



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique en

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : **Installations Énergétiques et Turbomachines**

Présentée par : **OUKIL Fatma zahraa**

### *Thème*

---

## **Étude numérique du comportement thermique d'un système de stockage par matériaux poreux granulaires**

---

Soutenu le, 27 septembre 2022

### **Devant le Jury :**

MERGHACHE Sidi Mohammed	Président	MCA	U. Tissemsilt
KHERRIS Sahraoui	Encadreur	Prof	U. Tissemsilt
SAIDI Lilia	Co-Encadreur	Doctorante	U. Tiaret
BENLEKKAM Mohamed Amine	Examineur	MCA	U. Tissemsilt

**Année universitaire : 2021-2022**

# Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier mon DIEU, mon créateur pour m'avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier de façon particulière, mon père **K. OUKIL** pour ses encouragements et son soutien moral.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon promoteur **Pr. KHERRIS** pour m'avoir proposé ce sujet, pour ses précieux conseils, pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité.

Je remercie aussi ma Co-promotrice **Dr. SAIDI** pour sa précieuse collaboration, son aide et son orientation.

J'adresse mes vifs remerciements aux les membres du jury, le président **Dr. MERGHACHE** et l'examineur **Dr. BENLEKKAM** d'accepter d'examiner ce modeste mémoire.

Je tiens à remercier tous mes enseignants du département des Sciences et Technologies pour leurs contributions à ma formation et à mes connaissances.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont bien conseillé, et à ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin.

# Dédicace

À ma grand-mère,  
À mes chers parents,  
À toute ma famille OUKIL,  
À tous mes enseignants,  
À ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage,  
À tous qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

# Sommaire

<b>Remerciement</b> .....	2
<b>Dédicace</b> .....	3
<b>Sommaire</b> .....	4
<b>Liste des figures</b> .....	7
<b>Liste des tableaux</b> .....	9
<b>Nomenclature</b> .....	10
<b>Introduction générale</b> .....	13
<b>Chapitre 01 Généralités sur les milieux poreux</b> .....	15
1.1 Introduction.....	16
1.2 Définition d'un milieu poreux .....	16
1.3 Propriétés structurales d'un milieu poreux .....	17
1.3.1 La porosité .....	17
1.3.2 La perméabilité.....	18
1.3.3 La surface spécifique .....	19
1.3.4 La tortuosité .....	19
1.4 Caractéristique thermodynamiques d'un milieu poreux .....	20
1.4.1 La conductivité thermique effective $K_{eff}$ .....	20
1.4.2 La viscosité effective $\mu_{eff}$ .....	21
1.5 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux .....	22
1.5.1 Modèle de Darcy .....	22
1.5.2 Modèle de Darcy-Forchheimer .....	23
1.5.3 Modèle de Darcy-Brinkman.....	23
1.5.4 Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer (Modèle général) .....	24
1.6 Transfert de chaleur dans les milieux poreux .....	24
1.6.1 Transfer de chaleur par convection .....	25
1.6.2 Transfer de chaleur par conduction .....	25
1.7 Exemples de matériaux poreux .....	26
1.8 Domaines d'application des milieux poreux.....	27
1.9 État de l'art de milieu poreux.....	27

1.10 Conclusion .....	29
<b>Chapitre 02 Le stockage thermique .....</b>	<b>30</b>
2.1 Introduction.....	31
2.2 Stockage de l'énergie thermique.....	31
2.3 Types de stockage thermique.....	32
2.3.1 Stockage thermique par chaleur sensible .....	32
2.3.1.1 Stockage liquide .....	33
2.3.1.2 Stockage solide.....	34
2.3.1.3 Domaine d'application.....	34
2.3.2 Stockage thermique par chaleur Latente .....	34
2.3.1.1 Matériaux à Changement de Phase (MCP) .....	36
2.3.1.2 Classification des matériaux à changement de phase.....	37
2.3.3 Stockage thermochimique.....	37
2.4 Travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur sensible .....	38
2.5 Travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur latente .....	43
2.6 Conclusion .....	44
<b>Chapitre 03 Modélisation numérique.....</b>	<b>45</b>
3.1 Introduction.....	46
3.2 Description de la géométrie .....	46
3.3 Les hypothèses simplificatrices .....	48
3.4 Équations gouvernantes.....	49
3.4.1 Équation de continuité .....	49
3.4.2 Équation de la quantité de mouvement .....	49
3.6.3 Équation de conservation de l'énergie.....	49
3.5 Équation du modèle.....	50
3.6 Génération de maillage.....	51
3.6.1 Type de maillage utilisé.....	51
3.6.2 Qualité de maillage.....	51
3.6.3 Indépendance de maillage.....	52
3.7 Les conditions initiales et aux limites .....	54
3.8 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics 6.0.....	54

3.9 Les étapes de la résolution numérique.....	55
3.10 Conclusion .....	55
<b>Chapitre 04 Résultats et discussions.....</b>	<b>56</b>
4.1 Introduction.....	57
4.2 Résultats et discussions .....	57
4.2.1 La variation du temps de fusion de glace en fonction de la porosité.....	57
4.3 Conclusion.....	68
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>70</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>72</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>76</b>
ANNEXE A.....	77
A.1 Les caractéristiques de matériaux de stockage de chaleur sensible.....	77
A.2 Les caractéristiques de divers matériaux à changement de phase .....	78
<b>Résumé .....</b>	<b>80</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>80</b>
<b>ملخص .....</b>	<b>80</b>

# Liste des figures

Fig. 01 - Milieux poreux .....	16
Fig. 02 - milieu poreux non consolidé .....	17
Fig. 03 - milieu poreux consolidé .....	17
Fig. 04 - Définition schématique de la tortuosité.....	20
Fig. 05 - Modèle série de la conductivité thermique effective .....	21
Fig. 06 - Modèle parallèle de la conductivité thermique effective .....	21
Fig. 07 - Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....	31
Fig. 08 - Volume nécessaire pour la même énergie stockée .....	34
Fig. 09 - Classification des matériaux à changement de phase .....	35
Fig. 10 - Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide) .....	35
Fig. 11 - Classification des MCP proposée par Abhat .....	37
Fig. 12 - Schéma de principe du stockage thermochimique.....	38
Fig. 13 - Unité de stockage par chaleur sensible .....	39
Fig. 14 - Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage.....	39
Fig. 15 - Diagramme à barres illustrant la capacité calorifique spécifique d'une centaine des matériaux les plus utilisés, obtenue avec CES Sélecteur.....	40
Fig. 16 - Schéma physique de l'unité de stockage.....	40
Fig. 17 - Schéma du dispositif expérimental .....	41
Fig. 18 - Efficacité énergétique de charge du lit de sable en fonction du nombre de tubes de charge.....	41
Fig. 19 - Schéma de canal poreux.....	42
Fig. 20 - Les trois cas de géométrie à comparer .....	43
Fig. 21 - Système de stockage par chaleur latente .....	43
Fig. 22 - Géométrie du modèle, distribution de température initiale et conditions aux limites.....	46
Fig. 23 - Génération du maillage utilisé.....	51
Fig. 24 - Qualité de maillage utilisé.....	51
Fig. 25 - Indépendance de maillage .....	53
Fig. 26 - Interface du logiciel COMSOL Multiphysics 6.0.....	54
Fig. 27 - La distribution de la pression en fonction de temps.....	59
Fig. 28 - Tracé de surface montrant la distribution de la température en fonction de temps .....	61
Fig. 29 - Tracé de surface montrant la saturation en eau liquide en fonction de temps .....	64

Fig. 30 - La température minimale dans le domaine du modèle en fonction du temps.....	65
Fig. 31 -Volume total d'eau liquide dans le domaine en fonction du temps .....	65
Fig. 32 - Flux de chaleur total sortant du système via la frontière de sortie en fonction de temps .....	66

# Liste des tableaux

Tableau 01 - Valeurs de porosité de quelques matériaux.....	18
Tableau 02 - Valeurs de perméabilité de quelques matériaux.....	19
Tableau 03 - Valeurs de surface spécifique de quelques matériaux.....	19
Tableau 04 - Nombreux exemples de matériaux poreux.....	26
Tableau 05 - Domaines d'application des milieux poreux.....	27
Tableau 06 - Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C.....	33
Tableau 07 - Comparaison des avantages et inconvénients des types de transformation de phase.....	36
Tableau 08 - Valeurs des paramètres géométriques, températures aux limites initiales et imposées et gradients de charge.....	47
Tableau 09 - Les valeurs des propriétés thermiques de l'eau, de la glace et de la matrice solide.....	47
Tableau 10 - Valeurs des paramètres physiques considérées.....	48
Tableau 11 - Indépendance de maillage.....	52
Tableau 12 - Caractéristiques de matériaux de stockage de chaleur sensible considérés pour les centrales CSP.....	77
Tableau 13 - Caractéristiques de matériaux à changement de phase solide-liquide utilisés ou envisagés pour le stockage d'énergie.....	78

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
$V_{\text{pores}}$	Volume des pores	$\text{m}^3$
$A_{\text{sf}}$	surface spécifique	$\text{m}^2$
L	longueur réelle des lignes	m
$L_e$	Longueur d'un milieu poreux	m
G	accélération de la pesanteur	$\text{m/s}^2$
S	Air de surface	$\text{m}^2$
V	Volume	$\text{m}^3$
$S_p$	Stockage	1/Pa
$C_p$	La capacité thermique des matériaux	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Phi$	Flux de chaleur	W
m	Masse de matériau de stockage	Kg
E	Energie stockée	J
T	Température	K
V	Vecteur de vitesse adimensionnel	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Q	Quantité d'énergie	W
P	Pression	Pa
<b>Symboles grecques</b>		
$\varepsilon_t$	La porosité totale	/
$\varepsilon_{\text{eff}}$	La porosité effective	/
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
K	La conductivité thermique du matériau	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
k	Perméabilité	$\text{m}^2$
$\Delta P$	Variation de pression	/
$K_{\text{eff}}$	Conductivité thermique effective	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$K_s$	Conductivité thermique de phase solide	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$K_f$	Conductivité thermique de fluide	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\mu_{\text{eff}}$	Viscosité effective	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\rho$	La masse volumique	$(\text{kg}/\text{m}^3)$
$\varepsilon_p$	La porosité	/
$\Delta H$	Gradient de charge hydraulique	%
$\beta$	Compressibilité efficace	$\text{Pa}^{-1}$
$\theta$	Température	K

## **Indices**

eff	Effective
s	Solide
f	Fluide
ini	Initiale
ice	Glace
w	Liquide
res	Résiduelle
int	Intrinsèque
pc	Changement de phase
eq	Équivalent
T	Totale

# **Introduction générale**

## Introduction générale

En raison de l'épuisement rapide des ressources d'énergies fossiles et de la demande énergétique croissante, de nombreuses recherches dans le monde entier ont commencé à prêter attention aux énergies renouvelables et aux systèmes de stockage. Le stockage d'énergie est indispensable, chaque fois que la demande ou la consommation d'énergie varie dans le temps. L'action de stockage consiste à placer une quantité d'énergie en lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Fondamentalement, il existe deux principales méthodes de stockage de l'énergie thermique : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et thermochimique.

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau de stockage (fusion ou solidification). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. Contrairement au stockage par chaleur sensible peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les MCP présentent une capacité de stockage plus élevée et un comportement presque isotherme pendant les processus de charge/décharge. Des systèmes de stockage thermique basés sur la chaleur latente, ont été conçus, en particulier dans des applications solaires thermiques, tel que les centrales solaires pour la production de l'électricité, ou le chauffage/refroidissement des bâtiments.

Le problème du transfert de chaleur lors de la fusion et de la solidification est pertinent dans de nombreuses applications techniques, par exemple dans les domaines du stockage de l'énergie thermique, du traitement des aliments, de la physique des sols et des eaux souterraines et de la conception d'échangeurs de chaleur de pompe à chaleur enterrés dans le sol. Le problème de la fusion et de la solidification en présence de la convection est considérablement plus difficile. Cette étude se concentre sur le problème fondamental de la fusion de glace dans un domaine poreux.

La glace a fusionné plus rapidement en raison du changement climatique qui libérerait des gaz à effet de serre, modifierait les régimes hydrologiques, affecterait les bâtiments, etc. Il est nécessaire d'étudier le processus de fusion de glace. Un modèle de couplage eau-chaleur pour est établi sur la loi de Darcy et les interfaces de transfert de chaleur dans les milieux poreux.

L'objectif de notre travail porte sur l'étude de l'effet de la convection naturelle sur le phénomène de fusion d'une inclusion de glace dans un milieu poreux, pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre englobe une généralité sur les milieux poreux, ces paramètres thermo physique, ces différents modèles d'écoulement et un état de l'art.

Le deuxième chapitre donne un aperçu sur le stockage thermique et ses différentes techniques avec une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Quant au troisième chapitre, nous allons poser le problème physique considéré sous forme d'équations de continuité, de quantité de mouvement et de conservation d'énergie tout en prenant en compte des hypothèses simplificatrices, la procédure de résolution du problème (schéma et maillage utilisé) les conditions aux limites et la présentation du logiciel utilisé pour la simulation numérique du dispositif expérimental étudié COMSOL Multiphysics 6.0.

Le quatrième chapitre, intitulé résultats et discussions, comporte l'interprétation et les discussions des résultats obtenues.

Enfin, une conclusion générale viendra synthétiser l'ensemble de travail.

# **Chapitre 01**

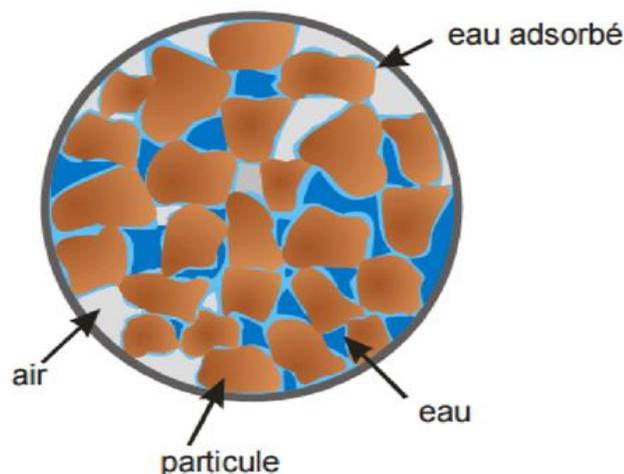
## **Généralités sur les milieux poreux**

## 1.1 Introduction

Le présent chapitre traite les milieux poreux, leurs différentes propriétés structurales, thermodynamiques, les différents modèles utilisés pour décrire l'écoulement au sein de ce type de milieu et les différents modes de transferts de chaleur qui s'y déroule, en fin nous avons présenté un état de l'art sur ces milieux.

## 1.2 Définition d'un milieu poreux

Le milieu poreux se désigne un corps composé d'une matrice solide fortement imbriquée avec la phase fluide, est fixe. Il existe de nombreux matériaux naturels dans cette catégorie : les sols, les couches sédimentaires, la plupart des roches, ainsi que certains matériaux vivants. Aussi des matériaux artificiels requièrent d'être poreux soit dans le processus de fabrication soit dans leur finalité pour jouer un rôle de filtre ou apporter des propriétés macroscopiques particulières (par exemple conductivité thermique) [1].



**Fig. 01 - Milieux poreux [2]**

En général, les matériaux poreux peuvent être décomposés en trois phases :

- ✓ Une phase solide qui contient de petits pores ou cavités et peut contenir un ou plusieurs fluides (liquide ou gaz) ;
- ✓ Une phase liquide constituée d'eau pure (libre et adsorbée) ;
- ✓ Une phase vapeur sans vapeur d'air (air sec + vapeur d'eau) [3].

Les milieux poreux se présentent généralement sous deux formes :

- ✓ Les milieux poreux non consolidés, où la phase solide est formée de particules (gravier, sable, billes, etc.) non soudées entre elles,
- ✓ Milieux poreux consolidés, où la phase solide est formée de particules cimentées (calcaire, grès, céramique, etc.).

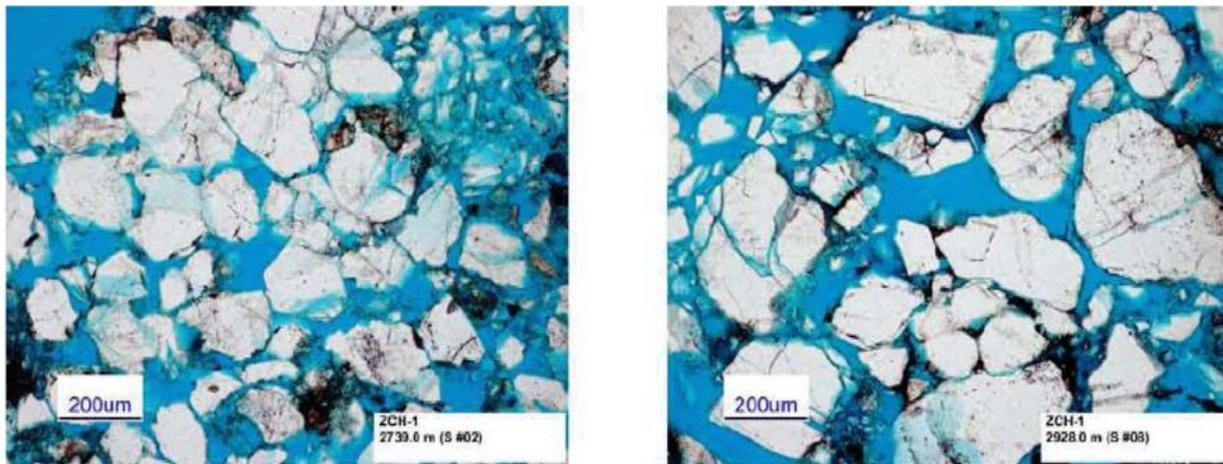


Fig. 02 - Milieu poreux non consolidé [2]

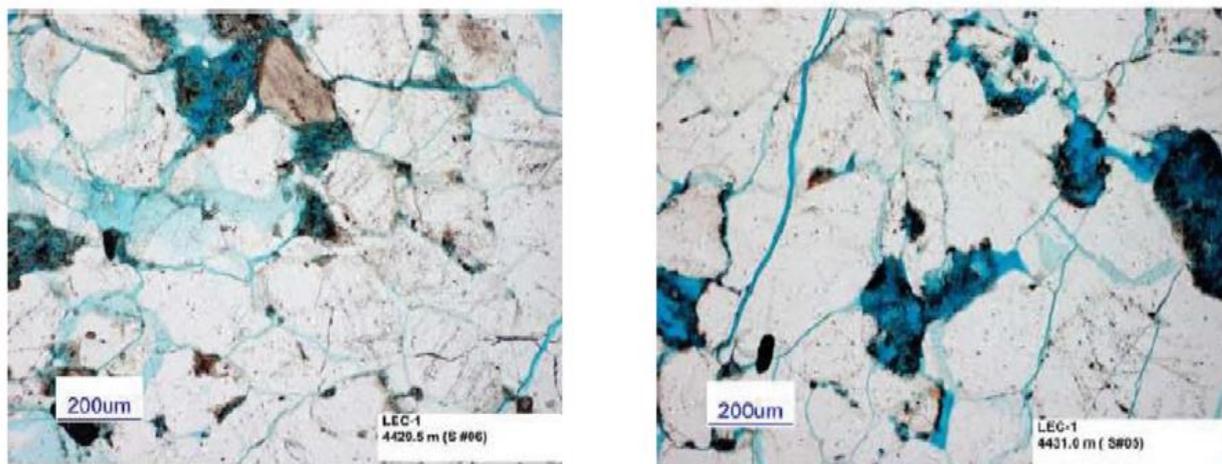


Fig. 03 - Milieu poreux consolidé [2]

### 1.3 Propriétés structurales d'un milieu poreux

Le milieu poreux contient des caractéristiques fondamentales telles que la porosité, qui est la fraction de vide, La perméabilité, qui indique la capacité d'un milieu poreux à s'écouler. Ces deux grandeurs sont des variables macroscopiques, c'est-à-dire estimées sur un volume contenant de nombreuses entités microscopiques qui composent le matériau : les pores [2].

#### 1.3.1 La porosité

La porosité est le rapport entre le volume total occupé par les pores (vides) et le volume total de la matrice (solide+vides).

$$\varepsilon_p = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{Volume total du milieu poreux}} = \frac{V_{\text{pores}}}{V} \quad (1.1)$$

Cette grandeur ne donne aucune information sur les dimensions et la distribution des pores. En effet, deux matériaux de même porosité peuvent avoir de propriétés physiques différentes. On distingue deux types de porosité :

- ✓ La porosité totale

$$\varepsilon_t = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{Volume total du milieu poreux}} \quad (1.2)$$

- ✓ La porosité effective

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\text{Volume des pores accessibles}}{\text{Volume total du milieu poreux}} \quad (1.3)$$

Pour les milieux poreux non consolidés  $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_t$ , alors que pour les milieux poreux consolidés la différence entre les deux porosités peut être significative.

La porosité est dite totale ou absolue ( $\varepsilon_t$ ) quand le rapport du volume occupé par les pores au volume du milieu poreux prend en compte tout les pores ; alors que la porosité est dite effective ou utile ( $\varepsilon_{eff}$ ) lorsque le rapport volumique tient compte seulement des pores interconnectés.

Les expériences de Scheidegger [4] et rapportées par Nield et Bejan [5] ont mené à déterminer la porosité moyenne de quelques matériaux :

**Tableau 01 - Valeurs de porosité de quelques matériaux [4, 6]**

Matériau	Porosité $\varepsilon_p$
Argile	0.44 à 0.55
Brique	0.12 à 0.36
Calcaire	0.01 à 0.10
Charbon	0.02 à 0.12
Cuivre (en poudre)	0.09 à 0.34
Cuir	0.56 à 0.59
Sable	0.37 à 0.50
Sols	0.50 à 0.60

### 1.3.2 La perméabilité

La perméabilité est définie comme la capacité d'un milieu poreux à laisser circuler un fluide lors de son écoulement à travers les pores du milieu. Selon la loi de Darcy [7], la perméabilité  $k$  mesure la conductance de la matrice poreuse, c'est-à-dire :

$$k = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta P} \cdot \mu \quad (1.4)$$

Où,  $Q$  est le débit ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $S$  est la section ( $\text{m}^2$ ),  $\frac{\Delta P}{\Delta x}$  le gradient de pression et  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ). L'unité de la perméabilité est le  $\text{m}^2$ , mais elle est souvent exprimée en Darcy =  $9.87 \times 10^{-13} \text{m}^2$ .

Quantitativement, la perméabilité est une caractéristique du milieu poreux et elle est indépendante de la nature du fluide. Plusieurs travaux, dont les mesures expérimentales de

Scheidegger [4] et Nield et Bejan [5] ont donné des valeurs de perméabilité pour les matériaux les plus courants.

**Tableau 02 - Valeurs de perméabilité de quelques matériaux [4, 6]**

Matériau	Perméabilité $k$ ( $m^2$ )
Ardoise	$2 \times 10^{-14}$ à $4.4 \times 10^{-13}$
Béton bitumineux	$10^{-13}$ à $2.3 \times 10^{-11}$
Cuivre (en poudre)	$3.3 \times 10^{-10}$ à $1.5 \times 10^{-9}$
Liège (en plaque)	$2.4 \times 10^{-11}$ à $5.1 \times 10^{-11}$
Sable	$2 \times 10^{-11}$ à $1.8 \times 10^{-10}$

### 1.3.3 La surface spécifique

La surface spécifique permet d'évaluer la surface de contact offerte par le réseau poreux avec le fluide qui le traverse. Il est défini comme le rapport d'air de la surface totale de l'interface solide-pore au volume d'échantillon  $V$  :

$$\alpha = \frac{A_{sf}}{V} \quad (1.5)$$

Où :  $A_{sf}$  est la surface spécifique.

Cette quantité, contrairement à la longueur, est uniforme et joue un rôle clé dans le problème d'adsorption. Quant à la porosité, il est parfois préférable de distinguer la surface spécifique effective et la surface spécifique totale  $V$ . Le tableau ci-dessous résume les valeurs de surface spécifique pour certains matériaux.

**Tableau 03 - Valeurs de surface spécifique de quelques matériaux [4, 6]**

Matériau	Surface spécifique $\alpha$ ( $m^{-1}$ )
Ardoise (en poudre)	$7 \times 10^5$ à $8.9 \times 10^5$
Catalyseur granulaire	$5.6 \times 10^7$
Fibre de verre	$5.6 \times 10^4$ à $7.7 \times 10^4$
Cuir	$1.2 \times 10^6$ à $1.6 \times 10^6$
Sable	$1.5 \times 10^4$ à $2.2 \times 10^4$
Silice (en poudre)	$6.8 \times 10^5$ à $8.9 \times 10^5$

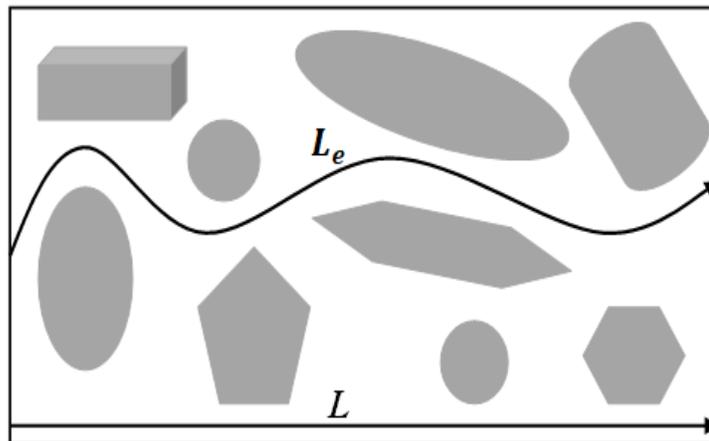
### 1.3.4 La tortuosité

La description de la géométrie des pores implique la notion de connectivité, qui correspondant à la complexité du chemin continu à travers l'espace poreux. Il faut aussi tenir compte des « bras morts », qui sont nombreux dans les milieux peu poreux et très hétérogènes.

Pour décrire ces différents aspects, on introduit un paramètre  $\tau$  appelé tortuosité, que l'on définit de la manière suivante [8] :

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (1.6)$$

Où  $L_e$  est la longueur réelle des lignes de courant du fluide traversant un échantillon de longueur  $L$  d'un milieu poreux modélisé sous la forme d'un réseau de capillaires ou ondulés. Ce rapport joue un rôle important dans les problèmes de diffusion.



**Fig. 04 - Définition schématique de la tortuosité**

## 1.4 Caractéristique thermodynamiques d'un milieu poreux

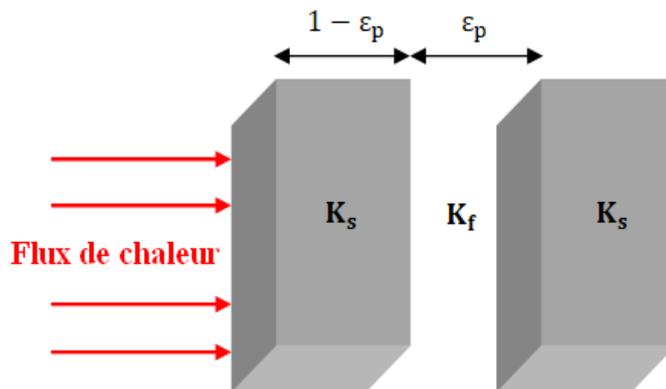
### 1.4.1 La conductivité thermique effective $K_{eff}$

Le transfert de chaleur par conduction à travers un milieu poreux nécessite des contributions des phases fluide et solide qui composent la matrice poreuse, ce qui se fait généralement dans des proportions différentes. Pour cette raison, l'introduction d'une conductivité thermique prenant en compte la contribution de chaque phase est importante pour modéliser le transfert de chaleur dans les milieux poreux. Par conséquent, la notion de la conductivité thermique effective semble donner un sens aux milieux poreux hétérogènes. Ces derniers dépendent fortement de la porosité et de la conductivité thermique des phases solide  $K_s$ , et fluide  $K_f$ .

En général, les modèles proposés sont des combinaisons pondérées de modèles série et parallèle basés sur des analogies électriques.

Dans le modèle série, le flux de chaleur passe séquentiellement à travers les phases solide et fluide. Alors la résistance thermique du milieu est égale à la somme des résistances thermiques de chaque phase [9] :

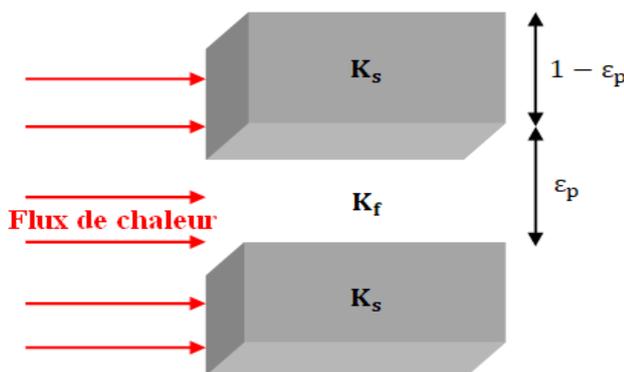
$$\frac{1}{K_{eff}} = \frac{\varepsilon_p}{K_f} + \frac{1 - \varepsilon_p}{K_s} \quad (1.7)$$



**Fig. 05 - Modèle série de la conductivité thermique effective**

Dans le modèle parallèle, le flux de chaleur passe par deux phases parallèles en même temps. La conductivité effective est égale à la somme des conductivités de phase pondérée par l'occupation de l'espace [9] :

$$K_{eff} = (1 - \varepsilon_p)K_s + \varepsilon_p K_f \quad (1.8)$$



**Fig. 06 - Modèle parallèle de la conductivité thermique effective**

La conductivité thermique effective est toujours comprise entre celle du fluide et celle du solide.

#### 1.4.2 La viscosité effective $\mu_{eff}$

Lorsque l'approche des modèles moyennés sur un volume élémentaire représentatif est adoptée, il est nécessaire de définir les propriétés thermophysiques évaluées sur le volume élémentaire représentatif incluant les deux phases fluide et solide. Ainsi la viscosité effective a été introduite par Brinkman (1947) afin de mettre en évidence la discontinuité des contraintes aux interfaces fluide-poreux et d'obtenir une expression pour la perméabilité. En combinant l'écoulement de Stocks avec celui de Darcy, il a obtenu l'équation vectorielle suivante [10].

$$\vec{\nabla} p = -\frac{\mu}{k} \vec{\nabla} + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{\nabla} \quad (1.9)$$

Ce modèle a été validé plus tard par Landgren (1972) qui démontra aussi que la viscosité effective était une fonction de la viscosité du fluide et de la porosité. Brinkman a considéré la viscosité dynamique effective comme étant égale à la viscosité du fluide considéré.

## 1.5 Modèles d'écoulement dans les milieux poreux

Il existe différents modèles pour décrire l'écoulement dans les milieux poreux, ces modèles sont construits à partir du modèle de base (c'est-à-dire le modèle de Darcy), que nous avons différencié en tenant compte de certains effets présents dans les milieux poreux [10] :

### 1.5.1 Modèle de Darcy

Darcy a établi une loi fondamentale en 1856 qui régit la dynamique des fluides homogènes dans les milieux poreux. La loi est mise en évidence à partir de l'écoulement unidirectionnel sur la colonne de sable, montrant le rapport entre le gradient de pression appliqué et le débit d'eau à travers la colonne de sable. Depuis lors, la science de l'hydrogéologie est basée sur la loi de Darcy, même pour les écoulements multidirectionnels. Il s'écrit sous la forme suivante [10] :

$$\vec{\nabla}p = -\frac{\mu}{k}\vec{V} + \rho\vec{g} \quad (1.10)$$

$\vec{\nabla}p$  : Gradient de pression (Pa/m)

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

$k$  : Perméabilité ( $m^2$ )

$\vec{V}$  : Vitesse de filtration obtenue à partir de la mesure du débit (m/s)

$\rho$  : La masse volumique ( $kg/m^3$ )

$\vec{g}$  : Le vecteur accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )

La loi de Darcy généralisée est valable pour les écoulements laminaires à faible nombre de Reynolds basé sur le diamètre des pores. Cette loi, qui reste largement utilisée, se trouve cependant insuffisante. D'une part elle ne peut pas traduire l'influence de la nature du fluide saturant sur l'écoulement, notamment dans les zones pariétales ; avec ce modèle, la condition de glissement du fluide sur les parois solides est retenue quelle que soit la nature du fluide.

En revanche, la loi ne prend pas en compte l'effet des forces visqueuses dans le cas des milieux poreux très perméables, ni l'effet de l'Inertie dans le cas des vitesses élevées. Par conséquent, des éléments supplémentaires ont été ajoutés au modèle de Darcy pour compenser ses lacunes.

### 1.5.2 Modèle de Darcy-Forchheimer

Pour des vitesses de filtration élevées, la loi de Darcy s'éloigne du comportement linéaire de la vitesse ; Il doit donc être corrigé par un terme inertiel non linéaire du second ordre prenant en compte les effets inertiels macroscopiques. Un modèle ainsi défini est appelé modèle de Darcy-Forchheimer et peut prendre la forme générale suivante [10] :

$$\vec{\nabla}p = -\frac{\mu}{k}\vec{V} - \frac{\rho F}{\sqrt{k}}|\vec{V}|\vec{V} \quad (1.11)$$

Où  $F$  représente le coefficient de Forchheimer caractéristique des forces d'inertie dans le milieu poreux. Il existe une région de transition, définie par rapport au nombre de Reynolds du pore, située entre  $1 < Re_p < 10$ . Au dessous de  $Re_p = 1$ , le modèle de Darcy suffit à lui seul pour décrire l'écoulement (écoulement lent), et les forces de pression sont prépondérantes. Au-dessus de  $Re_p = 10$ , les forces d'inerties sont dominantes, le modèle de Darcy n'est plus valable. Entre les deux, c'est la zone de transition et les deux modèles coexistent ensemble.

### 1.5.3 Modèle de Darcy-Brinkman

Pour des valeurs plus importantes de perméabilité et de porosité, les effets de la viscosité et de la résistance au glissement sur les surfaces solides ne sont négligés. Le modèle de Darcy-Brinkman dérivé du modèle de Stokes pour les forces visqueuses autour d'une sphère peut s'écrire sous la forme générale suivante [10] :

$$\vec{\nabla}p = -\frac{\mu}{k}\vec{V} + \mu_{eff}\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \quad (1.12)$$

$\mu_{eff}$  : représente la viscosité dynamique effective  $\mu_{eff} = \mu$  dans le modèle de Brinkman mais en réalité, elles ont approximativement égales.

$\mu_{eff}\nabla^2\vec{V}$  : est le terme de Brinkman qui représente les forces visqueuses causées par les forces de cisaillement macroscopiques le long des frontières solides. Il est très significatif dans les régions près des parois solides.

Cette loi empirique s'appelle la formule de Darcy-Brinkman. Le premier terme du côté droit de l'équation est le terme de Darcy et le second terme est appelé le terme de Brinkman. Cette dernière représente la force visqueuse causée par le cisaillement macroscopique le long de la frontière et est très importante dans les régions proches des parois solides. Plusieurs auteurs ont montré l'effet du terme de Brinkman sur le champ dynamique, ce qui permet de satisfaire les conditions d'adhésion aux parois. En ce qui concerne les aspects thermiques, l'omission de ce terme affecte significativement la valeur du coefficient de transfert.

### 1.5.4 Modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer (Modèle général)

En tenant compte de tous les effets ci-dessus (effets d'inertie et de paroi), nous rapportons l'équation de Darcy aux termes de Brinkman et Forchheimer. Le modèle résultant est appelé le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer.

L'équation du vecteur de conservation de la quantité de mouvement à travers le milieu poreux s'écrit alors sous la forme suivante [10] :

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon_p^2} \vec{V} \nabla \vec{V} = -\vec{\nabla} p - \frac{\mu}{k} \vec{V} + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} - \rho \frac{\varepsilon_p^F}{\sqrt{k}} |\vec{V}| \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (1.13)$$

Avec :

$\vec{V}$  : Quantité moyenne à travers un volume élémentaire

$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$  : Terme instationnaire

$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \vec{V} \nabla \vec{V}$  : Forces macroscopiques d'inertie

$-\vec{\nabla} p$  : Gradient de pression

$-\frac{\mu}{k} \vec{V}$  : Contraintes visqueuses microscopiques ou terme de Darcy

$\mu_{eff} \nabla^2 \vec{V}$  : Terme de Brinkman ou contraintes visqueuses macroscopiques (effet de parois)

$\rho \frac{\varepsilon_p^F}{\sqrt{k}} |\vec{V}| \vec{V}$  : Forces inertielles microscopiques ou terme d'inertie de Forchheimer

$\rho \vec{g}$  : Force de volume

### 1.6 Transfert de chaleur dans les milieux poreux

La description du transfert de chaleur dans les milieux poreux par des méthodes macroscopiques peut différer du transfert de chaleur réel. Par conséquent, le concept d'équilibre partiel est introduit. Cette dernière a été largement étudiée :

Carbonell et Whitaker (1984) ont proposé des conditions d'équilibre thermique pour les mesures de temps et de longueur.

Bennacerallah (1994) et Kaviany (1995) ont étudié la condition d'équilibre et ont trouvé qu'elle est satisfaite dans l'état instable.

Zhang et al. (1990) ont trouvé que l'équation d'énergie macroscopique peut être obtenue en faisant la moyenne des équations d'énergie dans chaque phase et un volume élémentaire représentatif.

L'équation d'énergie macroscopique se présente sous la forme suivante :

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f \vec{V} \nabla T = K_{eff} \nabla^2 T \quad (1.14)$$

Avec :

$$(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon_p (\rho C_p)_f + (1 - \varepsilon_p) (\rho C_p)_s \quad (1.15)$$

Où :

$\rho$  : Masse volumique du fluide considéré (kg/m<sup>3</sup>)

$(C_p)_{eff}$  : Capacité calorifique effective (J/kg K)

$(C_p)_f$  : Capacité calorifique de fluide (J/kg K)

$(C_p)_s$  : Capacité calorifique de fluide (J/kg K)

$\varepsilon_p$  : Porosité du milieu poreux

$K_{eff}$  : Conductivité thermique effective (W/m K)

Cette équation décrivant le transfert de chaleur dans un milieu poreux a été obtenue en supposant les hypothèses suivantes :

- ✓ Les termes de dissipation visqueuse sont négligeables (hypothèse justifiée si la vitesse de filtration reste relativement faible et si les fluides saturants ne sont pas trop visqueux) ;
- ✓ Les caractéristiques thermiques des phases solide et fluide sont supposées constantes et indépendantes de la température ;
- ✓ Pas de source interne de chaleur [9].

### 1.6.1 Transfer de chaleur par convection

La convection est la méthode préférée de transfert de chaleur entre les solides et les liquides ou les gaz. Il se caractérise par un transfert de chaleur associé au mouvement des fluides. Il existe trois types de convection :

- ✓ La convection forcée, où le mouvement du fluide est imposé par des forces extérieures (pompes, soufflantes, etc.) ;
- ✓ La convection naturelle, où le mouvement du fluide provient du gradient de densité du fluide (par ex. au mélange.....) ;
- ✓ La convection mixte, où le mouvement du fluide est produit par une combinaison de convection forcée et naturelle [11].

### 1.6.2 Transfer de chaleur par conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque sous l'influence de différences de température, sans déplacement de matière. La conduction de la chaleur dans le corps se fait par deux mécanismes différents :

- ✓ Le transport des vibrations atomiques ou moléculaires,
- ✓ Le transport des électrons libres.

La théorie de la conduction est basée sur l'hypothèse de Fourier ; la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

Sans hypothèses simplificatrices, la propagation de la chaleur est un phénomène tridimensionnel qui répond à la loi de Fourier sous une forme générale [12] :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + q^m \quad (1.16)$$

$\rho$  : La masse volumique (kg /m<sup>3</sup>),

$K$  : La conductivité thermique du matériau (W/K.m),

$C_p$  : La capacité thermique massique (J/kg.K),

$q^m$  : La densité volumique de flux développé dans l'échantillon (W/m<sup>3</sup>).

En faisant les hypothèses :

$\lambda$  constant,

Pas de puissance dissipée  $q^m = 0$ ,

Régime permanent  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ,

Flux monodimensionnel  $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ .

On va trouver une forme simplifiée de telle loi qui dit que la valeur instantanée du débit calorifique est égal à :

$$\varphi = -K \text{ grad } (T) = -K S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.17)$$

Avec :

$\varphi$  : Le flux de chaleur transmis par conduction (W),

$S$  : Air de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>).

### 1.7 Exemples de matériaux poreux

On trouve de nombreux exemples de matériaux poreux, naturels ou artificiels dans la vie courante :

**Tableau 04 - Nombreux exemples de matériaux poreux [13]**

Matériaux poreux	Exemple
Matériaux fibreux	Laines minérales, cuirs, papiers
Agglomérats granulaires	Sable, isolants, revêtements routiers
Matériaux polymères	Mousses synthétiques
Végétaux	Paille, bois, liège, chanvre
Matériaux de construction	Béton, brique

Dans le domaine de l'acoustique, les matériaux poreux sont utilisés pour réduire les nuisances sonores à des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. La structure du matériau permet une absorption d'une partie des ondes sonores grâce aux frottements visqueux du fluide sur la matrice et des échanges thermiques entre le fluide et la matrice.

Dans le domaine de la construction et du génie civil, la porosité des matériaux leur confère résistance et durabilité, dans des applications aussi diversifiées que le stockage des déchets nucléaires ou l'optimisation énergétique des habitats, jusqu'à se positionner comme protecteur de l'environnement et de la santé avec le solide hybride MOF (Metal-Organic Framework) qui stocke le CO<sub>2</sub>.

Les matériaux poreux contribuent également à des avancées considérables dans le domaine médical, les greffes de larynx artificiel ou les implants crâniens en titane poreux en sont une illustration [13].

### 1.8 Domaines d'application des milieux poreux

La recherche de milieux poreux est un domaine de recherche très actif ces dernières années. Ceci est dû à la présence de milieux poreux dans plusieurs phénomènes naturels et procédés industriels, voici quelques exemples de leurs applications :

**Tableau 05 - Domaines d'application des milieux poreux [2]**

Domaine	Applications
Géologie	-Exploitation des gisements géothermiques -Migration des eaux et minéraux
Pétrole	-Accroissement de la production du gaz naturel -Ecoulement de gaz et de pétrole dans les réservoirs -Ecoulement des eaux souterraines
Environnement	-Recyclage des déchets nucléaires -Nettoyage des sols par injection de vapeur
Médecine	-Simulation du transport des gaz respiratoires de l'organisme -Pots catalytiques dans le domaine de l'automobile
Ingénierie mécanique	-Accroissement du transfert de chaleur par modification de surfaces (échangeurs de chaleur) -Combustion en milieux poreux -Stockage de l'énergie solaire
Ingénierie des procédés	-Fusion et solidification des alliages binaires -Réacteurs nucléaires utilisant des gaz de refroidissement.

### 1.9 État de l'art de milieu poreux

A travers de l'étude de W. Breugem [14], Une expression de la viscosité effective ( $\mu_e$ ) d'un canal homogène poreux de type moyen a été dérivé en faisant correspondre la solution de Brinkman pour l'écoulement macroscopique avec la moyenne volumique de la solution de Stokes correspondante pour le flux microscopique.

W.R Hwang et al. [15] sont présenté et appliqué un nouveau schéma d'éléments finis pour résoudre l'équation de Stokes–Brinkman pour les analyses d'écoulement dans des milieux poreux à double échelle pour prédire la perméabilité effective des milieux fibreux à double échelle. Les conditions de contraintes continues et discontinues à l'interface entre un milieu poreux et un fluide environnant sont explorées en introduisant une équation de quantité de mouvement équivalente pour l'équation de Brinkman. Des solutions numériques dans un écoulement de canal parallèle sur un milieu poreux sont présentées et comparées à des solutions analytiques pour évaluer la précision du schéma proposé. Ils ont proposé une relation simple entre la perméabilité effective et la perméabilité du câble de fibres, basée sur des résultats numériques et analytiques.

Dans cet article, C. Varsakelis<sup>1</sup> et al. [16] présentent une théorie d'existence et d'unicité pour les équations de Darcy-Brinkman-Forchheimer qui régissent l'écoulement stationnaire d'un milieu poreux et d'un fluide clair occupant à la fois des domaines bornés et non bornés. En étendant la méthode fonctionnelle de Ladyzhenskaya aux équations en question, ils établissent l'existence d'au moins une solution faible. Pour le cas des domaines bornés, ils montrent en outre que cette solution est unique à condition qu'une hypothèse de petitesse convenable, impliquant le nombre de Reynolds, la porosité du milieu poreux et la première valeur propre du Laplace, soit vérifiée.

H. Rui et al. [17] ont étudié un schéma de différence finie centré sur les blocs est introduit pour résoudre l'équation non linéaire de Darcy-Forchheimer, dans laquelle la vitesse et la pression peuvent être approchées simultanément. Les estimations d'erreur de second ordre pour la pression et la vitesse sont établies sur une grille rectangulaire non uniforme. Des expériences numériques utilisant le schéma montrent la cohérence des taux de convergence de notre méthode avec l'analyse théorique.

Dans cet article, J.J. Salas et al. [18] discutent de la convergence d'une méthode d'éléments finis mixtes appliquée à un écoulement stationnaire de Darcy-Forchheimer dans une région bornée. Ils utilisent des éléments finis conformes pour les vitesses et la pression. Ils obtiennent des estimations d'erreur du schéma. Ils proposent également deux autres espaces d'éléments finis mixtes et comparons les tailles des différents problèmes discrets.

Ben Amara [19] a réalisé un travail sur les écoulements et les transferts thermiques en convection naturelle dans les milieux macroporeux alimentaires : application aux réfrigérateurs. L'approche est à la fois expérimentale et numérique.

Ould-Amer et al. [20] sont intéressés à la convection naturelle dans une cavité carrée poreuse multicouche. Chaque couche de milieu poreux est considérée homogène, isotrope et saturé par un seul fluide.

Pour une étude numérique et analytique du transfert thermique par convection naturelle dans des couches poreuses pour optimiser l'effet de la trainée de forme Darcy, Rebhi et al. [21] ont proposé le modèle suivant: une cavité rectangulaire horizontale soumise à un gradient thermique verticale avec l'écoulement de transition régissant un flux convectif mono-cellulaire ou multi-cellule.

Bouriche et al. [22] ont aussi donné une étude numérique et analytique sur l'influence de l'effet de la convection naturelle développée au sein d'une enceinte poreuse de Darcy soumise à un flux de chaleur uniforme en présence d'un champ magnétique.

Helel et al. [23] ont étudié le transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux non saturé soumis à une convection forcée laminaire.

Habbachi et al. [24] sont intéressés à la simulation tridimensionnelle de la convection naturelle dans une cavité cubique partiellement remplie de milieux poreux.

Ouarhlent et al. [25] sont intéressés à la convection thermique dans un milieu poreux (cavité partiellement poreuse).

### **1.10 Conclusion**

Ce chapitre a permis de mettre une description et des notions très importantes sur les milieux poreux, des différents paramètres de l'écoulement et le transfert de chaleur au sein des milieux, suivi par une étude bibliographique regroupe les travaux de recherche qui traitent les milieux poreux.

## **Chapitre 02**

### **Le stockage thermique**

## 2.1 Introduction

Ce chapitre présente des définitions et des notions fondamentales sur le stockage de l'énergie thermique avec ses différents types. Par la suite nous citerons quelques travaux des recherches réalisés sur le stockage thermique.

## 2.2 Stockage de l'énergie thermique

L'énergie thermique est stockée en ajoutant (ou en soustrayant) des calories à un matériau. Lorsque sa température augmente (ou diminue), on parle de stockage de chaleur sensible, et dans le processus de fusion (ou de solidification) et de vaporisation (ou de condensation) du matériau, on parle de stockage de chaleur latente [26].

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées en plusieurs catégories selon différents critères (voir la figure 07). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en stockage de la chaleur et stockage du froid. Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, le stockage long terme et le stockage court terme. D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe trois principaux types : stockage par chaleur sensible, stockage par chaleur latente, et stockage par chaleur thermochimique.

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs. Le stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. En revanche, dans le cas du système stockage passif, où le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé [27].

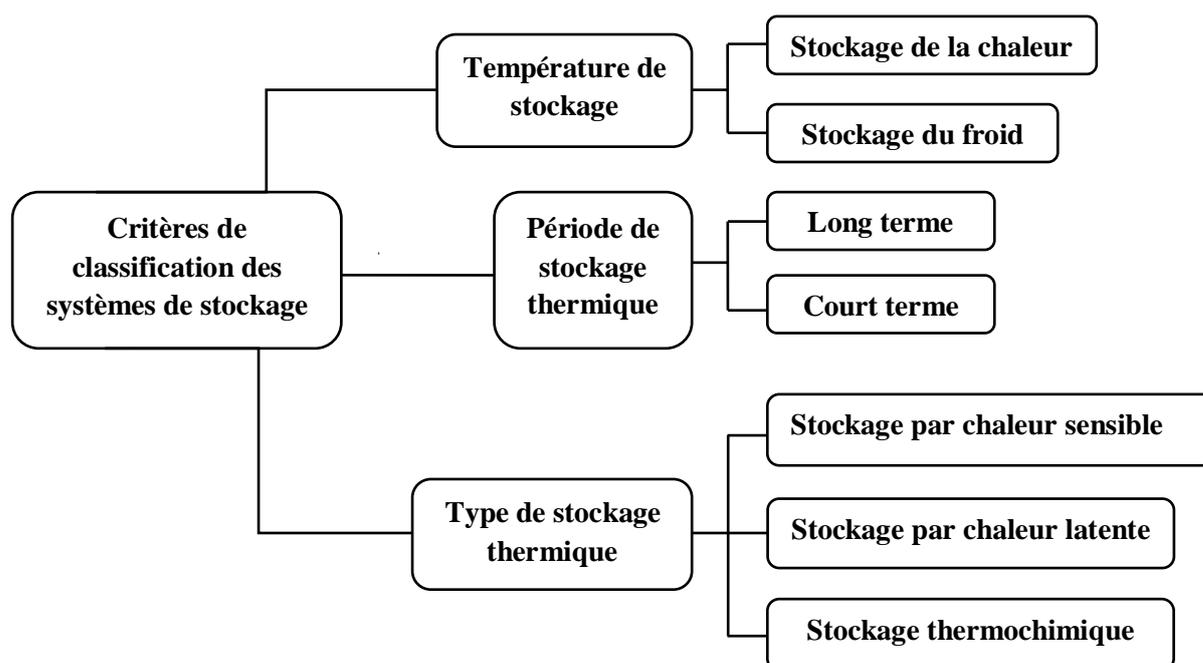


Fig. 07 - Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

## 2.3 Types de stockage thermique

Il est possible de stocker l'énergie thermique sous différentes formes, en utilisant la capacité des matériaux de libérer ou à stocker de la chaleur par le biais d'un transfert thermique. Ces dernières peuvent être réalisées de trois manières :

### 2.3.1 Stockage thermique par chaleur sensible

Dans une unité de stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée par modifications de la température du support de stockage (augmentation de la température) d'un matériau) au sein du système au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur. L'énergie stockée dans dépend de la capacité calorifique du fluide, changements de température et de quantité de matériel stocké [28].

L'évolution de l'énergie  $Q$  emmagasinée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT \quad (2.1)$$

$Q$  est la quantité d'énergie stockée (J),  $m$  est la masse du matériau de stockage (kg),  $C_p$  est la chaleur spécifique du matériau de stockage ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) et  $dT$  est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K) [27].

Le stockage sensible est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. Cependant, la faible densité de stockage de ce type de système est un inconvénient majeur. Il s'accompagne d'une élévation de la température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage [28].

Le Tableau 06 donne les propriétés thermophysiques des matériaux les plus utilisés dans les bâtiments.

**Tableau 06 - Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C [29]**

Matériaux	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> .K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Fer	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Terre graveleuse	2050	1840	3.77
Magnétite	5177	752	3.89
Eau	999	4182	4.17

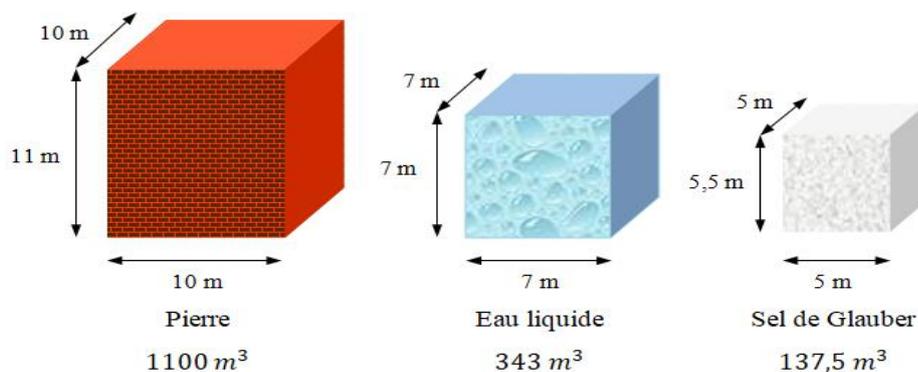
Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories : les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc. (voir l'annexe A) [28].

### 2.3.1.1 Stockage liquide

L'eau est le milieu de stockage le plus fréquemment utilisé pour les systèmes liquides aux basses températures, bien que la boucle de collecte peut utiliser de l'eau, des huiles, des mélanges eau-glycol ou tout autre milieu de transfert de chaleur comme fluide de récupération. Ce fluide a une chaleur spécifique la plus élevée ( $C_p = 4180 \text{ J/Kg.C}^\circ$ ).

Quand la température dépasse 100°C, la pression doit être maintenue à une valeur élevée et le coût du réservoir devient encore plus important pour des stockages volumineux.

D'autres liquides sont utilisés pour le stockage sensible, les plus usuels sont : les sels fondus et les huiles organiques. Toujours conditionné par des problèmes de sécurité et de stabilité, l'utilisation de ces liquides nécessite des installations très complexes du point de vue du contrôle et de sécurité [27].



**Fig. 08 - Volume nécessaire pour la même énergie stockée**

### 2.3.1.2 Stockage solide

Le stockage en milieu solide peut être utilisé pour des applications à basses, moyennes et hautes températures, En plus de leurs capacités calorifiques importantes, les matériaux solides ne présentent aucun problème dû à la pression de vapeur, Les métaux sont de bons candidats pour le stockage thermique. Cependant, ils restent chers en comparaison avec d'autres matériaux solides, notamment, la roche, le béton et la brique, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons matériaux. Mais en général, le stockage sensible des solides nécessite un plus grand volume que le stockage des liquides [27].

### 2.3.1.3 Domaine d'application

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur des bâtiments. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation) [27].

### 2.3.2 Stockage thermique par chaleur Latente

Lors de la transition de phase d'un matériau (solide, liquide ou liquide, vapeur), l'énergie thermique peut être stockée de manière isotherme et dépend donc de la chaleur latente, des propriétés intrinsèques du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Ce type de stockage est efficace pour de très faibles écarts de température. Le matériau utilisé dans ce cas est appelé : matériau à changement de phase (MCP, PCM pour matériel phase change). La Figure 8 montre la classification des MCP. Lors de la phase de charge, l'énergie thermique fournie au matériau l'échauffe, celui-ci subit alors un changement de phase et peut entraîner une surchauffe. Cette énergie est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie

stockée, le matériau de stockage change à nouveau de phase et revient à son état d'origine. La Figure 09 illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage [27].

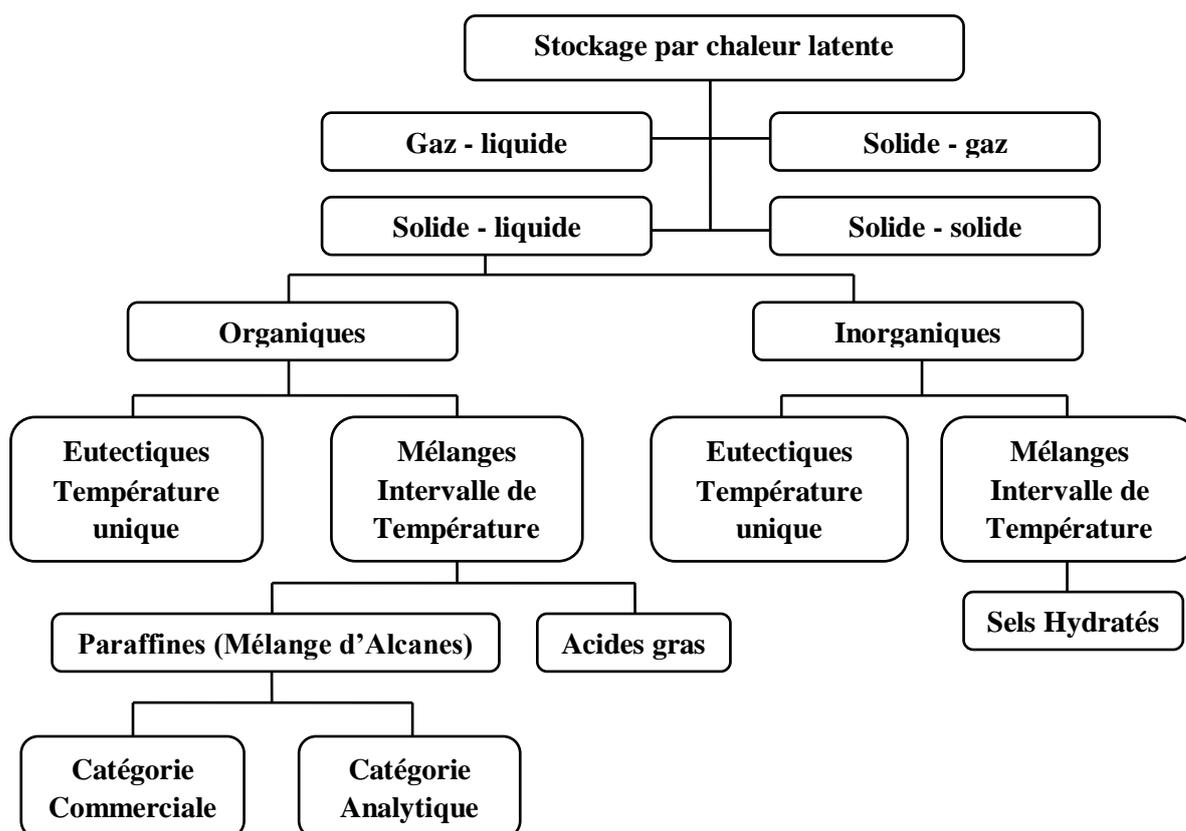


Fig. 09 - Classification des matériaux à changement de phase

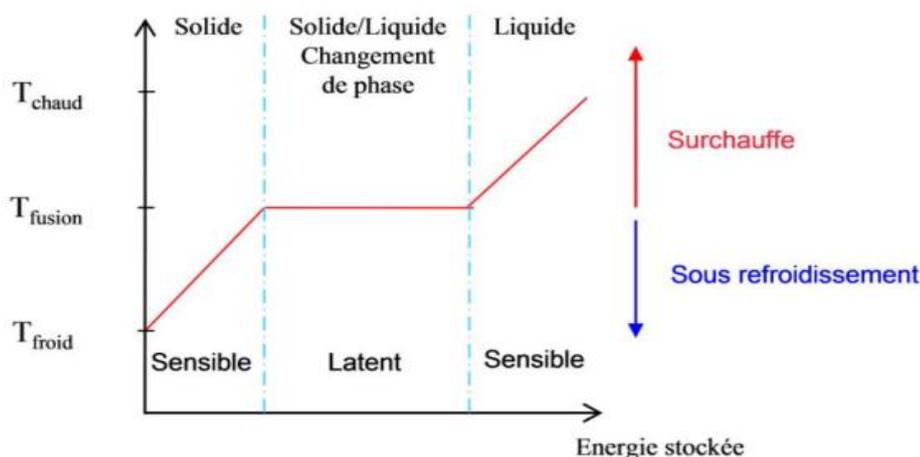


Fig. 10 - Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide) [27]

Selon la relation (2.2), l'énergie stockée dans un matériau à changement de phase est la somme de l'énergie apparente et de l'énergie potentielle. La majeure partie de l'énergie stockée est contenue dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$Q = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{fusion}}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{chaud}}} m \cdot C_{p,l} \cdot dT \quad (2.2)$$

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

Par rapport au stockage de chaleur sensible, l'utilisation du stockage de chaleur latente permet de réduire le volume de stockage et d'avoir une température de fonctionnement isotherme pendant la charge et la décharge. En revanche, les techniques utilisées pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes. Des problèmes subsistent, notamment la longévité du produit qui se dégrade après plusieurs cycles de fusion-solidification et le transfert de chaleur difficile à optimiser [27].

Selon les propriétés thermophysiques des phases obtenues (solide, liquide, gaz), les valeurs de chaleurs latentes et les niveaux de températures, chaque type de transformation (changement de phase du : solide au liquide, solide au solide ou liquide au gaz) présente plusieurs avantages et des inconvénients. Certains de ces avantages et de ces inconvénients sont résumés dans le Tableau 07.

**Tableau 07 - Comparaison des avantages et inconvénients des types de transformation de phase**  
[30]

Type de transformation	Avantages	Inconvénients
Liquide au gaz	La valeur de la chaleur latente est grande	Le changement de volume est important
Solide au solide	Le changement de volume est faible Pas de formation de fluide	La valeur de la chaleur latente est faible
Solide au liquide	Le changement de volume est faible	La valeur de la chaleur latente est moyenne
Solide au Gaz	Importante chaleur latente	Le changement de volume est important

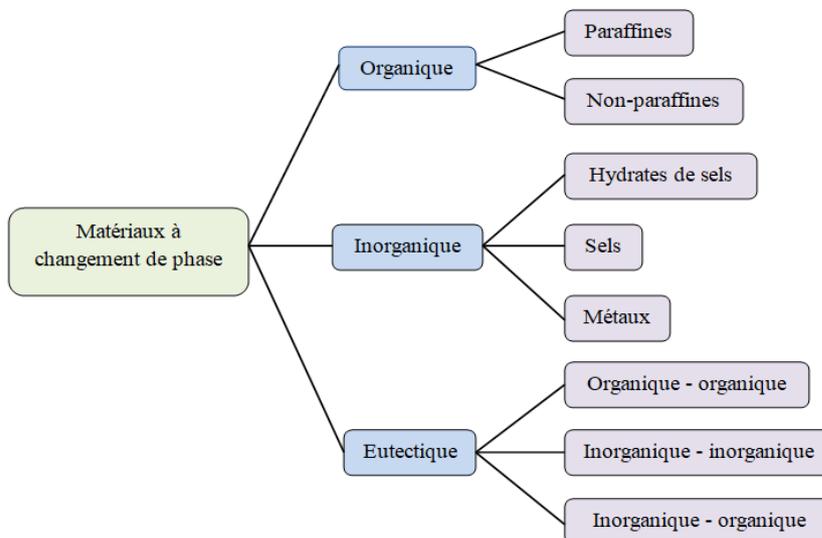
### 2.3.2.1 Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les MCP ont été considérés comme des matériaux de stockage d'énergie thermique. Les MCP peuvent être tout matériau capable d'absorber, de stocker et de libérer de la chaleur sous forme d'énergie thermique. En effet, l'énergie thermique est stockée dans les MCP au cours d'un processus de fusion alors qu'elle est récupérée au cours du processus de solidification.

L'application des MCP se trouve généralement dans de nombreux domaines, notamment le refroidissement des produits alimentaires, les parois dans les bâtiments, le système de récupération de chaleur, les centrales solaires, l'emballage, le textile, ...etc. [30].

### 2.3.2.2 Classification des matériaux à changement de phase

En 1983, Abhat [31] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure 11.



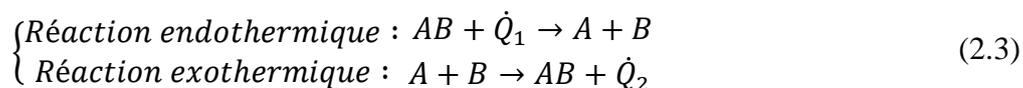
**Fig. 11 - Classification des MCP proposée par Abhat**

Les MCP peuvent être classés en trois groupes principaux :

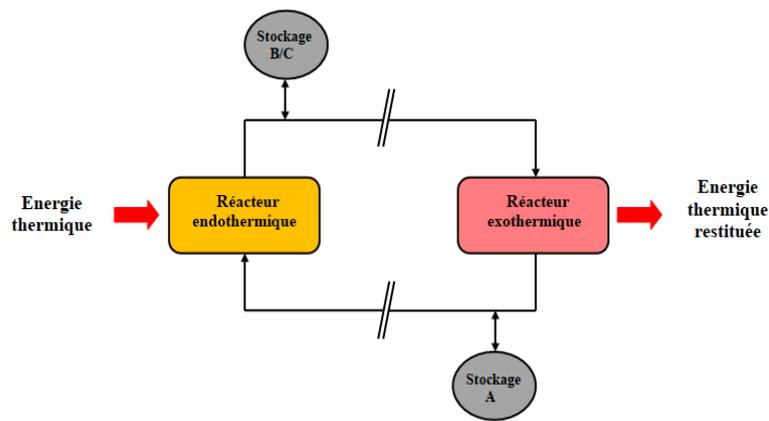
- ✓ Les matériaux à changement de phase organique (MCPO) où les MCPO sont composés de paraffine, d'acides gras, de polyéthylène glycol (PEG), d'alcools et de leurs dérivés,
- ✓ Les matériaux à changement de phase inorganique (MCPIO) où les MCPIO sont composés d'hydrates de sel et de composés métalliques. L'hydrate,  $M.nH_2O$ , où M est un composé inorganique,
- ✓ Les matériaux à changement de phase eutectique (MCPE) où les MCPE peuvent être défini comme une composition de fusion minimale de deux composants ou plus capables de fondre et de geler simultanément [32] (voir l'annexe A).

### 2.3.3 Stockage thermochimique

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solutions de stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est appelé : stockage thermochimique. Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par l'équation :



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la figure 12 [27].



**Fig. 12 - Schéma de principe du stockage thermochimique**

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique d'une source de chaleur, notamment un champ solaire, permet de réaliser une réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A et B) sont isolés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être récupérée, les produits stockés (A et B) sont mis en contact pour une réaction exothermique réversible qui récupère la chaleur stockée et régénère le produit initial (AB).

L'énergie qui peut être emmagasinée dans une réaction chimique (2.3) est la somme de l'énergie sensible du matériau et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée s'exprime selon la relation (2.4) [27] :

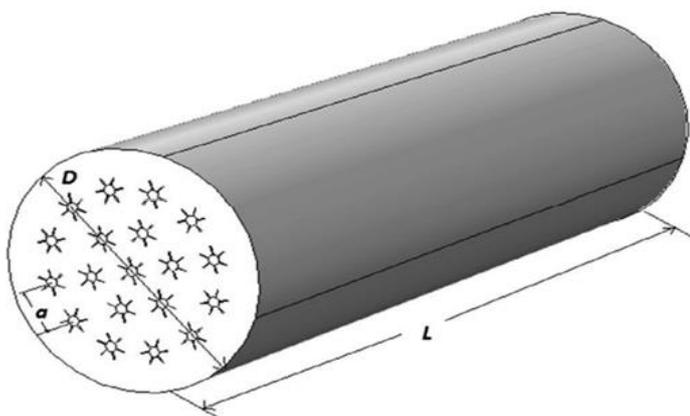
$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot Cp_i \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (2.4)$$

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

#### **2.4 Travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur sensible**

A travers une étude numérique en 3D, Prasad et al. [33] ont examinés la conception et l'optimisation d'un prototype de stockage de la chaleur sensible de configuration cylindrique avec tubes à l'échelle du laboratoire pour une application de centrale thermique solaire, utilisant trois matériaux à savoir le béton, la fonte et l'acier moulé ; pour étudier leurs caractéristiques de stockage de chaleur, un modèle mathématique 3D a été développé à l'aide de COMSOL Multiphysics. Le nombre de tube de chargement a été optimisé en fonction du temps de chargement du lit de stockage, les résultats prévenus numériquement correspondent étroitement aux données rapportées dans la littérature. La technique d'amélioration du transfert de chaleur est mise en œuvre en ajoutant des ailettes sur la surface extérieure des tubes de charge, l'effet de l'ajout d'ailettes sur les tubes de charge du lit de béton est analysé dans trois cas, à savoir les tubes de charge sans ailettes, les tubes de charge à 4 ailettes et les tubes de charge à 6 ailettes, Les

réductions de temps de charge sont de 35,48% (temps de charge 1307 s) pour une caisse à quatre ailettes et de 41,41% (temps de charge 1187 s) pour une caisse à six ailettes par rapport à un lit de béton avec des tubes de charge lisses. Pour la fonte et le lit en acier moulé, l'augmentation de la vitesse entraîne une réduction du temps de charge presque identique, alors que cet effet est moindre dans le béton en raison de la faible conductivité thermique et d'une plus grande capacité calorifique.



**Fig. 13 - Unité de stockage par chaleur sensible [33]**

R. Lalitha Priya et al. [34] ont étudié la caractérisation du sable de rivière en tant que milieu de stockage de chaleur à haute température et ont étudié la capacité thermique spécifique du sable de rivière. Un échantillon de sable de rivière prélevé sur la côte de Cauvery a été caractérisé par analyse TGA (Analyse Gravimétrique Thermique), FT-IR (Infrarouge à Transformée de Fourier) et DSC (Calorimètre à Balayage Différentiel). Ils ont été observés que, lorsque l'échantillon de sable était soumis à un procédé de chauffage initial, il y avait une perte de masse considérable mais lorsque l'échantillon était soumis à plusieurs cycles thermiques, il n'y avait pas de perte de masse. Cela prouve la durabilité de l'échantillon de sable jusqu'à une température de 1087°C, ils constatent que le composé carbonate était manquant après chauffage qui indique le dégagement de dioxyde de carbone. D'après l'observation colorimétrique, la capacité calorifique de l'échantillon de sable de rivière était 1041 J/Kg.K, ce qui en fait une option appropriée pour le stockage de l'énergie thermique.



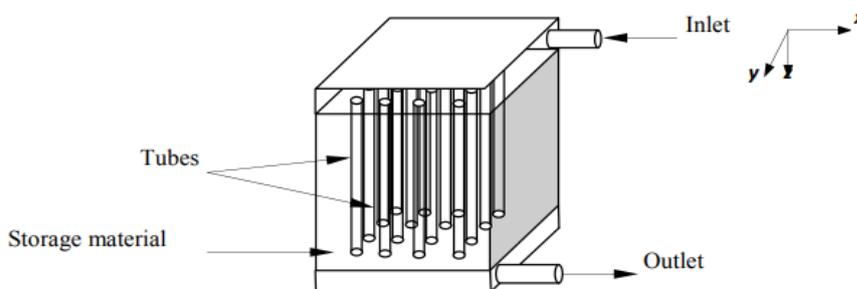
**Fig. 14 - Échantillon de sable de rivière avant et après chauffage [34]**

Fernandez et al. [35], ont présenté une méthodologie de recherche des matériaux à potentiels utilisés dans le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible, le stockage par chaleur sensible à des températures comprises entre 150 et 200 C° est défini comme une étude de cas et deux scénarios différents ont été envisagés : le stockage par chaleur sensible à long terme et à court terme dans le but de réduire les couts au minimum, la méthodologie proposée permet de combiner plusieurs objectifs et restrictions d'utilisation pour évaluer les matériaux d'ingénierie les plus utilisés pour les applications de stockage d'énergie thermique.



**Fig. 15 - Diagramme à barres illustrant la capacité calorifique spécifique d'une centaine des matériaux les plus utilisés, obtenue avec CES Sélecteur [35]**

Mahfoudi et al. [36] font une analyse expérimentale et numérique du comportement transitoire et la capacité de stockage thermique d'une unité de stockage de chaleur sensible de configuration cubique avec des tubes de charge intégrés utilisant le sable comme support de stockage, le matériau utilisé dans cette expérimentation (sable de région d'El-oued, au sud de l'Algérie) a été caractérisé par sa granulométrie, sa densité et sa capacité calorifique.



**Fig. 16 - Schéma physique de l'unité de stockage [36]**

Dans l'étude de Mahfoudi et al. [37], un modèle mathématique 2D à éléments finis a été développé à l'aide de COMSOL Multiphysics. Ils ont constaté que l'énergie stockée et l'efficacité

de charge peuvent être augmentées en augmentant le nombre des tubes de charge. Ils ont conclu que les résultats montrent que le sable a une inertie thermique importante, cependant, il est intéressant de développer ce procédé de stockage dans la région où le sable et l'énergie solaire sont abondants.

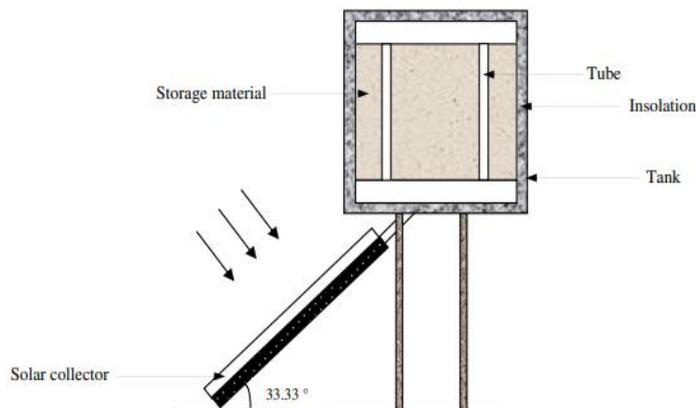


Fig. 17 - Schéma du dispositif expérimental [37]

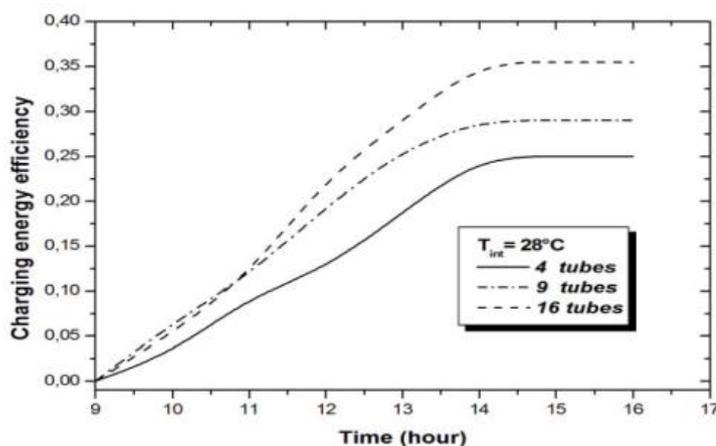
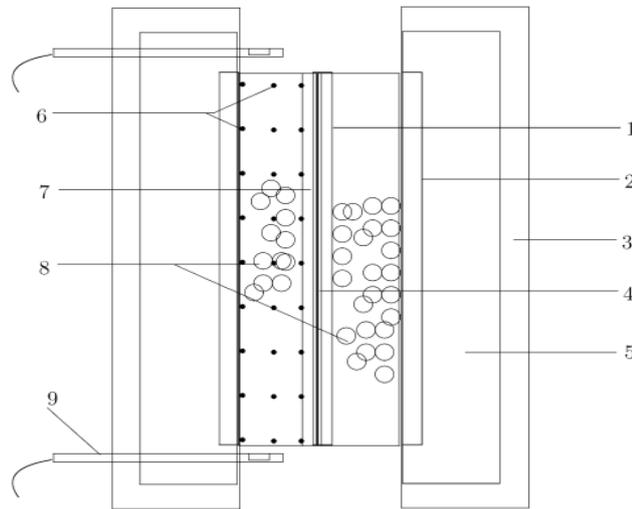


Fig. 18 - Efficacité énergétique de charge du lit de sable en fonction du nombre de tubes de charge [37]

B. Dhifaoui et al. [38] ont montré expérimentalement l'intérêt d'utiliser les matériaux poreux comme matériaux de stockage, cette étude concerne le stockage de l'énergie thermique dans un lit poreux formé principalement par un canal vertical rempli de billes de verre chauffé sur l'une des parois verticales par un flux de chaleur constant, l'utilisation de billes de verre est motivée par l'utilisation possible d'un tel système de stockage de l'énergie solaire par chaleur sensible et son optimisation. La modélisation dynamique du système au premier ordre par comparaison avec les expériences permet d'évaluer le coefficient d'échange thermique et de prédire la réponse du système à un flux de chaleur correspondant à des données solaires réelles afin d'atteindre l'objectif principal qui est l'optimisation du comportement du système sous un flux solaire.



- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1: plaque chauffante,                 | 6: thermocouples de type K,                    |
| 2: plaque quasi-adiabatique,          | 7: plaques en samicanite (isolant électrique), |
| 3: cadre en bois,                     | 8: perles de verre,                            |
| 4: résistance en feuilles de carbone, | 9: sondes (anémomètre à fil chaud).            |
| 5: isolant thermique (liège),         |  |

**Fig. 19 - Schéma de canal poreux [38]**

Dans la centrale cylindro-parabolique de PSA, Espagne, Tamme et al. [39] ont développé et testé un système de stockage de l'énergie thermique sensible dans les milieux solides. A travers les résultats du calcul, l'influence des différents paramètres décrivant le système de stockage. Bien que les effets des propriétés du matériau de stockage soient limités, la géométrie sélectionnée du système de stockage est importante. Ils ont observé que l'évaluation d'un système de stockage nécessite l'analyse de la centrale électrique complète et non seulement de l'unité de stockage, la capacité du système est définie par le travail électrique produit par la centrale, au cours de processus de décharge. Le choix de la stratégie de fonctionnement pour le système de stockage est essentiel pour l'optimisation économique.

A travers une étude de B. Bourouga et al. [40], L'analyse de comportement d'un système de stockage par chaleur sensible est abordée sous l'aspect de la réponse périodique. La température de sortie est obtenue après résolution de l'équation de transfert couplée à celle de diffusion dans le solide. Les résultats théoriques d'une comparaison des fonctions de transfert pour trois dispositions classiques du matériau sont présentés. Dans la première configuration, le fluide caloporteur circule dans des canaux rectangulaires disposés entre des plaques. Pour la seconde, le matériau occupe l'espace entre des tubes cylindriques équirépartis. Le dernier cas est un empilement de billes sphériques balayées par le fluide caloporteur.

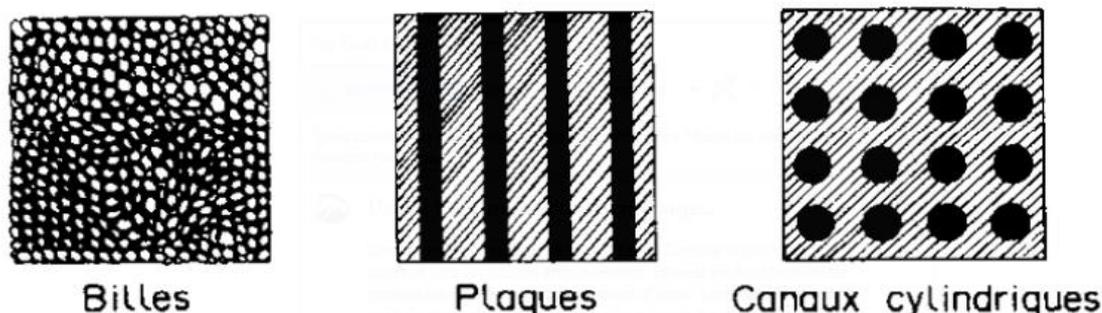


Fig. 20 - Les trois cas de géométrie à comparer [40]

## 2.5 Travaux des recherches réalisés sur le stockage par chaleur latente

Arkar et al. [41] ont étudié un système de stockage de chaleur latente dans lequel le MCP est encapsulé dans des sphères, formant ainsi un milieu poreux. L'ensemble est placé dans le conduit du système de ventilation d'un local. D'abord, l'air ambiant est chauffé dans un canal situé sur le toit du local et recevant le rayonnement solaire. Ensuite, il passe dans le système de stockage de chaleur où il cède une partie de sa chaleur au MCP en déclenchant sa fusion. Cette stratégie permet d'éviter le surchauffe de l'air de ventilation et prolonge la ventilation jusqu'au soir. Des résultats de simulation pour différentes conditions climatiques réelles ont été obtenus.

H. El Qarania [42] est utilisé un modèle mathématique basé sur des équations de conservation d'énergie pour prédire le comportement thermique des cellules de stockage solaire et les performances des matériaux à changement de phase sous forme de chaleur latente de fusion (MCP). L'unité de stockage se compose d'une série de tubes placés dans le MCP. En mode charge, le fluide caloporteur (eau) du capteur solaire circule dans le tube et transfère l'énergie solaire collectée au niveau du capteur solaire vers le matériau à changement de phase. Celui-ci fond en stockant l'énergie sous forme de chaleur latente de fusion. La chaleur ainsi stockée est ensuite restituée par l'eau à chauffer pendant la phase de décharge.

Les simulations effectuées ont pour but d'étudier les effets de la masse du MCP ( $M$ ), le nombre de tubes ( $N$ ) et le débit massique du fluide caloporteur ( $\dot{m}_f$ ) sur l'efficacité thermique de stockage de l'unité.

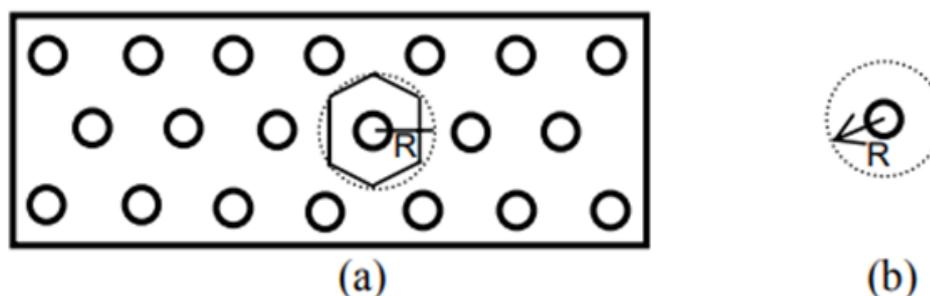


Fig. 21 - Système de stockage par chaleur latente [42]

W. Foudhil et al. [43] ont étudié comportement thermique d'un canal vertical poreux rempli de billes sphériques (en verre ou contenant un matériau à changement de phase), chauffé à la paroi et soumis à une ventilation d'air à faible vitesse. La complexité de cette modélisation réside en la combinaison de la physique des milieux poreux avec celle du changement de phase. La simulation numérique est basée sur la méthode des éléments finis et a été réalisée en utilisant le code de calcul Comsol Multiphysics. Ils ont montré que si l'utilisation de matériaux à changement de phase améliore les performances du système de stockage.

A partir de l'étude de M. Aadm et al. [44], les matériaux à changement de phase à base de cire de paraffine de résine époxy avec un point de fusion de  $27^{\circ}\text{C}$  ont été utilisés comme nouveau système de stockage d'énergie. Les propriétés thermophysiques et le processus de fusion d'un composite MCP ont été étudiés numériquement et expérimentalement. La DSC (calorimétrie différentielle à balayage) a été utilisée pour la mesure de l'enthalpie de fusion et la détermination de la capacité calorifique du MCP. Les résultats ont montré que les propriétés thermiques les plus importantes de ces composites à l'état solide et liquide sont comme la conductivité thermique « apparente », la capacité de stockage de chaleur et la chaleur latente de fusion. Ces résultats expérimentaux ont été simulés en utilisant des modèles numériques basés sur Comsol® Multiphysiques 4.3.

## **2.6 Conclusion**

Ce chapitre est consacré des notions sur le stockage de l'énergie thermique avec ses différents types ainsi que les travaux de recherche réalisés pour chaque type de stockage thermique (sensible, latente) sont présentée.

## **Chapitre 03**

# **Modélisation numérique**

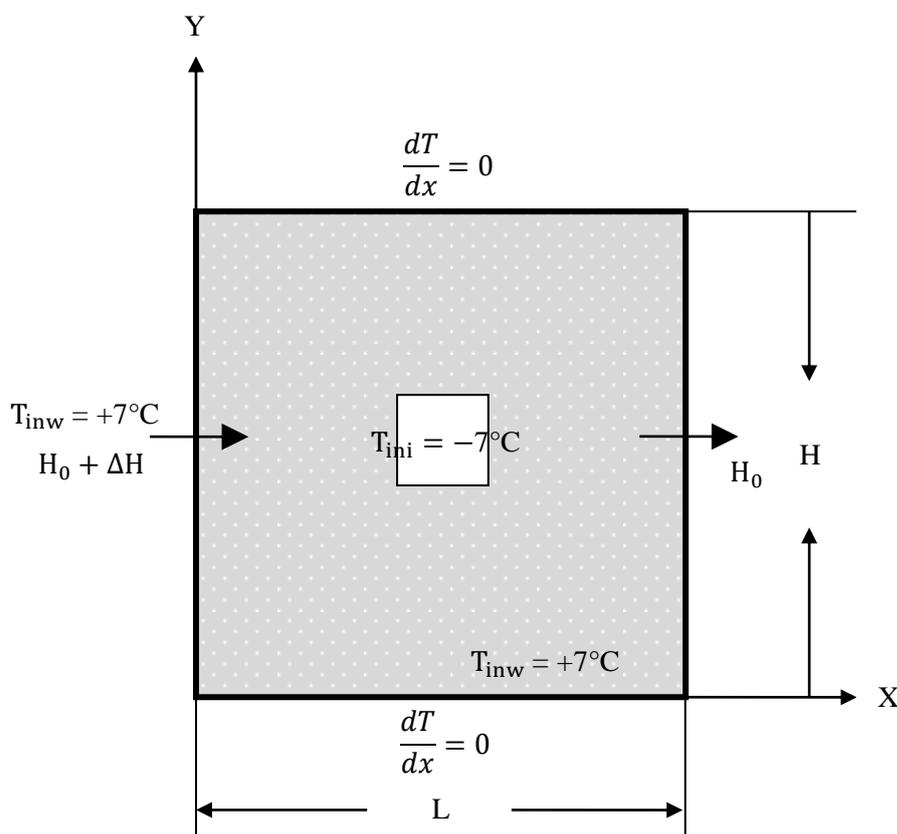
### 3.1 Introduction

Ce chapitre définit tout d'abord le domaine d'étude, ensuite nous présentons les propriétés thermiques et physiques utilisés et nous posons quelques hypothèses simplificatrices. Enfin, nous explicitons les équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites associées.

### 3.2 Description de la géométrie

La configuration du modèle est illustrée dans la figure 22 une cavité carrée de 1 mètre de largeur et 1 mètre de longueur contient une inclusion de glace carrée de 0,333 m de longueur, centrée aux coordonnées  $x = 0,5$  m et  $y = 0,5$  m.

La température initiale de l'inclusion de glace est  $T_{ini} = -7^{\circ}\text{C}$ . La température dans la cavité poreuse est  $T_{inw} = +7^{\circ}\text{C}$ . L'écoulement du fluide est entraîné par un gradient de charge hydraulique de  $\Delta H = 3\%$  sur la longueur de cavité.



**Fig. 22 - Géométrie du modèle, distribution de température initiale et conditions aux limites**

Les valeurs des paramètres géométriques, températures aux limites initiales et imposées et gradients de charge sont présentées dans le tableau 08.

**Tableau 08 - Valeurs des paramètres géométriques, températures aux limites initiales et imposées et gradients de charge**

<b>Les paramètres géométriques, températures et gradients de charge</b>	<b>Valeurs</b>
Domaine de la simulation, étendue longitudinale (m), $L_x$	1
Domaine de la simulation, étendue latérale (m), $L_y$	1
Position d'inclusion $L_{cx}$ (m)	0.5
Position d'inclusion $L_{cy}$ (m)	0.5
Taille d'inclusion de forme carrée $L_{rec}$ (m)	0.333
$T_{in}$ (°C)	+7
$T^+$ initiale pour le domaine (°C)	+7
$T^-$ initiale d'inclusion (°C)	-7
$\Delta H / L_x$	0.03

Ce modèle décrit le changement de phase glace-eau d'une inclusion de glace dans une cavité poreuse. Les valeurs des propriétés thermiques de l'eau, de la glace et de la matrice solide sont présentées dans le tableau 09.

**Tableau 09 - Les valeurs des propriétés thermiques de l'eau, de la glace et de la matrice solide**

<b>Propriété matérielle</b>	<b>La glace</b>	<b>L'eau</b>	<b>Matrice solide</b>
La densité	920 kg/m <sup>3</sup>	1000 kg/m <sup>3</sup>	2650 kg/m <sup>3</sup>
La capacité calorifique à pression constante	2060 J/(kg.K)	4182 J/(kg.K)	835 J/(kg.K)
La conductivité thermique	2.14 W/(m.K)	0.6 W/(m.K)	9 W/(m.K)

Une chaleur latente de fusion,  $L = 334$  kJ/kg est utilisée. Les paramètres physiques supplémentaires utilisés dans l'exemple sont résumés dans le tableau 10.

**Tableau 10 - Valeurs des paramètres physiques considérées**

Nom	Valeur	Description
$T_{inw}$	278.15 K	Température initiale pour le domaine décongelé
$T_{ini}$	268.15 K	Température initiale d'inclusion
$\lambda_w$	0.6 W/(m·K)	Conductivité thermique de l'eau
$\lambda_{ice}$	2.14 W/(m·K)	Conductivité thermique de la glace
$\lambda_s$	9 W/(m·K)	Conductivité thermique pour matrice solide
$C_w$	4182 J/(kg·K)	Capacité calorifique de l'eau
$C_{ice}$	2060 J/(kg·K)	Capacité calorifique de la glace
$C_s$	835 J/(kg·K)	Capacité calorifique à matrice solide
$\rho_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>	Densité de l'eau
$\rho_{ice}$	920 kg/m <sup>3</sup>	Densité de la glace
$\rho_s$	2650 kg/m <sup>3</sup>	Densité de matrice solide
L	3.34E5 J/kg	Chaleur latente
$\varepsilon_p$	0.37	Porosité
$\beta$	10 <sup>-8</sup> Pa <sup>-1</sup>	Compressibilité efficace
$S_{w, res}$	0.05	Saturation résiduelle en $S_w$ (T)
$\mu_w$	1.793. 10 <sup>3</sup> Pa. s	Viscosité dynamique de l'eau
$k_{int}$	1.3. 10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup>	Perméabilité intrinsèque
$\Omega$	50	Facteur d'impédance
$T_{pc}$	272.65 K	Température de changement de phase
$\Delta H / L_x$	0.03	Gradient de charge hydraulique

### 3.3 Les hypothèses simplificatrices

Pour le but de simplifier le problème étudié, certaines hypothèses ont été introduites :

- ✓ Le domaine poreux est supposé saturé, isotrope et non isotherme à l'équilibre thermique local,
- ✓ Le milieu poreux constitue une phase solide (matrice poreuse) et de l'eau, qui peut être en phase liquide, en phase glace,
- ✓ Aucune dispersion thermique n'est incluse dans l'équation de transfert de chaleur,
- ✓ La viscosité dynamique est considérée comme constante par rapport à la température,
- ✓ Le modèle d'écoulement utilisé pour ce travail est le modèle de Darcy.

### 3.4 Équations gouvernantes

Le transfert de chaleur en convection naturelle dans une cavité carrée poreuse est régi par les équations de continuité, de conservation de la quantité de mouvement et d'énergie. Ces équations s'écrivent comme suit [45] :

#### 3.4.1 Équation de continuité

L'équation de la conservation de masse est donnée par :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3.1)$$

Soit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

Où : u et v représentent les composantes longitudinale et transversale, respectivement, de la vitesse.

#### 3.4.2 Équation de la quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement d'une cavité carrée remplie d'un milieu poreux, est régie par le modèle de Darcy, qui prend en considération les effets visqueux, la forme vectorielle s'écrit sous forme :

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon_p} (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla p - \frac{\mu}{k} \vec{v} \quad (3.3)$$

Avec :

$\frac{\rho_f}{\varepsilon_p} (\vec{v} \nabla) \vec{v}$  : représente les effets convectifs.

$\frac{\mu}{k} \vec{v}$  : représente le terme Darcy qui rassemble les résistances de frottement dues à la présence de la matrice poreuse.

Où  $\varepsilon_p$  représente la porosité de milieu, k sa perméabilité et  $\mu$  la viscosité dynamique.

#### 3.4.3 Équation de conservation de l'énergie

L'équation de l'énergie d'une cavité carrée remplie d'un milieu poreux se met alors sous la forme suivante :

$$(\rho C_p)_f \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_{eff} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

Avec :

$$K_{eff} = (1 - \varepsilon_p) K_s + \varepsilon_p K_f \quad (3.5)$$

$K_{eff}$  : représente la conductivité thermique effective (moyenne) qui prend en considération la contribution de la phase fluide et de la phase solide via le paramètre porosité  $\varepsilon_p$ . En procédant à des arrangements adéquats, l'équation (3.4) se met sous la forme suivante :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha [(1 - \varepsilon_p) R_K + \varepsilon_p] \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.6)$$

Avec :

$R_K = \frac{K_s}{K_f}$  : représente le rapport des conductivités thermiques (conductivité thermique du solide sur celle du fluide), qui est un paramètre adimensionnel.

$\alpha = \frac{K_f}{(\rho C_p)_f}$  : représente la diffusivité thermique.

### 3.5 Équation du modèle

La fonction milieu poreux de l'interface de la loi de Darcy inclut une option permettant de définir une  $S_p$  de stockage définie par (unité SI : 1/Pa) qui, dans ce cas, est définie comme :

$$S_p = S_w \beta \varepsilon_p \quad (3.7)$$

Où  $S_w$  est la saturation en eau,  $\varepsilon_p$  est la porosité et  $\beta$  la compressibilité effective qui est une valeur combinée de la compressibilité de l'eau, de la glace et de la matrice solide. Pour la simplicité la gravité est négligée. La variable  $Q_m$  est une source massique qui représente l'eau liquide supplémentaire due à la fonte de l'inclusion de glace :

$$Q_m = S_w \varepsilon_p (\rho_i - \rho_w) \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (3.8)$$

$\rho_i$  et  $\rho_w$  Sont les densités de glace et d'eau liquide. La saturation en eau liquide  $S_w$  dépend du changement de phase comme :

$$S_w = S_{w, res} + (1 - S_{w, res}) \theta_2 \quad (3.9)$$

$S_{w, res}$  Est la saturation en eau liquide résiduelle et  $\theta_2$  est une fonction en escalier lisse définie dans le nœud Phase Change Matériel. La fonction échelon  $\theta_2(T)$  est nulle pour les températures inférieures à la température de fusion  $T_{pc}$  et vaut 1 pour les températures supérieures à  $T_{pc}$ .

Le transfert de chaleur dans le milieu poreux est décrit par l'équation suivante :

$$(\rho C)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_w u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-K_{eff} \nabla T) = Q \quad (3.10)$$

$(\rho C)_{eq}$  est la valeur équivalente de la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ) et de la capacité calorifique  $C$  à pression constante ( $\text{J/kg.K}$ ),  $K_{eff}$  est la conductivité thermique effective ( $\text{W/m.K}$ ),  $T$  est la

Température (K) et  $Q$  est une source de chaleur ( $W/m^3$ ). La variable  $C_w$  est la capacité calorifique effective du fluide à pression constante [46].

### 3.6 Génération de maillage

Comme le logiciel utilise la méthode des éléments finis, Un maillage doit aussi être défini en 2 dimensions.

#### 3.6.1 Type de maillage utilisé

Pour cette étude , on a utilisé un maillage non structuré triangulaire en 2D ,comme il est montré dans la figure 23.

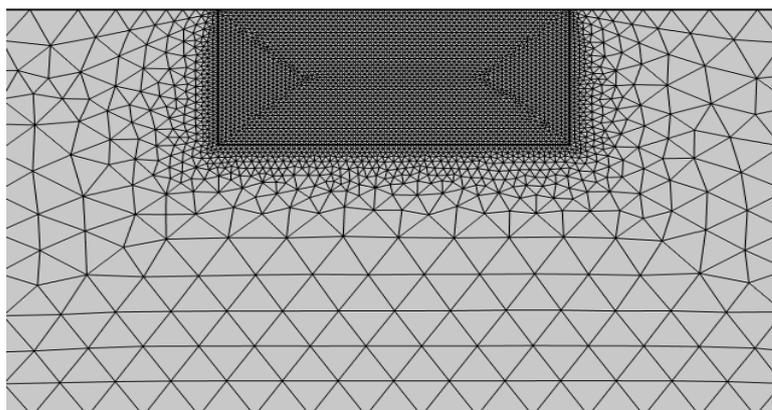


Fig. 23 - Génération du maillage utilisé

#### 3.6.2 Qualité de maillage

La qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul, il est important d'avoir un maillage suffisant pour capturer les gradients d'écoulement et de transfert thermique. Il est également important de conserver des ressources informatiques pour assurer une exécution rapide des analyses. Cette dernière joue un rôle important dans la précision et la stabilité du calcul numérique.

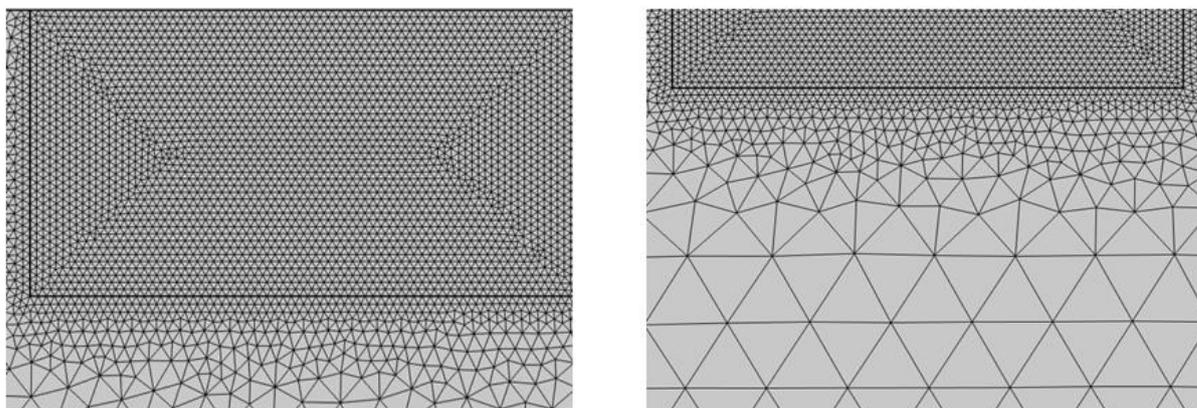


Fig. 24 - Qualité de maillage utilisé

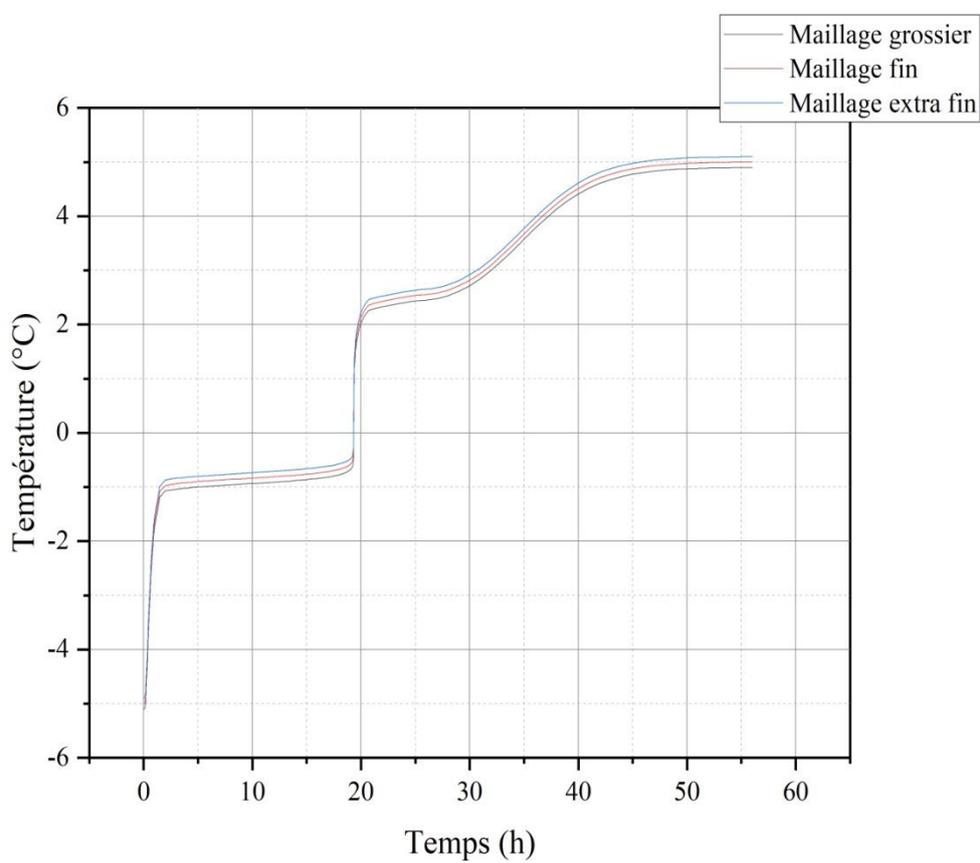
### 3.6.3 Indépendance de maillage

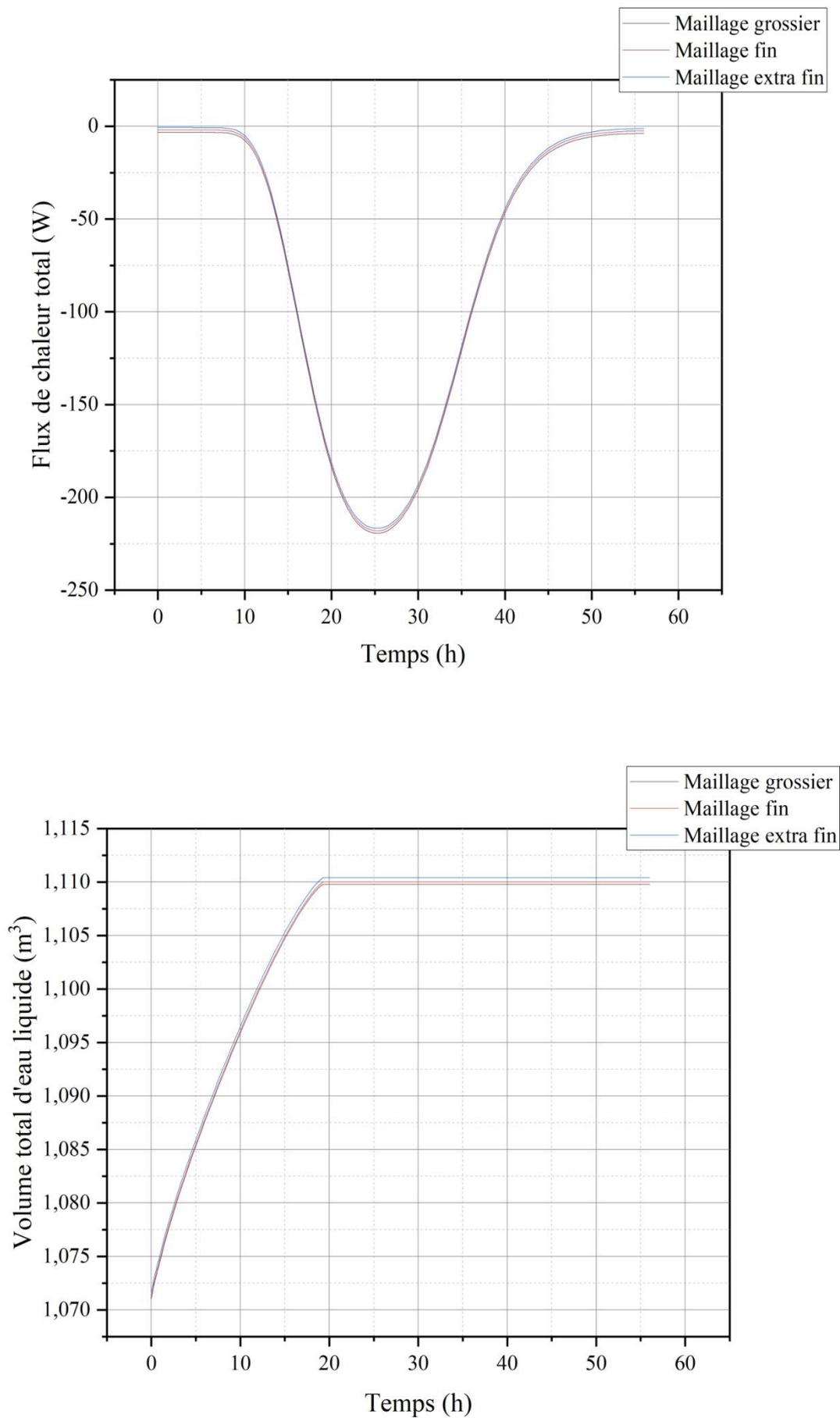
Afin d'étudier les effets du maillage sur la solution, nous avons réalisé un même calcul numérique avec des nombres de mailles différents. Un maillage initial est adapté en mettant plus de cellules dans les régions où le gradient de vitesse est plus élevé qu'un niveau choisi.

**Tableau 11 - Indépendance de maillage**

Maillage	Grossier	Fin	Extra fin
Nombre de nœuds	40000	122500	360000

Afin de comparer les résultats, nous avons superposé, grâce à COMSOL, les graphes de température, flux de chaleur total et volume total d'eau liquide en fonction de temps avec les différents maillages utilisés comme il est montré dans la figure 25.





**Fig. 25 - Indépendance de maillage**

On observe que la différence entre les courbes n'est pas importante à partir du 3 maillages (grossier, fin et extra fin). Pour obtenir une bonne solution prenant en compte le temps de calcul, le maillage fin est retenu pour l'étude dans ce présent travail.

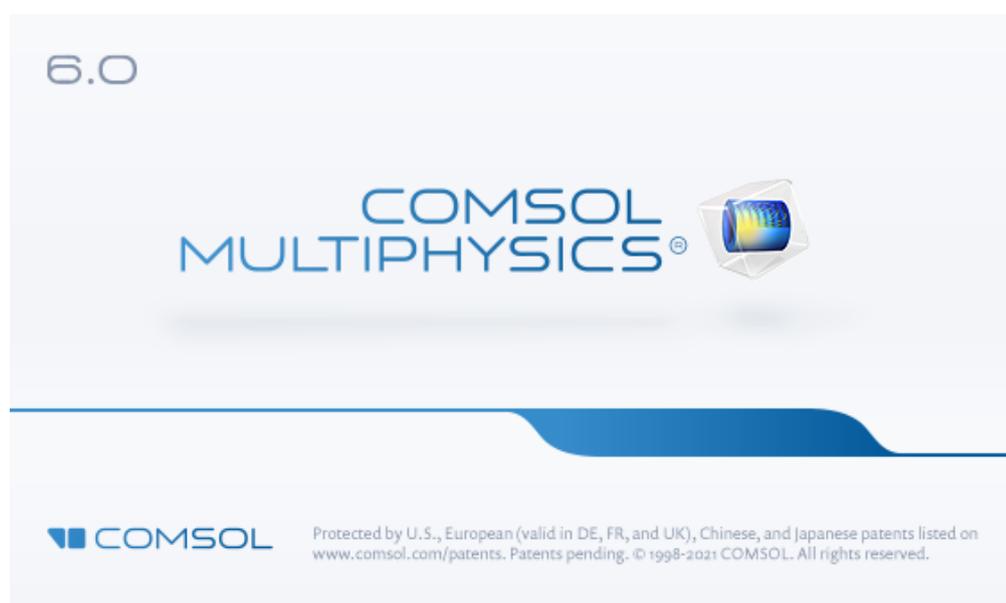
### 3.7 Les conditions initiales et aux limites

Les charges de la condition initiale sont supposées uniformes, égales au gradient descendant tête de délimitation. Les conditions aux limites du transport thermique sont une température imposée de  $7^{\circ}\text{C}$  à la limite d'entrée du gradient ascendant (à gauche), avec des conditions de gradient de température nulles (zéro flux conducteurs) le long de toutes les autres frontières.

- ✓ Paroi gauche :  $U = V = 0 ; T = T_{inw} = 7^{\circ}\text{C}$
- ✓ Paroi droite :  $U = V = 0 ; T = 0^{\circ}\text{C}$
- ✓ Paroi inférieure :  $0 < X \leq 1 ; U = V = \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{Y=0} = 0$
- ✓ Paroi supérieure :  $0 < X \leq 1 ; U = V = \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{Y=1} = 0$
- ✓ Flux de chaleur Q

### 3.8 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics 6.0

COMSOL Multiphysics est un outil de simulation, Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. Différentes modules physiques existent sous COMSOL, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel.



**Fig. 26 - Interface du logiciel COMSOL Multiphysics 6.0**

### 3.9 Les étapes de la résolution numérique par COMSOL Multiphysics 6.0

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous COMSOL Multiphysics 6.0 implique plusieurs étapes [28] :

- ✓ La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle,
- ✓ La définition de la géométrie,
- ✓ La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré,
- ✓ La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs,
- ✓ La visualisation des résultats.

### 3.10 Conclusion

Ce chapitre présente la géométrie de domaine physique, ses propriétés et les équations gouvernantes du phénomène étudié avec les conditions aux limites. Le prochain chapitre consacrera à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

## **Chapitre 04**

### **Résultats et discussions**

## 4.1 Introduction

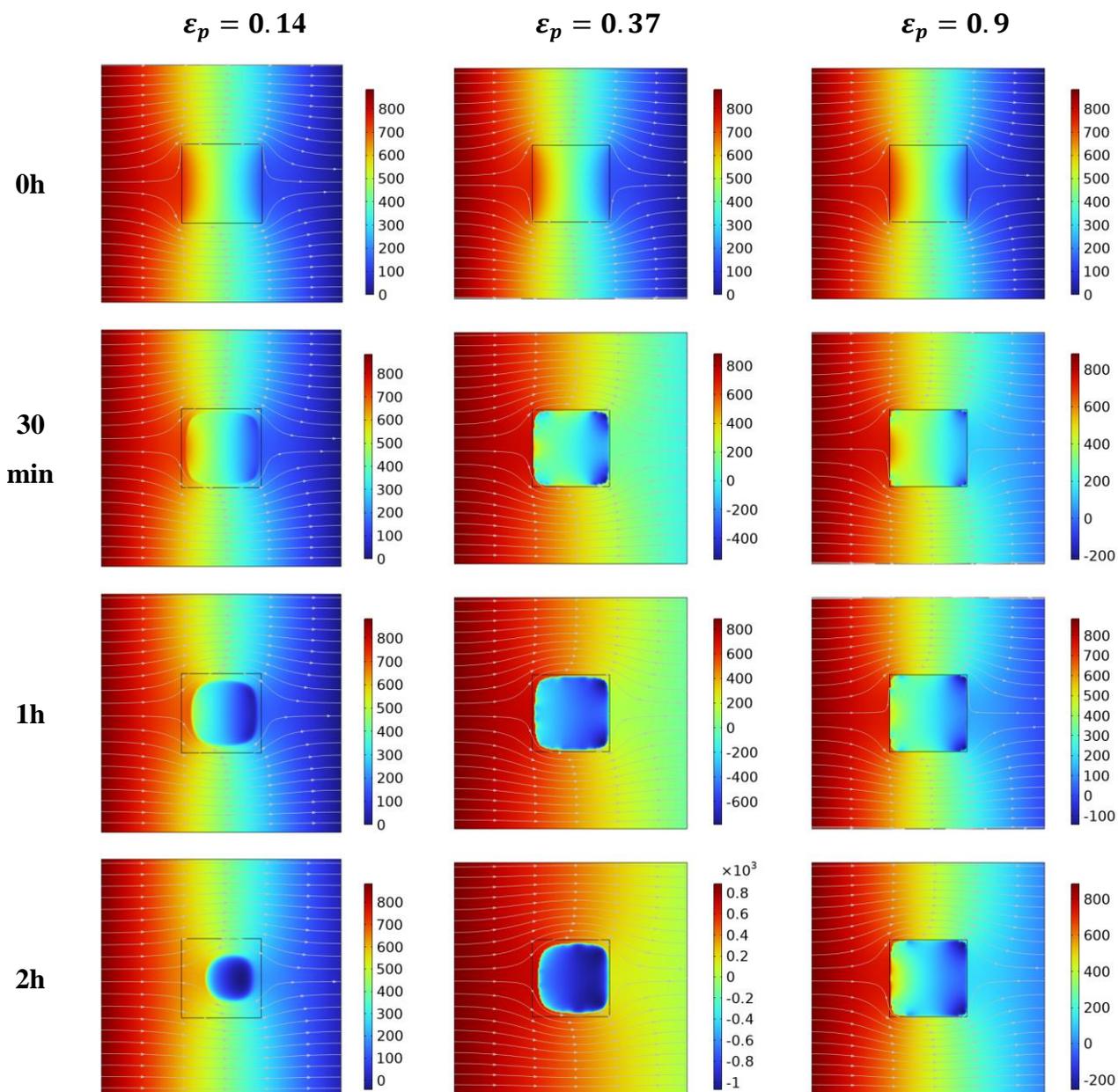
Le présent chapitre a été consacré aux résultats et discussions des différents résultats obtenus. Notre étude concerne l'influence de la porosité sur l'inclusion de glace.

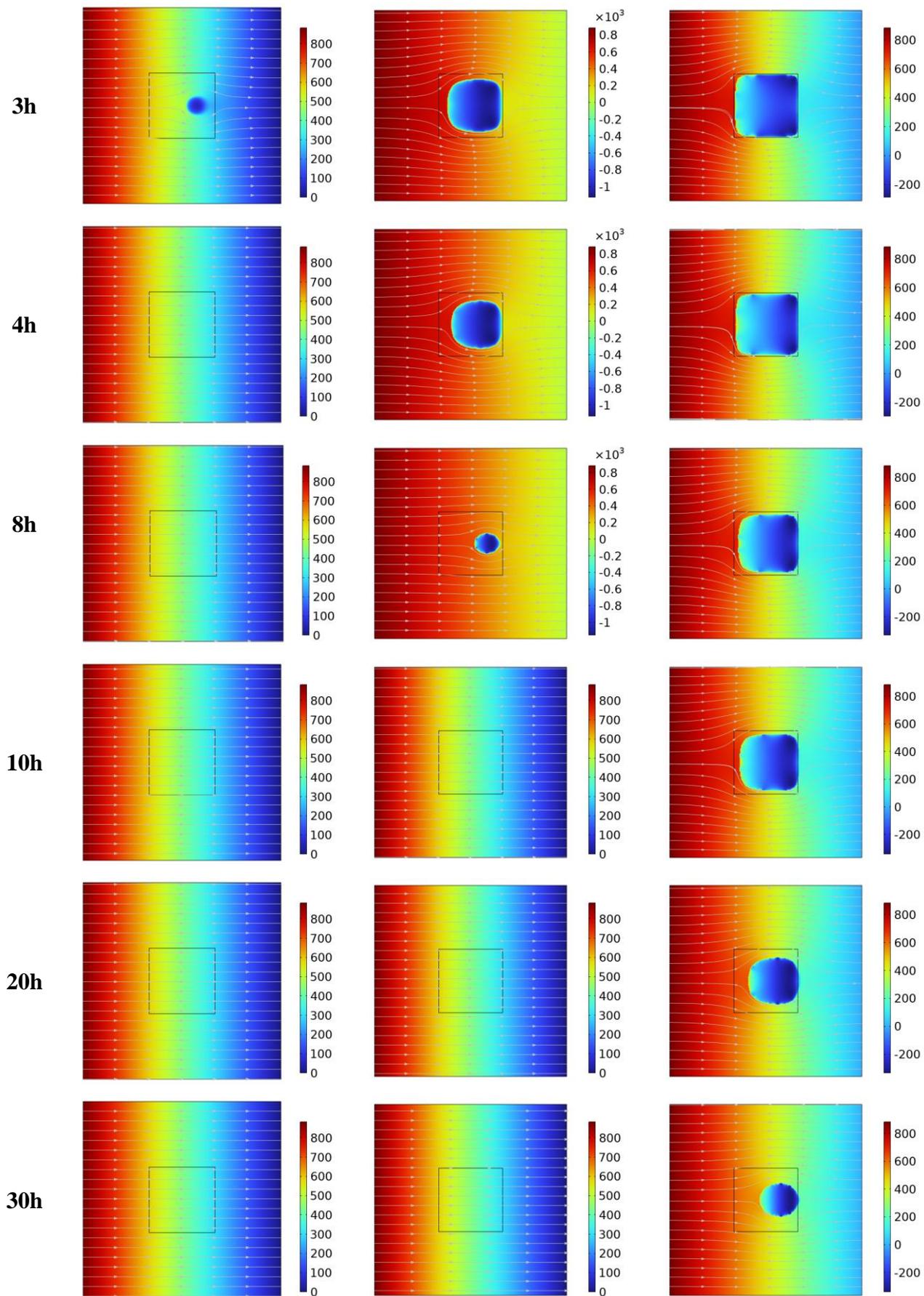
## 4.2 Résultats et discussions

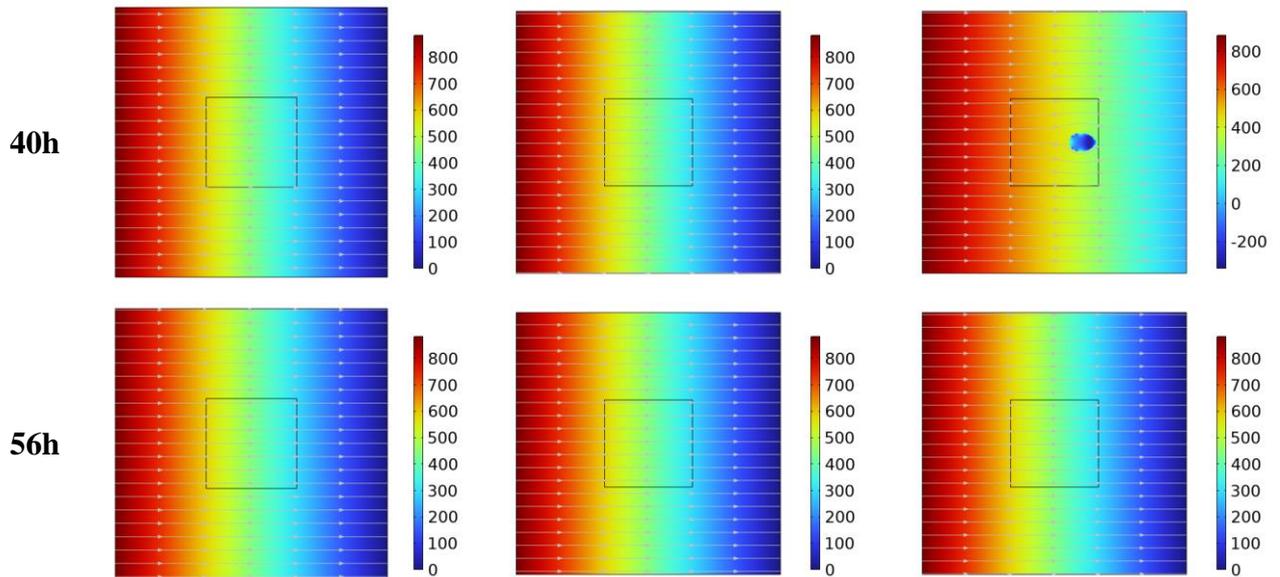
Dans cette étude, La distribution de la pression, la température et saturation en eau liquide dans la cavité se développe avec la fusion de glace en faisant varier le paramètre : la porosité.

### 4.2.1 La variation du temps de fusion de glace en fonction de la porosité

La figure 27 illustre la distribution de pression pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$ .





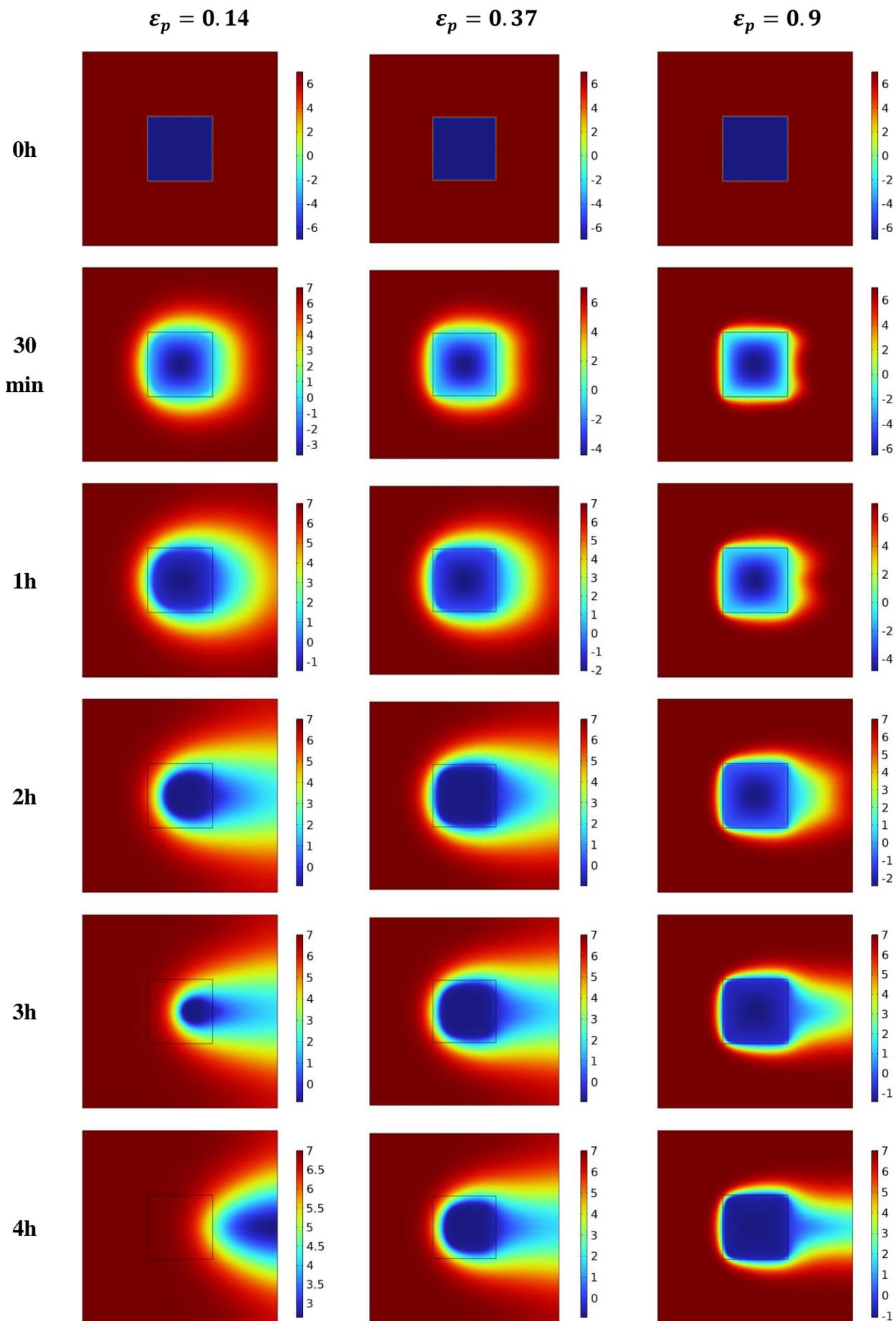


**Fig. 27 - La distribution de la pression en fonction de temps**

Pour  $\varepsilon_p = 0.14$ , on remarque le bloc de glace a commencé de se fondre après 30 min jusqu'à 4h la fusion totale, pour  $\varepsilon_p = 0.37$  la fusion de glace commencé à 1 h jusqu'à 10h la glace complètement fondu et pour  $\varepsilon_p = 0.9$  on remarque que à partir de 3 h la glace commencé à fondu jusqu'à 56 h la zone de glace a fondu complètement comme montre la figure 27. Le temps de fusion augmente en augmentant la porosité. Donc on a une influence de porosité sur la zone de glace. Lorsque la porosité élevée le bloc de glace prend plus de temps pour fondu.

La distribution de pression dans la cavité développe avec la fusion de la glace qui est illustrée dans la figure 27. Les lignes de courant sur la figure sont le champ de vitesse de Darcy, qui représente le chemin d'écoulement du fluide dans un milieu poreux. On peut voir que les changements de pression dans la cavité sont principalement concentrés sur la glace. Avec le début de la fusion de glace, la pression dans la zone de glace carrée a commencé à diminuer. Tout d'abord, il est passé d'une pression positive à une pression négative des quatre coins, puis complètement changé en pression négative dans la zone de glace. La glace a fondu d'un carré à un cercle et la zone de pression négative a aussi changé en un cercle. Ensuite, la zone de glace est devenue de plus en plus petite, et la valeur absolue de la pression négative progressivement augmentée jusqu'à la glace a complètement fondu et la pression dans la cavité reste constant. De plus, le changement des lignes de courant indique que le chemin d'écoulement de l'eau occupe progressivement la zone de fusion de glace.

La figure 28 illustre la distribution de température pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$ .



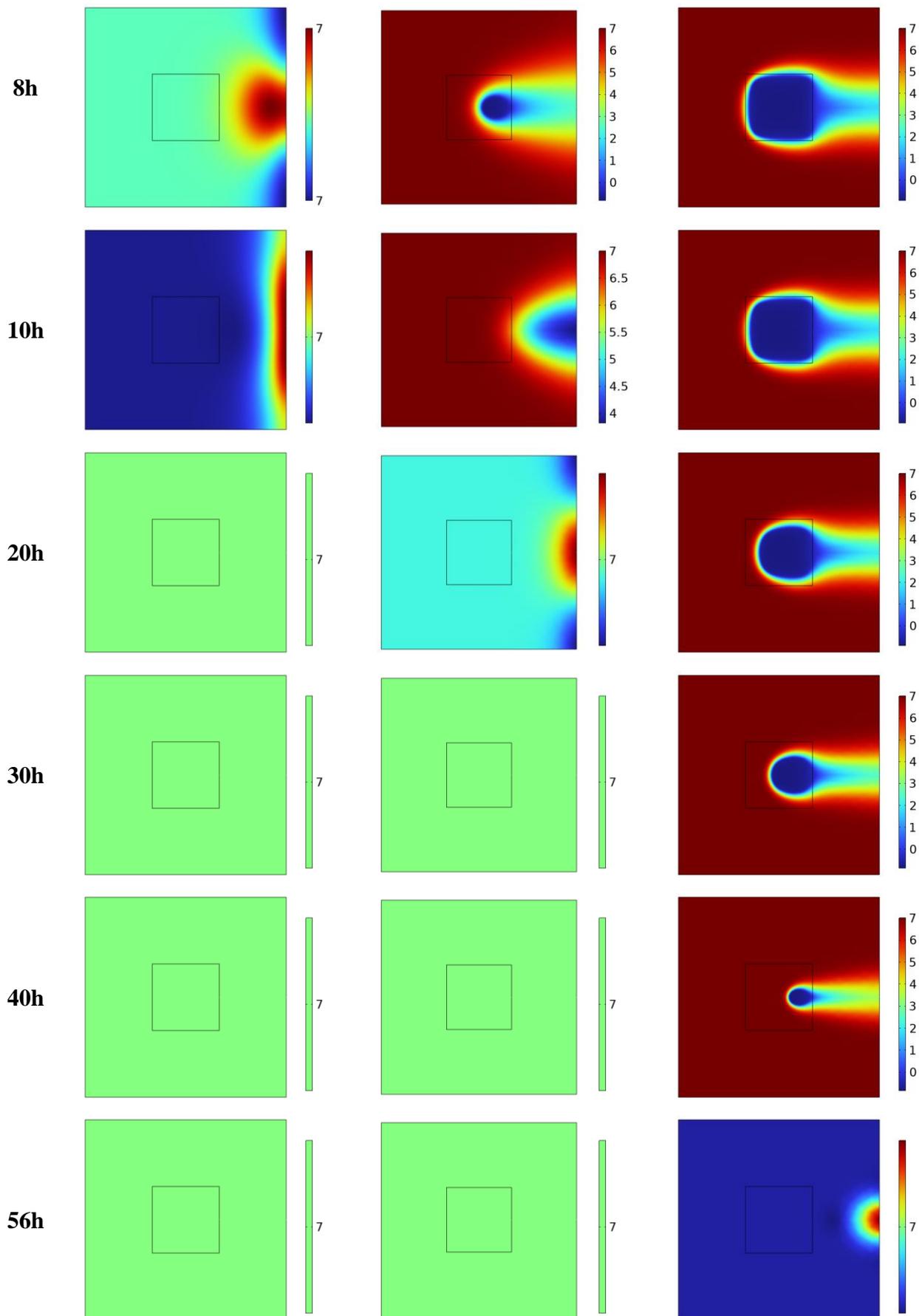
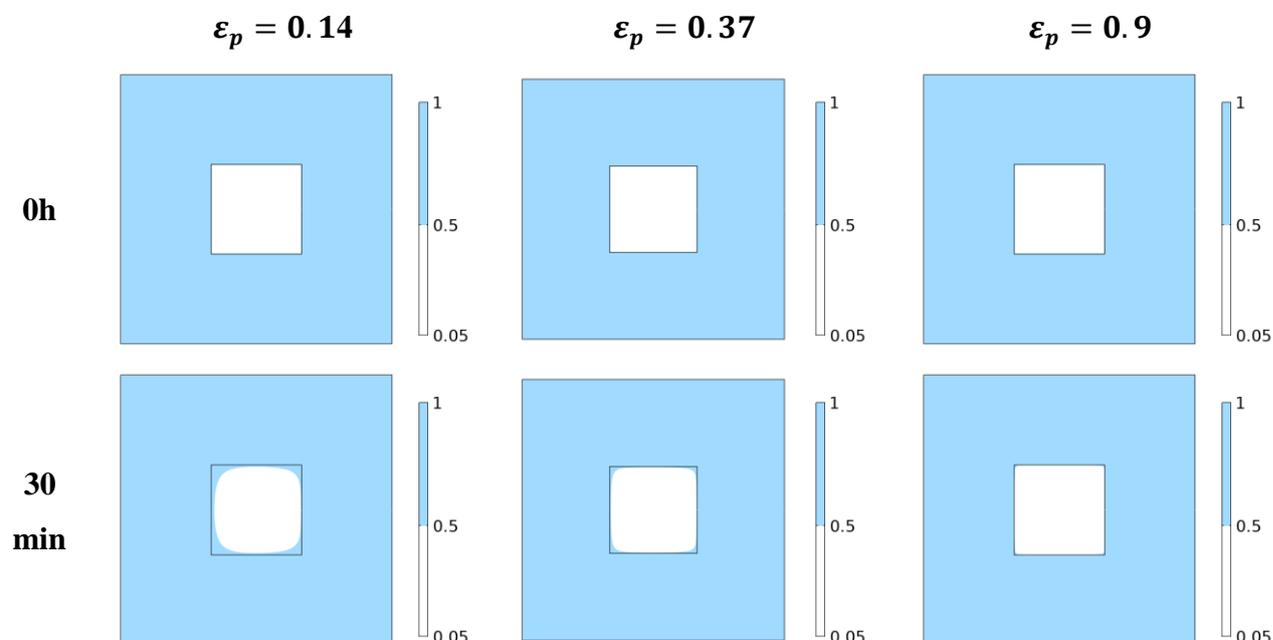


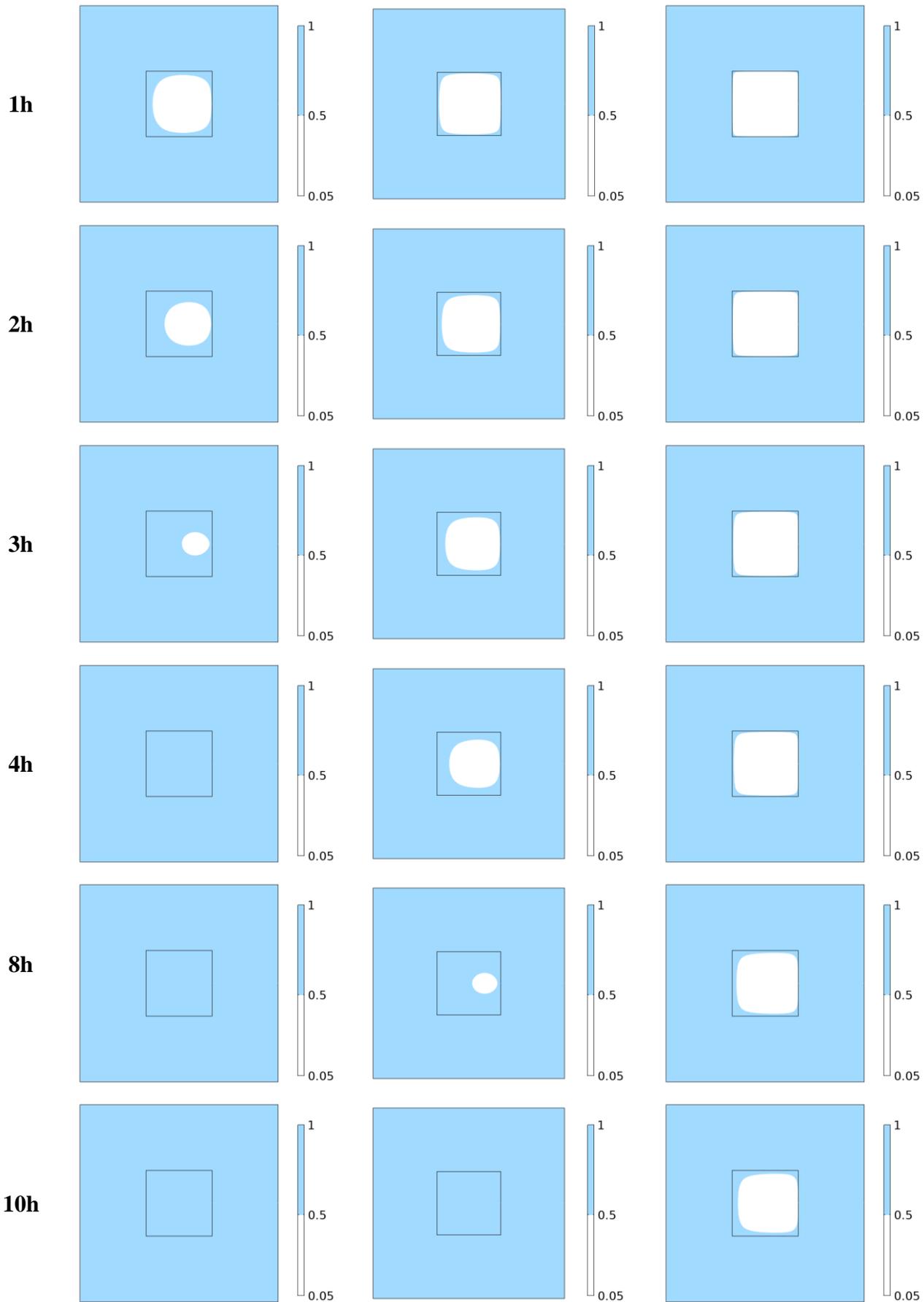
Fig. 28 - Tracé de surface montrant la distribution de la température en fonction de temps

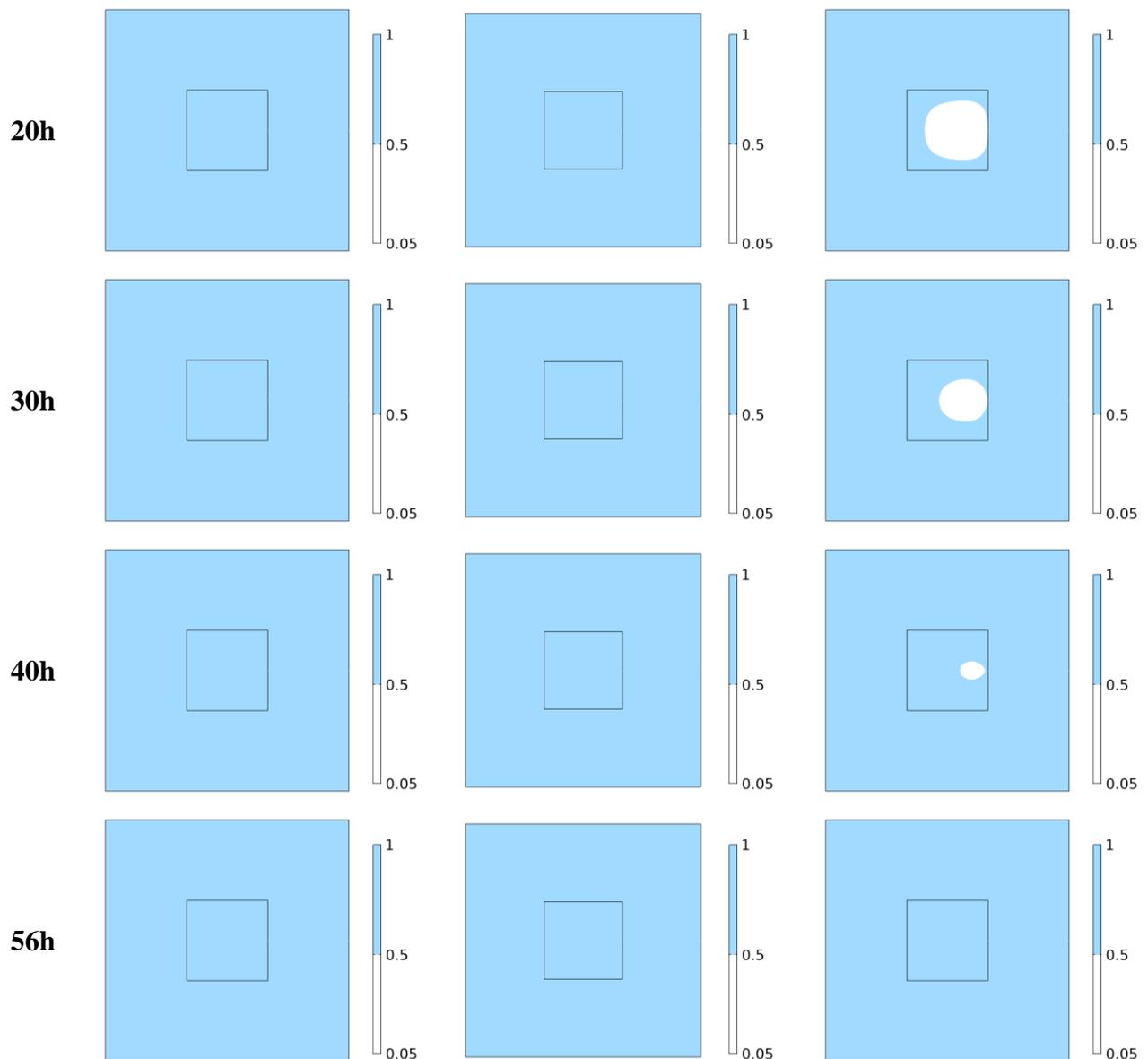
La distribution de la température pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$  dans la cavité se développe avec la fusion de la glace qui est illustré dans la figure 24. Une fois la glace fondue et réchauffée, la basse température diffusée puis déplacée vers la droite progressivement et en tant que le liquide s'écoulait. Enfin, la basse température s'est écoulée hors de la cavité et la température initiale  $7^\circ\text{C}$  a été restaurée dans la cavité. Évidemment, la partie en bleu où la température est inférieure de  $0^\circ\text{C}$  est de la glace ; à partir de 0h à 20h dans la figure 28, nous pouvons constater que la distribution de la glace dans le processus de fusion à partir de la figure 28 correspond à la figure 29 par rapport à la figure 30, les valeurs de température à 0h, 30min et 1h vérifient la montée rapide de la température minimale dans la première heure de la simulation. La fusion de la glace a causé l'eau environnante de la température pour refroidir. L'eau à basse température s'écoulait vers la droite avec la charge hydraulique qui changerait le flux de chaleur de la frontière de sortie. Le débit d'eau à basse température dans la figure 28 explique aussi la variation du flux de chaleur total dans la figure 32.

Dans la figure 28, il ya l'eau à basse température traversant la frontière de sortie entre 10h, 20h et 56h pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$  respectivement, ce qui est conforme à la plus grande valeur absolue du flux de chaleur dans la figure 32.

La figure 29 présente la distribution de la saturation d'eau liquide pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$ .





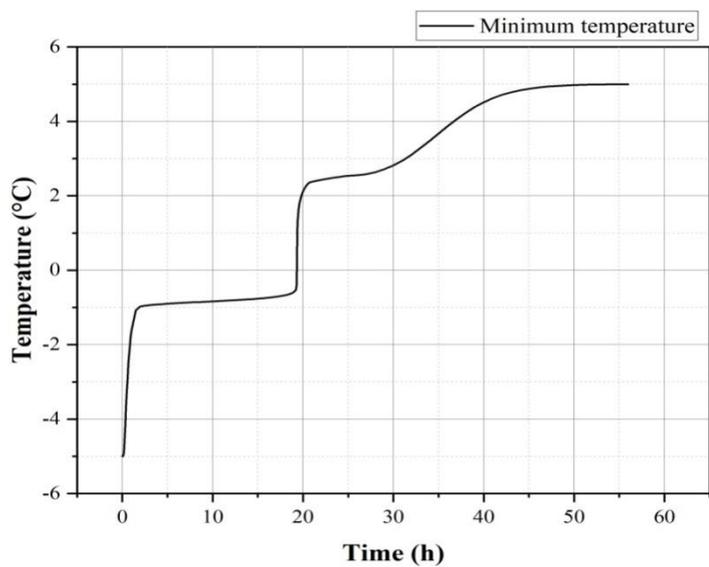


**Fig. 29 - Tracé de surface montrant la saturation en eau liquide en fonction de temps**

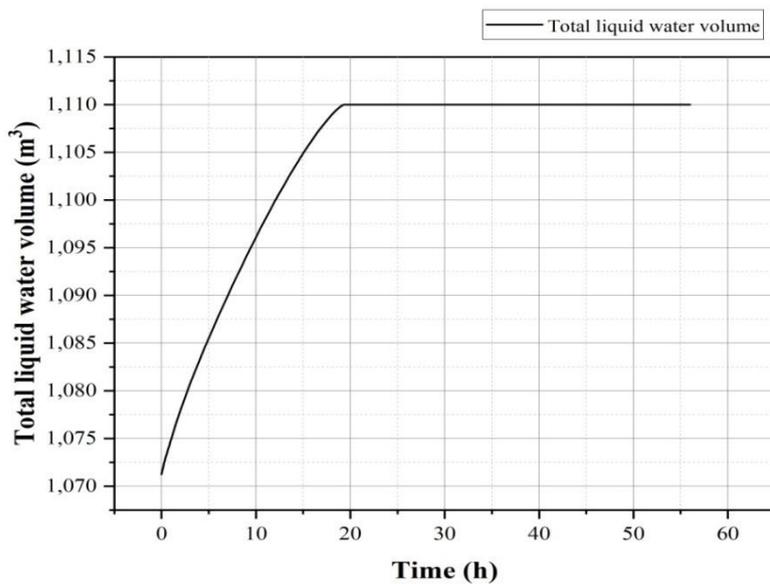
La variation de la distribution de l'eau liquide dans la cavité est illustrée à la figure 29 pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$  pour 0h, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 8h, 10h, 20h, 30h, 40h et 56h, respectivement. On peut voir que la glace commence à fondre des quatre coins du carré. Le côté gauche de la glace fait face à la direction d'écoulement du liquide et la vitesse de fusion des deux coins adjacents est supérieure à celui du côté droit. Pendant le processus de la fusion, la forme de la glace a changé de carré à cercle et la zone de la glace s'est progressivement diminué jusqu'à ce qu'elle fonde complètement.

On peut le voir sur la figure 29 pour  $\varepsilon_p = 0.14$ ,  $\varepsilon_p = 0.37$  et  $\varepsilon_p = 0.9$  à partir de 8h, 10h, 56h respectivement, la glace dans la cavité a complètement fondu, l'eau liquide était plein de la cavité et le volume total d'eau liquide est constant avec la courbe dans la figure 31.

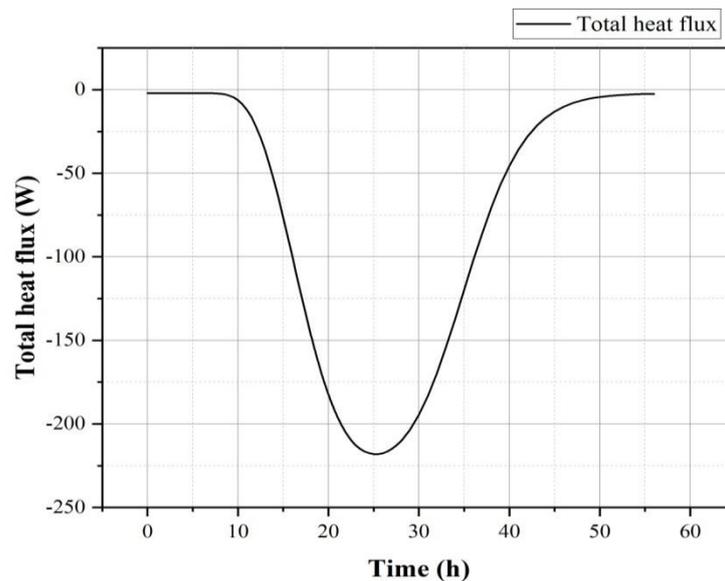
On constate que lorsque la porosité tanvers 0 le milieu est plein (solide plein) et lorsqu'est tanvers 1 le milieu est vide (volume complètement vide).



**Fig. 30 - La température minimale en fonction du temps**



**Fig. 31 - Volume total d'eau liquide en fonction du temps**



**Fig. 32 - Flux de chaleur total en fonction de temps**

Pour les 3 valeurs de porosité, on constate une faible variation sur la température minimale, le volume total d'eau liquide et le flux de chaleur dans le domaine.

La température minimale dans la cavité est illustrée dans la figure 30.

Au début de la simulation, la température de milieu poreux dans la cavité est de  $+7^{\circ}\text{C}$  et la température de la glace est à  $-7^{\circ}\text{C}$  ; à ce moment, la température minimale dans la cavité est la température de la glace  $-7^{\circ}\text{C}$ . Après 56 heures, la température minimale dans la cavité est revenue à un niveau initial de  $7^{\circ}\text{C}$ . La température est augmenté rapidement à  $-1^{\circ}\text{C}$  dans les deux premières heures après la fusion de glace. À partir de ce moment et jusqu'à environ 19,2h, la température minimale a augmenté à un rythme très lent. Dans l'étroit intervalle de 19,2h à 20h, la température minimale a augmenté rapidement et a dépassé le point de congélation. Alors, l'augmentation de la température minimale a connu trois étapes : lent, rapide et lent. La température minimale dans la cavité revient à la température initiale à 56h.

Le volume total d'eau liquide est illustré dans la figure 31.

Le volume total d'eau liquide a changé comme indiqué dans la figure 31. Après le début de la simulation, la glace dans le milieu poreux progressivement fondu, et le volume total d'eau liquide dans la cavité a commencé à augmenter. Vers 19,2h, le volume total d'eau liquide dans la cavité a augmenté à 1,11 et est resté constant, ce qui indique que la glace a complètement fondu.

Le flux de chaleur total est illustré dans la figure 32.

L'eau liquide s'écoule de gauche à droite dans la cavité, donc le côté droit du carré est la limite de sortie du système. Le flux de chaleur total via la limite de sortie est affiché comme la

figure 32. Comme la glace se trouve dans la moitié gauche de cavité, il y a une certaine distance par rapport à la limite droite d'écoulement ; le flux de chaleur de la frontière de sortie sur le côté droit de la cavité n'est pas compatible avec le changement de chaleur causé par la fusion de glace.

La relation correspondante entre le flux de chaleur et le changement de température est le changement de flux de chaleur à la limite de sortie est entraîné par la fusion de la glace, donc le flux de chaleur est négatif. La valeur absolue du flux de chaleur total à la sortie limite d'abord augmentée puis diminuée.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- ✓ La couche poreuse puisse provoquer un mouvement plus rapide de l'interface solide-liquide ;
- ✓ L'influence de la taille des pores est attribuée à deux aspects :

D'une part, la diminution de la taille des pores améliore la conduction thermique car il conduit à une plus grande surface d'interaction entre le MCP et le matériau de support ;

D'autre part, il entrave la convection naturelle du MCP fondu car des pores plus petits limiter le mouvement du MCP liquide. Les deux aspects s'affrontent et le résultat final est déterminé par le plus important.

- ✓ La diminution de la porosité améliore le transfert de chaleur par changement de phase car une petite porosité indique un grand volume à haute conductivité thermique dans les MCP, améliorant ainsi la capacité de conductivité thermique ;
- ✓ L'effet de la matrice poreuse est largement influencé par la porosité lorsqu'elle diminue ;
- ✓ La loi de Darcy dit que le débit de décharge  $Q$  est proportionnel au gradient de charge hydraulique et la conductivité thermique ;
- ✓ L'effet de la matrice poreuse est très perceptible sur le profil de vitesse ;
- ✓ l'effet de la taille des pores varie la petite taille des pores a amélioré les performances thermiques du MCP ;
- ✓ La diminution de la porosité de la matrice augmente la vitesse de fusion ;
- ✓ Lors du changement de phase, la conductivité thermique effective et la saturation de l'eau sont des fonctions de la température qui contrôlent le processus de transfert de la chaleur ;
- ✓ L'amélioration du transfert de chaleur est caractérisée en utilisant différents paramètres, tels que le taux de fusion/solidification, l'uniformité de la distribution de température, diminution de la température de base, etc.

### **4.3 Conclusion**

Ce chapitre présente les résultats numériques de l'influence de porosité sur fusion de glace dans un milieu poreux. Les résultats concernent des contours de pression, de température et de saturation en eau liquide.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le modèle étudié est le processus de fusion d'une inclusion de glace dans un milieu poreux et montre comment coupler la loi de Darcy et les interfaces de transfert de chaleur dans les milieux poreux, y compris le changement de phase. La simulation numérique révèle l'évolution interne du milieu poreux dans le processus de la fusion à partir de quatre aspects de l'eau, de la température, la chaleur et la pression. Les principales conclusions sont les suivantes :

- ✓ La variation de la distribution de l'eau liquide dans le processus de fusion de glace est simulée, correspondant à volume total d'eau liquide, et peut refléter la zone de glace non fondue ;
- ✓ La température minimale de l'eau passant à travers la frontière de sortie est compatible avec le flux total de chaleur ;
- ✓ Le changement de pression et le chemin d'écoulement de l'eau dans le milieu poreux sont simulés. On peut voir que la glace dans le milieu poreux génère une pression négative pendant le processus de fusion ;
- ✓ l'augmentation de la température minimale a connu trois étapes : lent, rapide et lent ;
- ✓ La configuration du support poreux « la porosité et la densité des pores » a un effet remarquable sur les caractéristiques de transfert de chaleur à changement de phase ;
- ✓ On constate également que la meilleure technique pour améliorer le stockage est d'utiliser une matrice solide à faible porosité ;
- ✓ Les mouvements convectifs précédant la fusion de la glace jouent un rôle très important sur la rapidité avec laquelle les phénomènes de changement de phase se produisent la relation entre la densité du fluide saturant la matrice poreuse et la température ;
- ✓ On constate que la porosité a un effet significatif sur le changement de phase solide - liquide ;
- ✓ Des précautions considérables doivent être prises en essayant d'améliorer le transfert de chaleur de fusion en utilisant des milieux poreux à faible porosité ;
- ✓ La chaleur latente de fusion est l'énergie nécessaire pour briser les liaisons hydrogène de la glace lors du changement de phase de l'eau qui fond ;
- ✓ On a constaté que la vitesse de fusion était augmentée par convection naturelle dans le liquide.

Comme suite à ce travail, il serait intéressant d'étendre cette étude au cas d'une anisotropie généralisée en termes de la conductivité thermique et de perméabilité du milieu poreux.

Il serait également utile d'analyser les écoulements induits dans des cavités poreuses allongées et ondulées soumises à des modes de convection d'origine thermique.

Bien que cette simulation numérique ait une référence valeur. En perspective, il est nécessaire d'effectuer plus d'observations et de recherches sur la fusion de glace dans un milieu poreux afin que le mécanisme de fonte réel de la glace puisse être clairement compris. Une approche potentielle est déployée des capteurs à grande échelle dans la glace pour surveiller la variation de la fusion de glace.

Il sera également nécessaire de compléter le présent de travail par l'étude de transfert de chaleur et de masse avec changement de phase dans des cavités contenant des couches poreuses anisotropes dans le cas 3D d'un écoulement de Darcy-Brinkman. Des études expérimentales complémentaires seront très intéressantes pour une validation approfondie de la modélisation proposée.

Enfin, il sera question d'implémentation du modèle dans un code de calcul en vue d'application aux problèmes pratiques.

## Bibliographie

- [1] Mejni, F., 2008. Structures synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, lille1 ;
- [2] Dullien, F.A.L., 1992. Porus Media, fluid and pore structure, Academic Press, 2<sup>nd</sup> Edition ;
- [3] Bennai, F., 2017. Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle ; Université Abderrahmane Mira – Bejaïa ;
- [4] Scheidegger, E., 1974. The physics of flow through porous media ,Academic Press, 3<sup>rd</sup> Edition ;
- [5] Nield, D.A., & Bejan, A., 1992. Convection in porous media, , Springer-Verlag ;
- [6] M, Kaviany, 1995. Principles of heat transfer in porous media, Springer-Verlag, 2<sup>nd</sup> Edition New York ;
- [7] <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/permeabilite-des-roches.xml>.  
Date de la dernière consultation du site : 04/04/2022 ;
- [8] Mouhous, O., 2016. Simulation numérique d'un écoulement diphasique eau-huile dans un milieu poreux. Mémoire de master, Université de Tizi-Ouzou ;
- [9] AMEUR, M., R.BRAHAM, R., 2015. Analyse numérique du transfert de chaleur par convection forcée d'un nanofluide dans un canal muni de blocs poreux en présence d'un flux oscillatoire. Mémoire de master, Université de Tizi-Ouzou ;
- [10] HANDBOOK OF POROUSE MEDIA, 2005. Second edition. Edited by Kambiz Vafai. By Taylor & Francis Group, LLC ;
- [11] Charles Garnier, 2014. Modélisation numérique des écoulements ouverts de convection naturelle au sein d'un canal vertical asymétriquement chauffé. Mécanique des fluides. Université Pierre et Marie Curie ;
- [12] Boukhalfa, O., 2012. Etude théorique et expérimentale d'un chauffe-eau solaire, Mémoire de Master en génie Mécanique, Université de Biskra ;
- [13] <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/materiau-poreux>. Date de la dernière consultation du site : 06/04/2022 ;
- [14] Reugem, W., 2007. The effective viscosity of a channel-type porous medium. Phys. Fluids 19(10), 103104 Brinkman, H.C, 1949. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. Flow Turbul. Combust. 1(1), 27 ;
- [15] Hwang, W.R., Advani, S.G., 2010. Numerical simulations of Stokes–Brinkman equations for permeability prediction of dual scale fibrous porous media. Phys. Fluids 22(11), 113101 ;
- [16] Varsakelis, C., Papalexandris, M.V., 2017. On the well-posedness of the Darcy-Brinkman-Forchheimer equations for coupled porous media-clear fluid flow,

- Nonlinearity 30 (4) 1449 ;
- [17] Rui, H., Pan, H., 2012. A block-centered finite difference method for the Darcy-Forchheimer Model, SIAM J. Numer. Anal. 50 (5) 2612–2631 ;
- [18] Salas, J.J., López, H., Molina, B., 2013. An analysis of a mixed finite element method for a Darcy-Forchheimer model, Math. Comput. Modelling 57(9-10) 2325-2338 ;
- [19] Ben Amara, S., 2005. Ecoulements et transferts thermiques en convection naturelle dans les milieux macro-poreux alimentaires – Application aux réfrigérateurs ménagers. Thèse de Doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignan, AgroParisTech ;
- [20] Ould-Amer Y., Slama, S., 2007. Convection naturelle dans un milieu poreux multicouche, 13èmes Journées Internationales de Thermique, 5 p., Albi, France ;
- [21] Rebhi, R., Alliche, M., Mamou, M., 2016. Etude numérique et analytique du transfert thermique par convection naturelle dans des couches poreuses, NRC Publications Archive, Archives des publications du CNRC ;
- [22] Bourich, M., Hasnaoui, M., Abd. Amahmid, 2007. Effet Sorte sur la convection hydromagnétique dans une couche poreuse horizontale, 13<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique, Albi, France ;
- [23] Helel, D., Boukadida, N., 2007. Transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux non saturé soumis à une convection forcée laminaire, 13<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique, Albi, France ;
- [24] Habbachi, F., Oueslati, F.S., Bennacer, R., Ganaoui, M., and Elcafsi, A., 2017 .Threedimensional simulation of natural convection in cubic cavity partially filled with porous media, Energy Procedia, Vol. 139, pp. 617 – 623 ;
- [25] Ouahlent, F., 2018. Etude de la convection thermique dans un milieu poreux (cavité partiellement poreuse). Mémoire de Master, Université de Batna 1-Algérie ;
- [26] Roget, F., 2012. Définition, modélisation et validation expérimentale d’une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. Thèse de doctorat, Université de Toulon ;
- [27] Mahfoudi, N., 2016. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide. Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider de Biskra ;
- [28] Hachana, R., 2020. Réalisation et expérimentation d’une enceinte de stockage de la chaleur dans le sable. Mémoire de Master, Université de Biskra ;
- [29] Furbo, S., 2015. Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems, Adv.Therm. Energy Storage Syst. 31-47 ;
- [30] Boudali Errebai, F., 2019. Utilisation des matériaux à changement de phase pour une meilleure efficacité énergétique dans le bâtiment. Thèse de doctorat, Université d’USTHB ;
- [31] Abhat, A., 1983. « Low temperature latent heat thermal energy storage : Heat storage materials », Sol. Energy, vol. 30, no. 4, pp. 313-332 ;
- [32] Khadiran, T., Hussein, M.Z., Zainal, Rusli, R., 2016. Advanced energy storage

- materials for building applications and their thermal performance characterization : A review, *Renew.Sustain. Energy Rev.* 916–928 ;
- [33] Prasad L., et Muthukumar, P., 2013. « Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application », *Solar Energy*, Vol.97, pp. 217-229 ;
- [34] Lalitha Priya, R., Subi, S., Vaishnu, B., and Vijaya Chandrakala, K. R.M., 2016. « Study on Characterization of River Sand as Heat Storage Medium », *Indian Journal of Science and Technology*, Vol.9(30) ;
- [35] Fernandez, A., Martinez, M., Segarra, M., al, 2010. « Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.94, pp.1723-1729 ;
- [36] Mahfoudi, N., Moumami, A., and El Ganaoui, M., 2014. « Sand as a Heat Storage Media for a Solar Application : Simulation Results » .*Applied Mechanics and Materials*, Vol.621, pp.214-220 ;
- [37] Mahfoudi, N., Khachkouch, A., Moumami, A., Benhaoua, B., El Ganaoui, M., 2015. « Design and characterization of a portable heat storage facility », *Mechanics and Industry*, Vol.16, pp.411 ;
- [38] Dhifaoui, B., Benjabrallah, S., Belghith, A., al, 2007. « Experimental study of the dynamic behavior of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat », *International Journal of Thermal Sciences*. Vol.46, pp.1056-1063 ;
- [39] Tammé, R., Laing, D., Steinmann, W., 2003. *Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough*. International Solar Energy Conference, pp. 563-571 ;
- [40] Bourouga, B., Fourcher, B., 1995. Comparaison des fonctions de transfert d'un stockage en régime périodique pour trois géométries fondamentales. Exemples d'optimisation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 8, pp. 1425-1439 ;
- [41] ARKAR, C., MEDVED, S., 2002. “ Enhanced Solar Assisted Building Ventillation System Using Sphere Encapsulated PCM Thermal Heat storage”, IEA, ECES IA Annex 17, *Advanced Thermal Energy Storage Techniques- Feasibility Studies and Demonstration Projects*, 2<sup>nd</sup> Workshop, 3-5 April, Ljubljana, Slovenia ;
- [42] Hamid El QARNIA, 2005. *Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau*. Marrakech MAROK ;
- [43] Foudhil, W., Dhifaoui, B., Ben Jabrallah, Sadok, Dutil, Y., et Rouse, Daniel R., 2013. « Simulation numérique du stockage thermique sensible et latent dans un canal poreux : performances et comparaison ». In *Xie Colloque interuniversitaire franco-québécois sur la thermique des systèmes : Reims, France, 3, 4 et 5 juin 2013 (Reims, France, 3-5 juin 2013)* p. 295-300. Reims, France : ÉPURE, Éditions et presses

universitaires de Reims ;

- [44] Aadn, M., Karkri, M., El Hammouti, M., 2014. Heat transfer characteristics of thermal energy storage of a composite phase change materials : Numerical and experimental investigations, *Energy* 72, 381-392 ;
- [45] KOULAL, N., 2011. Simulation numérique des échanges thermiques par convection forcée dans un canal plan, rempli d'un milieu poreux. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ;
- [46] YAN, Zhaoyu, PAN, Wei, FANG, Junjie and al, 2020. Numerical simulation of thawing process in frozen soil. *Geofluids*.

# **ANNEXES**

### A.1 Les caractéristiques de matériaux de stockage de chaleur sensible

Le tableau 12 présente les caractéristiques de stockage de matériaux de stockage de chaleur sensible envisagés ou déjà utilisés pour les centrales solaires à concentration.

**Tableau 12 - Caractéristiques de matériaux de stockage de chaleur sensible considérés pour les centrales CSP**

<b>Matériau</b>	<b>Température basse (°C)</b>	<b>Température haute (°C)</b>	<b>Masse volumique moyenne (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Capacité thermique massique (kJ/kg.K)</b>	<b>Densité de stockage (kWh/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Solides</b>					
Sable-roches-huile	200	300	1700	1,30	60
Béton renforcé	200	400	2200	0,85	100
NaCl (solide)	200	500	2160	0,85	150
Fonte	200	400	7200	0,56	160
Acier	200	700	7800	0,60	450
Brique réfractaire (silice)	200	700	1820	1,00	150
Brique réfractaire (magnésie)	200	1200	3000	1,15	600
<b>Liquides</b>					
Huile (minérale)	200	300	770	2,6	55
Huile (synthétique)	250	350	900	2,3	57
Huile (silicone)	300	400	900	2,1	52
Sels de nitrite	250	450	1825	1,5	152
Sels de nitrate	265	565	1870	1,6	250
Carbonates	450	850	2100	1,8	430
Sodium liquide	270	530	850	1,3	80

## A.2 Les caractéristiques de divers matériaux à changement de phase

Le tableau 13 présente les caractéristiques de divers matériaux à changement de phase utilisés ou envisagés pour le stockage d'énergie. La densité de stockage annoncée est théorique et calculée à partir des caractéristiques physiques disponibles sans tenir compte d'un rendement ou d'une éventuelle composante sensible. En particulier, la masse volumique n'est pas toujours connue à la température de changement de phase.

**Tableau 13 - Caractéristiques de matériaux à changement de phase solide-liquide utilisés ou envisagés pour le stockage d'énergie**

Matériau	Température		Masse volumique ( $kg/m^3$ )	Densité de stockage potentielle ( $kWh/m^3$ )
	de changement de phase solide-liquide (°C)	Chaleur latente massique ( $kJ/kg$ )		
Solution eutectique $H_2O$ -sel (HCl 24,8 % en masse)	-86	73,77 (kJ/mol)	-	-
Solution eutectique $H_2O$ -sel (NaCl 22,4% en masse)	-21,2	222	1165 (liquide) 1108 (solide)	68,33 (solide)
Triéthylène glycol ( $C_6H_{14}O_4$ )	-7	247	1200 (liquide)	82,33
Eau	0	333	998 (liquide)	92,32
n-Hexadecane ( $C_{16}H_{34}$ )	18	210	760 (liquide)	44,33
n-Octadecane ( $C_{18}H_{38}$ )	27,7	243,5	865 (liquide)	58,51
Erythritol	118	339,8	1300 (liquide à 140 °C)	122,71
68,3 % ( $KNO_3$ )- 31,7 % ( $LiNO_3$ )	135	136	1,78 (solide à 25°C)	67,24
$NaNO_3$	306	172	2260 (solide à 25°C)	107,98
	308	174	2260 (solide à 25°C)	109,23
	310	172	2260 (solide à 25°C)	107,98
$KNO_3$	N51 335	88	-	-
	N52 335	95	2110 (solide à 25°C)	55,68

	N53 336	116	2110 (solide à 25°C)	67,99
SolarSalt				
55,8 % (NaNO <sub>3</sub> )- 44,2 % (KNO <sub>3</sub> )	220	108,67	1800 (solide à 25°C)	54,34
NaOH	318	165	2100 (solide à 25°C)	96,25
	320	159	1785 (solide à 25°C)	78,83
Zn (> 99,9 % pur)	419	112	7140 (solide à 25°C)	222
NaCl	802	520	2160 (solide à 25°C)	312

## Résumé

Ce présent travail est consacré à l'étude numérique du processus de fusion de la glace présente dans une cavité carrée occupée par un milieu poreux à convection naturelle. Une modélisation mathématique a été élaborée en couplant la loi de Darcy avec les interfaces de transfert de chaleur dans les milieux poreux dans la région de fusion. L'effet de la porosité a été testé. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'une matrice poreuse avec faible porosité favorise le transfert de chaleur.

**Mots clés :** Stockage de chaleur, milieu poreux, Transfert de chaleur, loi de Darcy.

## Abstract

This present work is devoted to the numerical study of the melting process of the ice present in a square cavity occupied by a porous medium with natural convection. A mathematical modeling has been developed by coupling Darcy's law with the heat transfer interfaces in porous media in the melting region. The effect of porosity was tested. The results obtained show that the use of a porous matrix with low porosity promotes heat transfer.

**Keywords :** Heat storage, porous medium, heat transfer, Darcy's law.

## ملخص

هذا العمل الحالي مخصص للدراسة العددية لعملية ذوبان الجليد الموجود في تجويف مربع يشغله وسط مسامي مع الحمل الحراري الطبيعي. تم تطوير نمذجة رياضية من خلال اقتران قانون دارسي بواجهات نقل الحرارة في الوسائط المسامية في منطقة الانصهار. تم اختبار تأثير المسامية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن استخدام مصفوفة مسامية ذات مسامية منخفضة يعزز نقل الحرارة.

**الكلمات المفتاحية :** تخزين الحرارة، الوسط المسامي، انتقال الحرارة، قانون دارسي.