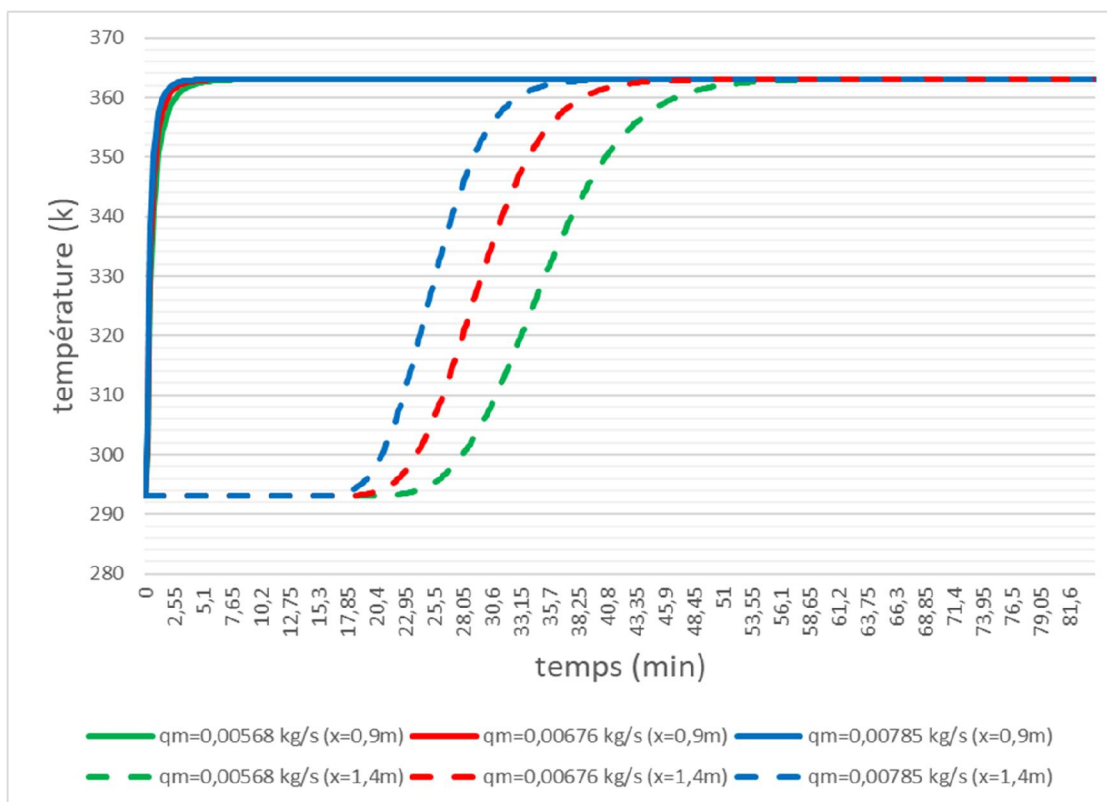


Figure IV.20 : Evolution temporelle de la température pour différents Débits à $x=0.9$ m et $x=1.4$ m.

La figure IV.20 présente l'effet du débit 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s) sur l'évolution de la température à $x=0.9$ m et $x=1.4$ m.

Après 3 sec, les températures au niveau de $x=0.9$ m augmentent avec l'augmentation du débit et atteignent 300.01, 302.71 et 304.98 K pour les débits de 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement. Les courbes de températures commencent à se stabiliser vers 363 K après 21.3, 15.45 et 11.7 min. pour 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement.

Au niveau de $x=1.4$ m, après 25.05 min les températures augmentent avec l'augmentation du débit et atteignent 294.06, 300.7 et 319.38 K pour les débits 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement. Les courbes de T_5 commencent à se stabiliser vers 363 K après 82.5, 66 et 54.9 min. pour 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s), respectivement.

Il est clair que la diminution du débit prolonge le temps de stockage dans le stockeur thermique de 54.9 à 82.5 min pour un débit de 0.00785 et 0.00568 (kg/s), respectivement.

VI.4.4 Variation de porosité :

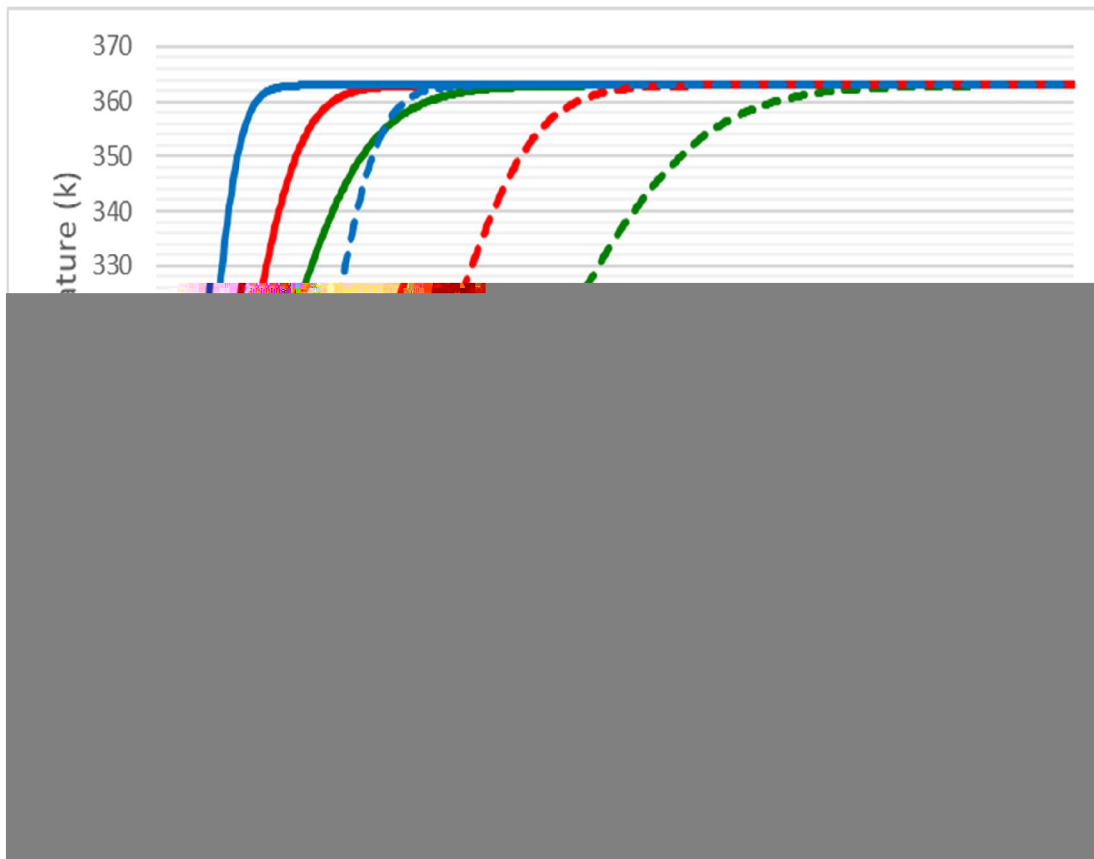


Figure IV.21 : Evolution temporelle de la température pour différentes porosités à $x=1.03\text{m}$ et $x=1.28\text{m}$.

La figure IV.21 présente l'effet de la porosité (0.3, 0.5 et 0.7) sur l'évolution de la température à $x=1.03\text{m}$ et $x=1.28\text{m}$.

Au début de stockage (5 min), les températures au niveau de $x=1.03\text{m}$ augmentent avec l'augmentation de la porosité et atteignent 293.74 ,297.38 et 334.64 K pour les vitesses de 0.3, 0.5 et 0.7, respectivement. Les courbes de T_3 commencent à se stabiliser vers 363 K après 53.4, 30.45 et 16.35 min pour 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement.

Au niveau de $x=1.28\text{m}$, après 16 min les températures augmentent avec l'augmentation de porosité et atteignent 293.03, 294.73 et 352.07 K pour les débits 0.3, 0.5 et 0.7, respectivement. Les courbes de T_4 commencent à se stabiliser vers 363 K après 84.75, 53.4 et 30.9 min. pour 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement. Les courbes de températures commencent à se stabiliser vers 363 K après 84.75, 53.4 et 30.9 min. pour 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement.

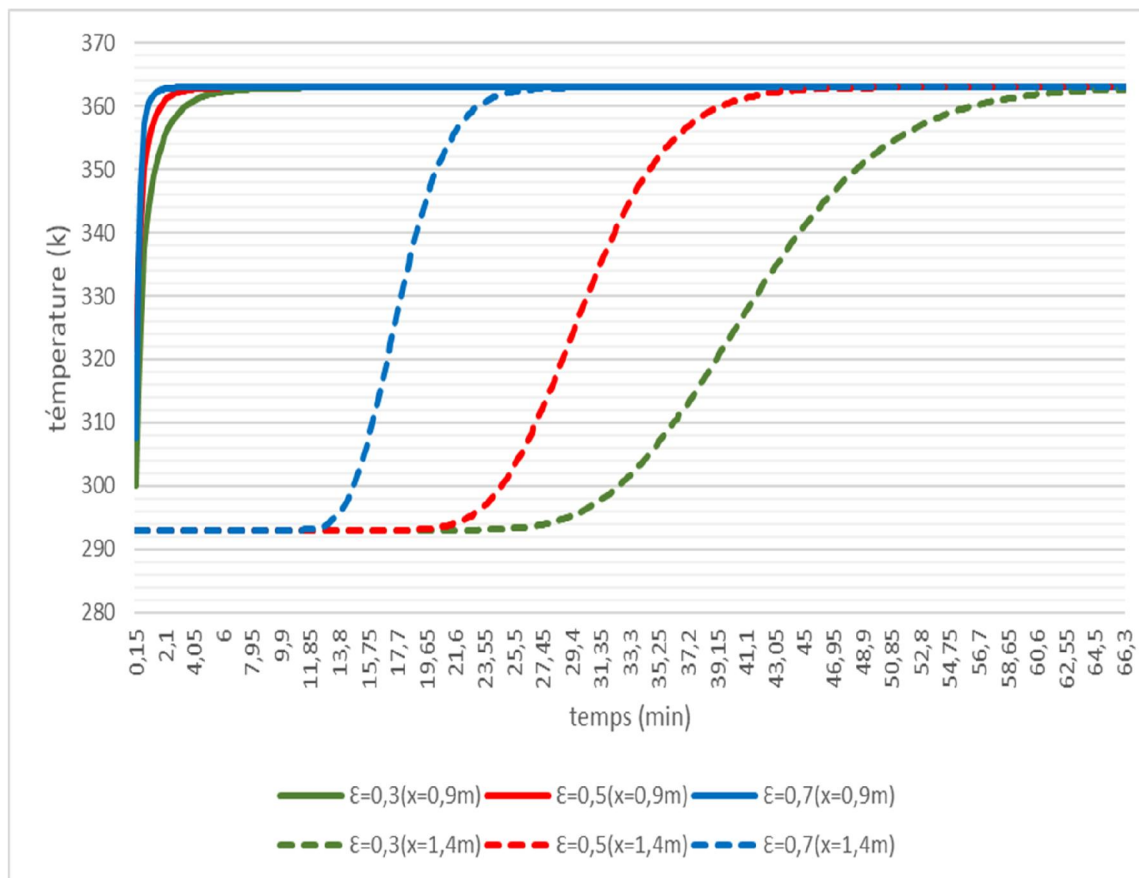


Figure IV.22 : Evolution temporelle de la température pour différentes porosités à $x= 0.9 \text{ m}$ et $x= 1.4 \text{ m}$.

La figure IV.22 présente l'effet de la porosité (0.3, 0.5 et 0.7) sur l'évolution de la température à $x= 0.9 \text{ m}$ et $x=1.4 \text{ m}$.

Au début de stockage (3 secondes), les températures au niveau de $x=0.9\text{m}$ augmentent avec l'augmentation de la porosité et atteignent 299.98 ,302.38 et 307.72K pour les vitesses de 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement.

Au niveau de $x=1.4\text{m}$, après 27 min les températures commencent à augmenter avec l'augmentation du débit et atteignent 294.05, 317.5 et 362.3 K pour les porosités 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement. Les courbes de température commencent à se stabiliser vers 363 K après 102, 66 et 38.25 min. pour 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement.

Il est observé qu'en augmentant la valeur de la porosité, les conditions d'état stable sont atteintes à un temps plus court (38.25 min pour une porosité 0.7) en raison de la masse solide plus faible qui diminue avec l'augmentation de la Porosité.

VI.4.5 Stockage et déstockage :

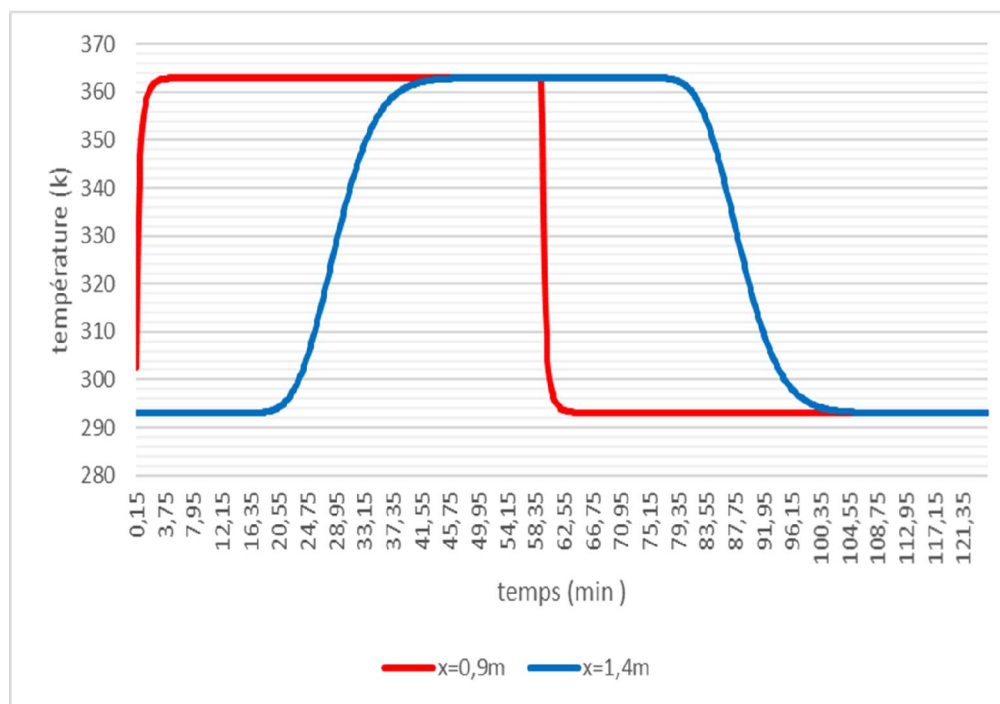


Figure IV.23 : Evolution temporelle de la température à $x=0.9\text{ m}$ et $x=1.4\text{ m}$ pendant la période du stockage et déstockage.

La figure IV.23 illustre l'évolution temporelle de la température à $x=0.9\text{ m}$ et $x=1.4\text{ m}$ pendant la période du stockage et déstockage, pour une vitesse initiale 0.25 m/s, porosité 0.5 et température initiale 363 K.

Nous remarquons que le stockage prend 65.5 min, ainsi que le déstockage prend la même durée de stockage.

VI.5 Energie stockée :

VI.5.1 Variation de débit :

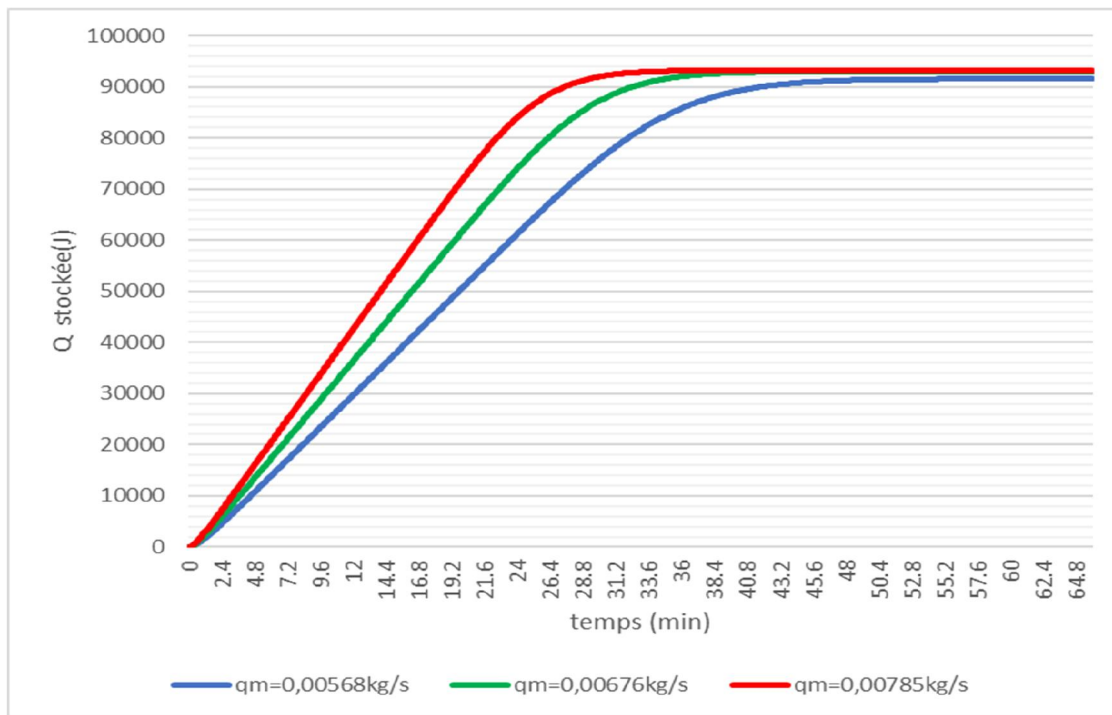


Figure IV.24 : Variation temporelle de l'énergie stockée pour différents débits.

La figure IV.24 présente l'effet du débit 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s) sur l'évolution temporelle de l'énergie stockée.

On remarque que la quantité d'énergie stockées augmente avec l'augmentation de débit pour atteindre 91352.04379, 92970.89325 et 93190,52216 J à 81 min, 65 min et 54.75 min pour les débits 0.00568, 0.00676 et 0.00785 (kg/s) respectivement.

Un gain du temps de stockage est observé de 26,25 min entre un débit de 0.00568 et 0.00785 (kg/s).

VI.5.2 Variation de porosité :

On a fixé le débit 0,00676 (kg/s) et varié la porosité en 0.3, 0.5 et 0.7.

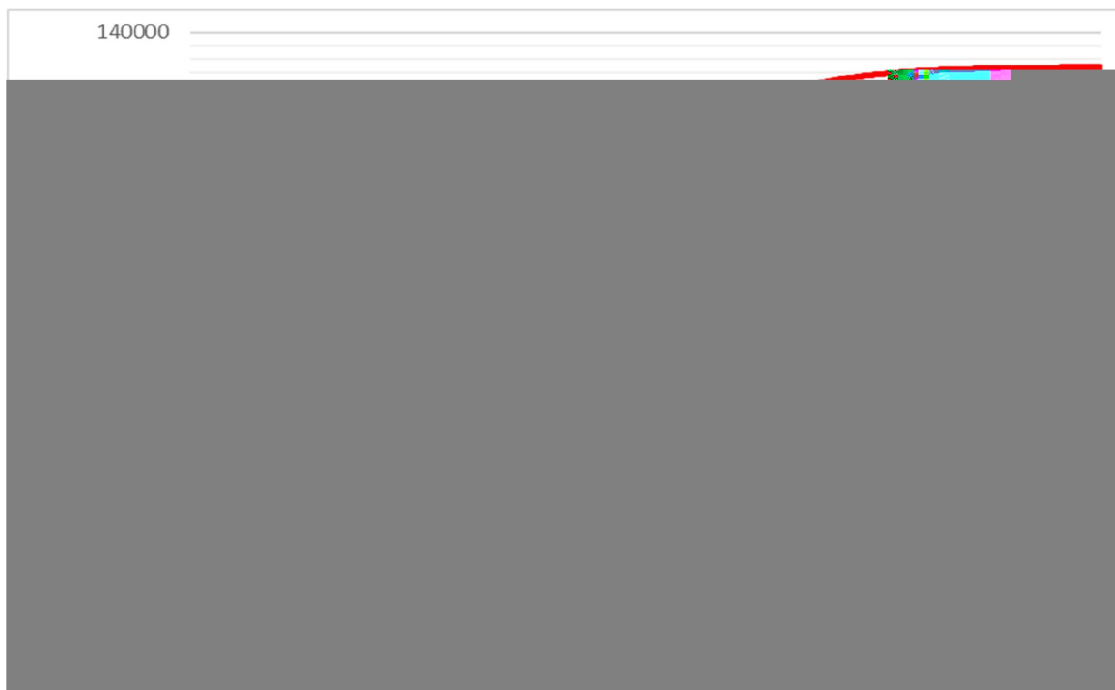


Figure IV.25 : Variation temporelle de l'énergie stockée pour différentes porosités.

La figure IV.25 La figure IV.25 présente l'effet de la porosité 0.3, 0.5 et 0.7 sur l'évolution temporelle de l'énergie stockée.

On voit que les quantités d'énergie stockées atteignent 129395.91, 93964.486 et 56478.25 J à 102, 65 et 37 min pour les porosités 0.3, 0.5 et 0.7 respectivement.

Il est important de souligner que plus la porosité est faible, plus la quantité d'énergie stockée est élevée, car plus elle est basse, plus il y a de masse solide et, par conséquent, plus l'énergie est stockée dans le TES.

On peut constater qu'une augmentation de l'énergie stockée d'environ 37586.236 J est obtenue en passant de la porosité de 0,7 à 0,5, tandis que de 0,7 à 0,3, l'augmentation est d'environ 72917,66 J.

Conclusion

Générale

Conclusion générale :

Notre travail porte sur une simulation numérique utilisant le logiciel ANSYS Fluent 15.0 afin d'analyser le comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air bidimensionnel, transitoire et turbulent qui traverse un canal rectangulaire contenant un milieu poreux, tel qu'une zone de stockage sensible. Les résultats sont présentés en termes de profils de vitesse axiale et de température, de champs de Température et d'énergie thermique stockée, qui permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le débit et la vitesse axiale de l'air dans le canal de stockage augmentent de manière proportionnelle, tandis qu'une diminution de la porosité correspond à une réduction de l'espace d'air dans le milieu poreux, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse.
- Au cours de la période de stockage, la température de l'air augmente de manière exponentielle en fonction du temps.
- La diminution du débit permet d'augmenter la quantité de chaleur stockée et prolonger le processus de stockage. En revanche, les débits élevés diminuent le gradient de température dans le milieu de stockage et le stockeur évolue de manière plus homogène.
- La diminution de la porosité et donc l'augmentation de la masse de roche permet de prolonger le processus de stockage et d'augmenter la quantité de chaleur stockée. Donc, l'énergie récupérée augmente.

ملخص:

يركز عملنا على المحاكاة العددية لتدفق الهواء العابر والمضطرب ثنائي الأبعاد الذي يعبر قناة مستطيلة تحتوي على وسط مسامي كمنطقة تخزين حرارية معقولة. تم تصميم الوسط المسامي بواسطة صيغة Darcy-Forchheimer وتم اختيار فرضية التوازن الحراري المحلي (LTE). تم استخدام برنامج ANSYS Fluent 15.0.7 لحل المعادلات لتحليل تأثير تدفق الهواء والمسامية على السلوك الديناميكي والحراري للمخزن. وتكشف النتائج التي تم الحصول عليها أن معدل التدفق يجعل من الممكن تقييم وقت التخزين بشكل أكثر عملية، في حين تؤثر المسامية أيضًا على كمية الطاقة المخزنة. الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري، الحرارة المحسوسة، دراسة عددية، الوسط المسامي، الصخور، التوازن الحراري المحلي (LTE)، دارسي فورشهايمر

Abstract:

Our work focuses on the numerical simulation of a transient and turbulent two-dimensional air flow which passes through a rectangular channel containing a porous medium as a sensible heat storage zone. The porous medium is modeled by the Darcy-Forchheimer formulation and the local thermal equilibrium (LTE) hypothesis has been opted. ANSYS Fluent 15.0.7 softwares was used to solve the governing equations to analyze the effect of air flow and porosity on the dynamic and thermal behavior of the store. The results obtained reveal that the flow rate makes it possible to more practically evaluate the storage time, while the porosity also influences the quantity of energy stored.

Keywords: thermal storage, sensible heat, numerical study, porous medium, rocks, local thermal equilibrium (LTE), Darcy-Forchheimer.

Résumé :

Notre travail porte sur la simulation numérique d'un flux d'air bidimensionnel transitoire et turbulent qui traverse un canal rectangulaire contenant un milieu poreux comme zone de stockage de chaleur sensible. Le milieu poreux est modélisé par la formulation de Darcy-Forchheimer et l'hypothèse de l'équilibre thermique local (ETL) a été retenue. Le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 a été utilisé pour résoudre les équations déterminantes afin d'analyser l'effet du flux d'air et de la porosité sur le comportement dynamique et thermique du magasin. Les résultats obtenus révèlent que le débit permet d'évaluer de manière plus pratique la durée de stockage, tandis que la porosité influence également la quantité d'énergie stockée.

Mots clés : stockage thermique, chaleur sensible, étude numérique, milieu poreux, roches, équilibre thermique local (ELT), Darcy-Forchheimer.

Référence

- [1] Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(30), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i30/99010, August 2016.
- [2] I.O.Salyer and A.K.Sircar «phase change materials for heating and cooling of residential building, proceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering conference», reno, nevada.12-17 aout 1990.
- [3] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," Energy Conversion and Management, vol. 39, (1998), 12-14.
- [5] S. Berreksi et S. Latarsa, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, Mémoire du Master, Université M'Hamed Bougara-Boumerdés, 2016.
- [6] [http://www.physique-etmatiere.com/materiau_a_changement_de_phase_\(thermique\).php](http://www.physique-etmatiere.com/materiau_a_changement_de_phase_(thermique).php), le 03/04/2022.
- [7] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, Solar Energy, Vol 30, pp.313-332. 1983.
- [8] J. Millette, Conception, instrumentation, modélisation et analyse d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke .1999.
- [9] M. Pierre Pedro « développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique ». Institut national polytechnique de Toulouse, le lundi 9décembre 2013.
- [10] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes," vol. 3, Wiley, New York, 1980
- [11] A. Moumami, Cours échangeurs de chaleur, Master II, option énergétique, Université de Biskra, 2020.
- [12] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: heat storage materials and techniques, Energy Conversion and Management, vol. 39, n°. 11, pp. 1127-1138,1998
- [13] J. S. Savard, mémoire, Université du Québec à Rimouski, 300, allée des ursulines, Rimouski (Québec), Canada, G5L 3A1, jean-sebastien.savard@uqar.qc.ca
- [14] S. M. HASNAIN. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: Heat storage materials and techniques, Elsevier Science Ltd., 1998

Référence

- [15] H. Mehling, & L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. (2008). <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA87407281>
- [16] S. Kalaiselvam and R. Parameshwaran, "Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications," Elsevier, 2014
- [17] S. Molina. Combinaisons huiles/solides pour le stockage thermocline : De l'étude des matériaux au modèle de stockage thermique [Internet] [thesis]. [Pau] : Pau et des Pays de l'Ardour; 2018 [cité 16 janv 2020]. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2018PAUU301>
- [18] T. Esence. Étude et modélisation des systèmes de stockage thermique de type régénératif solide/fluide [Internet] [thesis]. [Grenoble] : Grenoble Alpes ; 2017 [cité 7 janv 2020] Disponible sur : <http://www.theses.fr/2017GREAA024>
- [19] M. Pierre Pedro, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute Température par voie thermochimique, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2013.
- [20] www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/le-fonctionnement-dune-centrale-solaire-thermique
- [21] A. B. T. Loemba, B. Kichonge, J. R. Selemani, and T. Kivevele, "Performance evaluation of solar-assisted heat pump dryer integrated with thermal energy storage for drying Moringa oleifera leaves," MRS Advances, vol. 8, no. 12, pp. 698–702, 2023.
- [22] <https://www.carrier.com/commercial/fr/fr/produits-et-regulations/climatisation/stockage-energie-thermique>
- [23] A. Andreozzi, B. Buonomo, O. Manca, & S. Tamburrino, Thermal energy storages analysis for high temperature in air solar systems. Applied Thermal Engineering, 71(1), 130–141. (2014). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.036>
- [24] D. Le Roux, A. Touzo, T. Esence, & R. Olivès, Experimental and numerical investigation of the temperature and flow rate variation on an industrial high-temperature thermocline storage for recovering waste heat. Journal of Energy Storage, 55, 105656. (2022, November). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105656>.
- [25] I.A. Badruddin, Z. Zainal, P.A. Narayana, & K. Seetharamu, Thermal non-equilibrium modeling of heat transfer through vertical annulus embedded with porous medium. International Journal of Heat and Mass Transfer/International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(25–26), 4955–4965. (2006). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.043>

Référence

- [26] M. PARHIZI, M. TORABI, A. JAIN, « Modèle de non-équilibre thermique local (LTNE) pour le débit développé dans des supports poreux avec un nombre de Biot spatialement variable », Mechanical and Aerospace Engineering Department, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, USA, 2021.
- [27] B. DHIFAoui, S. BEN JABRALLAH, A. BELGHITH, J. CORRIOU, Experimental study of the dynamic behaviour of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat, *International journal of thermal sciences*, 46, 1056-1063, 2007.
- [28] S. Singh, K. Sørensen, T. Condra, S.S Batz, & K. Kristensen. Investigation on transient performance of a large-scale packed-bed thermal energy storage. *Applied Energy*, 239, 1114–1129. (2019, April) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.260>
- [29] R. Kothari, C. S. Hemmingsen, N. V. Voigt, A. La Seta, K. K Nielsen, N. BDesai, A. Vijayan, & F. Haglind. Numerical and experimental analysis of instability in high temperature packed-bed rock thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 358, 122535., (2024, March) <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122535>
- [30] R. Bouali, Etude numérique d'un stockage thermique par chaleur sensible dans les galets. [En ligne]. Blida : Université Saad Dahlab, 2020, 68, <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/10347>
- [31] F. Lamamra, F. Bouzebra, Etude numérique de la convection mixte d'un milieu poreux dans un canal horizontale content des composantes électroniques. [En ligne]. Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 2018, 74, <https://www.univbejaia.dz/jspui/handle/123456789/16058>
- [32] B. Xie, N. Baudin, J. Soto, Y. Fan, & L. Luo. Experimental and numerical study on the thermocline behavior of packed-bed storage tank with sensible fillers. *Renewable Energy*, 209, 106–121. (2023, June). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.107>
- [33] K. El Alami, M. Asbik , H. Agalit, Identification of natural rocks as storage materials in thermal energy storage (TES) system of concentrated solar power (CSP) plants – A review, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 217 110599,(2020)
- [34] K. E. Alami, M. Asbik, R. Boualou, F. Z. Ouchani, H. Agalit, E. G. Bennouna, & S. Rachidi. A critical overview of the suitability of natural Moroccan rocks for high temperature thermal energy storage applications : Towards an effective dispatching of concentrated solar power plants. *Journal of Energy Storage*, 50, 104295. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104295>

Référence

- [35] F. Anjum, N. M. Yasin, A. Ghaffar, K. Kamran, S. Shukrullah, & S. Ullah. Sustainable insulating porous building materials for energy-saving perspective: Stones to environmentally friendly bricks. *Construction and Building Materials*, 318, 125930., (2022, February)<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125930>.
- [36] Y. Jemmal, N. Zari, & M. Maaroufi, Experimental characterization of siliceous rocks to be used as filler materials for air-rock packed beds thermal energy storage systems in concentrated solar power plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171, 33–42. (2017, November). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.026>.
- [37] T. CHEKIFI, M. BOUKRAA, « CFD applications for sensible heat storage: A comprehensive review of numerical studies », Research Center in Industrial Technologies CRTI, Cheraga, Algiers, Algeria P.O. Box 64, 16014,2023.
- [38] L. ABDELMOUMENE, A. BENDJEBBOUR, Réalisation et étude expérimentale d'un stockeur à chaleur sensible en utilisant des matériaux naturels (galets de cailloux de mer), Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2019.
- [39] N. Connor, Granit | Propriétés, Prix & Application | Propriétés matérielles. *Material Properties*. (2022, February 4). <https://material-properties.org/fr/granit-tableau-des-materiaux-applications-prix/>.
- [40] S. Y. Khaldi, 'Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour lestockage d'énergie', Université Bourgogne Franche-Comté ; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), thèse, 2018.