



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département :** Maintenance en Electromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Electromécanique

**Spécialité :** Maintenance en électromécanique industrielle

### Thème

# Étude d'un élément de stockage de l'énergie thermique

Présenté et soutenu publiquement par :

KOUMAD Ahmed

et

CHIAD Faouzi

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
M. ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI-Université d'Oran 2	Président
M. DARRAMDANE Mohamed Zouhir	MCB	IMSI-Université d'Oran 2	Encadreur
M. ACHACHE Habib	MCA	IMSI-Université d'Oran 2	Examineur

Année 2020/2021

# *Remerciement*

*Ce travail, est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices.*

*Je remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce m'a permis d'arriver au bout de mes efforts en me donnant la santé, la force, le courage et en me faisant entourer des merveilleuses personnes dont je tiens à remercier.*

*Je tiens à adresser mes remerciements à ma famille qui m'ont toujours soutenus et poussés à continuer et d'aller devant jusqu'au bout.*

*Nous remercions Monsieur DARRAMDANE Mohamed Zouhir, notre enseignant et encadreur. Son soutien, ses compétences, et sa clairvoyance ont été d'une aide inestimable. On le remercie surtout pour son attention, ses conseils, sa patience, sa disponibilité et tout le temps qu'il nous a consacré afin d'accomplir notre travail.*

*Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire. Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.*

*Merci à tous ceux qui de près ou de loin a contribué à l'accomplissement de ce travail.*

# Dédicace

## ***A mes parents, ma source du pouvoir***

*Je ne trouverai pas les mots pour exprimer l'immense respect que je vous porte, ni la profonde reconnaissance que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être.*

*J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.*

*Que le tout puissant ALLAH vous garde et vous procure santé, bonheur, amour et longue vie.*

## ***A mes chères anges sœurs et mon frère Youssef***

*Je veux partager avec vous cette fierté, je vous remercie éternellement pour votre soutien, et je vous souhaite que la réussite, l'amour, la santé, la tendresse et que dieu vous protège.*

## ***A la mémoire de mes grands-pères et ma grande mère H.AMELLAL***

### ***A ma chère famille d'or KOUMAD***

*Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et mon amour infini.*

### ***A ma grande mère K.TEBBOUN***

*Que dieu te bénisse.*

### ***A mes chères tantes***

*Fatima, Fatiha, Radia, Rachida et toutes leurs familles.*

### ***A mon partenaire d'affaire Faouzi et toute la famille CHIAD.***

*Je voudrais témoigner ici ma gratitude à tous mes professeurs, en particulier mon enseignante en primaire madame HADJ ALI Fatima.*

*A mes amis que j'adore : Youcef, Tahar, Oussama, Sid Ahmed, At-tahir, Ayoub, Hadj, Aymen, Salah, Yassine, Nadir, Abdelmouhssine, Ismail, Ammar, Hicham, Abidin, Hamada, Wail, Mahdi, Khalid, Idir, Takfarinas, Hadji, Mohamed, Islam, Hamza, Yasser, Toufik et Amine.*

**Ahmed KOUMAD**



# *Dédicace*

## ***A mes parents, ma source du pouvoir***

*Je ne trouverai pas les mots pour exprimer l'immense respect que je vous porte, ni la profonde reconnaissance que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être.*

*J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.*

*Que le tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur, amour et longue vie.*

## ***A mes chères anges sœurs Lyna, Faiza et Mouna***

*Je veux partager avec vous cette fierté, je vous remercie éternellement pour votre soutien, et je vous souhaite que la réussite, l'amour, la santé, la tendresse et que dieu vous protège.*

## ***A la mémoire de mon grand père***

### ***A ma chère famille d'or***

*Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et mon amour infini.*

### ***A mes deux grands mère***

*A mon cousin Ali qui était toujours auprès de moi dans les bons et les mauvais moments de ma vie, à sa femme Karima et ses quatre petits anges Ziad, Islem, Badis et Aksil.*

### ***A mes chères cousines***

*Zahia, Fadila, Fazia, Ourida, Djamila, Lylia, Dyla et Naima*

*A mes deux oncles Hamid, Omar et leurs femmes, ainsi mes chères tantes Fahima, Saida,*

*Djamila et son époux Saïd.*

*A mon binôme Ahmed à qui je souhaite encore plus de réussites*

*A mes amis que j'adore : Massinissa, Moussa, Saïd, Faicel, Ahmed, Hamza, Youcef,*

*Ayoub, At-tahir, Adel, Younes, Nadir, Wahib, Azzedine et Riad.*

**Faouzi CHIAD**



## الملخص

يركز العمل الحالي على محاكاة رقمية للسلوك الحراري والديناميكي لنظام تخزين الطاقة الحرارية الحساسة اليومية في التركيب الديناميكي الحراري الشمسي. في هذا النموذج الثنائي الأبعاد، يتم حل معادلات التوصيل المتعلقة بالزمن باستخدام طريقة الفروق المحدودة مع الاعتماد على المخطط الضمني.

في هذه المذكرة، تم دراسة تأثير المسافة بين الأنابيب وسرعة المائع الناقل للحرارة على توزيع درجات الحرارة وكمية الحرارة المخزنة في مختلف الأوساط الصلبة التي شملتها الدراسة. لقد تم اختيار سرعة المائع والمقدرة ب  $0.06\text{ م/ثا}$  والمسافة بين الأنابيب والتي حددت ب  $50\text{ سم}$ .

وتشير نتائج الحسابات بالمقارنة مع المواد الأخرى المدروسة، أن الخرسانة من بين أجود أنواع مواد التخزين الصلب من حيث الطاقة الحرارية المخزنة وكذلك إمكانية وجود تطبيقات بسيطة وسهلة لتنفيذها على النطاق الصناعي مقارنة بالتكوينات الأخرى.

**الكلمات المفتاحية:** تخزين الطاقة الحرارية، محاكاة رقمية فورتران، الطاقة الحرارية الحساسة، طريقة الفروق المحدودة.

## Résumé

Le travail en cours, porte sur la simulation numérique du comportement thermique et dynamique du système de stockage journalier d'énergie thermique sensible dans un dispositif thermodynamique solaire. Dans ce modèle bidimensionnelle, la résolution des équations instationnaire de la conduction se fait à l'aide de la méthode des différences finies avec le schéma implicite.

Dans cette étude l'influence de la distance entre les tubes et la vitesse du fluide caloporteur sur la distribution de la température et la quantité de chaleur transférée dans différents matériaux de stockage ont été présentée. Une vitesse du fluide caloporteur de  $0.06\text{ m/s}$  et une distance de  $50\text{ cm}$  entre les tubes ont été choisis.

Les résultats des calculs montrent que, par rapport à d'autres configurations, le béton présente de bonnes performances en termes de capacité d'échange thermique et de possibilité d'applications simples et faciles à mettre en œuvre à l'échelle industrielle.

**Mots clés :** Stockage de l'énergie thermique, Simulation numérique FORTRAN, Chaleur sensible, Méthode des différences finies.

## **Abstract**

This work focuses on the numerical simulation of the thermal and dynamic behavior of the daily thermal energy storage system in a solar thermodynamic device. In this two-dimensional model, the resolution of the unsteady equations of conduction is done using finite difference method with an implicit scheme.

In this study the influence of distance between the tubes and the velocity of the heat transfer fluid on the temperature distribution and the amount of heat transferred to the solid storage materials are performed. Fluid velocity and distance between tubes are selected to be 0.06m/s and 50cm respectively.

Compared to other configurations, concrete has shown a good performance in terms of heat capacity and it may be used in easy ways and widely in industrial scale.

**Keywords:** Thermal Energy Storage, Numerical simulation with FORTRAN, Sensible Heat, finite difference method.

## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I.....</b>	<b>2</b>
I.1    Introduction.....	2
I.2    Les travaux réalisés sur le stockage sensible .....	2
I.2.1  Dans les lits fixes entassés (packed-bed) .....	2
I.2.2  Autres travaux réalisés sur le stockage sensible.....	5
I.3    Conclusion .....	7
<b>Chapitre II.....</b>	<b>8</b>
II.1   Introduction.....	8
II.2   Stockage de l'énergie thermique.....	8
II.2.1   Types de stockage de l'énergie thermique .....	10
II.2.1.1  Stockage thermique par chaleur Latente.....	10
II.2.1.2  Stockage thermochimique.....	11
II.2.1.3  Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible.....	11
II.2.2   Matériaux.....	13
II.2.2.1  Matériaux liquides .....	13
II.2.2.1.1  L'Eau.....	14
II.2.2.1.2  Les huiles organiques .....	14
II.2.2.1.3  Les sels fondus .....	15
II.2.2.2  Matériaux solides .....	15
II.3   Le stockage thermique dans l'énergie solaire.....	17
II.3.1   Les types d'exploitations de l'énergie solaire thermique .....	17
II.3.1.1  L'énergie solaire thermique à basse température.....	17
II.3.1.1.1  La technologie solaire « active ».....	17
II.3.1.1.2  La technologie solaire « passive ».....	18
II.3.1.2  L'énergie solaire thermique à haute température (Le solaire thermodynamique).....	18
II.3.2   Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .....	19

---

II.4	Conclusion .....	20
<b>Chapitre III.....</b>		<b>21</b>
III.1	Introduction.....	21
III.2	Rappels sur les éléments d'échanges thermiques .....	21
III.2.1	L'équation générale de la conduction.....	21
III.2.2	Modes de transfert de chaleur.....	22
III.2.2.1	Transfert de chaleur par conduction.....	23
III.2.2.2	Transfert de chaleur par convection.....	24
III.2.2.2.1	La convection naturelle ou libre.....	25
III.2.2.2.2	La convection forcée .....	25
III.2.2.2.3	Régimes d'écoulement : .....	26
III.2.2.2.3.1	Régime Laminaire.....	26
III.2.2.2.3.2	Régime turbulent.....	26
III.2.2.3	Transfert de chaleur par Rayonnement .....	26
III.3	Les méthodes numériques en régime instationnaire bidimensionnel .....	27
III.3.1	Résolution de système avec la méthode des différences finies .....	27
III.3.1.1	Schéma explicite .....	27
III.3.1.2	Schéma implicite .....	27
III.3.1.2.1	Pour un nœud interne .....	28
III.3.1.2.2	Pour un nœud frontière.....	29
III.3.1.2.2.1	Avec convection .....	29
III.3.1.2.2.2	Adiabatique .....	30
III.3.1.2.3	Pour un nœud en coin extérieur.....	30
III.3.1.2.3.1	Convection-adiabatique .....	30
III.3.1.2.3.2	Adiabatique-symétrique.....	31
III.4	Programme de calcul de la quantité de chaleur stockée .....	32
III.4.1	Simulation numérique avec le Fortran 90 et l'algorithme de calcul.....	32
III.5	Modélisation du système étudié.....	37
III.5.1	Description de la configuration étudiée.....	37
III.5.1.1	Domaine de calcul.....	39
III.6	Conclusion .....	40



---

---

<b>Chapitre IV .....</b>	<b>41</b>
IV.1 Validation de calcul .....	41
IV.1.1 Le choix du pas d'espace .....	41
IV.1.2 Le choix du pas de temps .....	42
IV.2 L'influence de la vitesse sur la distribution de température .....	42
IV.3 La distance entre les tubes .....	43
IV.4 Stockage dans différents matériaux solides .....	44
IV.4.1 Stockage dans le béton .....	44
IV.4.2 Stockage dans le sable .....	45
IV.4.3 Stockage dans la roche .....	46
IV.4.4 Stockage dans la céramique .....	47
IV.5 La quantité de chaleur stockée dans les différents matériaux .....	48
IV.6 Conclusion .....	48
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>50</b>

---

## Nomenclature

Q	Quantité de chaleur	J
$\dot{q}$	La puissance volumétrique	$\text{w.m}^{-3}$
È	La puissance	w
S	l'aire de la surface	$\text{m}^2$
m	La masse	kg
$C_p$	capacité thermique massique	$\text{J.kg}^{-1}. \text{k}^{-1}$
T	température du solide/fluide	°C
h	le coefficient de convection	$\text{W.m}^{-2}. \text{C}^{-1}$
v	La vitesse moyenne du fluide	$\text{m.s}^{-1}$
D	diamètre	m
L	distance	m
g	accélération de la pesanteur	$\text{m.s}^{-2}$
A	surface	$\text{m}^2$
n	nombre	–
x	variable d'espace	m
t	temps	s

### Symboles grecs

$\alpha$	Diffusivité thermique du fluide	$\text{m}^2.\text{s}$
$\rho$	masse volumique	$\text{kg.m}^{-3}$
$\lambda$	conductivité thermique	$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
$\phi$	Flux de chaleur	W
$\varphi$	La densité de flux	$\text{W.m}^{-2}$
$\sigma$	Constante de S-B	$5.669.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
$\varepsilon$	Émissivité de la surface (<1)	–
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	pa.s
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$\beta$	le coefficient de dilatation thermique	$\text{K}^{-1}$

---

---

## Nombres sans dimension

Gr	nombre de Grashof	—
Re	nombre de Reynolds	—
Pr	nombre de Prandtl	—
Nu	nombre de Nusselt	—
Pe	nombre de Péclet	—
F <sub>0</sub>	nombre de Fourier	—
B <sub>i</sub>	nombre de Biot	—

## Indices

i	indice d'un point de maillage suivant x
j	indice d'un point de maillage suivant y
s	solide
∞, f	fluide
stk	stockage
réf	référence
t	Temps au condition initiale
i	inlet (entrée)
e	exit (sortie)

## Liste d'abréviations

MCP	matériaux à changement de phase
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage
CAES	Stockage d'énergie par air comprimé
TES	Stockage d'énergie thermique

## Opérateurs mathématiques

$\Delta$	variation
$\partial$	<i>dérivée partielle</i>
$\frac{d}{dt}$	La dérivée par rapport au temps
$\frac{d}{dx}$	La dérivée par rapport à l'espace
$\frac{\partial}{\partial x}$	La dérivée partielle par rapport à l'espace
$\frac{\partial}{\partial t}$	La dérivée partielle par rapport au temps

---

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I-1</b> : Schéma d'un système de stockage à lit entassé [4].....	3
--	---

### Chapitre II

<b>Figure II-1</b> : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique. ....	9
<b>Figure II-2</b> : Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge [46]. ....	10
<b>Figure II-3</b> : Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide) [46]. ....	11
<b>Figure II-4</b> : Figure Principe du stockage sensible dans une centrale thermodynamique [58]. ....	13
<b>Figure II-5</b> : Stockage avec gravier et sable [65]. ....	16
<b>Figure II-6</b> : Stockage avec garnissage [65]. ....	16
<b>Figure II-7</b> : Chauffe-eau solaire. [58] .....	17
<b>Figure II-8</b> : centrale thermodynamique parabolique [69].....	18
<b>Figure II-9</b> : centrale thermodynamique à tour [71]. ....	19
<b>Figure II-10</b> : centrale thermodynamique cylindro-parabolique [72]. ....	19

### Chapitre III

<b>Figure III-1</b> : volume de contrôle différentiel, $dx dy dz$ , pour l'analyse de conduction en coordonnées cartésiennes [73]. ....	22
<b>Figure III-2</b> : les modes de transfert de chaleur [77]. ....	23
<b>Figure III-3</b> : Schéma du transfert de chaleur conductif [75]. ....	23
<b>Figure III-4</b> : Schéma du transfert de chaleur convectif [75]. ....	24
<b>Figure III-5</b> : volume de contrôle pour le débit interne dans un tube [73]. ....	24
<b>Figure III-6</b> : Les deux différents modes d'écoulements rencontrés. (a) laminaire. (b) turbulent [78]. ....	26
<b>Figure III-7</b> : Bilan thermique d'un nœud interne. ....	28
<b>Figure III-8</b> : Bilan thermique d'un nœud frontière avec convection. ....	29
<b>Figure III-9</b> : Bilan thermique d'un nœud frontière adiabatique. ....	30
<b>Figure III-10</b> : Bilan thermique d'un nœud en coin extérieur convection-adiabatique. ....	30
<b>Figure III-11</b> : Bilan thermique d'un nœud en coin extérieur adiabatique-symétrique. ....	31
<b>Figure III-12</b> : Schéma d'installation d'une centrale thermodynamique à tour, avec un système de stockage [83]. ....	37
<b>Figure III-13</b> : Module de stockage en béton et banque de tubes avant et après l'isolation [84]. ....	38
<b>Figure III-14</b> : Dimensionnement du module de stockage [79]. ....	38

<b>Figure III-15</b> : L'emplacement des nœuds dans le domaine de calcul. ....	39
--	----

## Chapitre IV

<b>Figure IV-1</b> : Distribution de la température pour différentes valeurs de pas d'espace $\Delta x$ . .....	41
<b>Figure IV-2</b> : La distribution de la température selon différentes valeurs de pas de temps $\Delta t$ . .....	42
<b>Figure IV-3</b> : l'influence de la vitesse du fluide caloporteur sur la distribution de température. ....	43
<b>Figure IV-4</b> : la quantité de chaleur stockée pendant une journée pour différentes distances entre les tubes. ....	44
<b>Figure IV-5</b> : la variation de distribution de la température dans le béton pendant plusieurs durées. ....	45
<b>Figure IV-6</b> : la variation de distribution de la température dans le sable pendant plusieurs durées. ....	45
<b>Figure IV-7</b> : la variation de distribution de la température dans la roche pendant plusieurs durées. ....	46
<b>Figure IV-8</b> : la variation de distribution de la température dans la céramique pendant plusieurs durées. ....	47
<b>Figure IV-9</b> : la quantité de chaleur stockée en fonction du temps dans les quatre matériaux. ....	48

---

## Liste des tableaux

### Chapitre II

<b>Tableau II-1</b> : les avantages et les inconvénients de l'eau comme matériau de stockage sensible [37].....	14
<b>Tableau II-2</b> : les avantages et les inconvénients des huiles organiques comme matériaux de stockage [37].....	15
<b>Tableau II-3</b> : Classification des sels fondus en fonction de la température nécessaire pour une application spécifique [37].....	15
<b>Tableau II-4</b> : Propriétés thermo physiques des solides pour le stockage [64].....	16
<b>Tableau II-5</b> : les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire [67].	20

### Chapitre III

<b>Tableau III-1</b> : propriétés de quelques matériaux de stockage sensible [85].....	40
<b>Tableau III-2</b> : propriétés du fluide caloporteur (l'huile).....	40

## Introduction générale

Face au nucléaire, au pétrole, au gaz et au charbon, les énergies renouvelables apportent des réponses durables quant aux préoccupations relatives à la sécurité, la santé, l'environnement et l'économie. Sources inépuisables, faibles émettrices de gaz à effet de serre et abordables, les énergies renouvelables représentent assurément l'avenir.

Le stockage thermique représente une solution prometteuse pour des applications liées à l'énergie solaire. Un système de stockage thermique peut être classifié selon différents critères : le type de stockage, la durée de stockage et la température de stockage. Trois types de stockage existent, le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage thermochimique. Dans ce travail on s'intéresse au stockage d'énergie thermique par chaleur sensible dans un milieu solide. Ce mémoire est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré sur la revue bibliographique et l'ensemble des recherches théoriques, expérimentaux et numériques qui ont été faite dans le domaine de stockage thermique par chaleur sensible.

Le second chapitre traite les diverses technologies de stockage de l'énergie thermique et puis l'application dans le stockage thermique de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre décrit le modèle de calcul en introduisant les éléments d'échanges thermiques et en formulant implicitement des équations par la méthode des différences finies. Nous avons ensuite réalisé l'algorithme de calcul et le cas de notre étude.

Le quatrième chapitre est dédié à la discussion des résultats obtenus.

Dans notre travail, le langage de programmation Fortran90 est utilisé pour simuler numériquement le stockage de l'énergie thermique sensible dans le milieu solide avec la méthode des différences finies.

## **I.1 Introduction**

Les systèmes de stockage présentent beaucoup d'intérêt pour gérer efficacement la source d'énergie primaire (solaire, électrique, ou autre).

Il est bien sûr possible de stocker de l'énergie par la simple augmentation de température d'un matériau. L'énergie est alors accumulée sous forme de chaleur sensible. Toutefois, afin de parvenir à stocker une quantité appréciable d'énergie, cette méthode doit faire intervenir des températures élevées. Ceci provient du fait que les chaleurs spécifiques de la plupart des matériaux sont relativement faibles.

Une autre façon de stockage de l'énergie calorifique consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant grâce à leur solidification [1].

Durant ces dernières années, la demande en énergie ne cesse d'augmenter, les chercheurs trouvent que le stockage d'énergie sous forme de chaleur est l'une des solutions incontournables [2].

Le stockage thermique a fait l'objet de différentes applications, à citer le chauffage solaire, l'air conditionné, les systèmes hybrides (solaire/électrique), le chauffage passif (mur massif), l'eau chaude sanitaire, ... [3].

Dans ce qui suit, nous présentons certains des travaux théoriques, expérimentaux et numériques publiés dans ce contexte.

## **I.2 Les travaux réalisés sur le stockage sensible**

### **I.2.1 Dans les lits fixes entassés (packed-bed)**

La technique des lits entassés consiste en un amas de matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut circuler. Ce dernier traverse le lit de haut en bas assurant ainsi le transfert de chaleur au matériau pendant la période de chargement. Durant la période de décharge, le sens de l'écoulement du fluide caloporteur est inversé. En général cette technique est utilisée avec un capteur solaire à air (figure I-1). Dans certaines configurations des conduites sont utilisées pour assurer le transport du fluide caloporteur.



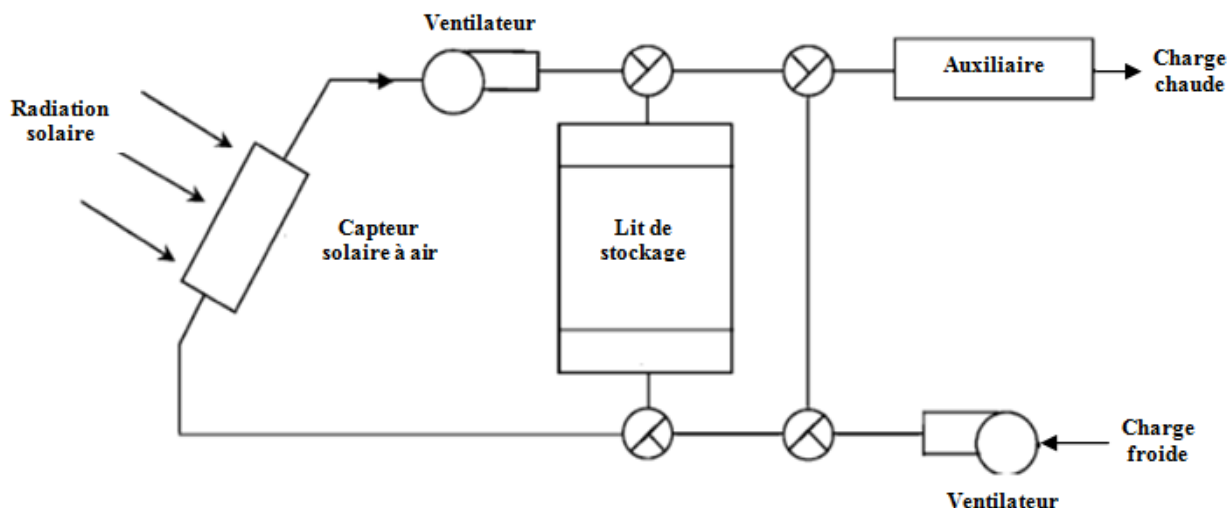


Figure I-1 : Schéma d'un système de stockage à lit entassé [4].

Les matériaux utilisés dans ce type de stockage sont généralement des matériaux granulaires tels que : les pierres, les roches, les sables...etc.

La technologie des lits fixes entassés a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche.

La majorité des travaux réalisés sur les lits fixes ont abordé l'aspect des performances thermiques des matériaux de stockage.

Le travail mené par **Schumann** [5] sur l'écoulement d'un liquide à température uniforme à travers un prisme poreux, a été la base des travaux postérieurs. L'élaboration d'un modèle monodimensionnel à deux phases pour un lit fixe est permise dans ce travail [4].

**Saez et Mcay** [6] ont présenté un modèle mathématique pour simuler la réponse dynamique d'une colonne entassée. Ils ont pris en compte les propriétés négligées dans d'autres études, telles que, la dispersion thermique axiale et la conduction inter-particules, qui a un effet important dans les applications de l'énergie solaire. Ils ont trouvé que, dans le cas où le nombre de Biot ( $Bi$ ) est suffisamment grand, l'effet de la conduction inter-particules ne doit pas être négligé. En revanche, cet effet est négligeable si  $Bi \ll 1$  ; en outre, la température du fluide et celle du solide seront identiques dans toute section du lit. Les études menées pour comprendre les modes de transfert de chaleur dans un lit fixe, se résument comme suit : transfert convectif entre les parois du lit et le fluide, transfert convectif entre les particules solides et le fluide, transfert conductif entre les parois et les particules solides constituant le lit fixe, transfert conductif entre les particules du lit et enfin le transfert radiatif. Ces différents modes peuvent coexister comme il peut y avoir un ou plusieurs modes dominants [4].

Les matériaux de stockage solide utilisés dans la technique des lits fixe ont été étudiés par de nombreux auteurs [7-8]. Des études extensives ont exploité la capacité abondante des roches et de la terre, tandis que d'autres ont été intéressés par les métaux. **Aly et Echarkawi** [9] ont étudié l'effet des propriétés des matériaux de stockage sur le comportement thermique du lit fixe pendant le processus de chargement. En testant trois matériaux de stockage [4].

**Hasnain** [10-11] a montré à travers une étude de dimensionnement d'un lit de pierres couplé à un capteur solaire destiné à une application de chauffage résidentielle, que le dimensionnement dépend de plusieurs paramètres liés :

- Au matériau de stockage ;
- Au fluide caloporteur ;
- Au capteur solaire ;

En général, le stockage utilisant les pierres est recommandé dans les applications liées au secteur de bâtiment, vu leur coût relativement bas. De ce fait, et pour des raisons de cycle de vie et d'économie, les lits fixes entassés peuvent être considérés comme une solution de stockage de premier choix pour les bâtiments à haute performance énergétique. Une stratification thermique semblable à celle du stockage dans l'eau apparaît dans le stockage dans les lits fixes. Le bon transfert de chaleur entre le fluide caloporteur (air) et le solide vient en faveur de la stratification thermique dans le lit. En revanche, un mauvais échange de chaleur par conduction entre les particules du milieu solide, permet de maintenir la stratification pendant de longues périodes [12].

Dans ce cadre, **Crandall et Thacher** [13] ont effectué une simulation numérique pour étudier la stratification dans un lit fixe de roche destiné au stockage de l'énergie solaire. Ils ont montré l'avantage de la stratification dans le stockage solide, comme ils ont proposé un arrangement du raccordement entre le capteur solaire et le réservoir de stockage pour préserver la stratification ; qui diminue avec le taux de l'ensoleillement pendant la journée et la température à la sortie du capteur solaire [4].

Des études d'optimisation ont été menées afin de déterminer les paramètres optimales pour la conception d'un lit fixe, tels que : la vitesse d'air, les dimensions du réservoir de stockage, ainsi que celles des particules solides, et cela pour un rendement économique maximal [14-15].

Expérimentalement, de nombreux travaux ont été réalisés :

Les premiers travaux expérimentaux sur les lits fixes ont pour finalité l'étude du comportement thermique de différents matériaux notamment des matériaux granulaires [16-17]. Les résultats obtenus ont permis de déterminer la distribution de la température dans le lit de stockage ainsi que l'effet de la taille des particules solide sur le transfert thermique. Sur le même axe, les travaux se sont succédé afin de définir les paramètres de contrôle des

systèmes de stockage à lit fixe [18-19]. La taille des particules solide aussi que la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur représentent des paramètres clés dans le dimensionnement des systèmes de stockage. En utilisant des particules de faibles diamètres, on atteint une performance optimale et un large degré de stratification [20]. Pour des applications solaires, des recherches ont été réalisées pour déterminer les paramètres de dimensionnement ainsi que les performances énergétiques des systèmes de stockage, en testant de différents matériaux [21-22]. A l'issue de ces recherches une base de données est mise en place, afin de permettre aux concepteurs de systèmes de choisir le matériau de stockage qui convient à leurs besoins [23].

La majorité des travaux réalisés sur les lits fixes ont abordé l'aspect des performances thermiques des matériaux de stockage, en revanche l'aspect de la stabilité, qui est un aspect important dans les applications à hautes températures, a été peu traité dans la littérature. Des matériaux peuvent montrer de bonnes performances thermiques, mais ils se dégradent en subissant plusieurs cycles charge/décharge (composite de sel/céramique) [4].

### **I.2.2 Autres travaux réalisés sur le stockage sensible**

**Srivastava et al** [24] ont analysé la performance de stockage d'un plancher solaire avec le béton comme matériau de stockage. Ils ont remarqué que l'efficacité du système augmente avec la vitesse d'écoulement et diminue avec la profondeur planché et que le béton présente un choix intéressant comme matériau de stockage par chaleur sensible, en se référant au coût de ce dernier.

**S. Hasnain** [10] a présenté en revue le développement des technologies de stockage (TES) de l'énergie thermique disponible avec les avantages et les inconvénients de chaque technique, ainsi que les différents matériaux utilisés. Dans la plupart des applications à basse température, telles que le chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire, l'eau est le matériau de stockage le plus utilisé.

Dans le but de montrer l'intérêt d'utiliser les matériaux poreux comme matériaux de stockage, **Dhifaoui et al** [25] ont étudié expérimentalement le comportement dynamique d'un milieu poreux soumis au flux de chaleur d'un mur en vue de stocker l'énergie thermique par chaleur sensible.

**Fernandez et al** [26] ont présenté les matériaux potentiels utilisés dans le stockage par chaleur sensible. Durant ces dernières années, un nombre considérable de nouveaux matériaux a été développé et cela à travers des études de caractérisation et de classification de ces matériaux.

A travers une étude expérimentale et numérique **Mahfoudi et al** [27-28] ont montré l'intérêt de l'utilisation du sable du comme matériaux de stockage à la fois économique et écologique, notamment pour les régions aride et semi-aride.

**Abdul Jabbar et al** [29] ont réalisé une étude numérique sur le comportement thermique d'un mur solaire. Trois matériaux de stockage différents sont examinés, à savoir le béton, le sel hydraté et la cire de paraffine. Une épaisseur optimale de 8cm est défini pour un mur de sel hydraté est capable de maintenir la température de confort dans la zone de fluctuation de la température ambiante.

**Mahmud et al** [30] ont présenté un état de l'art des systèmes de stockage thermique destinés au stockage de l'énergie solaire en utilisant des capteurs solaires à air. Les études relatives tiennent en compte les systèmes séparés aussi que les systèmes intégrés.

**Zhou et al** [31] ont analysé expérimentalement et numériquement les performances thermiques d'un plancher chauffant en utilisant deux matériaux de stockage (sable, MCP) et avec deux configurations de l'échangeur de chaleur. La distribution de la température dans plancher et l'air dans la chambre d'essai a été présentée pour quatre combinaisons, matériau de stockage/échangeur de chaleur et cela pendant le cycle charge/décharge.

Cependant, pour des applications à haute température, **Sragovich** [32] a réalisé une étude du comportement transitoire d'un système de stockage à haute température afin de déterminer les performances ainsi que les conditions opératoires du système.

**Antoni Gil et al** [33] ont présenté un état de l'art des systèmes de stockage thermique à haute température destinés à la production de l'électricité. Les différents matériaux, de principes et technologies de stockage ont été examinés.

A travers une analyse numérique en 3D, **Prasad et al** [34] ont examiné le comportement transitoire et la capacités de stockage d'une unité de stockage de chaleur sensible destiné au stockage de chaleur dans une plage de températures allant de 523 à 673k .Trois matériaux de stockage ont été utilisés, le Béton, l'Acier et la Fonte. L'efficacité de stockage a été évaluée pour les trois matériaux [3].

**BECHIRI Mohammed et MANSOURI Kacem** [35] Ont examiné dans cet article les performances de système de stockage d'énergie thermique sensible qui consiste en plaques-parallèles et conduites cylindriques. Le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur des conduites est soumis à une température d'entrée périodique. Quatre matériaux du stockage, thermiquement différents à savoir le Silicium-carbure, l'Acier-inoxydable, la brique-réfractaire et l'alumine sont testes. La Technique de Transformée Intégrale Généralisée est utilisée pour étudier la réponse transitoire d'une unité de stockage sur convection forcée laminaire. La performance thermique de ces matériaux est évaluée en termes de température moyenne à la sortie, fréquence de la température d'entrée, efficacité de stockage, et l'énergie totale stockée en fonction de l'épaisseur de la conduite.

### **I.3 Conclusion**

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible est un sujet très important vu que de nombreuses recherches ont été publiées dans ce contexte.

Les recherches menées permettant de mieux comprendre les systèmes de stockage et d'établir un état de l'art général en ce qui concerne le stockage de l'énergie thermique. Celui-ci permettra de remédier au problème d'intermittence limitant l'utilisation des sources d'énergies renouvelables, telle que l'énergie solaire.

La comparaison entre les différents types de stockage thermique a permis de montrer les avantages d'utilisation du stockage sensible-solide, parmi eux : la maturité de la technologie, la simplicité, la stabilité et la disponibilité des matériaux...

Le chapitre suivant est consacré à l'étude théorique et au principe de fonctionnement.

## II.1 Introduction

Le concept de « stockage d'énergie » est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques, en réservant une quantité d'énergie provenant d'une source d'énergie sous une forme aisément utilisable. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie [36].

Le stockage de chaleur est utilisé depuis très longtemps. On pense en premier lieu à des pierres qui, après avoir passé la soirée dans le feu, sont transportées à proximité des lits pour garder les occupants au chaud. Ou encore, les pierres entourant les cheminées pour permettre à la chaleur dégagée par le feu d'être emmagasinée puis dissipée tranquillement même suite à l'extinction du feu. Ou encore à la glace qui était enlevée des lacs et rivières gelés durant l'hiver et emmagasinés dans des « maisons de glace ». Isolée avec du bran de scie, la glace restait disponible jusqu'à la fin de l'été. Plus récemment, des camions de transport de produits réfrigérés utilisent le même principe, parfois avec des mélanges de sel pour le transport des denrées sensibles à la chaleur [37].

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. En effet, souvent le besoin de l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ces problèmes est le stockage de l'énergie [38].

Cette énergie peut être stockée sous forme de chaleur dans des réservoirs thermiques. Ces derniers diffèrent par la géométrie du lit et par la nature du matériau servant à stocker l'énergie [39-40]. Ainsi, l'énergie thermique peut être alors stockée sous forme de chaleur latente, ou bien sous forme de chaleur sensible ou même les deux à la fois [41].

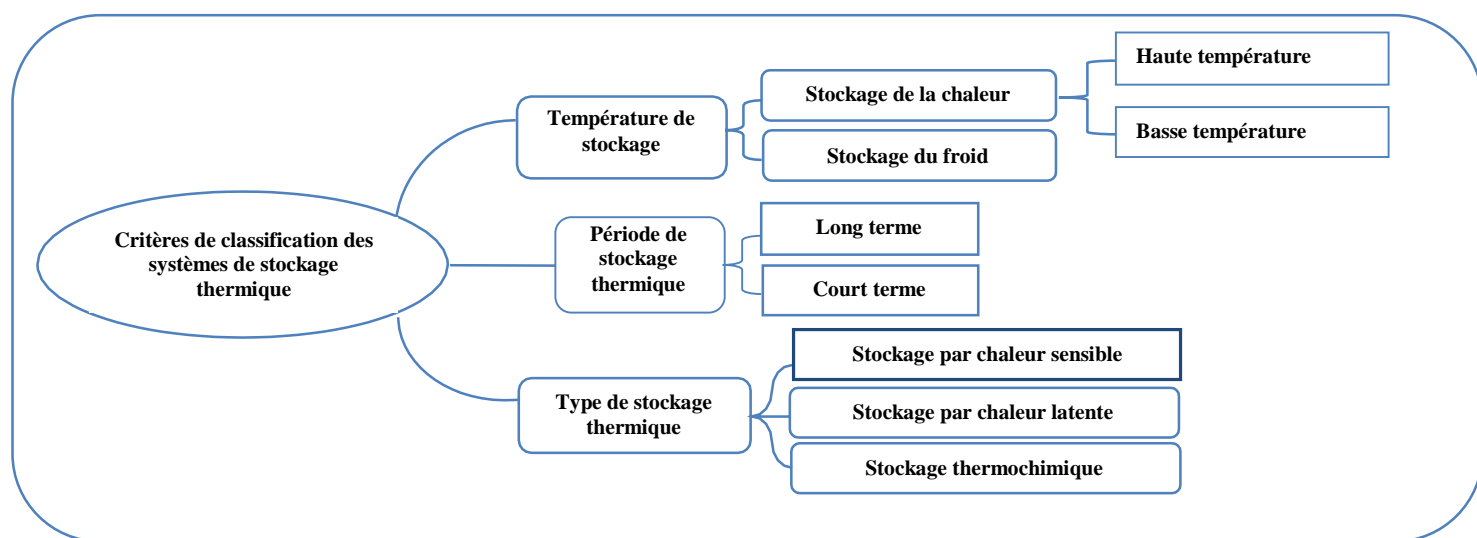
Ce chapitre présente une étude théorique sur le stockage d'énergie thermique, en se basant majoritairement sur la propriété de stockage par chaleur sensible.

## II.2 Stockage de l'énergie thermique

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

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères (figure II-1). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en stockage de la chaleur et stockage du froid [42-43]. 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 [44]. Les systèmes de

stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs [45]. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur, et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur [46].

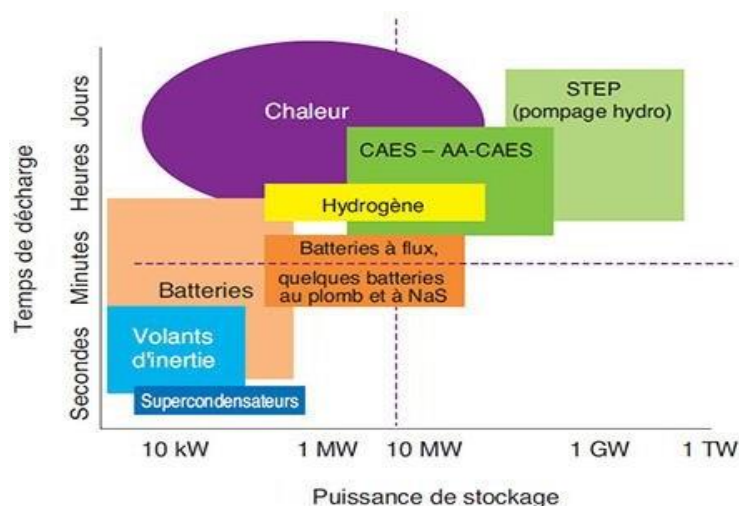


*Figure II-1 : Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.*

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrons sur la classification selon le type de stockage.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois principes élémentaires : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et le stockage thermochimique [44].

L'importance du stockage thermique par rapport aux autres technologies existantes, est illustrée dans la figure II-2 [47]. Elle montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des longues périodes concernent principalement les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), le stockage d'énergie par air comprimé (Compressed Air Energy Storage-CAES) et le stockage thermique. Par contre les autres technologies comme les batteries électriques, l'hydrogène, le volant d'inertie et les supercondesateurs sont classées dans la case de stockage d'énergie à court terme.



*Figure II-2 : Différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance de stockage et du temps de décharge [46].*

La technologie de stockage sensible est considérée comme simple, économique et relativement mature, ce qui lui permet d'être exploitée [48], en revanche le choix du matériau de stockage est primordial. Plus de 15000 matériaux de stockage sont disponibles avec de nouveaux développés chaque année [49].

Les systèmes de stockage sensible peuvent être classifiés selon le matériau de stockage utilisé, aux systèmes liquides, et systèmes solides. De même ils peuvent être classifiés selon la durée de stockage, au stockage à court et à long terme. Pour le stockage liquide, l'eau reste le milieu le plus utilisés (réservoir d'eau, aquifère, bassin solaire), pour des applications à basse température (25 - 90 °C). En revanche des matériaux plus performants sont destinés au stockage à haute températures (300 - 800 °C) (huiles à base de pétrole, sels fondus...etc.) [46].

Dans le cas du stockage solide à basse et à haute température, des matériaux tel que pierre, sable, béton, brique, sont utilisés [50-51]. A cet effet, et pour des raisons de sécurité et de stabilité, le stockage solide est favorisé par rapport au stockage liquide [52].

## II.2.1 Types de stockage de l'énergie thermique

### II.2.1.1 Stockage thermique par chaleur Latente

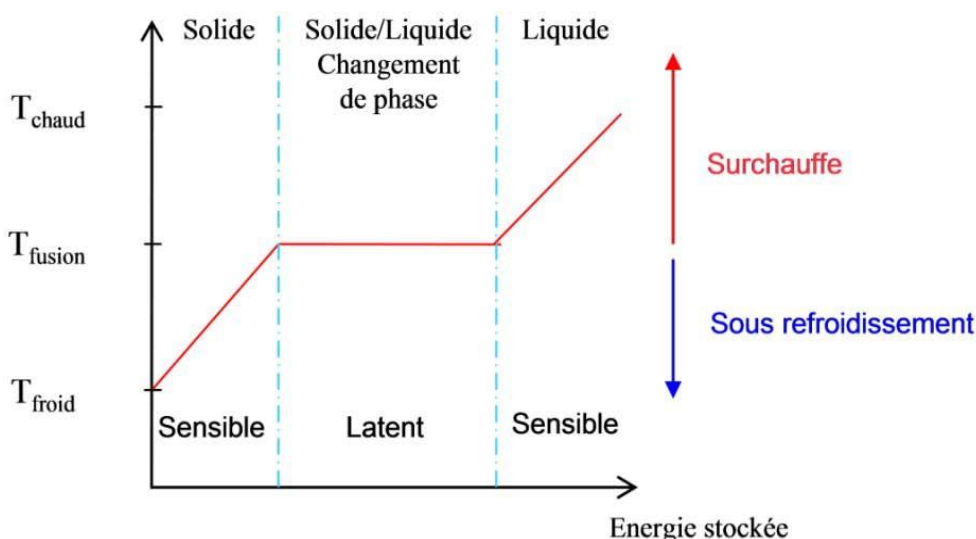
Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente, propriété intrinsèque du matériau et de la quantité de matériau utilisée.

Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP). De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels [53-54].

Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie



est ensuite stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial. La figure II-4 illustre les différentes étapes d'un tel système de stockage [46].



**Figure II-3 :** Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente (solide/liquide) [46].

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

L'utilisation du stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isothermes, en charge et en décharge. En revanche, les technologies à utiliser pour le transfert de chaleur et la sélection des matériaux sont plus complexes. Des problèmes subsistent encore, dont notamment, la durée de vie des produits qui se dégradent après plusieurs cycles de fusion-solidification et les transferts thermiques qui sont difficiles à optimiser [55] [46].

### II.2.1.2 Stockage thermochimique

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est dit : stockage thermochimique. 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.

En général, le stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ( $T \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) tandis que pour des applications de type solaire concentré ( $T \approx 200$  à  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées [46].

### II.2.1.3 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température, et à la capacité

calorifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état [46].

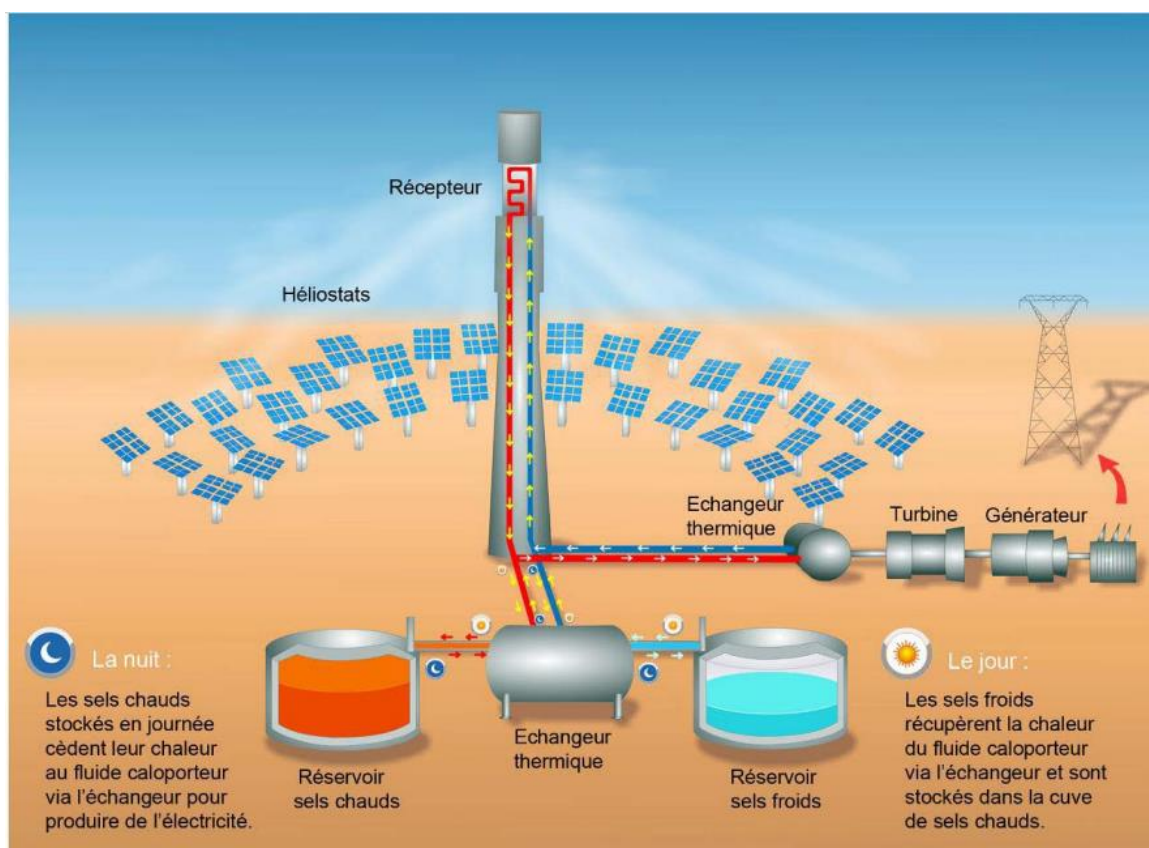
De plus, aucun changement de phase n'apparaît en cours de fonctionnement. Afin qu'un matériau soit reconnu comme potentiel utilisable comme médium de stockage de chaleur sous forme sensible, il doit répondre aux critères suivants [42] :

- Chaleur spécifique élevée ;
- Stabilité à long terme avec cycles thermiques ;
- Compatibilité avec son contenant ;
- Faible coût [37].

Les principaux matériaux utilisés se retrouvent sous forme liquide ou solide.

Ce type de stockage est efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température, Dans le cadre des procédés solaires à concentration, les gammes de températures sont qualifiées de moyenne et haute température. Les températures, comprises entre 100 et 500°C, appartiennent au domaine des moyennes températures et au-delà on parle de haute température [56].

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé par un média solide (systèmes de stockage passifs) ou liquide (systèmes de stockage passifs ou actifs). Avec un média solide, le stockage a lieu dans un lit compact qui requiert un fluide caloporteur pour l'échange de chaleur. Pour un média liquide (sels fondus, huiles naturelles et synthétiques, eau) le stockage se fait en général dans des thermoclines ou dans des réservoirs de stockage. Ce type de stockage est utilisé industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques [57], Comme la montre la figure II-4 : [58]



**Figure II-4 :** Figure Principe du stockage sensible dans une centrale thermodynamique [58].

Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de  $500^{\circ}\text{C}$ ) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité [59] [58].

## II.2.2 Matériaux

Les matériaux utilisés pour le stockage de chaleur sensible peuvent être des liquides ou des solides :

### II.2.2.1 Matériaux liquides

Les matériaux liquides sont de bons candidats pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. En effet, leur état liquide permet généralement une meilleure intégration au système d'échange de chaleur. De plus, la vitesse de restitution de la chaleur est généralement plus élevée due aux effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. Cette caractéristique spécifique aux matériaux liquides leur procure par contre une plus grande autodécharge, résultant en une plus faible autonomie pour une puissance donnée. Les principaux liquides utilisés sont l'eau et les huiles thermiques et les sels fondus [37].

On utilise généralement de l'eau pure dans les circuits d'eau chaude, ou avec adjuvant pour les circuits thermiques domestiques, les huiles et les sels fondus principalement utilisés par les centrales électriques solaires, On peut utiliser aussi, les métaux fondus (nucléaire), la vapeur d'eau. Chacun de ces fluides possède des caractéristiques thermo physiques propres et adaptées à une utilisation particulière (température, viscosité, coût, espace...). On trouve également des mélanges très particuliers parfois développés pour un site spécifique [60] [61].

#### II.2.2.1.1 L'Eau

Étant un des matériaux les plus accessibles et abondant au monde, l'eau a vite été considérée pour une utilisation de stockage thermique sous forme sensible. L'essai a été concluant pour certaines situations, car son utilisation comporte de nombreux avantages.

Par contre, certains inconvénients font que d'autres matériaux peuvent y être préférés dans certains systèmes [42].

Le tableau II-1 résume les avantages et les inconvénients de l'eau comme matériau de stockage sensible.

*Tableau II-1 : les avantages et les inconvénients de l'eau comme matériau de stockage sensible [37].*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haute efficacité ;</li> <li>• Chaleur spécifique élevée ;</li> <li>• Faible coût ;</li> <li>• Très disponible ;</li> <li>• Très documenté ;</li> <li>• Aucune détérioration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosif à certains contenants ;</li> <li>• Faible température de stockage ;</li> </ul>

#### II.2.2.1.2 Les huiles organiques

Les huiles sont les liquides les plus utilisés après l'eau, pour un système de stockage thermique sous forme sensible. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40 % plus élevée que celle de l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de leur utilisation à température plus élevée. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le Therminol et la Caloria-HT [39-42].

Le tableau II-2 résume les avantages et les inconvénients des huiles organiques comme matériaux de stockage.

**Tableau II-2** : les avantages et les inconvénients des huiles organiques comme matériaux de stockage [37].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaleur spécifique élevée.</li> <li>• Non-corrosif aux contenants.</li> <li>• Disponible.</li> <li>• Température de fonctionnement élevée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevée.</li> <li>• Toxique pour l'environnement.</li> <li>• Inflammable.</li> </ul>

### II.2.2.1.3 Les sels fondus

On désigne par « sel fondu » tout milieu ionique constitué d'anions et de cations inorganiques entre lesquels de fortes interactions électrostatiques permettent une cohésion du liquide. Afin de ne pas confondre les sels fondus avec les liquides ioniques à température ambiante, il convient de préciser que les températures d'utilisation des sels fondus sont beaucoup plus élevées, de 400 à 800°C pour les chlorures ou jusqu'à 1200°C pour les fluorures. De manière générale, les sels fondus possèdent une grande capacité calorifique, une bonne conductivité thermique et une pression de vapeur relativement basse [62].

Les sels fondus ont été utilisés dans de nombreuses industries comme fluide calorifique à haute température. En fonction de la température nécessaire pour une application spécifique, les sels fondus peuvent être classés comme indiqué dans le tableau II-3 [37].

**Tableau II-3** : Classification des sels fondus en fonction de la température nécessaire pour une application spécifique [37].

Système a sel fondu	Chlorures alcalins, chlorure d'aluminium	Nitrates, nitrites, hydroxydes alcalins	Halogénures, sulfates, carbonates alcalins
Intervalle de température de fonctionnement	150-250 °C	250-400°C	450-1000 °C

### II.2.2.2 Matériaux solides

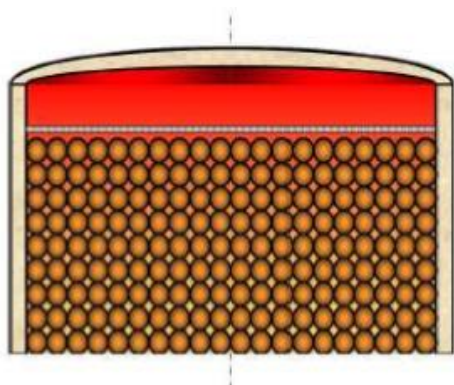
Il est également possible de stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible dans des matériaux solides tableau II-4, que ce soit des roches telles que le béton, les briques, les céramiques ou des métaux. Les roches possèdent une conductivité beaucoup plus faible que les métaux. Il est donc possible d'y stocker une quantité d'énergie approximativement équivalente mais de façon moins rapide, ce qui est plus adapté à du stockage sur du long terme. Le béton est par exemple utilisé dans le bâtiment sous forme de pieux échangeurs [63] Dans le sol, au niveau des fondations pour des stockages saisonniers de chaleur. Les

métaux peuvent être utilisés pour des stockages tampons à plus court terme en raison de leurs temps de réaction plus rapides [61].

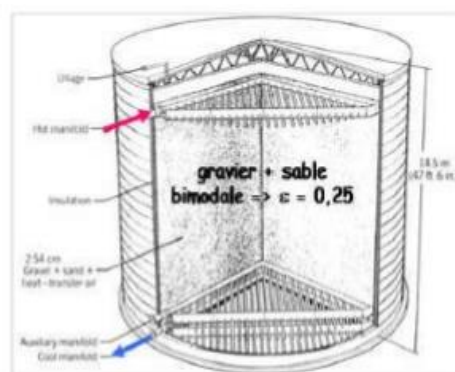
*Tableau II-4 : Propriétés thermo physiques des solides pour le stockage [64].*

Matériau	Masse volumique [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Chaleur spécifique [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Capacité volumique ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ )
<b>Roche</b>	2150-2680	745-1105	2.15 - 5 ; 38	1.6-2.96
<b>Sable</b>	1515	850	0 ; 27	1.2
<b>Béton</b>	2200	880	1.5	2.52
<b>Céramique</b>	3500	866	1.35	3.03
<b>Aluminium</b>	2707	896	204	2.43
<b>Cuivre</b>	8954	383	385	3.43
<b>Fer</b>	7897	452	73	3.57

Les matériaux de stockage solides peuvent s'utiliser conjointement avec un fluide. Ainsi, il est possible de remplir une cuve de stockage avec un garnissage granulaire, par exemple des billes de métal (figure II-6) ou bien du gravier et du sable (figure II-5), le tout baignant dans de l'eau ou dans un autre fluide. Ceci permet d'exploiter les capacités thermiques du fluide et du solide. Avec ce type de procédé, la quantité de fluide est réduite, la convection naturelle à l'intérieur de la cuve de stockage est inhibée et la stratification est bien conservée, ce qui permet généralement de diminuer le volume utile du module de stockage [61].



*Figure II-6 : Stockage avec garnissage [65].*



*Figure II-5 : Stockage avec gravier et sable [65].*



## II.3 Le stockage thermique dans l'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable [66].

### II.3.1 Les types d'exploitations de l'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est l'une des sources d'énergies renouvelables les plus facile à utiliser. On désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement dans le chauffage des bâtiments par exemple, ou indirectement dans les centrales thermodynamiques avec des capteurs solaires à concentration [68].

Il existe deux types d'énergies solaires thermiques :

#### II.3.1.1 L'énergie solaire thermique à basse température

##### II.3.1.1.1 La technologie solaire « active »

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus [69].

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct" [69-70].

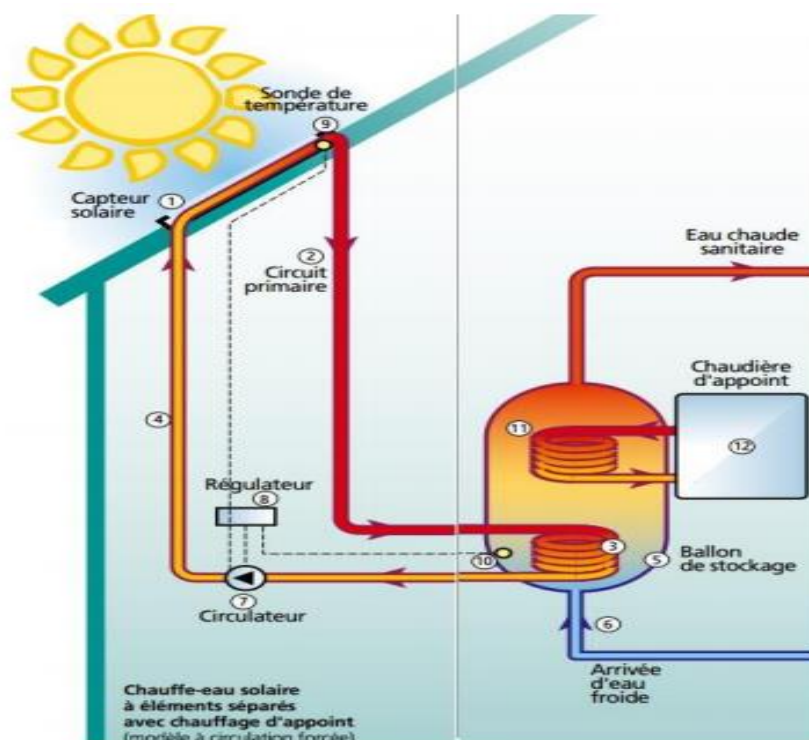


Figure II-7 : Chauffe-eau solaire. [58]

### II.3.1.1.2 La technologie solaire « passive »

Toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux.

L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux [58].

### II.3.1.2 L'énergie solaire thermique à haute température (Le solaire thermodynamique)

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1 000 °C [69].

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'hélio-thermodynamique. Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.

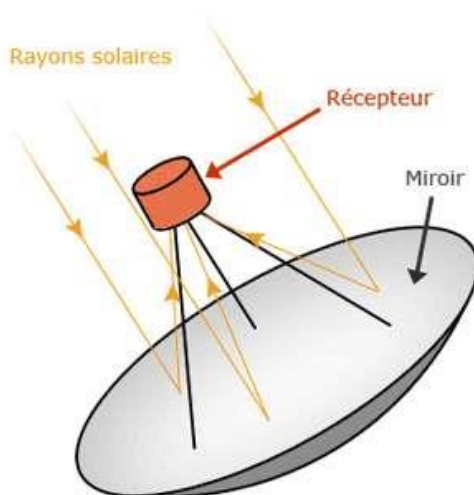
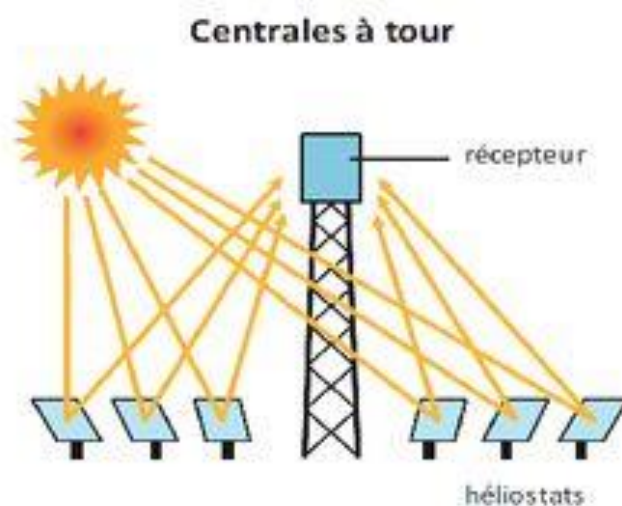


Figure II-8 : centrale thermodynamique parabolique [69].

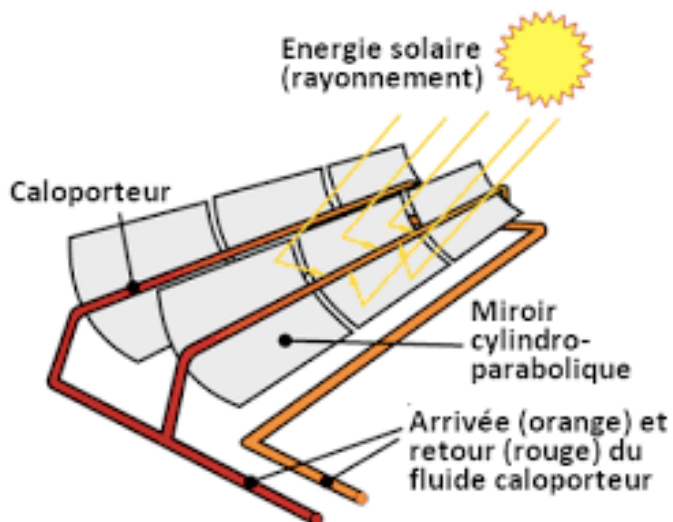
- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.





*Figure II-9 : centrale thermodynamique à tour [71].*

- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire [69].



*Figure II-10 : centrale thermodynamique cylindro-parabolique [72].*

### II.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

Le tableau II-5, résume les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

*Tableau II-5 : les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire [67].*

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
L'énergie solaire est inépuisable et non polluante (L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre).	Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.	L'énergie solaire est une énergie intermittente (La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil).
Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.	Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a montré que le stockage thermique est devenu aujourd'hui plus important au sein de l'industrie.

Ce chapitre donne aussi un aperçu rapide sur les techniques de stockage thermique. On peut effectuer ce stockage en trois modes principales : sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton... etc.), sous forme de chaleur latente (eau, paraffine, sels, ...etc.), et par voie thermochimique. Le choix de l'un de ces modes étant en fonction des besoins économiques, techniques ainsi que de la durée du stockage qu'on a désirée.

L'énergie solaire thermique est une solution d'avenir. C'est celle qui est disponible en plus grande quantité. C'est dans les déserts qu'elle peut être capturée de la manière la plus efficace et la plus économe, comme elle peut couvrir la majeure partie des futurs besoins globaux en énergie.

### III.1 Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures. On dit qu'il y'a transfert de chaleur [74].

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur : La conduction thermique ou diffusion thermique, La convection et le rayonnement thermique.

Afin de déterminer quantitativement comment la température de chaque point du système change avec le temps, il est nécessaire de définir le problème physique par des équations aux dérivées partielles. D'une manière générale, ces équations ne reconnaissent pas des solutions analytiques sauf dans des cas simplifiés, c'est pour cela que nous recourons à utiliser les méthodes de résolutions numériques tel que les différences finies, les volumes finies et les éléments finis. Chaque méthode pour les problèmes continus, comprend une étape de maillage et une étape de discrétisation d'équations aux dérivées partielles, suivies d'une résolution numérique.

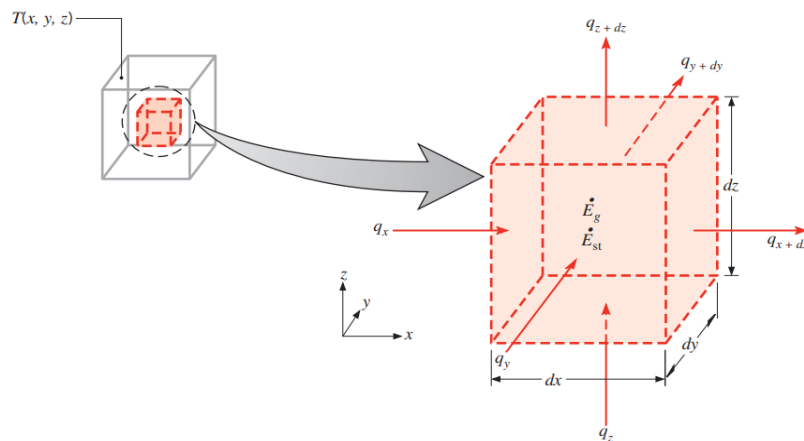
### III.2 Rappels sur les éléments d'échanges thermiques

Le transfert d'énergie dépend de l'évolution spatiale et temporelle de la température. La valeur instantané de la température en tout point de l'espace est un scalaire, appelé champ de température. Nous distinguerons deux situations :

- Champ de température indépendant du temps : l'état est considéré comme permanent ou stationnaire.
- L'évolution du champ de température dans le temps : l'état est dit variable, instationnaire ou transitoire [75].

#### III.2.1 L'équation générale de la conduction

Un objectif majeur d'une analyse de conduction est de déterminer le champ de température dans un milieu résultant des conditions imposées sur ses limites. Pour connaître la distribution de température, un bilan énergétique est effectué dans le volume de contrôle ( $dx dy dz$ ), voir figure III.1. Une fois cette distribution connue, le flux de chaleur par conduction en tout point du milieu ou sur sa surface peut être calculé à partir de la loi de Fourier.



**Figure III-1** : volume de contrôle différentiel,  $dx dy dz$ , pour l'analyse de conduction en coordonnées cartésiennes [73].

La forme générale de l'équation de la conduction en régime instationnaire s'écrit :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III-1})$$

Dans le cas d'un flux bidimensionnel ( $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ) et sans puissance volumétrique interne, l'équation de la conduction s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III-2})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (\text{III-3})$$

### III.2.2 Modes de transfert de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [76].

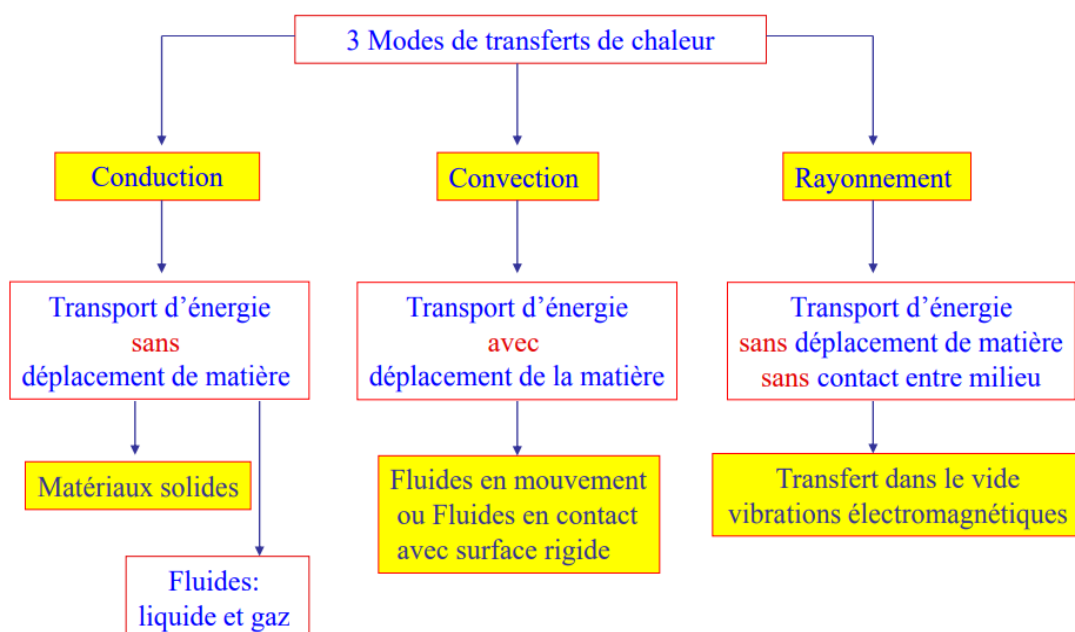


Figure III-2 : les modes de transfert de chaleur [77].

### III.2.2.1 Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Fourier :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{III-4})$$

Ou sous forme algébrique :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{III-5})$$

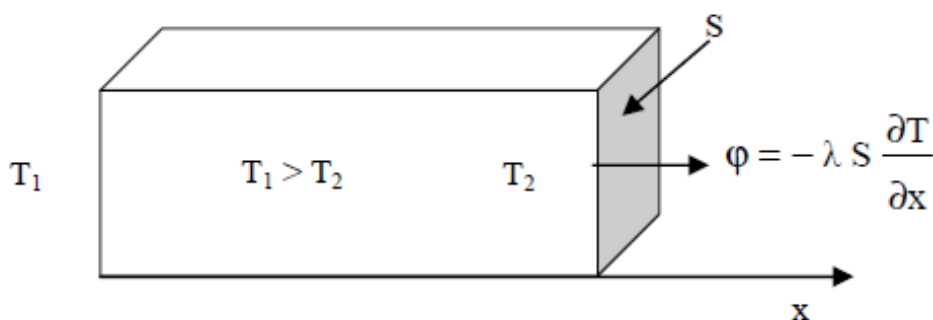


Figure III-3 : Schéma du transfert de chaleur conductif [75].

### III.2.2.2 Transfert de chaleur par convection

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\phi = hS(T_p - T_\infty) \quad (\text{III-6})$$

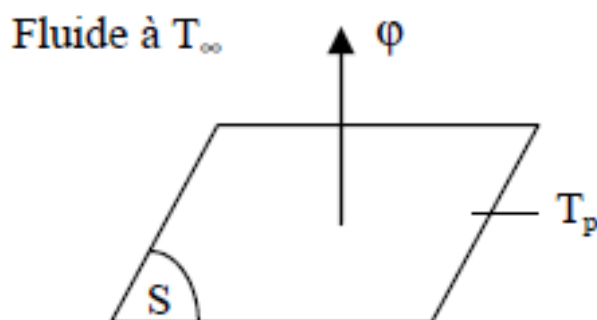


Figure III-4 : Schéma du transfert de chaleur convectif [75].

L'estimation de la température du fluide dans un tube à température de paroi constante :

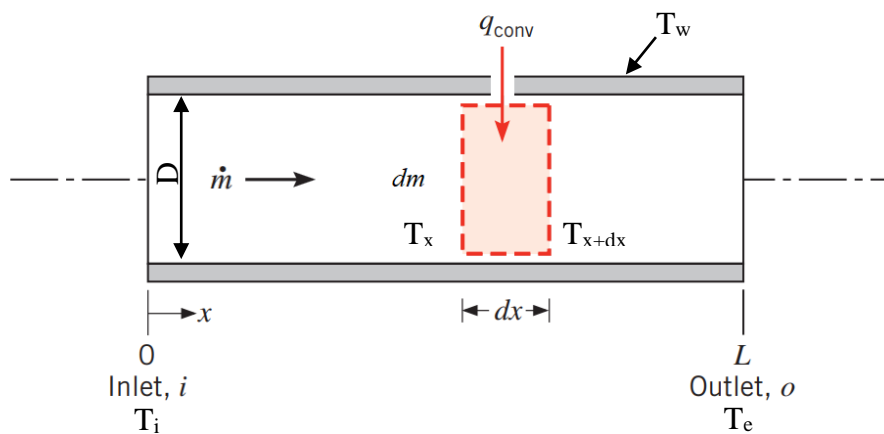


Figure III-5: volume de contrôle pour le débit interne dans un tube [73].

La température du fluide s'écrit :

$$T_{f,x} = e^{\left(\frac{-4hx}{\rho D v c_p}\right)} (T_i - T_w) + T_w \quad (\text{III-7})$$

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide, on distingue :

### III.2.2.2.1 La convection naturelle ou libre

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

La circulation naturelle du fluide est caractérisée par le nombre de Grashof, il est défini comme le rapport entre la force de flottabilité et la force visqueuse agissant sur un fluide dans la couche limite. Son rôle dans la convection naturelle est identique à celui du nombre de Reynolds en convection forcée, Il s'écrit : [75]

$$Gr_{Lref} = \frac{g\beta\Delta TL_{ref}^3\rho^2}{\mu^2} \quad (\text{III-8})$$

### III.2.2.2.2 La convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température telle qu'une pompe ou un ventilateur [76].

La méthode d'analyse dimensionnelle est connue sous le nom de théorème de Vaschy–Buckingham ou théorème de groupements  $\pi$ , permettra de déterminer de manière simple le coefficient d'échange convectif pour la plupart des problèmes rencontrés dans la pratique.

Les nombres qui caractérisent les écoulements et les transferts d'énergie associés sont des grandeurs sans dimensions : [79]

- Le nombre de Reynolds, (Re) compare les forces d'inertie et les forces visqueuses, il caractérise le régime d'écoulement et s'écrit :

$$Re = \frac{\rho v L_{ref}}{\mu} \quad (\text{III-9})$$

- Le nombre de Prandtl, (Pr) compare la diffusion de masse devant la diffusion thermique et s'écrit :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_f} \quad (\text{III-10})$$

- Le nombre de Nusselt, (Nu) compare le transfert par convection devant le transfert par conduction dans le fluide et caractérise le type de transfert de chaleur, il s'écrit :

$$Nu = \frac{h L_{ref}}{\lambda} \quad (\text{III-11})$$

- Le nombre de Péclet, (Pe) compare le transfert par diffusion et par convection dans le fluide, il s'écrit :

$$Pe = Re_L Pr_L = \frac{ul}{a_f} \quad (\text{III-12})$$

### III.2.2.2.3 Régimes d'écoulement :

Un régime d'écoulement peut être défini comme étant le mode de mouvement des particules fluides entre elles dans un écoulement.

L'importance du flux de chaleur échangé par convection va dépendre du régime d'écoulement sous lequel se produisent les échanges : régime laminaire ou turbulent.

#### III.2.2.2.3.1 Régime Laminaire

Un écoulement laminaire est un écoulement caractérisé par des lignes de courant bien identifiables parallèles aux parois.

Ce régime est très rare en hydraulique, on le rencontre souvent dans le domaine industriel comme celui des lubrifiants.

#### III.2.2.2.3.2 Régime turbulent

Un écoulement turbulent est caractérisé par des structures tourbillonnaires qui favorisent le brassage du fluide et donc les échanges de chaleur.

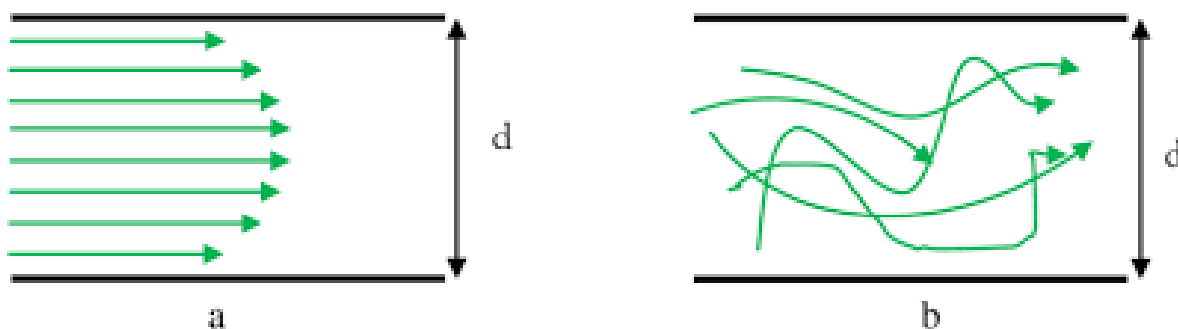


Figure III-6 : Les deux différents modes d'écoulements rencontrés. (a) laminaire. (b) turbulent [78].

La connaissance de régime d'écoulement d'un fluide est un point clé en génie des procédés, car il a une influence sur la plus part des phénomènes, en particulier les transferts de chaleur.

Le régime d'écoulement dépend de débit de fluide, du diamètre de la conduite et des propriétés du fluide. Il est déterminé grâce au nombre de Reynolds, défini comme suit dans le cas d'un écoulement dans une conduite cylindrique : [80]

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (\text{III-13})$$

Suivant le critère de Reynolds :

- Convection en régime laminaire :  $Re < 2300$  ;
- Ecoulement turbulent lisse :  $2300 < Re < 3000$  ;
- Convection en régime turbulent :  $Re > 3000$ .

### III.2.2.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Le rayonnement thermique représente, avec la convection et la conduction, l'un des phénomènes physiques qui autorisent le transfert de chaleur. Son signe particulier : il ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel intermédiaire et peut donc transporter de la



chaleur à travers le vide. Ainsi, c'est grâce au rayonnement thermique que le Soleil nous transmet, presque instantanément, sa chaleur [81].

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stefan – Boltzman :

$$\varphi_{max} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{III-14})$$

### III.3 Les méthodes numériques en régime instationnaire bidimensionnel

#### III.3.1 Résolution de système avec la méthode des différences finies

La méthode des différences finies est la méthode numérique la plus ancienne et fut la première utilisée pour résoudre des problèmes thermiques. Elle consiste à diviser le volume de l'espace où la solution est recherchée en un réseau de points espacés régulièrement ou irrégulièrement pour constituer ce que l'on appelle un maillage. La solution du problème est ensuite calculée en chaque point du maillage. [82]

##### III.3.1.1 Schéma explicite

La température d'un nœud intérieur à l'instant  $(t+\Delta t)$  est obtenue en fonction de la température du nœud considéré et de celles de ses voisins, toutes prises à l'instant  $t$ .

La formulation explicite de la dérivée temporelle s'écrit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j}^t = \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \quad (\text{III-15})$$

La forme explicite aux différences finies de l'équation III.2 est :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = \frac{T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i-1,j}^t}{(\Delta x^2)} + \frac{T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t}{(\Delta y^2)} \quad (\text{III-16})$$

La discrétisation de cette équation en supposant que  $\Delta x = \Delta y$ , pour un nœud intérieur :

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = F_0 (T_{i+1,j}^t + T_{i-1,j}^t + T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + (1 - 4F_0) T_{i,j}^t \quad (\text{III-17})$$

$$\Rightarrow \text{Avec : } F_0 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

La méthode explicite a certains inconvénients, chaque type d'équation du nœud utilisé doit satisfaire à son critère de stabilité, ceci a pour conséquence que si on choisit un  $(\Delta x)$  petit pour obtenir une distribution de température précise, il faut choisir aussi un  $(\Delta t)$  très petit pour respecter le critère de stabilité. Ceci conduit à effectuer de nombreux calcul pour arriver au temps recherché. Dans les problématiques instationnaires impliquant de grandes valeurs de temps, on préfère la méthode implicite.

##### III.3.1.2 Schéma implicite

La méthode implicite au contraire n'impose pas de critère de stabilité et utilise les différences arrière, les températures de premier membre sont toutes évaluées à l'instant  $(t+\Delta t)$ .

La formulation implicite de la dérivée temporelle s'écrit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j}^{t+\Delta t} = \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \quad \text{(III-18)}$$

La forme implicite aux différences finies de l'équation III.2 est :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = \frac{T_{i+1,j}^{t+\Delta t} - 2T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i-1,j}^{t+\Delta t}}{(\Delta x^2)} + \frac{T_{i,j+1}^{t+\Delta t} - 2T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{(\Delta y^2)} \quad \text{(III-19)}$$

La discrétisation de cette équation pour différents type de nœuds, en supposant que :

$$\Delta x = \Delta y, \Delta z=1, \text{ avec } q = -KA \frac{dT}{dx}, \text{ donne :}$$

### III.3.1.2.1 Pour un nœud interne

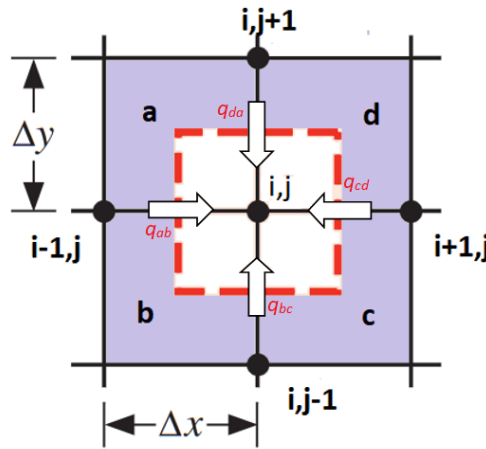


Figure III-7 : Bilan thermique d'un nœud interne.

$$\begin{aligned} q_{ab} + q_{bc} + q_{cd} + q_{da} &= mc_p \frac{dT}{dt} \\ -k\Delta y \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i-1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k\Delta y \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i+1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k\Delta x \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} - k\Delta x \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j+1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} \\ &= \rho c_p \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) \end{aligned}$$

↳ Avec :  $m = \rho v = \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

D'où la température au nœud interne est calculée en fonction de l'équation :

$$T_{i,j}^t = (1 + 4F_0)T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0(T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + T_{i-1,j}^{t+\Delta t} + T_{i,j+1}^{t+\Delta t} + T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) \quad \text{(III-20)}$$

## III.3.1.2.2 Pour un nœud frontière

## III.3.1.2.2.1 Avec convection

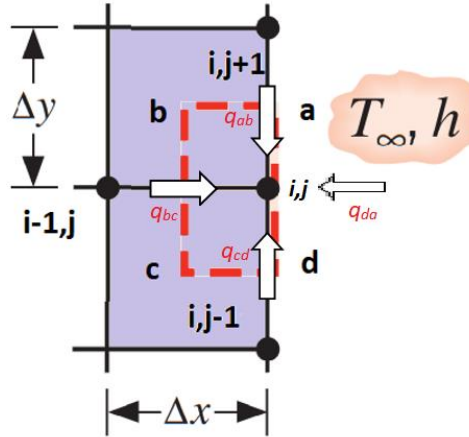


Figure III-8 : Bilan thermique d'un nœud frontière avec convection.

$$q_{ab} + q_{bc} + q_{cd} + q_{da} = mc_p \frac{dT}{dt}$$

$$-k \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i-1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i+1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k \Delta x \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} - h \Delta x (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{\infty}^t)$$

$$= \rho \frac{\Delta x^2}{2} c_p \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t}$$

$$4F_0 T_{i,j}^{t+\Delta t} + 2F_0 B_i T_{i,j}^{t+\Delta t} + T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0 T_{i-1,j}^{t+\Delta t} - F_0 T_{i+1,j}^{t+\Delta t} - 2F_0 T_{i,j-1}^{t+\Delta t} = 2F_0 B_i T_{\infty}^t$$

↪ Avec :  $B_i = h \frac{\Delta x}{k}$

D'où la température au nœud frontière en contact avec un fluide est calculée en fonction de l'équation :

$$(1 + 2F_0(B_i + 2))T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0(T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + T_{i-1,j}^{t+\Delta t} + 2T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) = 2B_i F_0 T_{\infty}^t + T_{i,j}^t \quad (\text{III-21})$$

III.3.1.2.2.2 Adiabatique

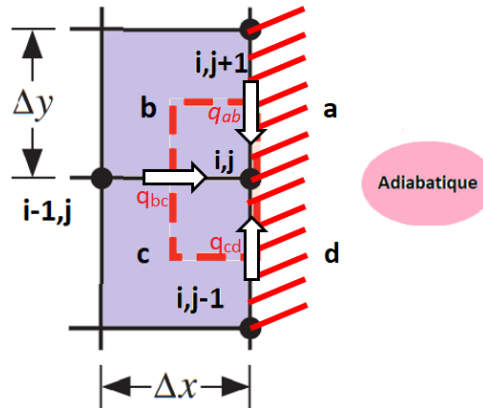


Figure III-9 : Bilan thermique d'un nœud frontière adiabatique.

$$q_{ab} + q_{bc} + q_{cd} = mc_p \frac{dT}{dt}$$

$$-k \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i-1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i+1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k \Delta x \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} = \rho \frac{\Delta x^2}{2} c_p \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t}$$

$$T_{i,j}^t = 4F_0 T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0 T_{i-1,j}^{t+\Delta t} - F_0 T_{i+1,j}^{t+\Delta t} - 2F_0 T_{i,j-1}^{t+\Delta t} + T_{i,j}^{t+\Delta t}$$

La température au nœud frontière adiabatique est calculée en fonction de l'équation :

$$T_{i,j}^t = (1 + 4F_0) T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0 (T_{i-1,j}^{t+\Delta t} + T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + 2T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) \tag{III-22}$$

III.3.1.2.3 Pour un nœud en coin extérieur

III.3.1.2.3.1 Convection-adiabatique

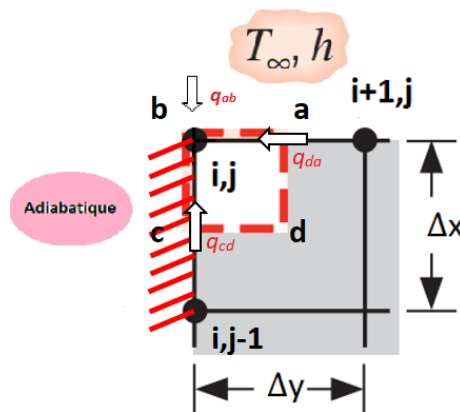


Figure III-10 : Bilan thermique d'un nœud en coin extérieur convection-adiabatique.

$$\begin{aligned}
 q_{ab} + q_{cd} + q_{da} &= mc_p \frac{dT}{dt} \\
 -k \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i+1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} - h \Delta x (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{\infty}^t) \\
 &= \rho \frac{\Delta x^2}{4} c_p \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t}
 \end{aligned}$$

$$4F_0 T_{i,j}^{t+\Delta t} - 2F_0 T_{i+1,j}^{t+\Delta t} - 2F_0 T_{i,j-1}^{t+\Delta t} - 2F_0 B_i T_{i,j}^{t+\Delta t} + T_{i,j}^{t+\Delta t} = T_{i,j}^t + 2F_0 B_i T_{\infty}^t$$

D'où la température dans ce cas est calculée en fonction de l'équation :

$$(1 + 2F_0(B_i + 2))T_{i,j}^{t+\Delta t} - 2F_0(T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) = 2B_i F_0 T_{\infty}^t + T_{i,j}^t \quad (\text{III-23})$$

### III.3.1.2.3.2 Adiabatique-symétrique

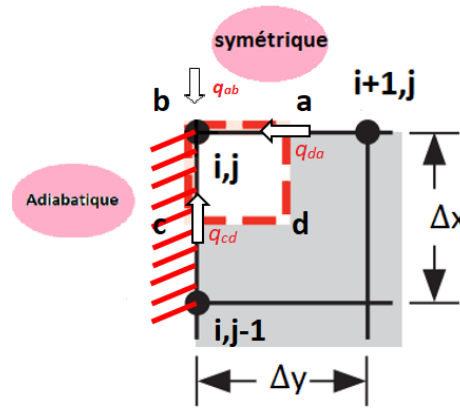


Figure III-11 : Bilan thermique d'un nœud en coin extérieur adiabatique-symétrique.

$$\begin{aligned}
 q_{ab} + q_{cd} + q_{da} &= mc_p \frac{dT}{dt} \\
 -k\Delta y \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i-1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - k\Delta y \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i+1,j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - 2k\Delta x \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j-1}^{t+\Delta t}}{\Delta y} \\
 &= \rho \Delta x^2 c_p \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \\
 4F_0 T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0 (T_{i-1,j}^{t+\Delta t} + T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + 2T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) + T_{i,j}^{t+\Delta t} &= T_{i,j}^t
 \end{aligned}$$

D'où :

$$(1 + 4F_0)T_{i,j}^{t+\Delta t} - F_0 (T_{i-1,j}^{t+\Delta t} + T_{i+1,j}^{t+\Delta t} + 2T_{i,j-1}^{t+\Delta t}) = T_{i,j}^t \quad (\text{III-24})$$

Afin de mettre les équations précédentes sous forme matricielle, ou les inconnues sont les températures à l'instant  $t+\Delta t$  ( $T^{t+\Delta t}$ ), tandis que les températures à l'instant  $t$  ( $T^t$ ) sont connues, il faut réarranger les équations sous forme respective. Nous avons affaire à un système de  $n$  équations et  $n$  inconnues. Voir la matrice ci-dessous.

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_n^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (\text{III-25})$$

Il existe deux méthodes pour résoudre ce système :

**Méthode directe** : qui se définit sous la forme d'équation de récurrence et conduit à la solution en un nombre fini d'étapes.

**Méthode indirecte (itérative)** : qui évalue la solution exacte du problème par approximations successives de celle-ci.

Nous avons choisi la méthode d'élimination de Gausse pour résoudre ce système d'équations. La distribution de température obtenue dans chaque calcul représente le champ de température initial de l'itération suivante.

### III.4 Programme de calcul de la quantité de chaleur stockée

De nombreux comportements physiques sont régis par des équations aux dérivées partielles. Ces équations étant insolubles analytiquement, la méthode de calcul par différence finie permet de les résoudre numériquement. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible.

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans le domaine technologique et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de suivre le fonctionnement des modèles physiques complexes, et d'étudier les propriétés du système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

#### III.4.1 Simulation numérique avec le Fortran 90 et l'algorithme de calcul

Le FORTRAN ou FORMula TRANslator est un langage de programmation Particulièrement destiné au traitement des applications scientifiques telles que les statistiques, le calcul numérique, la simulation, etc...

Le programme fortran se constitue d'un programme principal qui assure le bon déroulement des opérations de calcul et de gestion des résultats avec la macro visual basic, ainsi que plusieurs sous-programmes qui assurent les opérations de calcul auxiliaires.

Un programme comporte généralement plusieurs modules (sous-programmes). Ces modules peuvent figurer dans un même fichier ou dans des fichiers différents. Lorsque les modules figurent dans des fichiers individuels, il est possible, et c'est même fortement

conseillé, de les réutiliser dans d'autres programmes. Un ensemble de modules doit, pour pouvoir être exécuté, comporter un programme principal. Le programme principal peut faire appel à des procédures et à des fonctions qui peuvent faire de même.

Un module comporte différentes parties :

- L'entête ou le nom du module. En FORTRAN on peut trouver :
  - PROGRAM nom du programme pour le programme principal
  - SUBROUTINE (Liste de paramètres) pour un sous-programme
  - FUNCTION (Liste de paramètres) pour une fonction
- Les déclarations des paramètres, s'il y a lieu ;
- Les déclarations des variables ;
- Les initialisations et déclarations particulières ;
- Les instructions exécutables. C'est la traduction en langage (FORTRAN) de l'algorithme ;
- L'instruction FIN de module. En FORTRAN, il s'agit de END.

Nous avons utilisé le Fortran 90 comme outil d'aide dans la réalisation du programme de calcul et de l'estimation de la quantité de chaleur sensible stockée récupéré d'un milieu solide.

Nous avons suivi les étapes suivantes dans l'élaboration de l'algorithme :

### 1. Introduction des données

La longueur, la largeur, le nombre de nœuds totale, le pas du temps, la température initiale du solide, la température initiale du fluide, la masse volumique, la chaleur massique, le nombre d'itérations, le coefficient de convection, la conductivité thermique du solide, le nombre des nœuds frontière (les nœuds en contact avec le fluide), le nombre de nœuds suivant la largeur, la vitesse du fluide, le diamètre, la viscosité dynamique, le nombre de Prandtl.

### 2. Calcul des valeurs constantes

- Pas de l'espace  $\Delta x$  avec l'équation :  $\Delta x = \frac{AL}{n_f - 1} = \frac{W}{n_w - 1}$
- La diffusivité thermique  $\alpha$  par l'équation :  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
- Le nombre de Reynolds  $Re$  par l'équation :  $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$
- Nombre de Nusselt par la condition :
  - Si  $Re \leq 2300$  donc :  $Nu = \frac{hD}{\lambda} = 4,36$
  - Sinon :  $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}$
- Le coefficient de convection :  $h = \frac{\lambda_f Nu}{D}$
- Le nombre de Fourier avec l'équation :  $F_0 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$
- Le nombre de Biot avec l'équation :  $B_i = h \frac{\Delta x}{\lambda}$

### 3. Remplissage du vecteur de température initiale, température du fluide, la matrice 'a' et le vecteur 'b'

- Le remplissage du vecteur de température initial est effectué par la boucle :

De  $i=1$  jusqu'à  $n$  :

$$tetold(i) = T_i$$

- Le remplissage du vecteur de température du fluide est effectué par la boucle :

$$x(1) = 0.0$$

$$T_{lfluid}(1) = T_{fi}$$

De  $i=2$  jusqu'à  $nf$  :

$$x(i) = x(i-1) + Dx$$

$$T_{lfluid}(i) = \exp(-h * x(i) / (ro * D / 4 * V * Cp)) * (T_{fi} - tetold(i)) + tetold(i)$$

- Le remplissage de la matrice a :

On a réussi à réaliser un programme qui nous a permis de remplir n'importe quelle matrice, quel que soit sa taille à l'aide du programme ci-dessous :

De  $i=(nf+2)$  jusqu'à  $n$  :

De  $j=1$  jusqu'à  $(i-nf-1)$  :

$$a(i,j) = 0$$

$$a(j,i) = 0$$

De  $i=1$  jusqu'à  $nf$ :

$$a(i,i) = 1 + 2 * F0 * (Bi + 2)$$

$$a(i, i + nf) = -2 * F0$$

$$a(i + nf, i) = -F0$$

$$jj = (i + n - nf) \text{ et } kk = (i + n - 2 * nf)$$

$$a(jj, kk) = -2 * F0$$

De  $i=(nf+1)$  jusqu'à  $((nf-2)*nf)$  :

$$a(i,i) = 1 + 4 * F0$$

De  $i=(nf+1)$  jusqu'à  $(n-nf)$  :

$$a(i, i + nf) = -F0$$

De  $i=(nf+1)$  jusqu'à  $(n-2*nf)$  :

$$a(i + nf, i) = -F0$$

De  $i=((nf-2)*nf+1)$  jusqu'à  $n$  :

$$a(i,i) = 1 + 4 * F0$$

De  $i=1$  jusqu'à  $(n-2)$  :

De  $j=(i+2)$  jusqu'à  $(nf+i-1)$  :

$$a(i,j) = 0$$

$$a(j,i) = 0$$

De  $i=1$  jusqu'à  $(n-1)$  avec un pas qui est égale à  $(nf)$  :

$$a(i, i+1) = -2 * F0$$

$$a(i+1, i) = -F0$$

De  $i=(n-1)$  jusqu'à  $1$  avec un pas de  $(-nf)$  :

$$a(i, i-1) = -F0$$



De  $i=n_f$  jusqu'à  $(n-1)$  avec un pas de  $(n_f)$  :

$$a(i,i+1)=0$$

$$a(i+1,i)=0$$

De  $i=(n-1)$  jusqu'à  $(n_f-1)$  avec le pas de  $(-n_f)$  :

$$kk=i$$

De  $j=1$  jusqu'à  $(n_f-3)$  :

$$a(kk,kk-1)=-F_0$$

$$a(kk-1,kk)=-F_0$$

$$kk=kk-1$$

De  $i=n$  jusqu'à 2 avec un pas de  $(-n_f)$  :

$$a(i,i-1)=-2*F_0$$

$$a(i-1,i)=-F_0$$

➤ Le remplissage du vecteur  $b$  :

De  $i=1$  jusqu'à  $n_f$  :

$$b(i)=tetold(i) + 2*Bi*F_0*Tlound(i)$$

De  $i=(n_f+1)$  jusqu'à  $n$  :

$$b(i)=tetold(i)$$

#### 4. Solution par la méthode d'élimination de Gauss

Commençons d'abord par l'écriture de la matrice  $a$  sous forme triangulaire à l'aide de la boucle :

De  $k=1$  jusqu'à  $(n-1)$  :

De  $i=(k+1)$  jusqu'à  $n$  :

$$b(i)=b(i)-a(i,k)*b(k)/a(k,k)$$

De  $j=k+1$  jusqu'à  $n$  :

$$a(i,j)=a(i,j)-a(i,k)*a(k,j)/a(k,k)$$

De  $i=(k+1)$  jusqu'à  $n$  :

De  $j=1$  jusqu'à  $k$  :

$$a(i,j)=0$$

Le calcul des températures :

$$x(n)=b(n)/a(n,n)$$

De  $i=(n-1)$  jusqu'à 1 avec un pas de  $(-1)$  :

$$somme=0$$

De  $j=(i+1)$  jusqu'à  $n$  :

$$Somme=somme+a(i,j)*x(j)$$

$$x(i)=(b(i)-somme)/a(i,i)$$

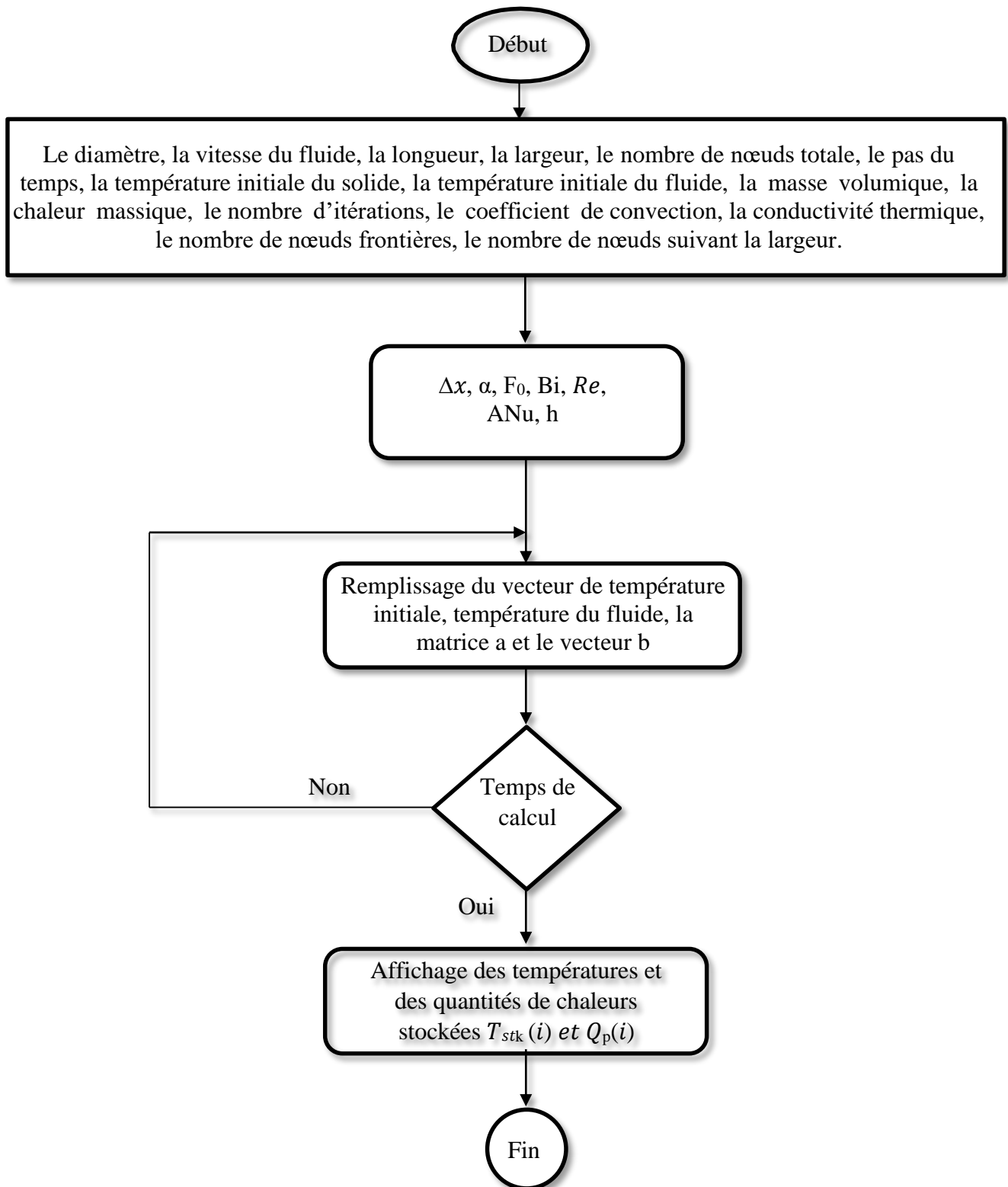
#### 5. Calcul de la quantité de chaleur stockée par l'équation

$$q_{ll} = q_{ll} + h*(T_f(i) - T(i))*\Delta t$$

## 6. Affichage des résultats de stockage dans un fichier externe

L'interprétation des résultats sera à l'aide du logiciel ORIGIN.

L'organigramme du programme de calcul :



### III.5 Modélisation du système étudié

Dans une installation solaire thermodynamique de production d'électricité, des capteurs solaires à concentration de rayonnements solaires sont utilisés pour générer de la vapeur qui alimente la turbine à vapeur. En parallèle, un circuit secondaire est installé pour transporter le fluide caloporteur à haute température vers la batterie de stockage, voir figure III-12, afin d'utiliser cette énergie ultérieurement.

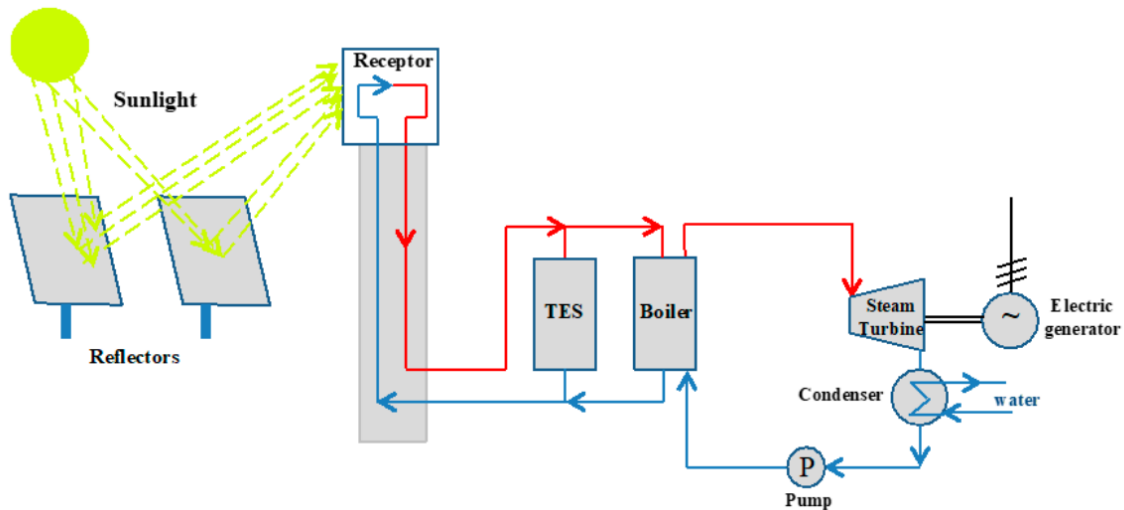


Figure III-12 : Schéma d'installation d'une centrale thermodynamique à tour, avec un système de stockage [83].

Notre étude vise à étudier le module de stockage de la chaleur sensible à haute température et à comparer le comportement dynamique du fluide caloporteur ainsi que le cycle de stockage dans les différents matériaux du milieu solide utilisé tel que le béton, la roche, le sable et la céramique.

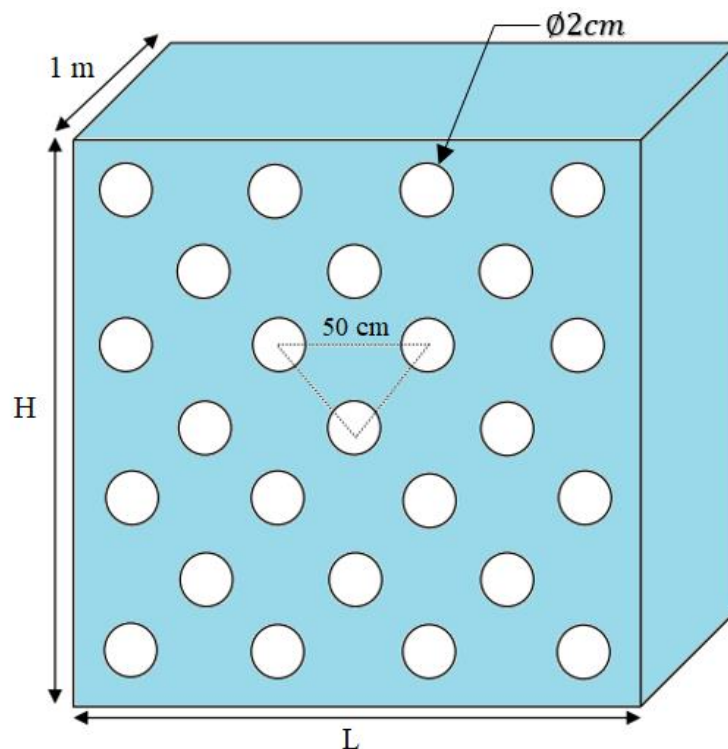
#### III.5.1 Description de la configuration étudiée

Le module de stockage de l'énergie thermique sensible utilise un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur lorsque le fluide s'écoule à travers des tubes dans une structure similaire à un échangeur de chaleur tubulaire intégré dans le matériau de stockage solide. La figure III-13 montre un exemple réel d'un module de stockage d'énergie thermique, étude de Yongfan Jian, et al.



*Figure III-13 : Module de stockage en béton et banque de tubes avant et après l'isolation [84].*

Dans notre étude, nous avons considéré le module représenté sur la figure III-14. Le fluide caloporteur circule dans les tubes, ou chaque trois tubes forment les sommets d'un triangle équilatéral de longueur  $2w$ . Le diamètre de chaque tube est  $2\text{cm}$  et la batterie de stockage est d'une longueur de  $1\text{m}$ .



*Figure III-14 : Dimensionnement du module de stockage [79].*

La distribution des tubes présentés permet à un stockage maximum de l'énergie thermique et qui crée des zones symétriques la raison qui conduit à simplifier le domaine de calcul en un domaine de longueur ( $AL$ ) et de largeur ( $W$ ) pour résoudre l'équation de la conduction bidimensionnelle et en régime instationnaire.

### III.5.1.1 Domaine de calcul

Le domaine de calcul représente une surface de milieu solide de stockage de l'énergie thermique de longueur  $AL$  et de largeur  $W$ . Le domaine de calcul est divisé uniformément par des distances  $\Delta x$  et  $\Delta y$  qui représentent le pas de l'espace suivant  $AL$  et  $W$  successivement comme illustré sur la figure III-15.

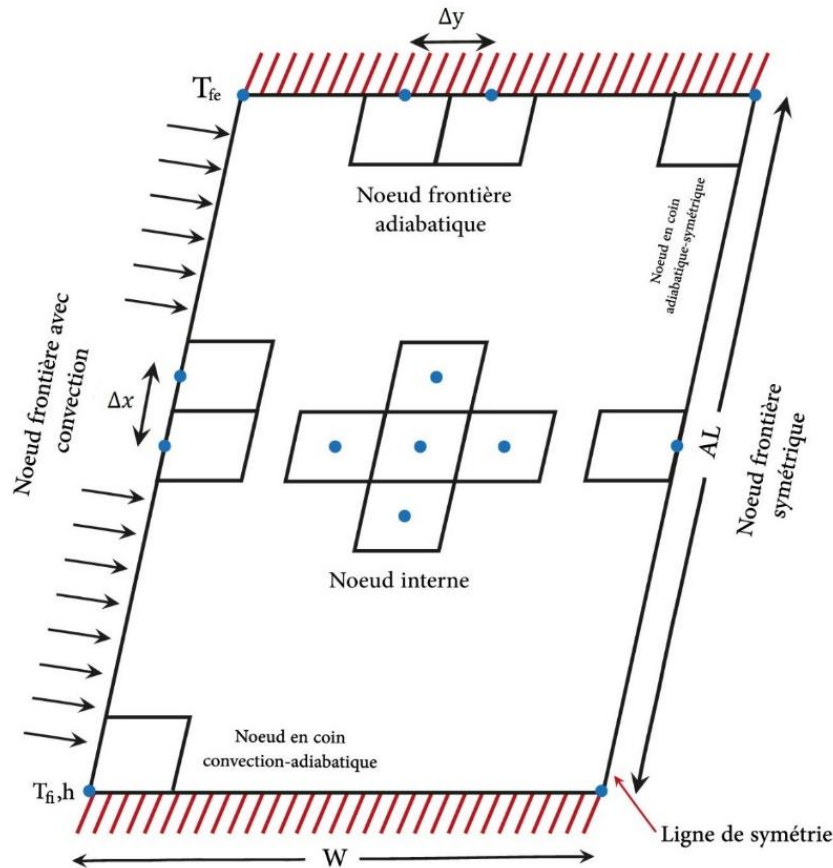


Figure III-15 : L'emplacement des nœuds dans le domaine de calcul.

Les conditions aux limites imposées sont les suivantes :

- Pour le nœud frontière symétrique, la condition de symétrie.
- Pour le nœud frontière adiabatique, la condition adiabatique.
- La température d'entrée du fluide caloporteur  $T_{fi}$  est de  $400^{\circ}\text{C}$ .

Les conditions initiales :

- la distribution initiale de température dans le milieu de stockage (solide)  $T_i$  est  $20^{\circ}\text{C}$ .
- la distribution de température du fluide par l'équation III-7.

Les propriétés thermo-physiques des solides et du fluide caloporteur sont illustrées sur le tableau III-1 :

*Tableau III-1 : propriétés de quelques matériaux de stockage sensible [85].*

<b>Matériau</b>	<b>Masse volumique [kg·m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Chaleur spécifique [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</b>	<b>Conductivité thermique [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</b>
<b>Béton</b>	2200	880	1.5
<b>Roche</b>	2560	879	2.2
<b>Sable</b>	1515	850	1
<b>Céramique</b>	3500	866	1.35

Nous avons utilisé une huile comme fluide caloporteur de propriétés suivantes :

*Tableau III-2 : propriétés du fluide caloporteur (l'huile).*

<b>Fluide caloporteur</b>	<b>Chaleur spécifique [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</b>	<b>Masse volumique [kg·m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Conductivité thermique (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>Viscosité dynamique (MPa.s)</b>	<b>Viscosité cinématique (mm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Huile</b>	2628	694	0.0756	0.146	0.211

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) tout en basant sur la conduction et la convection.

Ensuite, nous avons donné un aperçu sur la méthode des différences finies en basant sur le schéma implicite et représenter le programme de calcul réalisé sur le cas étudié.

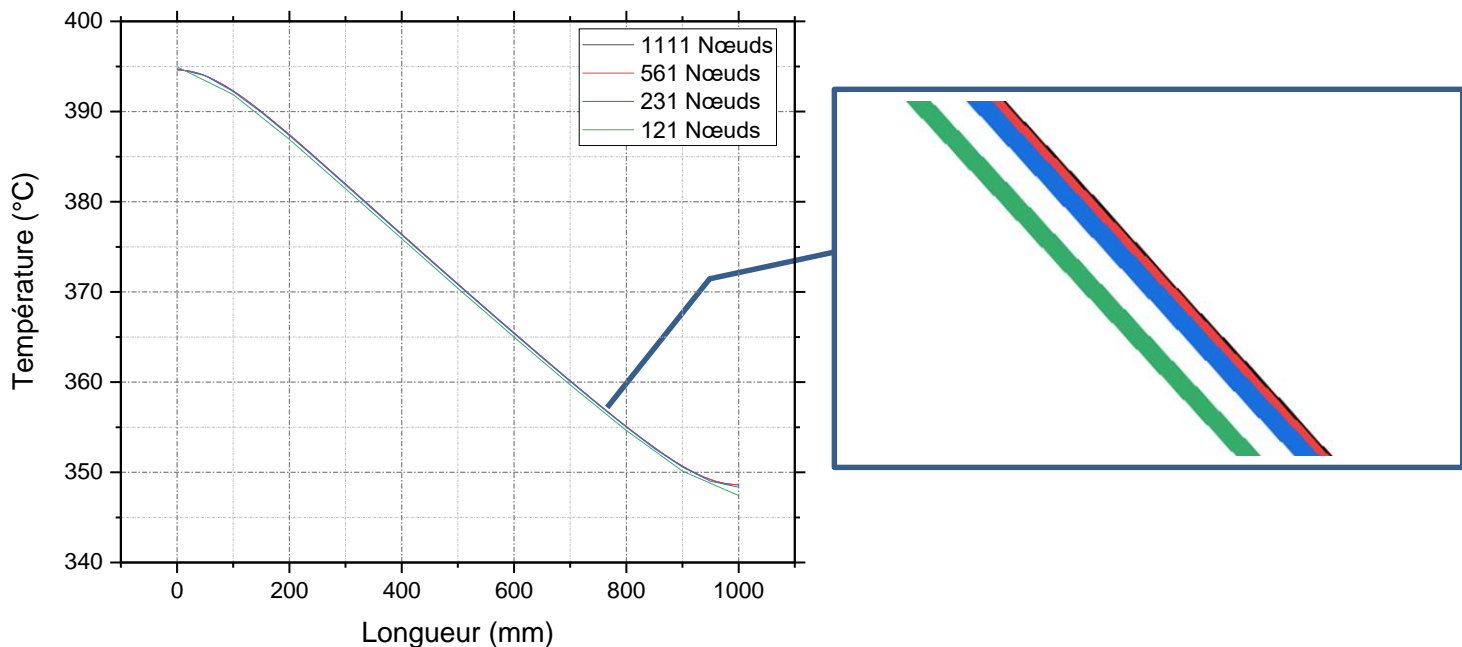
Les résultats obtenus après l'exécution seront présentés dans le dernier chapitre.

## IV.1 Validation de calcul

La distribution de température est vérifiée en fonction de la longueur pour plusieurs valeurs du pas d'espace  $\Delta x$  et du temps  $\Delta t$  afin de clarifier leurs effet sur les résultats obtenues.

### IV.1.1 Le choix du pas d'espace

La figure IV-1 représente la distribution de la température dans le solide pour plusieurs valeurs de pas d'espace  $\Delta x$ .



**Figure IV-1 :** Distribution de la température pour différentes valeurs de pas d'espace  $\Delta x$ .

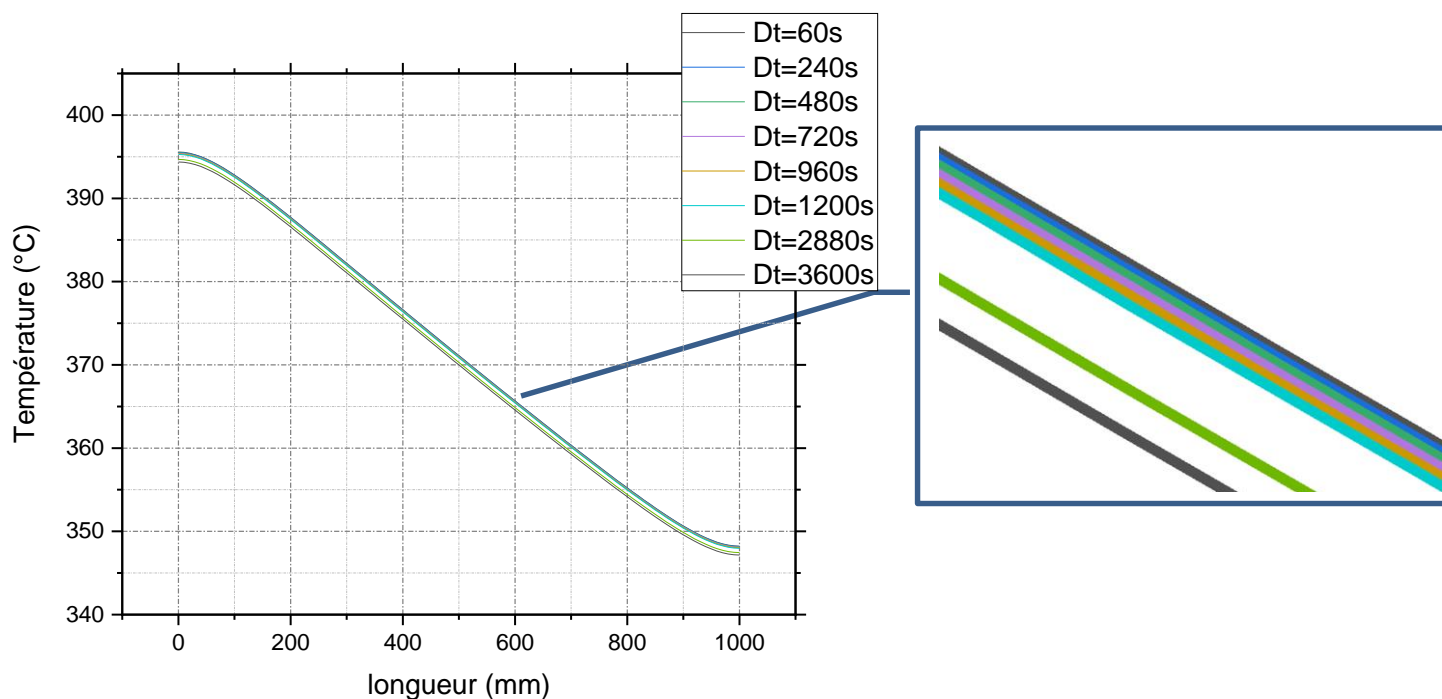
La figure IV-1 montre que la courbe de distribution de température dans le milieu solide se converge avec l'augmentation de nombre de nœuds. La variation de distribution de température pour les valeurs de nombres de nœuds supérieure ou égale à 561 ( $\Delta x$  inférieur à 20mm) est presque identique.

Il n'est pas nécessaire d'augmenter le maillage à un nombre de nœuds supérieure à 1111 nœuds, une telle augmentation va uniquement alourdis le temps de calcul.

Nous avons choisi un pas d'espace de 10mm qui correspond à un nombre de nœuds de 1111 dans nos calculs.

### IV.1.2 Le choix du pas de temps

La figure IV-2 représente la distribution de température en fonction de la longueur pour plusieurs valeurs de pas de temps  $\Delta t$ .



*Figure IV-2 : La distribution de la température selon différentes valeurs de pas de temps  $\Delta t$ .*

A partir de la figure IV-2, on a conclu qu'il y a une importante différence dans les courbes de la distribution de température qui correspondent successivement à un pas de temps de 3600s et 1200s. Cet écart se diminue avec la diminution du pas de temps et il devient presque nul pour les valeurs inférieure ou égal à 1200s.

Alors il est inutile d'avoir un pas d'espace inférieur à 10mm et un pas de temps inférieur à 1200s, ça ne vas qu'augmenter les efforts de calculs.

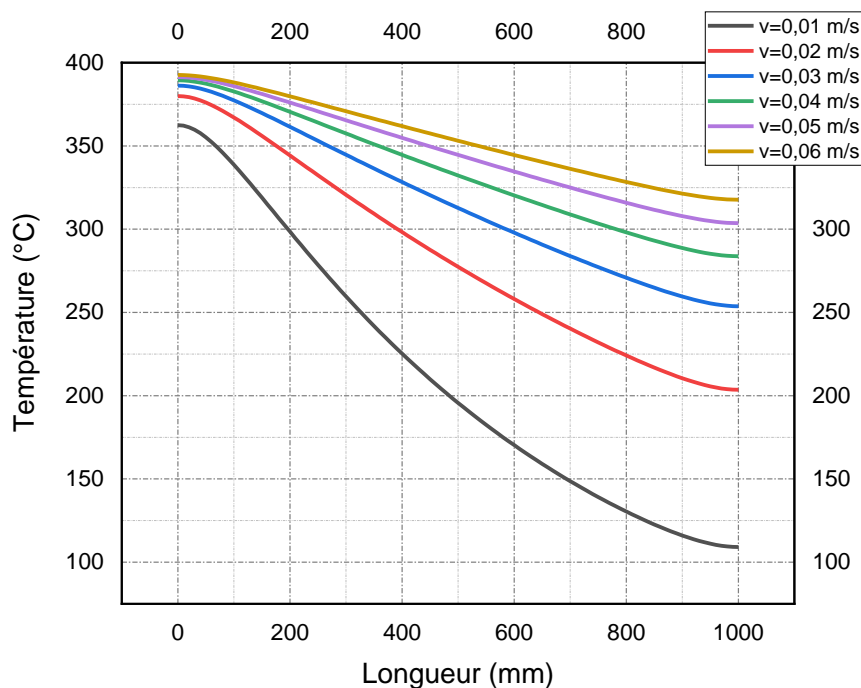
### IV.2 L'influence de la vitesse sur la distribution de température

Après avoir fait notre choix du pas d'espace et du pas de temps, on est censé de faire l'étude sur l'influence de la vitesse sur le profil de température.

Le fluide caloporteur circule dans les tubes avec une certaine vitesse qui détermine l'état d'écoulement (le régime d'écoulement). Cette vitesse a une influence sur le coefficient de convection et sur la distribution de température.

La figure IV-3 illustre l'influence de la vitesse du fluide caloporteur sur la distribution de température dans le milieu solide.





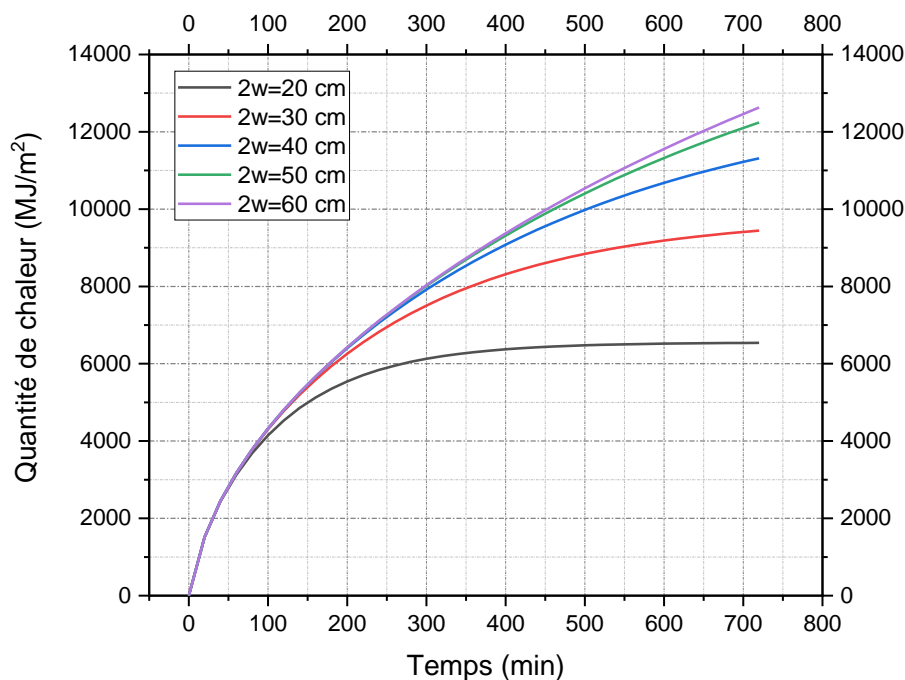
*Figure IV-3: l'influence de la vitesse du fluide caloporteur sur la distribution de température.*

Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse du fluide caloporteur provoque une augmentation dans la distribution de température dans le milieu de stockage. Cette augmentation est due à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur par convection de  $16.35 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  à  $149.92 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  qui correspond aux valeurs de vitesses de  $0.01 \text{ m/s}$  à  $0.06 \text{ m/s}$  successivement.

La vitesse élevée du fluide caloporteur engendre une grande perte de charge mais elle provoque au même temps un grand transfert de chaleur dans la batterie de stockage, ce qui justifie notre choix d'une vitesse de  $0.06 \text{ m/s}$  dans notre simulation.

### IV.3 La distance entre les tubes

La figure IV-4 représente la quantité de chaleur stockée pendant une journée pour différentes distances entre les tubes.



**Figure IV-4 :** la quantité de chaleur stockée pendant une journée pour différentes distances entre les tubes.

Les courbes représentées dans la figure IV-4 montrent l'influence des différentes valeurs de la distance entre les tubes ( $2w$ ) sur la quantité de chaleur, d'où cette dernière augmente avec l'augmentation de la distance entre les tubes.

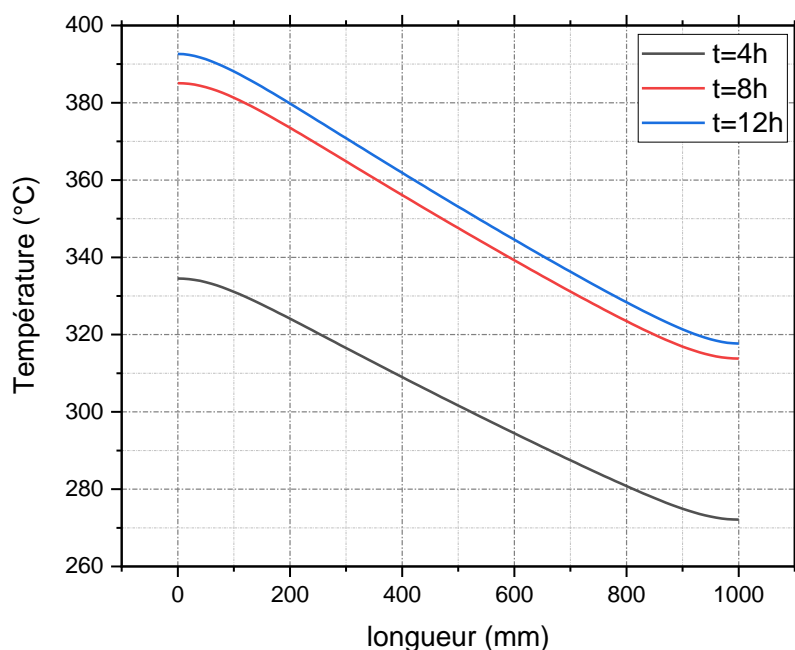
On remarque qu'à partir d'une distance de 50cm entre les tubes, l'augmentation de la quantité de chaleur stockée est non significative, d'où il est inutile d'augmenter cette distance qui amène la batterie de stockage vers des dimensions immenses, c'est pour cela qu'on a pris cette distance de 50cm.

#### IV.4 Stockage dans différents matériaux solides

Le calcul de distribution de la température dans les différents matériaux a été fait au niveau de la ligne de symétrie.

##### IV.4.1 Stockage dans le béton

La figure IV-5 illustre la variation de distribution de la température dans le béton pendant quatre, huit et douze heures.

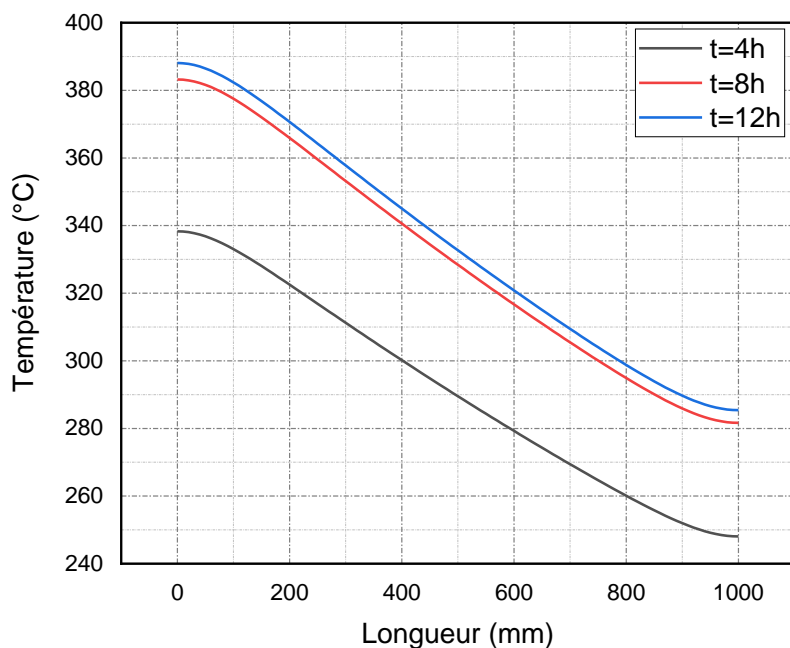


*Figure IV-5 : la variation de distribution de la température dans le béton pendant plusieurs durées.*

La température augmente avec le temps. Pour 4h elle est à 272°C puis elle atteint 317°C après 12h de stockage.

#### IV.4.2 Stockage dans le sable

La figure IV-6 montre la variation de distribution de la température dans le sable pendant quatre, huit et douze heures.

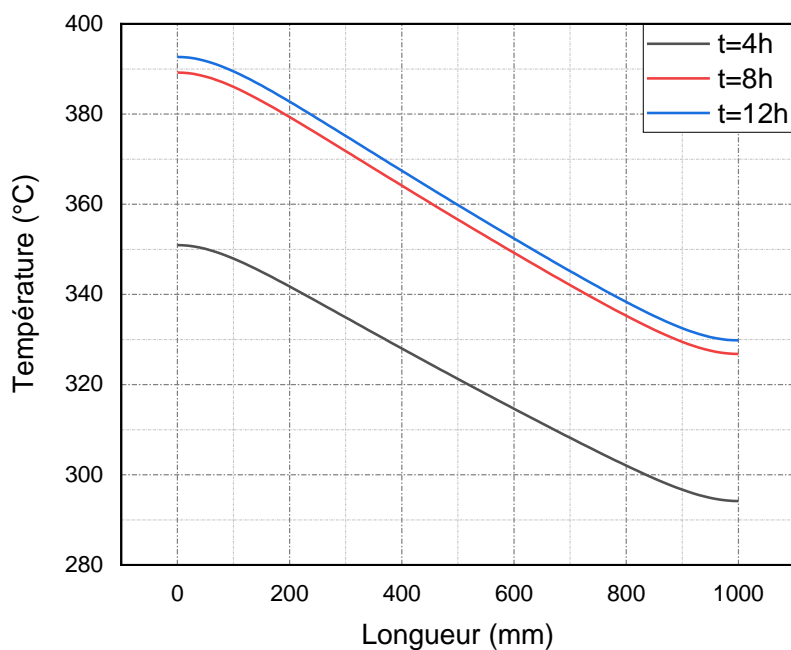


*Figure IV-6 : la variation de distribution de la température dans le sable pendant plusieurs durées.*

La température augmente avec le temps. Pour 4h, la température de stockage atteint 248°C puis elle continue à augmenter jusqu'à 285°C après 12h de stockage.

#### IV.4.3 Stockage dans la roche

La figure IV-7 représente la variation de distribution de la température dans la roche pendant quatre, huit et douze heures.

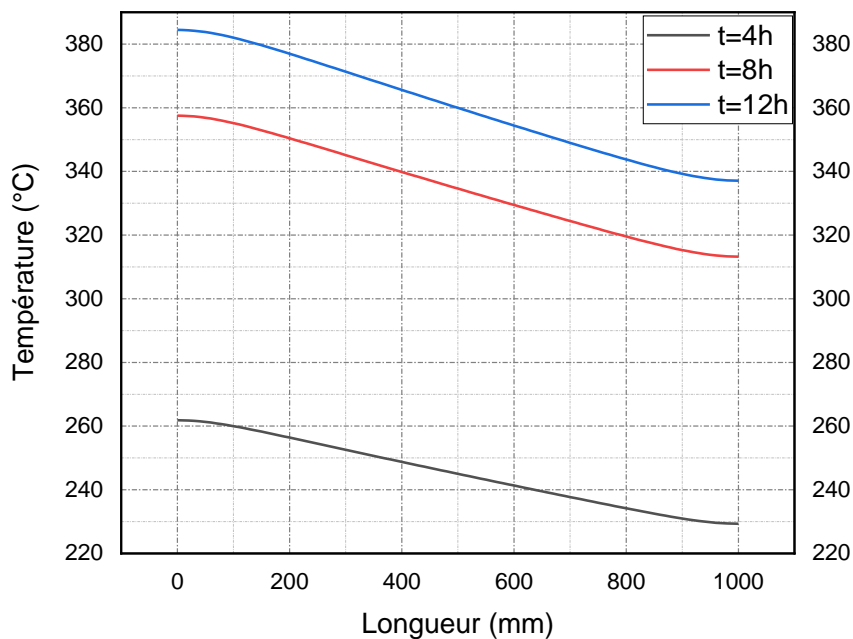


*Figure IV-7 : la variation de distribution de la température dans la roche pendant plusieurs durées.*

La température augmente avec le temps. Pour 4h, la température de stockage atteint 294°C puis elle continue à augmenter jusqu'à 329°C après 12h de stockage.

#### IV.4.4 Stockage dans la céramique

La figure IV-8 montre la variation de distribution de la température durant le stockage dans la roche pendant quatre, huit et douze heures.



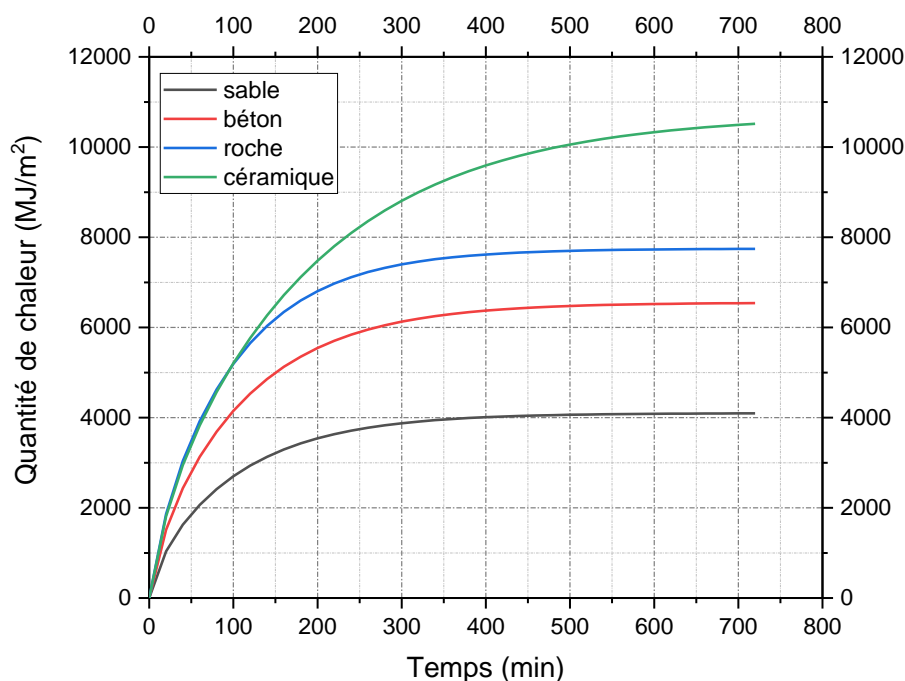
*Figure IV-8 : la variation de distribution de la température dans la céramique pendant plusieurs durées.*

La température augmente avec le temps. Pour 4h, la température de stockage atteint 229°C puis elle continue à augmenter jusqu'à 337°C après 12h de stockage.

Après certaines heures, la variation de température dans le solide commence à se stabiliser (l'écart entre les courbes se diminue) pour tous les matériaux étudiés, ce qui affecte la quantité de chaleur stockée.

### IV.5 La quantité de chaleur stockée dans les différents matériaux

La figure IV-9 représente la quantité de chaleur stockée dans les quatre matériaux durant une période de stockage de douze heures.



*Figure IV-9 : la quantité de chaleur stockée en fonction du temps dans les quatre matériaux.*

La quantité de chaleur maximale stockée dans le sable est de  $4094 \text{ MJ/m}^2$ , dans le béton est de  $6540 \text{ MJ/m}^2$ , la roche stocke  $7741 \text{ MJ/m}^2$  alors que la céramique stocke  $10515 \text{ MJ/m}^2$  dans la même durée de 12h. Le stockage de la chaleur diffère selon les matériaux utilisés. La conductivité thermique et la masse volumique du matériau sont les deux facteurs qui déterminent la quantité de chaleur.

Le matériau utilisé dans notre étude parmi la variété des matériaux qui existe est le béton vu que sa conductivité thermique élevée, chimiquement stable, pour son faible coût et sa disponibilité qui nous a permis d'avoir un cycle de charge souhaitable, et à partir de là nous garantissons un système de stockage plus performant.

### IV.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré pour les résultats obtenus dans notre simulation numérique de l'équation de conduction en régime instationnaire et bidimensionnelle.

Dans le cadre de cette simulation, on a débuté avec le choix du pas de temps et d'espace. Une bonne sélection de ces paramètres rendra meilleur les résultats de distribution de température et réduira le temps de calcul.

Ensuite et après l'étude de l'influence de la vitesse du fluide sur la distribution de température et sur la quantité de chaleur, on est obligé de choisir une telle vitesse dont les pertes de charges sont faibles.

Les résultats de cette simulation ont permis aussi de connaître la meilleure conception de ce système de stockage (le matériau de stockage, la distance entre les tubes...).

## Conclusion générale

La technologie des systèmes de stockage thermique (TES) est largement utilisée dans l'industrie, cette technologie nous a permis de mettre en réserve une quantité d'énergie (pendant la journée) provenant d'une source (le soleil) pour une utilisation ultérieure (pendant la nuit).

Le travail présenté dans ce mémoire a contribué à l'étude de faisabilité d'un système de stockage d'énergie thermique solaire en utilisant un matériau solide qui est le béton. Ce matériau a été choisi après la prise en compte de plusieurs facteurs.

La simulation réalisé dans ce mémoire a permis d'étudié numériquement le stockage d'énergie thermique solaire par chaleur sensible en utilisant la méthode des différences finies pour la résolution de l'équation instationnaire de la conduction avec un modèle bidimensionnel.

Dans notre étude, on a opté pour le choix d'une vitesse du fluide caloporteur de 0.06m/s ainsi qu'une distance de 50cm entre les tubes. Les résultats numériques confirment que l'utilisation du béton comme un matériau de stockage thermique à haute température est une technique performante, fiable et attrayante dans le domaine industriel.



## Référence bibliographiques

- [1] S.Zakaria, « Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage mixte (chaleur sensible et chaleur latente) » Faculté des sciences, Département de mécanique, Université Saad Dahlab Blida, 2013.
- [2] A.Z.Cheriet, L.Khiari, « Etude expérimentale d'échangeur de chaleur pour améliorer l'efficacité de réservoir de stockage thermique», faculté sciences et technologies, département de génie mécanique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018.
- [3] Z.Bekkari, M.Messaoudi, "Effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un réservoir de stockage thermique solide" Faculte de Technologie, Departement de Genie Mecanique, Université echahid Hamma Lakhdar el oued 2016.
- [4] N.Mahfoudi "Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide" faculté des sciences et technologies, département de génie mécanique, université Mohamed Khider Biskra 2016.
- [5] T. E. Schumann, "Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism," Journal of the Franklin Institute, vol. 208, pp. 405-416, 1929.
- [6] A. Saez and B. McCoy, "Dynamic response of a packed bed thermal storage system-a model for solar air heating," Solar energy, vol. 29, pp. 201-206, 1982.
- [7] O. E. Ataer, "Storage of thermal energy," in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2008.
- [8] C. Wyman, J. Castle, and F. Kreith, "A review of collector and energy storage technology for intermediate temperature applications," Solar energy, vol. 24, pp.517- 540, 1980.
- [9] S. Aly and A. El-Sharkawy, "Effect of storage medium on thermal properties of packed beds," Heat Recovery Systems and CHP, vol. 10, pp. 509-517, 1990.
- [10] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [11] D. Laing and S. Zunft, "4 - Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage (TES) systems," in Advances in Thermal Energy Storage Systems, L. F. Cabeza, Ed., Woodhead Publishing, 2015, pp. 65-86.
- [12] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes ," vol. 3, Wiley, New York, 1980.
- [13] D. Crandall and E. Thacher, «Segmented thermal storage «Solar energy, vol. 77, pp. 435-440, 2004.
- [14] C. Choudhury, P. Chauhan, and H. Garg, "Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy," Solar energy, vol. 55, pp. 29-37, 1995.
- [15] O. Maaliou and B. McCoy, «Optimization of thermal energy storage in packed columns," Solar energy, vol. 34, pp. 35-41, 1985.
- [16] A. P. Colburn, "Heat Transfer and Pressure Drop in Empty, Baffled, and Packed Tubes 1," Industrial & Engineering Chemistry, vol. 23, pp. 910-913, 1931.
- [17] G. Löf and R. Hawley, "Unsteady-state heat transfer between air and loose solids," Industrial & Engineering Chemistry, vol. 40, pp. 1061-1070, 1948.
-

- [18] P. Chandra and D. Willits, "Pressure drop and heat transfer characteristics of air-rockbed thermal storage systems," *Solar Energy*, vol. 27, pp. 547-553, 1981.
- [19] N. Standish and J. Drinkwater, "The effect of particle shape on flooding rates in packed columns," *Chemical Engineering Science*, vol. 25, pp. 1619-1621, 1970.
- [20] H. Torab and D. Beasley, "Optimization of a packed bed thermal energy storage unit," *Journal of solar energy engineering*, vol. 109, pp. 170-175, 1987.
- [21] J. P. Coutier and E. Farber, "Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds," *Solar Energy*, vol. 29, pp. 451-462, 1982.
- [22] A. M. Waked, "Solar energy storage in rocks," *Solar & wind technology*, vol. 3, pp. 27-31, 1986.
- [23] H. Singh, R. Saini, and J. Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1059-1069, 2010.
- [24] A. Srivastava, S. Hussain, B. Sharma, al .Tiwari thermal performance of ground as an inexpensive solar collector and storage. *System energy convers. Mgmt.* Vol. 22, pp. 197 to 204, 1982.
- [25] B.Dhifaoui, S. Benjabrallah, A. Belghith, et al. Experimental study of the dynamic behaviour of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol 46. pp 1056-1063. (2007).
- [26] A. Fernandez, M. Martínez, M. Segarra, I. Martorell, and L. Cabeza, "Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, pp. 1723-1729, 2010.
- [27] N. Mahfoudi, A. Khachkouch, A Moumami B. Benhaoua, M. El Ganaoui, Design and characterization of a portable heat storage facility *Mecannics & Industry*, 16, 411 (2015).
- [28] N.Mahfoudi, A. Moumami, M. El. Ganaoui, Sand as a Heat Storage Media for a Solar Application: Simulation Results, *Applied Mechanics and Materials* 621 (2014), 214-220.
- [29] N.Abdul jabbar, Khalifa, al. A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings* Vol. 41,pp 407–415. (2009).
- [30] Mahmud M.Alkilani, al. Review of solar air collectors with thermal storage units *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1476–1490.
- [31] G. Zhou, J. HE Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes *Applied Energy* 138 (2015) 648–660.
- [32] D. Sragovich, Transient analysis for designing and predicting operational performance of a high temperature sensible thermal energy storage system, *Solar Energy* vol. 43, no. i, pp. 7-16, 1989.
- [33] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modélisation, *Renewable and sustainable energy reviews* 14 (1) (2010) 31-55.
- [34] Likhendra Prasad, P. Muthukumar Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application *Solar Energy* 97 (2013) 217-229.
- [35] Mohammed BECHIRI et Kacem MANSOURI, « Stockage d'Énergie par Chaleur Sensible dans les Conduites Planes et Cylindriques avec Convection Forcée Laminaire », 16
-

ème Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013.

[36] N.Bendimerad et A.Berrabah « Optimisation expérimentale d'une unité de stockage thermique par chaleur latente » faculté des technologies, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2019.

[37] Z.BEKKARI, M.MESSAOUDI, "Effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un réservoir de stockage thermique solide" Faculte de Technologie, Departement de Genie Mecanique, Université echahid Hamma Lakhdar el oued 2016.

[38] W.Foudhil « SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE DANS UN CANAL POREUX : ANALYSE DES PERFORMANCES ET COMPARAISON » 2eme Congres de l'Association Marocaine de Thermique, 29 Juin 2017.

[39] J. DUFFIE, W. BECKMANN, Solar Engineering of thermal Processes, John Wiley and Sons, New York, 1980.

[40] A. BENMANSOUR, M.A. HAMDAN, Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe de sphères contenant un matériau à changement de phase, Revue d'Énergie Renouvelable, 4, 125134, 2001.

[41] J. MILETTE Conception, instrumentation, modélisation et analyse d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente, Thèse Ph.D., Université de Sherbrooke, Canada, 2000.

[42] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energystorage technologies, Part I: heatstoragematerials and techniques," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.

[43] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energystorage technologies, Part II: cool thermal storage," Energy Conversion and Management, vol. 39, pp. 1139-1153, 1998.

[44] I. Dincer and M. Rosen, "Thermal energystorage:systems and applications," 2nd ed. John Wiley& Sons, 2011, pp. 84-141.

[45] G. P. Henze, and M. Krarti, "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory," University of Nebraska, Lincoln, University of Colorado, Boulder, Tech. Rep. Ap. 2003.

[46] N.Mahfoudi «Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide». Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra 2016.

[47] Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité. (12/10/2015) [Online]. <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etatde-maturite#4>.

[48] J. Xu, R. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energystorage," Solarenergy, vol. 103, pp. 610-638, 2014.

[49] A. Fernandez, M. Martínez, M. Segarra, I. Martorell, and L. Cabeza, "Selection of materials with potential in sensible thermal energystorage," SolarEnergyMaterials and SolarCells, vol. 94, pp. 1723-1729, 2010.

---

- [50] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L. F. Cabeza, "State of the art on hightemperature thermal energystorage for power generation. Part 2—Case studies," *Renewable and SustainableEnergyReviews*, vol. 14, pp. 56-72, 2010.
- [51] M. E. Navarro, M. Martínez, A. Gil, A. Fernández, L. F. Cabeza, R. Olives, and X. Py, "Selection and characterization of recycledmaterials for sensible thermal energystorage," *SolarEnergyMaterials and SolarCells*, vol. 107, pp. 131-135, 2012.
- [52] A. El-Sebaili, S. Yaghmour, F. Al-Hazmi, A. S. Faidah, F. Al-Marzouki, and A. AlGhamdi, "Active single basin solarstillwith a sensible storage medium," *Desalination*, vol. 249, pp. 699-706, 2009.
- [53] J. C. Hadorn et al, "Thermal energystorage for solar and lowenergy buildings, State of the art by IEA SolarHeating and CoolingTask 32," Typeset by Servei de Publicacions (UdL). ISBN 84-8409-877-X, 2005.
- [54] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energystoragewith phase change:materials, heattransferanalysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [55] L. F. Cabeza, "Advances in thermal energy storage systems: Methods and Applications," Woodhead Publishing, 2014.
- [56] Jean-Francois Hoffmann, « Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en œuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés », Thèse de Doctorat de l'Université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2015.
- [57] M. PIERRE PARDO, « Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique. », Thèse de Doctorat de l'Université de TOULOUSE, 2013.
- [58] A.Chekkaba et A.Bouguerra « Simulation Numérique du Stockage d'Énergie Solaire Thermique d'une Installation Thermodynamique ». Mémoire master. IMSI Université d'oran 2 MBA. 2020
- [59] [Www. sitelyceejdarc.org](http://www.sitelyceejdarc.org)
- [60] Souad BABAY et al, «Review on thermal energy storage systems», *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur*, Vol. 1 N° 4/2009.
- [61] E.Bencheikh et O.Benzine, «Etude expérimentale de différents modes de stockage d'énergie dans une cheminée solaire». Mémoire master. Université kasdi merbah ouargla 2018.
- [62] O.Pauvert, Etude structurale de sels fondus d'intérêts nucléaires par RMN et EXAFS haute température, Thèse, Université d'Orléans, 23 Octobre 2009.
- [63] D. Pahud, A. Fromentin, and Markus Hubbuch. «Heatexchanger pile system of the dockmidfieldat the Zurich airport, detailed simulation and optimization of the installation». Technical Report 120.110, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, LASEN, EPFL, Décembre 1999. Rapport final.
- [64] Harmeet Singh, R.P. Saini, and J.S. Saini. A «review on packed bed solar energy storage systems». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3):1059-1069, 2010.
-

- [65] Xavier Py. «Stockage de l'Energie par chaleur sensible», Cours de Master 2 \_ Energie Solaire, Université de Perpignan Via Domitia, Laboratoire PROMES. 2008, 2008.
- [66] <https://opera-energie.com/energie-solaire/>
- [67] O.BELOUNIS, Cours Exploitation des énergies renouvelables, Chapitre2 : Exploitation d'énergie solaire
- [68] <https://www.scribd.com/doc/17224691>
- [69] M.Bidi « Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures » Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, Université de M'sila, 26 juin 2019.
- [70] <http://www.energies-renouvelables.org/accueil-systemes-solaires.asp>
- [71] [https://www.pinterest.fr/Gaëlle\\_Face/technik-energie-centrale-solaire-thermodynamique/](https://www.pinterest.fr/Gaëlle_Face/technik-energie-centrale-solaire-thermodynamique/)
- [72] [www.energieplanet.fr](http://www.energieplanet.fr)
- [73] Theodore L. Bergman and Adrienne S. Lavine. « Fundamentals of heat and mass transfer ». John Wiley & Sons, eighth edition, 2017.
- [74] cours université usto « introduction aux transferts thermique » ([www.univ-usto.dz](http://www.univ-usto.dz))
- [75] Yves JANNOT, Cours « transferts thermiques », 2ème année, école de mines Nancy, 2012.
- [76] Maifi Lyes, « Etude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque », thèse Doctorat en science de physique UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1, 2018.
- [77] Souad ABDERAFI, cours « Transfert de chaleur » ([www.almohandiss.com](http://www.almohandiss.com))
- [78] [https://www.researchgate.net/figure/Les-deux-differents-modes-decoulements-rencontres-a-ecoulement-laminaire-Re1-et\\_fig3\\_41133063](https://www.researchgate.net/figure/Les-deux-differents-modes-decoulements-rencontres-a-ecoulement-laminaire-Re1-et_fig3_41133063)
- [79] A.Chekkaba et A.Bouguerra « Simulation Numérique du Stockage d'Énergie Solaire Thermique d'une Installation Thermodynamique ». Mémoire master. IMSI Université d'oran 2 MBA, 2020.
- [80] <https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Hydraulique/Chapitre%20IX%20R%C3%A9gimes%20d%E2%80%99Ecoulement.pdf>
- [81] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-rayonnement-thermique-16047/>
- [82] BERIACHE M'hamed, «Simulation Numérique de la Conduction de Chaleur en 03 Dimensions par la Méthode des Différences Finies en Régimes Permanent et Variable ». Université hassiba ben bouali chlef, 2004.
- [83] Enescu, Diana, et al. « Thermal energy storage for grid applications : current status and emerging trends ». Energies, 2020, vol13, no2, p340.
- [84] Yongfang Jian, Fengwu Bai, Quentin Falcoz, Chao Xu, Yan Wang, Zhifeng Wang, « Applied Thermal Engineering », 2014.
- [85] E.Bencheikh et O.Benzine, «Etude expérimentale de différents modes de stockage d'énergie dans une cheminée solaire», Mémoire master, Université kasdi merbah ouargla, 2018.
-

## Annexe

### Programme FORTRAN élaboré pour les calculs :

Program Explicit-2D

Parameter (nmax=20000) !the value of nmax cannot be changed during program execution  
Dimension a(nmax,nmax), x(nmax), tetold(nmax), tetn(nmax), b(nmax), q(nmax),  
qq(nmax), qp(nmax), Tlound(nmax)  
dimension aa(nmax,nmax)

Amu=0.000146

Akf=0.075

Pr=5.075

Write(\*,\*) 'please provide : diameter, velocity '

read(\*,\*) D, v

Re=694.\*D\*v/Amu

if (re<=2300) then

    ANu=4.36

    else

    ANu=0.023\*(Re\*\*0.8)\*(Pr\*\*(1/3.))

endif

h=ANu\*Akf/D

write(\*,\*) Re, ANU, h

pause

write(\*,\*) 'please provide : Length, width, Number of nodes, Time step, Initial T, Tfi, masse  
volumique, chaleur massique, Number of iterations, coef of convection, conductivité  
thermique '

read(\*,\*) Al, w, ni, tt, Ti, Tfi, ro, Cp, nn, h, Thc, nf, nw, Dx

AL=1

w=0.1

ni=1111

tt=1200

Ti=20

Tfi=400

ro=2200

```

Cp=880
nn=36
!h=151.2
Thc=1.5
nf=101
nw=11
Dx=Al/(nf-1) !DELTA X
write(*,*) ' Dx= ', Dx
pause

Alfa=Thc/(ro*Cp)
F0=Alfa*tt/Dx**2
write (*,*) 'f0=', f0
n=ni  ! Number of nodes without BL nodes
do i=1,n
    tetold(i)=Ti
    write(*,*) ' tetold(',i,')=', tetold(i)
enddo
pause

! CALCULATION GRID
ni <= nmax
Dx=Al/ (nf-1)  ! DELTA X
Bi=h*Dx/Thc

! GRID VECTOR
x(1)=0.0
Tlound(1)=Tfi
Do i=2,nf
    x(i)=x(i-1)+Dx
    Tlound(i)=exp(-h*x(i)/(ro*D/4*V*Cp))*(Tfi-tetold(i))+tetold(i)
    write(*,*) ' Tlound(',i,')=', Tlound(i)
Enddo
pause

do k=1,nn
    pause
! UPDATE 09/09/21 2D FILLING MATRIX a

    do i= (nf+2), n
        do j=1, (i-nf-1)
            a(i,j)=0
            a (j,i)=0

```

```
        enddo
    enddo
do i=1, nf
    a(i,i)=1+2*F0*(Bi+2)
    a(i,i+nf)=-2*F0
    a(i+nf,i)=-F0
    jj=i+n-nf
    kk=i+n-2*nf
    a(jj,kk)=-2*F0
enddo
do i=(nf+1), ((nf-2)*nf)
    a(i,i)=1+4*F0
enddo
do i=(nf+1),(n-nf)
    a(i,i+nf)=-F0
enddo
do i=(nf+1),(n-2*nf)
    a(i+nf,i)=-F0
enddo
do i=((nf-2)*nf)+1,n
    a(i,i)=1+4*F0
enddo
do i=1,n-2
    do j=i+2, nf+i-1
        a(i,j)=0
        a(j,i)=0
    enddo
enddo
do i=1,n-1,nf
    a(i,i+1)=-2*F0
    a(i+1,i)=-F0
enddo
do i=n-1,1,-(nf)
    a(i,i-1)=-F0
enddo
do i=nf,n-1,nf
    a(i,i+1)=0
    a(i+1,i)=0
enddo
do i=n-1,nf-1,-(nf)
    kk=i
do j=1,nf-3
    a(kk,kk-1)=-F0
```



```

        a(kk-1,kk)=-F0
        kk=kk-1
    enddo
enddo
do i=n,2,-(nf)
    a(i,i-1)=-2*F0
    a(i-1,i)=-F0
enddo

! FILLING VECTOR b
do i=1,nf
    b(i)=tetold(i)+2*Bi*F0*Tlound(i)
enddo
do i=nf+1,n
    b(i)=tetold(i)
enddo

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Verification
do i=1,n
    write(*,*) 'b('i,')=',b(i)
do j=1,n
    write(*,*) ' a('i,','j,')=',a(i,j)
enddo
pause
enddo
Pause
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!solution
    Call Tri (a, b, tetn, n)
    t=(k*tt)/60

! Displaying results on the screen
write(*,20) t
write(*,*) 'tetn('i,')=',(tetn(i),i=1,n)
pause
do i=1,n
    tetold(i)=tetn(i)
enddo
write(*,*) ' tetold('i,')=', tetn(i)
pause

```

```

    qll=0
    do i=1,nf
        qll=qll+h*(Tlound(i)-tetn(i))*tt
    enddo
    q(k)=qll/1000000
    Write(*,*) 'q('k,')=', q(k)
    pause

! Writing results to an output file
    Open(1,file='tt.dat')

    write(*,*) k, t

    do i=1,ni
        Write(1,*) t
    enddo

    Open (4, file='implicit.dat')

    do i=1,n
        write(*,*) ' tetn('i,')=' , tetn(i)
    enddo
    pause

enddo

    mm=1
    do ii=1,nw
        do jj=1,nf
            a(ii,jj)=1
            a(ii,jj)=tetn(mm)
            mm=mm+1
        enddo
    enddo
    open (5, file='temp.dat')
    i=11
    do j=1,nf
        y=0
        open (5, file='temp.dat')
        write (5,*) a(i,j)
        write (*,*) 'a('i,',',j,')=',a(i,j)
        !write (*,*) x, y, a(i,j)
        !y=y+Dx
    enddo
    pause
```

```

        enddo
        pause
        !x=x+Dx
    enddo
enddo
pause
close(5)
Close(1)
pause
open (7,file='quantité .dat')
qq(0)=0
write(*,*) 'qq(,1,)'=, qq(1)
do L=1,nn
    qq(L)=q(L)+qq(L-1)
    write(*,*) 'qq (,L,)'=, qq(L)
    pause
enddo

do i=1,nn
    qp(i)=qq(i)
    Open (2,file='quantité de chaleur accum.dat')
    write(2,20) t
    write(2,*)'q(,L,)'=, q(L)
    write(*,*)'qp(,i,)'=, qp(i)
    write(2,*) qp(i)
enddo

        pause
        ! write(*,*) 'q(,1,)'=, q(1)
        close(2)

!!!
30 Format (f8.2,10f8.3,/)
10 Format (/,2x,3A8,/)
20 Format (2x,3f10.3)

write(*,*) ' we did it 10/2021'
pause
End
```

Subroutine Tri (a, b, x, n)

```
Parameter (nmax=20000)
Dimension a(nmax,nmax),b(nmax),x(nmax)
pause

!triangular form
Do k=1,n-1
  Do i=k+1,n
    b(i)=b(i)-a(i,k)*b(k)/a(k,k)
    Do j=k+1,n
      a(i,j)=a(i,j)-a(i,k)*a(k,j)/a(k,k)
    Enddo
  Enddo
  Do i=k+1,n
    Do j=1,k
      a(i,j)=0
    Enddo
  Enddo
Enddo
! Solution
x(n)=b(n)/a(n,n)
Do i=n-1,1,-1
  somme=0
  Do j=i+1,n
    somme=somme+a(i,j)*x(j)
  Enddo
  x(i)= (b(i)-somme)/a(i,i)
Enddo
Return
End
```