



Faculté de technologie

Département de génie mécanique

**Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de master
en génie mécanique
Option : Génie énergétique**

Thème :

*Etude et comparaison entre le stockage thermique par la chaleur sensible et
le stockage thermique par la chaleur latente (MCP)*

Présenté Par :

MALEK Abdenebi

Le 15 / 06 / 2015

Soutenu devant les membres de jury:

Mr. KORTI A.N.	Président	Univ. Tlemcen
Mme. SAIB.H	Encadreur	Univ. Tlemcen
Mr. SELKA.G	Examineur	Univ. Tlemcen
Mme. BENSEDIK.L	Examineur	Univ. Tlemcen

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2014-2015

Remerciement

*Je remercie vivement et chaleureusement Mme **SAIB Hind** encadreur de ce mémoire, pour m'avoir soutenu et guidé tout au long de ce mémoire. Je la remercie particulièrement pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour sa rigueur scientifique, pour sa patience et pour ses conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur. **KORTI Nabil Abdelillah** Qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude..*

*J'exprime mes vifs remerciements à **Mme .L.BENSEDIK** et Monsieur **SELKA.G** pour avoir accepté de faire partie du jury, montrant ainsi l'intérêt qu'ils portent au sujet de ce travail.*

*Notre sincère remerciement à Monsieur **A. RETERI** et Monsieur **O.BENDERMEEL** pour son aide précieuse en rapport avec le logiciel utilisé, durant toute la réalisation de ce mémoire*

A tous, je tiens à exprimer mes sincères remerciements.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes très chers parents,
votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien
durant ce long parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande
reconnaissance pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit
de toutes vos prières et vos efforts.*

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis .Nounou. Amin.monir.Aziz.Nabil...

A tous mes collègues de Maser 2 en Gémie Energétique.

A tous les membres de la famille MALEK

Abdenebi.youcef

Résumé

Résumé :

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié le stockage d'énergie solaire par chaleur latente et par la chaleur sensible avec une simulation numérique effectuée par le code de calcul **Fluent**. Nous avons effectué plusieurs simulations d'un échangeur cylindrique en position horizontal. Le premier, est rempli par un Matériau à Changement de Phase (RT31) ainsi que le deuxième modèle, est rempli par un matériau solide (la roche). A travers les deux modèles, circule de l'eau à l'intérieur d'une canalisation pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées.

Une comparaison sur le comportement dynamique et thermique des deux modèles a été étudiée. Les effets de différents paramètres sur ces comportements tels que l'épaisseur de l'élément de stockage est examiné.

Mot clé : stockage par la chaleur latente, stockage par la chaleur sensible, échangeur chaleur , matériau à changement de phase, simulation numérique.

Résumé

Abstract

As part of our project, we studied the storage of solar energy by latent heat and by sensible with a numerical simulation performed by the code **Fluent**. We performed several simulations with cylindrical exchangers filled with first time a Phase Change Material (PCM), second time filled with solid material (the Roche). Inside a water pipe passes through to store heat during sunny periods, A comparison between the two times and effect of thickness as well on the storage of solar energy have been presented.

Keywords: Latent heat storage; Sensible heat storage; Heat exchanger; Phase Change Materials; numerical simulation.

Résumé

ملخص :

كجزء من مشروعنا، درسنا تخزين الطاقة الشمسية الحرارية الكامنة و حرارة معقولة مع المحاكاة العددية التي تقوم بها رمز بطلاقة CFD . أجرينا عدة محاكاة مبادل حراري أسطواناني في وضع أفقي الحالة الأولى يشغلها تغيير المواد المرحلة (PCM) والحالة الثانية مليئة المواد الصلبة (الصخور) ، يمر عبرها أنبوب مليء بالماء الساخن لتخزين الحرارة خلال فترات مشمسة . تم عرض مقارنة بين الحالتين وتأثير سمك على تخزين الطاقة الشمسية.

كلمات مفتاحية: تخزين الحرارة الكامنة عن طريق الحرارة معقولة. مبادل حراري. مرحلة تغيير المواد لديها . المحاكاة العددية

Nomenclature

Nomenclature

Symboles Latins :

C_p	Chaleur spécifique	$J. Kg^{-1}.K^{-1}$
f_ℓ	Fraction liquide	
L_S	Chaleur latente de fusion	$J. Kg^{-1}$
T	Température	K
t	Variable du temps	S
u	Vitesse suivant x	$m.s^{-1}$
v	Vitesse suivant y	$m.s^{-1}$
Q	Quantité de la chaleur	$J. Kg^{-1}.K^{-1}$
x,y	Coordonnées cartésiennes	
g	l'accélération gravitationnelle	$m .s^{-2}$
L	Longueur	m
h	Epaisseur	m
d	Diamètre de tube	m

Symboles Grecs :

ρ	masse volumique	$Kg.m^{-3}$
λ	conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
μ	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
h	Coefficient d'échange	$W.m^{-2}.K^{-1}$
β	coefficient d'expansion thermique.	K^{-1}

Nomenclature

Indice :

s : solide

ℓ : Liquide

_{ref} : référence

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : énergie de stockage d'énergie

I.	L'énergie	01
I.1	Introduction Générale	01
I.1.1	Sources d'énergie	01
I.1.2	Les différentes formes d'énergies	02
I.1.2.1.1	Energie non –renouvelable	03
I.1.2.2	L'impact environnemental des énergies non-renouvelables	04
I.1.2.2.1	. L'impact environnemental des énergies fossiles	04
I.1.2.2.2	L'impact environnemental du nucléaire	04
I.1.3	Energies renouvelables.....	05
I.1.3.1.1	Energie éolienne:	06
I.1.3.1.2	Energie hydraulique.....	07
I.1.3.1.3	Energie géothermique.....	08
I.1.3.1.4	La biomasse	08
I.1.3.1.5	L'énergiesolaire	08
I.1.3.1.5.1	Les avantages et inconvénient de l'énergie solaire.....	12
I.2	Stockage d'énergie	12
I.2.1	Intérêt :	13
I.2.2	Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie :	13
I.2.3	Le choix des technologies de stockage :	14
I.2.4	Comment stocker de l'énergie :	15
I.2.4.1	Stockage mécanique :	15
I.2.4.2	Stockage électrochimique :	16
I.2.4.3	Stockage Thermique:	17
I.2.4.3.1	Stockage thermochimique	17
I.2.4.3.2	Stockage d'énergie Thermique:	18
I.2.4.3.3	Stockage thermique par la chaleur sensible.....	19
I.2.4.3.4	Stockage thermique par la Chaleur latente	19

Chapitre II : stockage par la chaleur sensible

II.1	Introduction	20
II.1.1	Définition de Stockage par chaleur sensible.....	21
II.3	Les matériaux de stockage par la chaleur sensible :	22
II.3.1	Matériaux liquides.....	22
II.3.1.1	Eau	22
II.3.1.2	Huiles	23
II.3.2	Matériaux solides	24
II.3.2.1	Roches, béton et briques	24
II.3.2.2	Métaux	25
II.3.3	Solutions technologiques :	26

Chapitre III :stockage des énergies thermique par la chaleur latente

III.1 Introduction.....	33
III.2 Phénomène de changement de phase :.....	34
III.2.1 Définition de la chaleur latente :	34
III.2.2 Modélisation mathématique du phénomène de changement de phase :.....	36
III.2.2.1 Schémas avec maillage mobile :.....	36
III.2.2.2 : Schémas avec maillage fixe :.....	37
III.2.2.2.1 : Méthode de la capacité effective :	37
III.2.2.2.2 : Méthode enthalpique :	38
III.3 Les matériaux à changement de phase MCP	39
III.3.1 Introduction	39
III.3.2 Propriétés des matériaux à changement de phase	40
III.3.2.1 Critères thermodynamiques	40
III.3.2.2 Critères cinétiques	40
III.3.2.3 Critères chimiques	40
III.3.2.4 Critères économiques	41
III.3.3 Différentes types des MCP	41
III.3.3.1 Les MCP inorganiques	41
III.3.3.2 Les MCP organiques	42
III.3.3.3 Les paraffines	42
III.3.3.4 Les acides gras	43
III.3.3.5 Les MCP Eutectique	43
III.3.4 Avantages et les inconvénients des MCP	45

Chapitre IV : position de problème

IV.1 Introduction.....	54
IV.1.1 Hypothèses simplificatrices :	54
IV.2 Modèle01 : Stockage thermique par la chaleur latente:.....	55
IV.2.1 Modèle physique :.....	55
IV.2.2 Formulations mathématique	56
IV.3 Modèle02 : Stockage thermique par la chaleur sensible:	58
IV.3.1 Modèle physique	58
IV.3.2 Formulation mathématique	59
IV.3.3 Les conditions initiales et aux limites :	59
IV.3.3.1 Conditions initiales :	59
IV.3.3.2 Conditions aux limites :	60
IV.4 Simulation numérique :.....	60
IV.4.1 Création de la géométrie :	61
IV.4.2 Choix du maillage :	62
IV.4.3 Exporte un fichier contient le maillage de notre model physique étudié	63
IV.4.4 Fluent :.....	64
IV.4.5 Importation de la géométrie (*. msh) :	65
IV.4.6 Sauvegarde les calculs	65
IV.4.7 Lancement des calculs :.....	66
IV.4.8 Résiduel :.....	67

Chapitre V : résultats et interprétations

V.	Résultats et discussions	70
V.1	Modèle 1 : stockage horizontal par la chaleur latente (MCP)	70
	V.1.1 Champ de température.....	70
	V.1.2 La fraction liquide	72
V.2	modèle2 : stockage horizontal par la chaleur sensible :	74
	V.2.1 Champ de température.....	74
V.3	Comparaison entre le stockage par un MCP et le stockage par un matériau solide	75
	V.3.1 Champ de température :	75
V.4	L'effet de l'épaisseur	76
V.4.1.1	Champ de température	77
V.4.1.2	La fraction liquide.....	78
V.4.2	Pour le stockage par la Roche	79
V.4.2.1	Champ de température	79
	Conclusion générale	
	Référence bibliographique	

Liste de figure

FigureI.1 : Les différentes formes d'énergie	02
FigureI.2 : Consommation énergétique mondiale en ex joules (EJ) par an	5
FigureI.3 : Principe de fonctionnement d'un éolienne	6
FigureI.4 : Principe de fonctionnement d'un centrale hydraulique.....	7
Figure I.5 : production de l'eau chaude.....	9
FigureI.6 : capteur solaire	11
FigureI.7 : Coupe d'un panneau solaire thermique	11
FigureI.8 : Vue de l'ensemble des moyens de stockage d'énergie	15
FigureI.9 : Principales techniques de stockage de l'énergie thermique	17
FigureII.1 : station de stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible	20
Figure II.2 : unité du stockage d'énergie thermique.	27
Figure II.3 : Géométrie du problème	28
FigureII.4 :Circuit dalle – capteur	29
figureII. 5 : la Roche	30
FigureII.6 : réservoir contient d'un lit de roche	30
FigureII.7 : évolution de la température d'un lit de roche.....	30
FigureII.8 : Le schéma de system étudié.....	31
FigureII.9 : Champ de température pour les différentes propriétés du matériau solide utilisé	32
.....	
FigureIII.1 : station de stockage de l'énergie par la chaleur latente.....	33
FigureIII.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (solide/liquide)	35
FigureIII.3 : la variation d'enthalpie	36
Figure :III.4 : Hydrates salins	42
Figure III.5 : Les paraffines.....	43
Figure III.6 : Acides gras.	43
Figure III.7 :MCP Eutectique.....	44
Figure III.8 : Dispositif expérimental et photo réelle du capteur solaire de Varol et al	46
Figure III.9 : schéma du lit de stockage	48
Figure III.10 : Modèle physique d'un Lit de stockage multicouche	48
Figure III.11 :un système de stockage	59
Figure III.12 :Schéma du capteur solaire à changement de phase	50
FigureIII.13 : Géométrie de l'unité de stockage étudié.....	52
FigureIII.14 : Géométrie de l'unité de stockage et le schéma de tube avec des ailettes	52

Liste de figure

Figure III.15 : l'évolution de la température du MCP durant la période de stockage pour un tube sans ailettes. a)1h, b)2h, c)3h, d)4h	52
Figure III.16 : Dispositif expérimental de CEA	53
Figure IV.1 : géométrie de l'élément de stockage en 3D	54
Figure IV.2 : Géométrie étudiée (modèle1)	55
Figure IV.3 : Création de la géométrie.....	61
Figure IV.4 : maillage adopté	62
Figure IV.5 : fenêtre d'exportation de maillage.....	63
Figure IV.6 : Type de résolution.....	64
Figure IV.7 : Vue globale	64
Figure IV.8 : Importation de la géométrie.....	65
Figure IV.9: Autosave case/data	65
Figure IV.10 : Choix de pas de temps le nombre itérations	66
Figure IV.11 : Résiduel	67
Figure V.1 : L'évolution de température en fonction du temps pour le MCP	70
Figure V.2 : Evolution de la fraction liquide en fonction du temps de MCP	72
Figure V.3 : Les contours de la variation de température en fonction du temps de matériau solide	74
Figure V.4 : L'évolution de température en fonction du temps pour des deux cas MCP et La roche	75
Figure V.5 : Géométrie étudiée	76
Figure V.6 : Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de température en fonction du temps	77
Figure V.7 : Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps	78
Figure V.8: Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de température en fonction du temps	79

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Quelques technologies de stockage par chaleur sensible existantes.....	26
Tableau III.1 : quelques MCP inorganiques.....	44
Tableau III.2 : Les Caractéristiques de quelques MCP organiques	45
Tableau III.3 : les Avantages et les inconvénients des MCP	45
Tableau IV.1 : Dimensions de la géométrie étudiée	56
Tableau IV.2 : Propriétés des matériaux utilisé	56
Tableau IV.3 : Propriétés du matériau solide	61

Introduction

Générale

Introduction général

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* » comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique. Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes.

L'énergie solaire reste la forme la plus exploitée dans le domaine du stockage. Il peut s'effectuer sous diverses formes, sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton, roche, céramique, etc.) ou sous forme de chaleur latente (paraffines, sels, etc.). Donc, vue l'importance d'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

L'objectif de ce travail est de faire une simulation numérique basée sur les équations de la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie pour comparer le comportement dynamique thermique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente et a un autre par chaleur sensible.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

1. Des généralités sur l'énergie et le stockage d'énergie sont abordées dans le premier chapitre.
2. Le stockage de l'énergie solaire par la chaleur sensible et par la chaleur latente avec une revue des travaux analytiques, numériques et expérimentaux des ces systèmes de stockage sont exposés au deuxième et troisième chapitre.

Introduction général

3. le modèle physique étudiée, les équations gouvernantes du problème abordé et la résolution numérique ainsi que la méthode utilisée, sont exposés au chapitre 4.
4. Le cinquième chapitre de ce travail est réservé aux résultats et interprétations obtenus par une simulation numérique par le logiciel fluent.
5. En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre I

L'énergie et stockage d'énergie

I. L'énergie

I.1 Introduction Générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18^{ème} siècle, puis du pétrole au milieu du 20^{ème} siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables.

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne; la lumière solaire excitant les photopiles; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie.

I.1.1 Sources d'énergie

Une source d'énergie est issue d'un élément naturel, l'eau, le vent, le soleil, la chaleur du sous-sol, ou d'un phénomène naturel, la combustion, la fission nucléaire, l'activité musculaire.

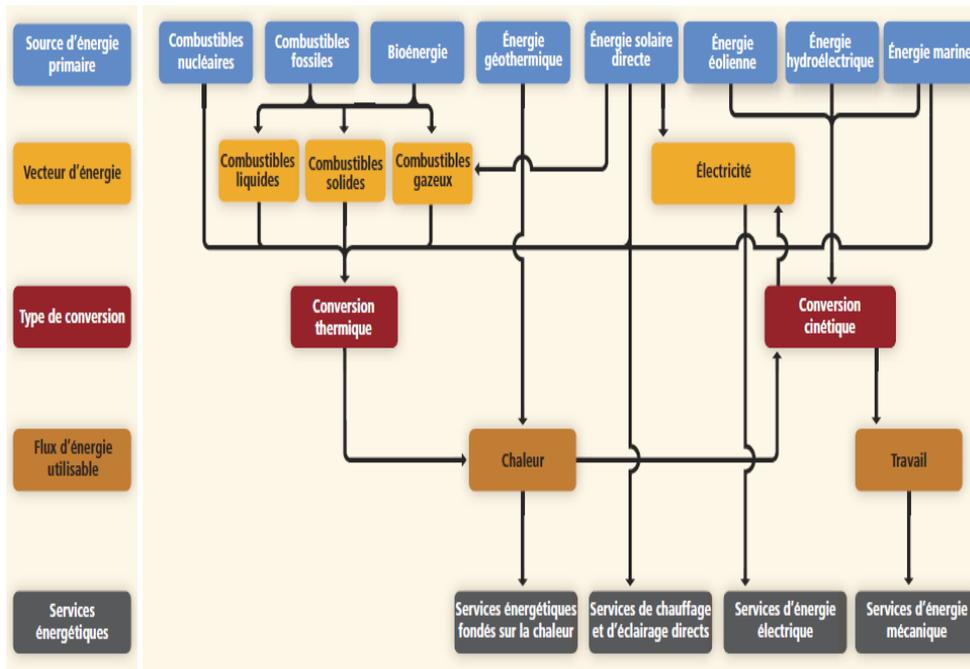


Figure I.1: Différentes formes d'énergie

La figure au-dessous représente une illustration du cheminement de l'énergie depuis la source jusqu'aux services. Toutes les connexions indiquent les filières énergétiques possibles. Les services énergétiques proposés aux utilisateurs peuvent être assurés au moyen de quantités différentes d'énergie pour utilisation finale. Cette énergie peut être fournie au moyen de quantités plus ou moins grandes d'énergie primaire de diverses sources et avec des émissions différentes de CO₂ et différents effets sur l'environnement [2].

I.1.2 Les différentes formes d'énergies

De façon naturelle, l'énergie se présente sous plusieurs formes: solaire, éolienne, marémotrice, etc. De nombreuses ressources naturelles sont utilisées par l'homme pour combler ses besoins en énergie. Ainsi, l'être humain a su tirer profit des ressources naturelles qui l'entourent pour combler ses besoins, pour se réchauffer, s'alimenter ou construire des abris.

Selon la disponibilité des ressources naturelles et leur vitesse de renouvellement, on a classé les différentes ressources en deux catégories:[3]

I.1.2.1.1 I.1.3.1 Energie non –renouvelable

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme, ou même qui ne se renouvelle pas du tout. Son utilisation est limitée car la consommation de cette source d'énergie par l'homme est plus rapide que sa régénération à l'inverse des sources. Les énergies non renouvelables représentent 89% de l'énergie consommée en 2009 (d'après l'agence internationale de l'énergie).

Les principales sources d'énergies non-renouvelables sont dérivés des hydrocarbures, tels que le pétrole, le gaz naturel et les huiles.

On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles :

- Énergie fossile. On peut citer notamment le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, et la consommation intensive, d'où les risques d'épuisement actuels.

Les réserves mondiales pour les sources d'énergies non renouvelables fossiles sont naturellement fonction de la source. En effet, les réserves mondiales de charbon, qui est la source la plus importante, sont estimées à 200 années. Le gaz naturel est estimé à environ 60 années et le pétrole à environ 50 années en 2012. Ces estimations sont faites à partir des ressources mondiales certaines (donc déjà découvertes) et à consommation mondiale d'énergie constante.

- Énergie nucléaire, les gisements d'uranium étant limités. Il existe cependant des partisans du caractère renouvelable de l'énergienucléaire, bien que la théorie n'ait pas encore rejoint la réalité pratique.
- Les ressources totales identifiées au 1er janvier 2011 montrent que l'approvisionnement en uranium serait suffisant pour une période d'environ 100 ans (à consommation mondiale constante), en tenant compte du rythme de consommation de 2011.
- Cependant, les estimations de durée de vie des énergies non renouvelables présentent certaines limites. En effet, elles sont établies sur une base de consommation constante des énergies. Or, les pays émergents ont une demande croissante en énergie pour

développer leur économie. D'après BP, la demande énergétique mondiale devrait augmenter de 39% d'ici 2030.

I.1.2.2 L'impact environnemental des énergies non-renouvelables [4]

I.1.2.2.1 . L'impact environnemental des énergies fossiles

Comme vous le savez sûrement, les énergies fossiles, au-delà du fait qu'elles soient en quantité limitée donc épuisable, présentent un autre désavantage majeur : les gaz à effet de serre.

Ces gaz sont la principale cause du réchauffement climatique qui entraîne des conséquences dramatiques sur la biosphère. On peut citer entre autres les sécheresses, l'acidification des océans, les inondations qui seront globalement néfastes pour l'humanité et la biodiversité.

I.1.2.2.2 L'impact environnemental du nucléaire

Le nucléaire engendre deux types de problèmes environnementaux.

Le premier est lié au problème de l'exploitation des centrales nucléaires. Souvenez-vous du drame de Fukushima ou encore Tchernobyl, un accident nucléaire peut arriver.

L'impact sur l'environnement proche de la centrale est dramatique, pour le cas Fukushima, un rayon de 30 Km autour de la centrale est contaminé par des particules radioactives. Cet impact peut être bien plus important, comme nous l'a montré Tchernobyl, où malheureusement, le nuage a bien dépassé les frontières françaises se trouvant à plus de 2000 km du site.

Le nucléaire engendre un autre problème : les déchets radioactifs.

À la fin de l'année 2010, il existait en France environ 1 320 000 m³ de déchets radioactifs. Sur ces 1 320 000 m³, 40 000 m³ étaient des déchets à haute ou moyenne activité dont la radioactivité reste notable pendant des centaines de milliers d'années voir des millions[***].

Cet état de fait pose le problème de la gestion de ces déchets dangereux.

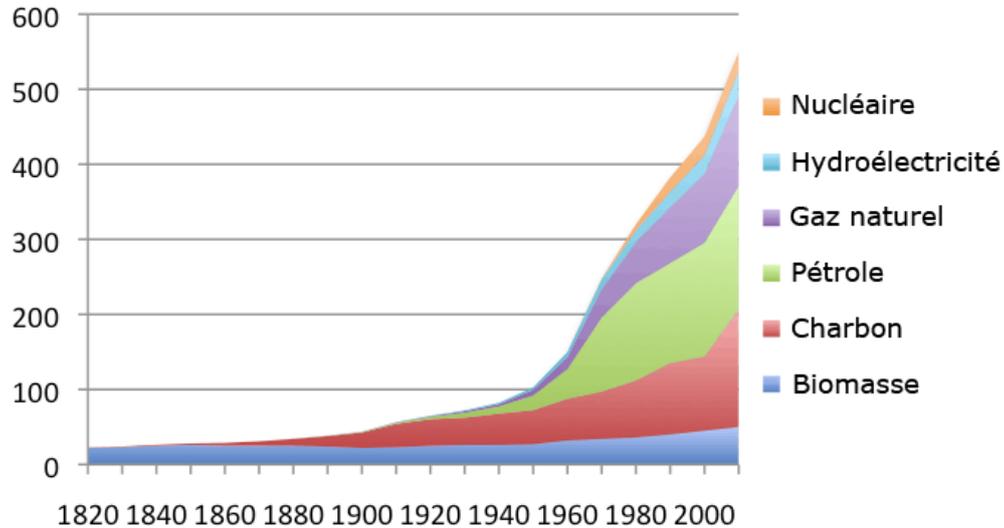


Figure I.2 : Consommation énergétique mondiale en ex joules (EJ) par an [4]

I.1.3 Energies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [5].

On considère les sources d'énergie suivantes comme des ressources renouvelables:

- l'énergie éolienne
- l'énergie hydraulique
- l'énergie géothermique
- l'énergie marémotrice
- l'énergie des vagues et des courants
- la biomasse
- l'énergie solaire

I.1.3.1.1 Energie éolienne:

L'énergie éolienne est l'énergie liée au vent. Cette énergie est exploitée par les bateaux à voiles et les moulins, mais ces deux applications ont reculé durant la révolution industrielle face à la motorisation des installations. Actuellement cette forme d'énergie est exploitée par des éoliennes pour générer de l'électricité. Si cette énergie est illimitée (durée de vie de la Terre) et non polluante, elle présente cependant un rendement faible. Comme le solaire, elle fluctue énormément. Seules certaines régions présentent une exposition au vent suffisante. Certaines éoliennes sont placées en mer (offshore) afin de ne pas prendre de place sur terre, et ne pas incommoder les populations.[5]

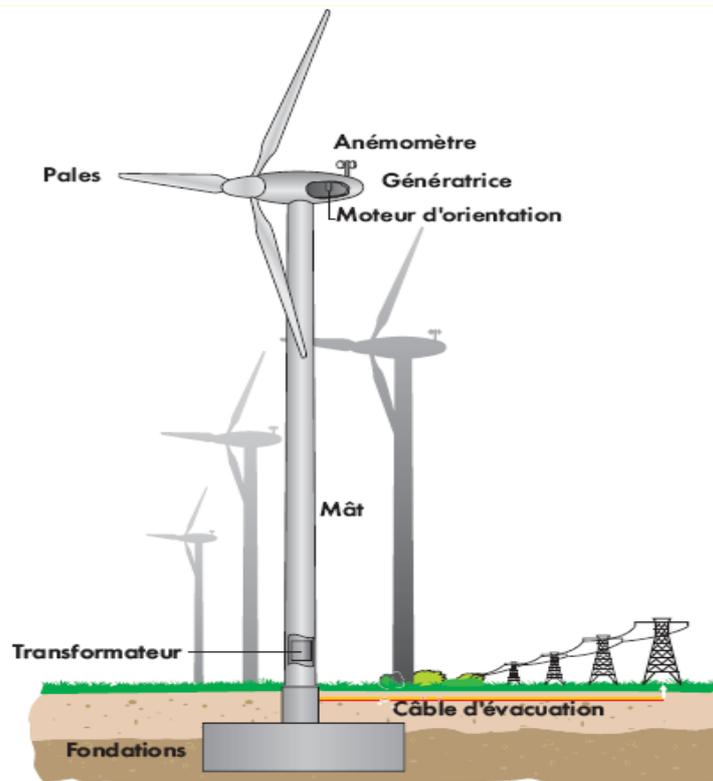


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une éolienne[5]

I.1.3.1.2 Energie hydraulique

L'eau des rivières possède une énergie potentielle de pesanteur. Cette dernière est exploitée dans des retenues d'eau, les barrages. L'eau qui s'écoule dans une conduite fait tourner des turbines et produit de l'électricité. Les barrages ont l'avantage de permettre une production électrique constante, sauf sécheresse. Par contre, l'impact environnemental est non nul : des vallées sont noyées, il faut permettre la migration des poissons (saumons) par des dispositifs adaptés... Egalement, le nombre de sites propices à la construction d'un barrage est limité. L'énergie hydroélectrique représente 90 % de la part des énergies renouvelables dans la production électrique [5]. Il existe d'autres formes d'énergie hydraulique, comme la force des marées. Des usines marémotrices ont la capacité d'exploiter cette énergie afin de produire de l'énergie électrique. Il est aussi question d'utiliser l'énergie des vagues, des courants marins [5]

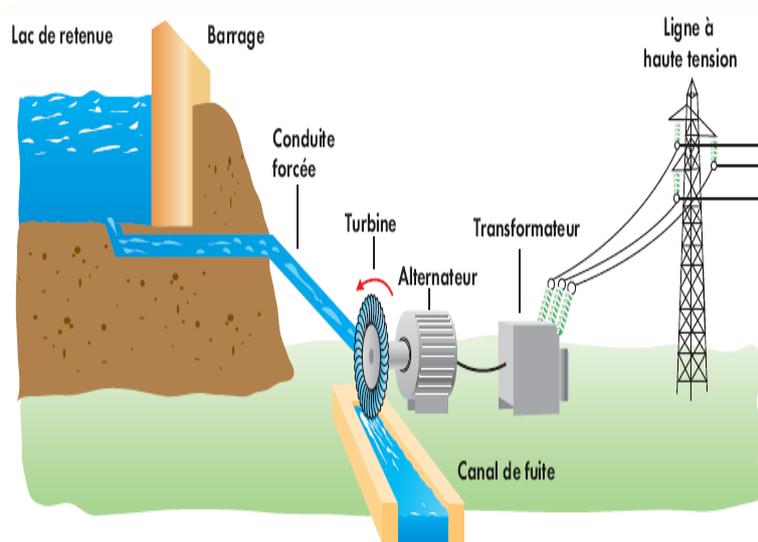


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

I.1.3.1.3 Energie géothermique

Les profondeurs de la Terre présentent de hautes températures. On gagne en moyenne 3°C tous les 100 m de profondeur. Cela est dû à la chaleur initiale de la planète, et à la radioactivité naturelle du sous-sol (uranium, thorium, potassium). Cela explique les sources d'eau chaudes (sources thermales). Cette énergie thermique est récupérable pour chauffer des habitations, ou la convertir en électricité. A l'échelle humaine, cette source d'énergie est considérée comme inépuisable et peut être « extraite » de manière quasi-constante dans le temps. Toutefois, la puissance exploitable est très faible, 0,2 W/m² au mieux. D'autre part, les possibles effets d'une utilisation massive de l'énergie géothermique sur un sous-sol sont encore mal connus.

I.1.3.1.4 La biomasse

Le terme de biomasse désigne l'énergie chimique stockée dans la matière organique. Le bois est par exemple un combustible utilisé par l'Homme depuis que celui-ci maîtrise le feu. Plus récemment, on a les biocarburants afin de prévenir l'épuisement des réserves fossiles. Cependant, des critiques se sont élevées, car ces derniers nécessitent des terres cultivables (champ de colza, canne à sucre), d'où une concurrence avec la production alimentaire (épuisement des sols). La biomasse concerne également le traitement de déchets organiques, comme les ordures ménagères, afin de générer de la matière combustible. Le principal inconvénient de l'utilisation de la biomasse est que sa combustion est productrice de CO₂ et de polluants.

I.1.3.1.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est quasi-illimitée : le Soleil va encore briller pendant environ 5 milliards d'années ! Sur Terre, la puissance reçue est de l'ordre de 1 kW/m² dans des conditions optimales. L'énergie solaire est exploitable de deux manières différentes :

- En transformant l'énergie lumineuse en électricité, par le biais de cellules photovoltaïques. Cette technologie est relativement facile à mettre en œuvre et permet la production d'électricité dans des zones isolées (déserts). Par contre, le rendement est faible. Aussi, la production ne peut se faire que de jour, et varie selon l'ensoleillement.

• En captant la chaleur du Soleil reçue sur Terre, Le rayonnement solaire émet à la surface de la Terre une énergie de 2 à 3 kWh par m². Cette dernière est loin d'être négligeable, et est donc mise à contribution dans le solaire thermique.

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

- ✓ la production d'eau chaude,
- ✓ le chauffage des maisons,
- ✓ le chauffage de l'eau des piscines,
- ✓ le séchage des récoltes,
- ✓ la réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- ✓ la production de très haute température.

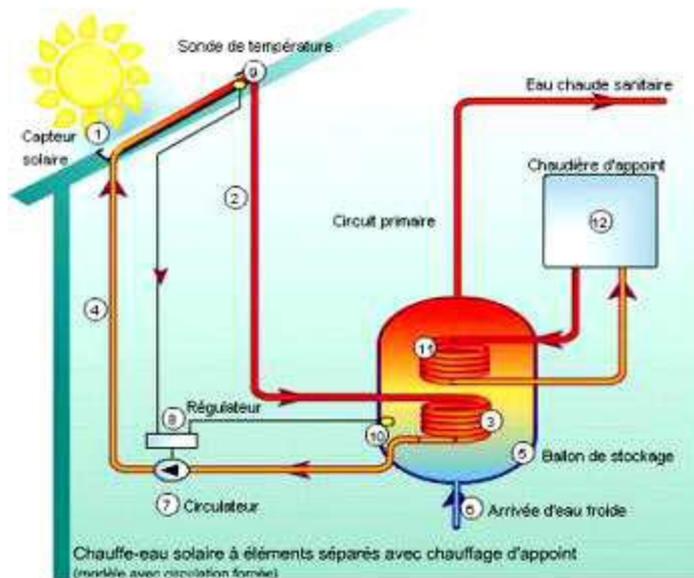


Figure I.5 : production de l'eau chaude [6]

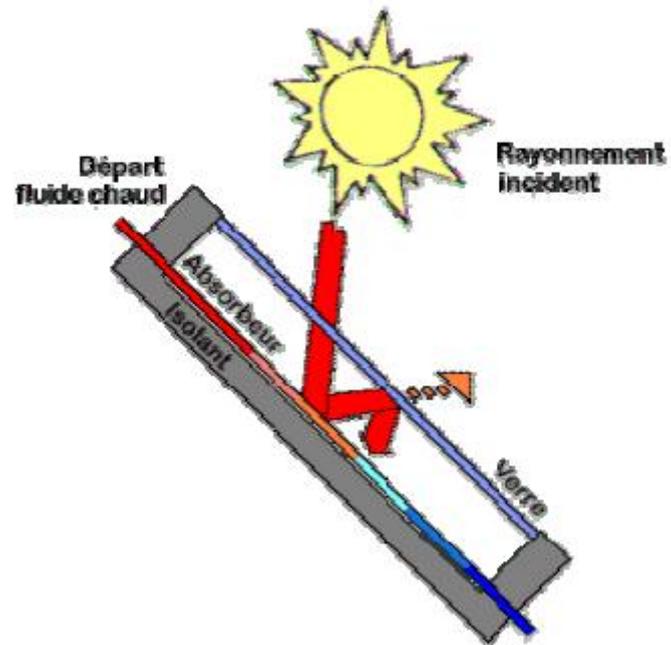
L'utilisation de l'énergie solaire thermique comme source de chaleur se définit par la conversion du rayonnement solaire en chaleur, selon plusieurs niveaux de température. Un fluide caloporteur, enfermé dans des tubes, absorbe la chaleur du rayonnement solaire et la redistribue au réseau d'eau de chauffage, par le biais d'un échangeur thermique.

Le panneau solaire thermique(ou capteur solaire thermique) est un équipement extérieur capable d'absorber l'énergie produite par le soleil en la transformant en énergie thermique. Il est constitué d'une vitre, en dessous de laquelle sont disposés des tubes possédant un revêtement absorbant. Un fluide circule dans ces tubes, généralement il s'agit d'eau. L'énergie lumineuse est ainsi captée par l'absorbeur, et retenue à l'intérieur du panneau solaire grâce à la présence de la vitre, ce qui provoque un réchauffement du fluide. Ce dernier peut alors transférer sa chaleur à un autre système, comme par exemple un ballon d'eau chaude sanitaire ou un stockeur.

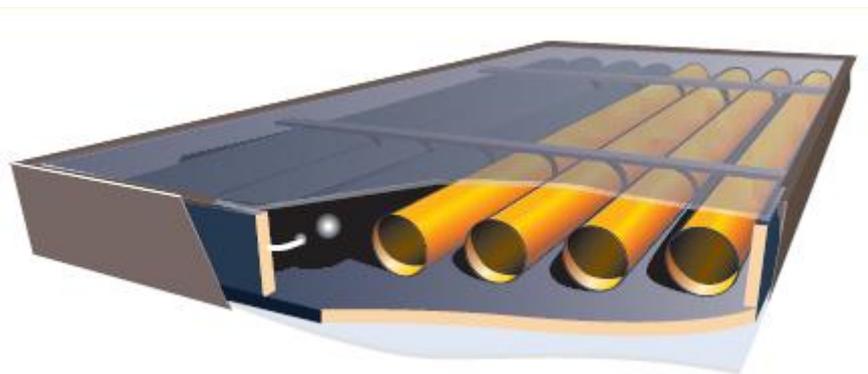
Différents types de capteurs solaires existent :

- les capteurs plans : ils peuvent atteindre des températures de chauffe de 50 à 80 °C lorsque les déperditions thermiques sont limitées en face avant du capteur par une protection (vitre, plexiglas, polycarbonate, etc.) ;
- les capteurs à tubes sous vide : le vide assure une isolation limitant les déperditions de chaleur par rayonnement et convection. Ce type de capteur est plus spécifiquement adapté aux applications nécessitant de hautes températures, en particulier dans les procédés industriels. Leur température de chauffe dépasse les 100-120 °C. Cependant, il existe des capteurs à tubes sous vide particulièrement adaptés à la production d'ECS (eau chaude sanitaire) avec des températures de chauffe de l'ordre de 60-85 °C ;
- les capteurs à concentration : ces capteurs sont plutôt utilisés dans le contexte d'applications industrielles, pour l'obtention de températures supérieures à 120 °C, ou pour la production d'électricité.

Les capteurs plans et capteurs à tubes sous vide sont les mieux adaptés aux applications de chauffage et de production d'ECS. La surface totale nécessaire de capteurs est variable selon la surface des locaux à chauffer, les besoins d'ECS à satisfaire (nombre d'occupants) et la qualité de l'isolation existante.



FigureI.6 : capteur solaire



FigureI.7 : Coupe d'un panneau solaire thermique

I.1.3.1.5.1 Les avantages et inconvénient de l'énergie solaire

✓ **Avantage :**

L'utilisation thermique de l'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses avantages propres, à savoir:

- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.
- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

✓ **Inconvénients :**

L'énergie solaire thermique a toutefois certaines limites:

- C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).
- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations [7].

I.2 Stockage d'énergie

Un des grands problèmes avec l'énergie, c'est le transport dans le temps ou l'espace. C'est particulièrement vrai avec les énergies renouvelables qui dépendent du climat et varient énormément dans le temps [8].

L'énergie solaire et ses dérivés (vent, chute d'eau, etc.) n'est pas disponible à la demande, il est donc nécessaire de compenser, en disposant d'un stockage suffisant, auprès du consommateur, du producteur, ou à travers un réseau d'échange (similaire à l'ancien réseau de *distribution*).

Le stockage consiste à constituer un stock d'énergie à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, afin de pouvoir en disposer plus tard, lorsque la demande sera plus importante.

I.2.1 Intérêt :

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines [8].

Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût très élevé, non seulement en termes de coûts économiques, mais aussi en termes de coûts sociaux : santé, sécurité, etc.

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays ;
- ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande ;
- compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

I.2.2 Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie est associé à l'opération inverse : l'opération consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage d'énergie). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial (idéalement "vide") ; on a alors régénéré le stockage.

L'efficacité énergétique d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. Ce rapport est généralement inférieur à 1, sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante où il peut être considéré comme infini (division par zéro), puisque personne ne fournit l'énergie à stocker, qui est de fait gratuite.

L'efficacité énergétique d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en œuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Dans tous les cas, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière : une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Mais pour de l'énergie ambiante naturelle, ces pertes influent surtout sur l'amortissement économique des investissements éventuellement nécessaires : la lumière du soleil arrive même si l'humain ne la capte pas.

I.2.3 Le choix des technologies de stockage :

Pour comparer les technologies de stockage et déterminer les plus pertinentes pour un usage particulier, plusieurs facteurs techniques doivent être pris en compte :

La puissance disponible (en MW) et la capacité énergétique (en M_{wh}). La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière.

Le temps de réaction est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système.

L'efficacité, définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en M_{whout}/M_{whin}).

La durée de vie, qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries.

Pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme la densité énergétique (en MWh/kg ou en MWh/m³) pour la mobilité par exemple [8].

I.2.4 Comment stocker de l'énergie :

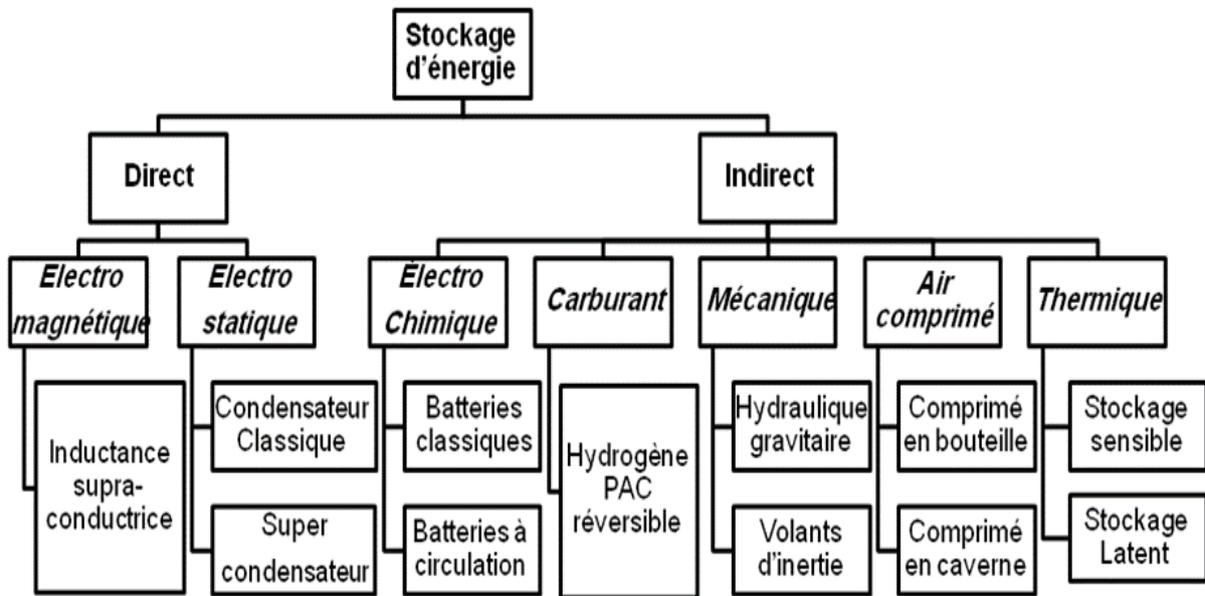


Figure I.8 : Vue de l'ensemble des moyens de stockage d'énergie

I.2.4.1 Stockage mécanique :

Les voies les plus connues de stockage à grande échelle. Stockage gravitaire par pompage (STEP° stockage par air comprimé (CAES), Elle inclut aussi les volants d'inertie, les accumulateurs hydrauliques, et plus généralement tout type de stockage d'énergie potentielle ou cinétique

I.2.4.2 Stockage électrochimique :

Ce mode de stockage, dont le principe repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries (raccourci pour "batteried'accumulateurs" en série), piles et accumulateurs.

Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), notamment pour le lissage de la charge

journalière en stationnaire. Quelques batteries au plomb peuvent répondre à ce besoin, de même que des batteries au sodium ou lithium-ion, mais ce sont surtout les batteries à flux qui font l'objet d'études pour le stockage massif à ce jour.

En effet, la notion de durée de vie liée au nombre de cycles de charge/décharge entre en ligne de compte pour l'utilisation des batteries en stationnaire : les batteries à flux peuvent revendiquer plus de 10 000 cycles, contre quelques centaines pour les batteries au plomb, voire quelques milliers pour les nouvelles batteries sodium (NaS et Zebra). Les systèmes de stockage électrochimique sont généralement composés d'un ensemble de batteries qui cumule la puissance de chaque unité ; leur attractivité repose sur leur flexibilité et leur réactivité.

I.2.4.3 Stockage Thermique:

Au moment où l'on parle de plus en plus d'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie[10].

Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés:

- le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau ;
- le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser la transformation solide – liquide d'un Matériau à Changement de Phase (MCP).
- le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en œuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz sur un milieu absorbant.

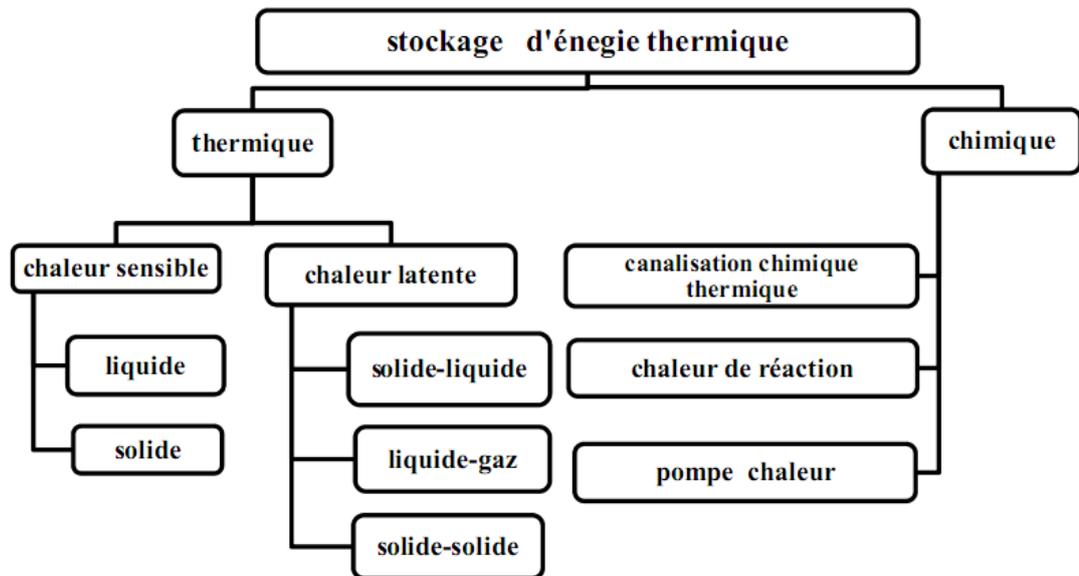


Figure I.9 : Principales techniques de stockage de l'énergie thermique

I.2.4.3.1 Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique réversible :



Le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la charge, phase de stockage de chaleur. Inversement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur.

Ce phénomène exothermique correspond à la décharge, phase de restitution de chaleur. Chaque système faisant appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge.

I.2.4.3.2 Stockage d'énergie Thermique:

De nombreuses solutions de stockage de froid (glace, liquides cryogéniques) et de chaud (sels fondus, accumulateurs de vapeur, graviers ou billes à changement de phase...) existent et permettent de stocker l'énergie sous forme thermique (chaleur latente, chaleur sensible) avant de la restituer, le plus souvent directement sous forme de chaleur ou de froid, mais aussi parfois sous forme électrique.

Les sources de chaleur proviennent en premier lieu du solaire pour lequel le stockage permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives (le jour/l'été) par rapport aux périodes de plus grandes demandes (le soir/l'hiver). Il est également possible de stocker la chaleur produite par certaines industries en corollaire de leur activité principale (centrales à gaz ou d'incinération par exemple).

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique ; ce transfert peut être par chaleur sensible, c'est-à-dire par changement de la température du matériau — la chaleur est alors emmagasinée dans le matériau —, ou par chaleur latente, c'est-à-dire par changement de phase du matériau, généralement changement solide/liquide d'un matériau pour lequel la variation volumique est faible.

I.2.4.3.3 Stockage thermique par la chaleur sensible

A pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement liquide ou solide) de masse m et de capacité thermique massique $C_p(T)$ de la température initiale T_1 à la température T_2 on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = Q = \int_{T_1}^{T_2} m C_p(T) dT \quad (I.2)$$

En supposant $C_p(T) = cste$ on obtient la relation suivante :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (I.3)$$

I.2.4.3.4 Stockage thermique par la Chaleur latente

Supposons que ce corps soit à T_1 un solide pur, de masse m ayant une température de fusion T_f telle que $T_1 < T_f < T_2$. L'énergie stockée serait donnée, à pression constante, par la variation d'enthalpie suivante :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_f} m C_{p_s}(T) dT + mL + \int_{T_f}^{T_2} m C_{p_l}(T) dT \quad (I.4)$$

Avec $C_{p_s}(T)$ et $C_{p_l}(T)$: Capacités thermiques massiques respectivement solide et liquide du corps considéré (J/kgK), L est la chaleur latente de fusion.

En supposant $C_{p_s}(T)$ et $C_{p_l}(T)$ sont constantes nous obtenons :

$$H_2 - H_1 = Q = m C_{p_s} (T_f - T_1) + m L + m C_{p_l} (T_2 - T_f) \quad (I.5)$$

Chapitre II

Stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible

II.1 Introduction

Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Il s'agit par exemple du simple fait de poser une pierre près d'un feu, de la déplacer et de profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps. C'est aussi le principe que l'on retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillote. 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°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité [11].

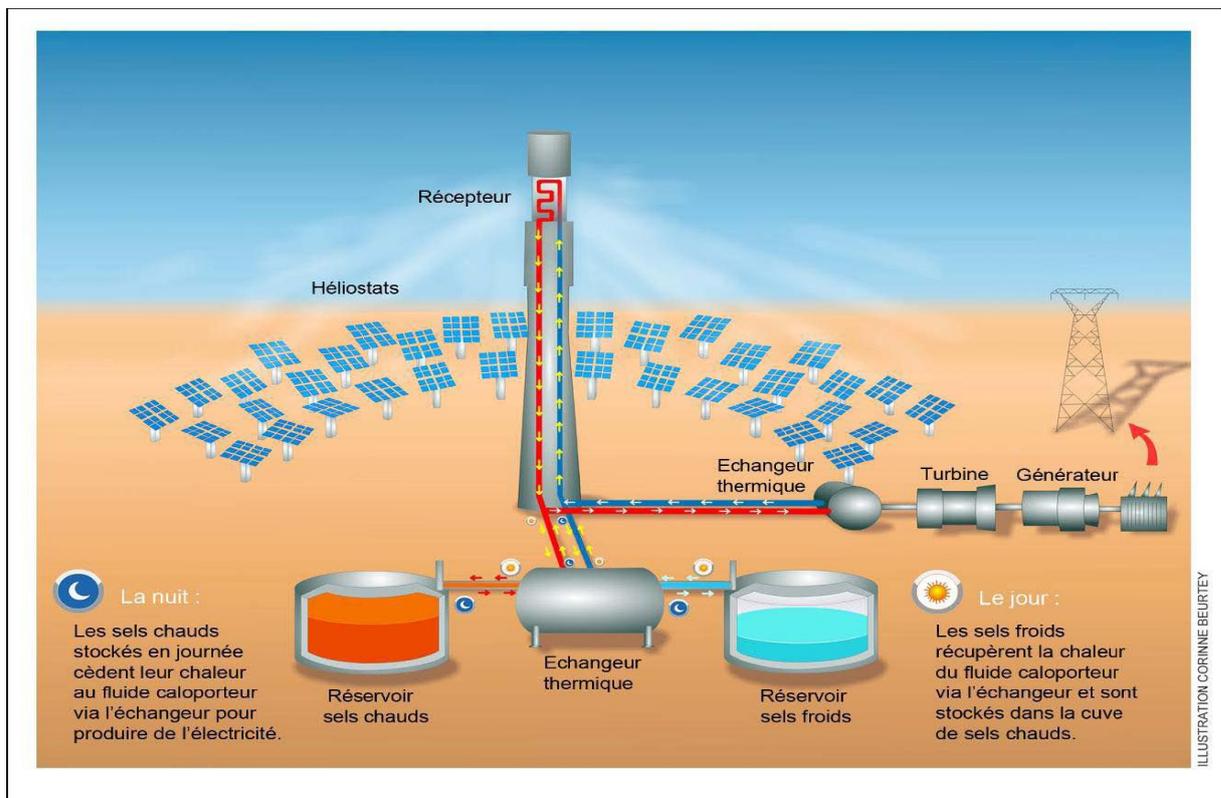


Figure II.1 : Station de stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible

II.1.1 Définition de Stockage par chaleur sensible :

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur.

L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique équation (II.1) :

$$Q_{stockée} = m cp\Delta T \quad (II.1)$$

Avec

$Q_{stockée}$: la chaleur sensible (J),

m : la masse du matériau de stockage (kg)

Cp : la chaleur massique du matériau ($J.kg^{-1} K^{-1}$)

ΔT : la différence entre températures moyennes finale et initiale (K).

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage.

Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories :

Les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc.

Par exemple, l'eau liquide à pression atmosphérique et à 20°C a une grande capacité calorifique ($4185 J.kg^{-1} K^{-1}$). De plus, son accessibilité, la disponibilité immédiate d'eau chaude, son prix, sa fiabilité et son non toxicité font du stockage par chaleur sensible de l'eau le plus répandu.

Les matériaux susceptibles d'être utilisés doivent posséder les qualités suivantes:

- une bonne stabilité et inertie chimiques
- une masse volumique forte à fin de réduire le dimensionnement de l'installation
- une toxicité très faible
- une bonne conductivité donc diffusivité thermique est élevée.

Cependant, des inconvénients majeurs interviennent en sa défaveur puisque ce type de stockage est limité par :

- la différence de températures disponibles,
- les déperditions thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du système qui requiert une bonne isolation,
- l'apparition de problèmes de dilatation plus ou moins gérables selon les matériaux considérés et les conditions imposées par les cahiers des charges des industriels (compatibilité avec les fluides caloporteurs et leur tenue dans le temps par exemple).

II.2 Les matériaux de stockage par la chaleur sensible :

II.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 [12].

II.2.1.1 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.

Les avantages et inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible [13].

Avantages

- ✓ Haute efficacité
- ✓ Chaleur spécifique élevée
- ✓ Faible coût
- ✓ Très disponible

Très documenté

- ✓ Aucune détérioration

Inconvénients

- Corrosif à certains contenants
- Autodécharge élevée
- Pression de vapeur élevée

II.2.1.2 Huiles

Les plus communs des matériaux liquides, 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 les utiliser à une température de fonctionnement 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.

Les avantages et inconvénients des huiles [13].

Avantages

- ✓ Chaleur spécifique élevée
- ✓ Non-corrosif aux contenants
- ✓ Disponible
- ✓ Faible pression de vapeur
- ✓ Température de fonctionnement élevée

Inconvénients

- Très dispendieux
- Toxique pour l'environnement
- Inflammable

II.2.2 Matériaux solides

Les matériaux solides sont de bons candidats pour une application de stockage thermique. On note notamment la roche, le conglomerat, le sable, les briques, les métaux, etc. L'énergie est emmagasinée à basse température. De plus, aucune fuite en cas de bris du contenant ne peut arriver et ils n'ont aucun problème dû à la pression de vapeur comme c'est le cas avec l'eau. Le meilleur candidat de matériaux solides pour le stockage thermique est la fonte, sa densité d'énergie est plus élevée que l'eau. Cependant, la fonte est très dispendieuse et d'autres matériaux sont généralement préférés pour leur coût inférieur. Un autre candidat de premier choix est la roche. Utilisée sous forme de lit de pierre, l'énergie peut y être emmagasinée en laissant le fluide caloporteur circuler directement entre les pierres ou par le biais d'un échangeur thermique. Un dernier type de matériaux à considérer est les métaux. Ils ont l'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique et peuvent résister à de très hautes températures. Leur utilisation est considérée généralement dans des applications nécessitant une conductivité thermique élevée. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont de bons exemples de métaux potentiels [13]

II.2.2.1 Roches, béton et briques

Ayant des caractéristiques très rapprochées, les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haut potentiel d'utilisation comme matériaux dans un système de stockage thermique sous forme sensible. En effet, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons candidats. Par contre, leur faible conductivité thermique ainsi que leur faible chaleur spécifique font que d'autres matériaux leur soient souvent préférés.

Leurs avantages et inconvénients :

Avantages

- ✓ Excellente stabilité Cyclique
- ✓ Chimiquement stable
- ✓ Disponible
- ✓ Abordable

Inconvénients

- Faible chaleur spécifique
- Faible conductivité thermique

II.2.2.2 Métaux

La principale caractéristique qui fait que les métaux puissent être intéressants pour un système de stockage de chaleur sous sensible est leur grande capacité thermique. Celle-ci leur permet une 50 absorption rapide de la chaleur, mais également une dissipation rapide, ce qui implique une grande autodécharge, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront principalement utilisés dans des applications de courte durée.

leurs avantages et inconvénients.

Avantages

- ✓ Conductivité thermique élevée
- ✓ Chimiquement stable
- ✓ Disponible
- ✓ Recyclable

Inconvénients

- Très dispendieux

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

II.2.3 Solutions technologiques :

Il existe différentes technologies permettant de mettre en œuvre un système de stockage par chaleur sensible. Le Tableau (II.1) présente les solutions techniques développées à échelle industrielle [14].

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

Tableau II.1 : Quelques technologies de stockage par chaleur sensible existantes

Parmi les recherches fait dans le domaine de stockage d'énergie par la chaleur sensible nous avons cité les travaux suivants :

Mohammed BECHIRI et Kacem MANSOURI[14] 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-carburé, l'Acier-inoxydable, la brique-réfractaire et l'alumine sont testés. La Technique de Transformée Intégrale Généralisée (GITT) 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.

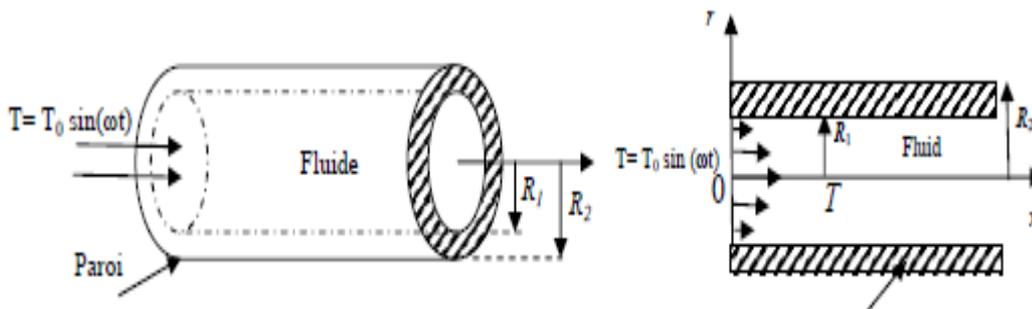


Figure II.2 : unité du stockage d'énergie thermique.

Walid FOU DHIL et Sadok BEN JABRALLAH [15] Ont analysé les performances d'un système de stockage énergétique thermique (inertie thermique et densité énergétique) dans un canal poreux vertical pour mode de stockage sensible. Le canal poreux, qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constante alors que l'autre est supposée adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour le mode de stockage a été effectuée. Les résultats indiquent que l'accroissement de l'énergie

stockée dans des billes de verre varie de 45 à 82 % lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40 °C.

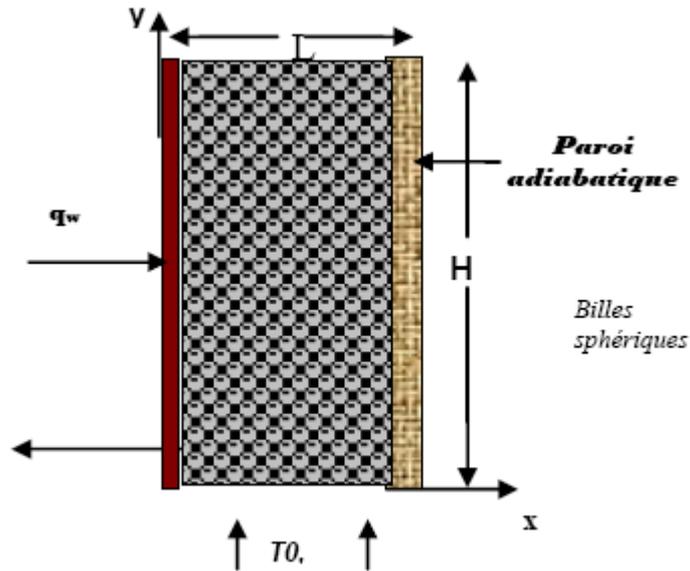
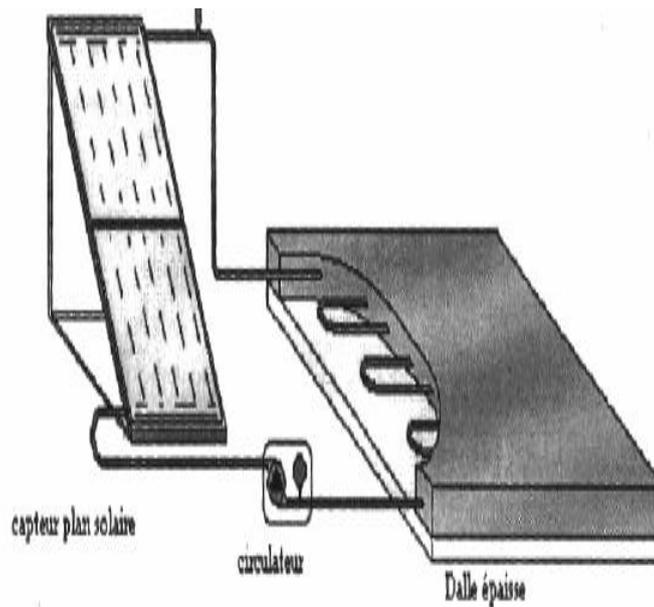


Figure II.3 : Géométrie du problème

R. Kharchi 1, N. Aït Messaoudène[16] Ont fait étude de recherche sur les points suivants :

- L'amélioration des matériaux et composants, par exemple la recherche de matériaux isolants et transparents qui permettent de capter le rayonnement avec un minimum de pertes thermiques;
- L'intégration appropriée de ces technologies dans une enveloppe architecturale, afin d'obtenir une bonne performance et de minimiser les coûts;
- La réalisation d'opérations expérimentales (un plancher solaire direct) et proposition d'un projet national sur la réalisation d'une maison solaire.

Leur travail consiste donc à développer cette technique du chauffage de l'habitat par l'énergie solaire en général et du plancher solaire direct en particulier, en étudiant le comportement thermique du système dans le site de Bouzaréah (Alger).



FigureII.4 : Circuit dalle - capteur

Le laboratoire CEA de Lile en France [11] dispose des systèmes expérimentaux de stockage de chaleur, depuis l'installation simple pour étudier les phénomènes localement, jusqu'à la boucle de test à échelle semi industrielle.

Pour le stockage thermique par chaleur sensible, la boucle CLAIRE, dédiée aux hautes températures (supérieures à 500 °C) avec de l'air comme fluide caloporteur, est déjà à échelle semi-industrielle avec des dimensions (10 m³ de volume de stockage) et des puissances thermiques (1 MW) tout à fait significatives.

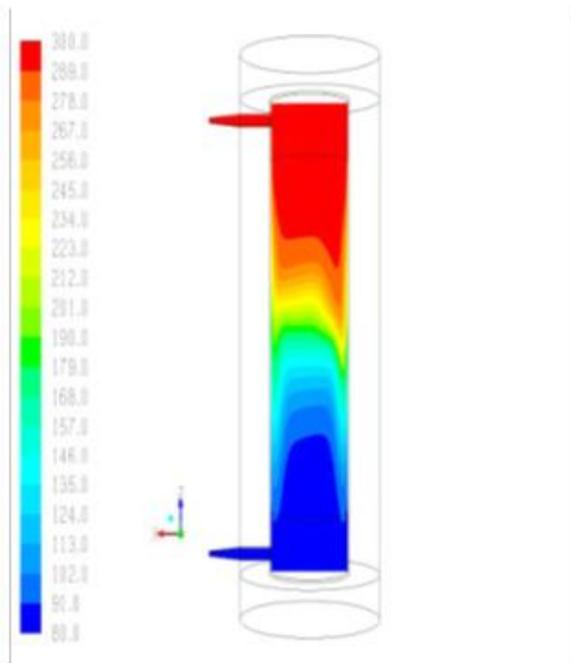
Pour le stockage thermique dédié aux centrales solaire à concentration de type Fresnel à huile, l'installation STONE permet d'étudier en détail le fonctionnement d'un lit de roche grâce à une instrumentation fine (220 mesures de température pour 3 m³ de stockage). Une fois chauffée dans la centrale thermique, l'huile circule jusqu'à un réservoir qui contient un lit de roche, et chauffe progressivement ces roches de haut en bas. Pour fixer un ordre

Chapitre II stockage d'énergie par la chaleur sensible

de grandeur sur une installation industrielle, le volume de stockage devrait varier entre quelques dizaines à quelques centaines de mètres cube. Ce type d'installation est d'ores et déjà envisagé en association d'une centrale thermique à concentration.



figureII.5 : la Roche



FigureII.7 : Evolution de la température
lit de roche



FigureII.6 : réservoir contient d'un
d'un lit de roche

Claudio Ferone et Francesco Colangelo [17] ont axé leur études sur le stockage de l'énergie thermique de la chaleur sensible (SHTES) utilisant des milieux solides. Une simulation numérique tridimensionnelle est faite pour analyser leur comportement transitoire en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Contrairement à d'autres papiers dans la littérature, le modèle numérique et l'approche de simulation ont simultanément pris en considération divers aspects: propriétés thermiques à haute température, la géométrie réelle de l'élément de stockage répété et le cycle de stockage réel adopté. Une haute performance thermique des matériaux de stockage des littératures ont été testés et utilisés ici comme indices de référence. Les matériaux testés sont des bétons légers avec granulats recyclés et un béton géo polymères. Leurs propriétés thermiques ont été mesurés et utilisés comme intrants dans le modèle numérique d'évaluer au préalable leur application dans le stockage thermique. L'analyse effectuée peut également être utilisé pour optimiser le système de stockage, en ce qui concerne les propriétés thermiques des matériaux requis pour le stockage, les résultats ont montré une influence significative des propriétés thermiques sur les performances des éléments de stockage par la chaleur sensible.

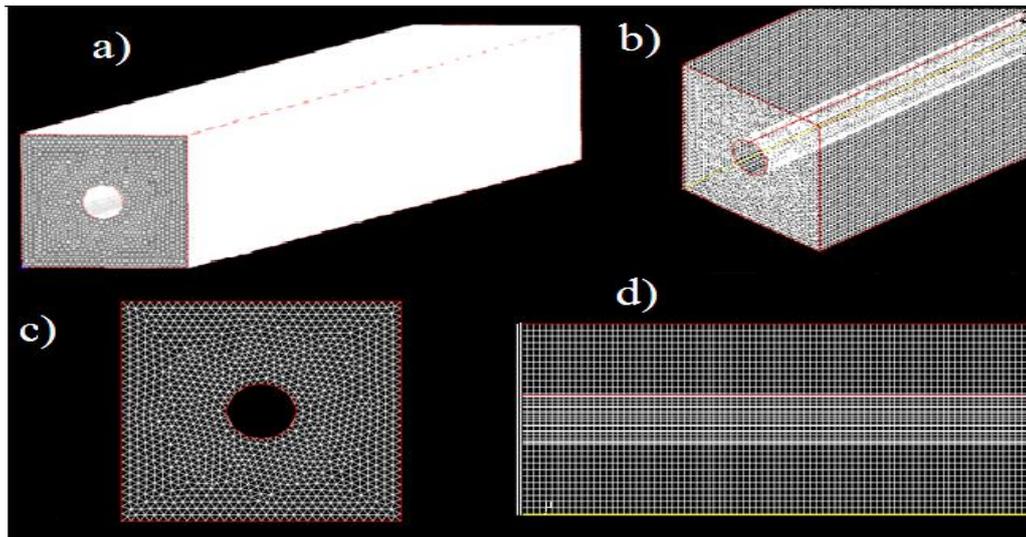


Figure II.8 : Schéma de système étudié

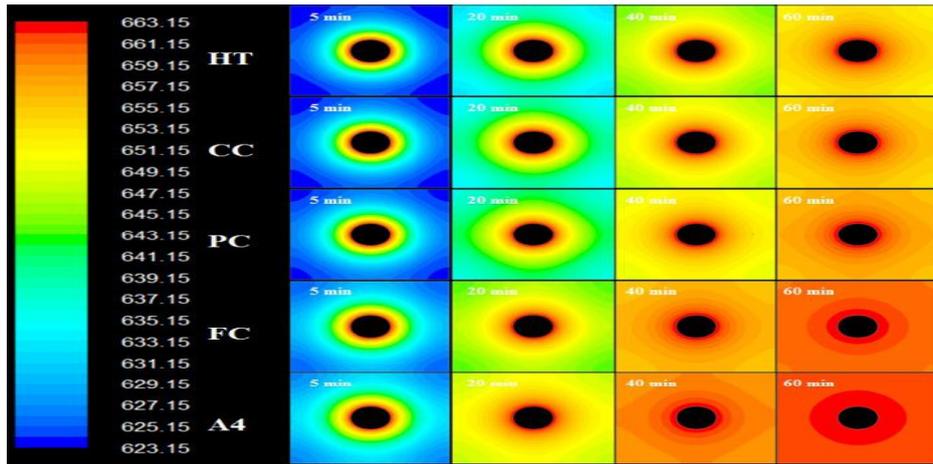


Figure II.9 : Champ de température pour les différentes propriétés du matériau solide utilisé

Chapitre III

Stockage d'énergie thermique par la chaleur latente

III.1 Introduction

Le principe du stockage via des matériaux à changement de phase (MCP) consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'eau. Lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se solidifiant si c'est de l'eau froide (autour de 15°C) qui circule dans le tube.

Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou quantité de chaleur que l'on souhaite stocker [11].

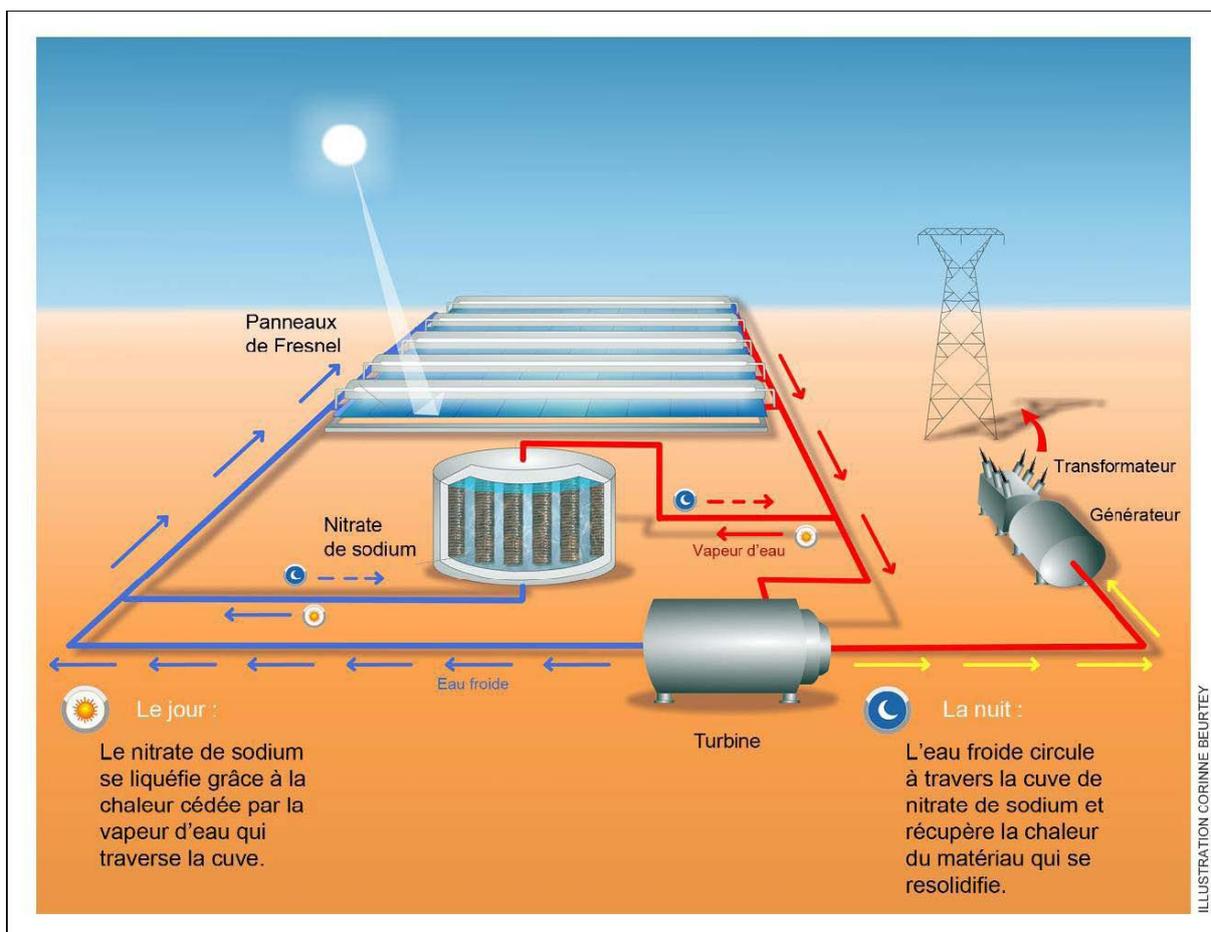


Figure III.1 : station de stockage de l'énergie par la chaleur latente

III.2 Phénomène de changement de phase :**III.2.1 Définition de la chaleur latente :**

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière, Elle intervient aussi dans les changements allotropiques.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules. Mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de La transition de phase [11].

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise enjeu s'écrit:

$$Q = m(h_f - h_1) = m. \Delta h_f (j) \quad (\text{III.1})$$

Ou. Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau de sa température initiale T_i A sa température de fusion T_f et l'on écrit:

$$Q = m(h_f - h_1) = m. C_p(T_f - T_1) + m. \Delta h_f (j) \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.1. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de La température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état La température reste constante.

Si T_f est La température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la temperature T_1 à La température T_2 avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_f} m. C_s(T) dT + m. L + \int_{T_f}^{T_2} m. C_L(T) dT \quad (\text{III.3})$$

$C_s(T)$: Chaleur spécifique du corps A l'état solide

$C_L(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide

L : chaleur latente de changement de phase

On retrouve dans l'équation (III.3) deux termes de chaleur sensible en plus du terme mL représentant la chaleur latente due à la masse m ,

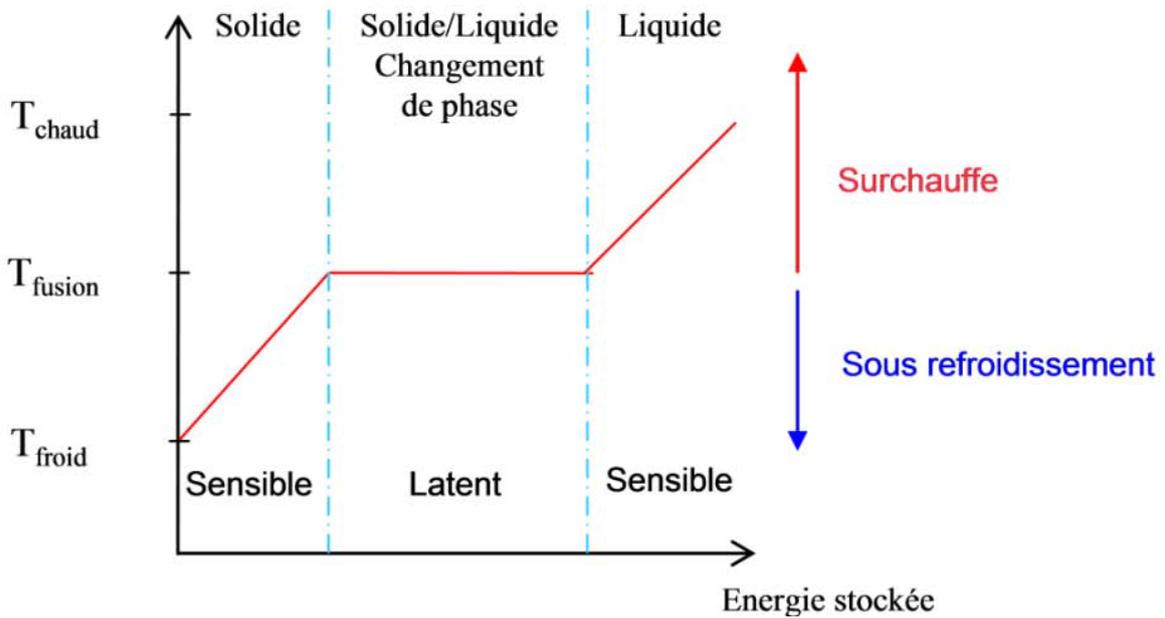


Figure III.2 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente (solide/liquide)

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure (III.3). On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température)[26].

Dans le cas d'un mélange (alliage), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) figure (III.3)) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente.

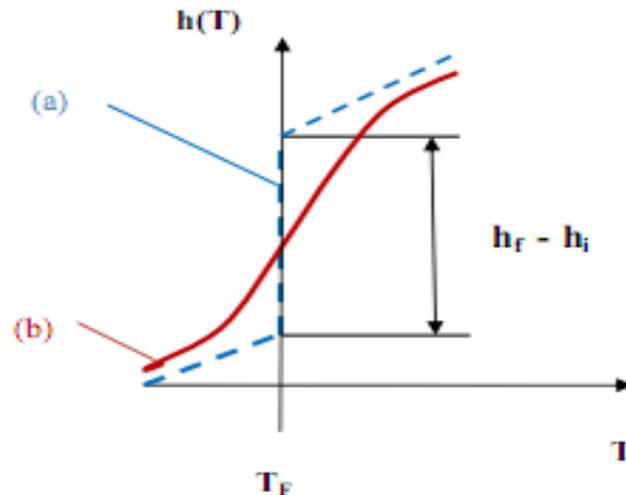


Figure III. 3 : la variation d'enthalpie

En résumé. Les avantages de la chaleur latente sont donc:

- des densités importantes de stockage,
- une température de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

III.2.2 Modélisation mathématique du phénomène de changement de phase :

Pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur avec le changement de phase, ou problèmes dits à frontière mobile, il faut déterminer le champ de températures dans les deux phases liquide et solide ainsi la position de l'interface.

La difficulté fait que la position de l'interface liquide solide est elle-même une inconnue du problème.

Il existe en général deux approches pour analyser les problèmes de changement de phase : La méthode à maillage mobile (variable dans le temps), et la méthode à maillage fixe.

III.2.2.1 Schémas avec maillage mobile :

Dans cette méthode, les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région liquide et dans la région solide, la position de l'interface est obtenue par la résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan) [36].

Région liquide :

$$C_{p\ell}\rho_\ell \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_\ell \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.4})$$

Région solide :

$$C_{ps}\rho_s \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

A l'interface solide-liquide, nous avons :

$$T_s[\xi(t), t] = T_l[\xi(t), t] = T_f \quad (\text{III.6})$$

et la condition de Stefan

$$\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} - \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{d\xi}{dn} \quad (\text{III.7})$$

où ξ désigne la position du front de solidification n désigne la normale au front. La condition de Stefan traduit la chute de l'enthalpie du système (dégagement de la chaleur latente L_s) à la température de fusion T_f .

III.2.2.2 : Schémas avec maillage fixe :

Dans ces schémas, le maillage reste fixe et les deux équations gouvernantes le transfert de chaleur dans la région liquide et la région solide sont résolues simultanément malgré la discontinuité du gradient de la température à l'interface. Ces schémas sont facilement applicables à des problèmes de changement de phase complexes de type industriel. Basant sur la modélisation du transfert de la chaleur latente, les schémas avec maillage fixe sont classés principalement en méthode de la capacité effective et en méthode enthalpique.

III.2.2.2.1 : Méthode de la capacité effective :

La méthode de la capacité effective introduit l'effet de la chaleur latente sur la capacité calorifique du système dans l'intervalle de changement de phase. Cette méthode est considérée la plus simple et la moins précise dans les méthodes à maillage fixe.

L'équation d'énergie est donnée par [36]

$$\rho C_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

La capacité effective $C_{eff}(T)$ peut être définie alors comme suit :

$$c_{eff}(T) = c(T) + l_s \delta(T - T_f) \quad (\text{III.9})$$

Avec

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{si } T < T_f \\ C_p + \frac{L_s}{T_\ell - T_s} \delta(T - T_f) & \text{si } T = T_f \\ C_{p\ell} & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Où $\delta(T - T_f)$ représente la fonction de Dirac, qui est infinie à $T = T_f$ et nulle ailleurs. Elle satisfait l'équation suivante :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(T - T_f) dT = 1 \quad (\text{III.11})$$

III.2.2.2.2: Méthode enthalpique :

Une approche alternative très largement utilisée consiste à considérer le domaine d'étude comme une seule phase dont les propriétés thermophysiques dépendent fortement de la température. On se ramène alors à la résolution d'une seule équation de la chaleur, non linéaire, dont le traitement peut être abordé par des schémas classiques de différences finies ou d'éléments finis. Cette méthode, qui revient à exprimer l'équation de la conservation de l'énergie sous forme enthalpique, proposée par Shamsundar et Sparrow [1], est particulièrement bien adaptée aux problèmes qui concernent l'emploi de matériau à changement de phase non purs pour lesquels le changement d'état se produit sur une plage de température

La forme enthalpique de l'équation de la conduction thermique bidimensionnelle s'écrit :

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_h \quad (\text{III.12})$$

avec f_l désigne la fraction liquide dont la valeur est comprise entre $0 \leq f_l \leq 1$ L'enthalpie du système prend alors la forme générale suivante :

$$H = cT + f_l L_s \quad (\text{III.13})$$

Avec $f_l = 1$ dans la région liquide, $f_l = 0$ dans la région solide et $0 \leq f_l \leq 1$ dans la région pâteuse où coexistent les deux phases. Dans la littérature, on suppose très souvent que la chaleur latente varie linéairement avec la température comme suit :

$$f_l = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Après réarrangement nous obtenons :

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_h \quad (\text{III.15})$$

S_h représentent le terme source dans l'équation est donne par :

$$S_h = \rho L_s \left[\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right] \quad (\text{III.16})$$

III.3 Les matériaux à changement de phase MCP

III.3.1 Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des substances avec une haute chaleur latente de fusion avec un point de fusion approprié à l'application. Le principe d'utiliser un accumulateur thermique pour stocker l'énergie latente générée par un procédé n'est pas récent. Son intérêt réside dans l'ajustement des pics de la demande d'énergie. La chaleur ou le froid généré par les équipements et récupéré et stocké dans une batterie thermique et peut par la suite être utilisé lorsque nécessaire, par exemple lors des moments où la demande est à son maximum. La technique permet à la fois de diminuer les appels de puissance et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement en faisant fonctionner à un régime optimal.

III.3.2 Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0 -120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères.[10]

III.3.2.1 Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée ;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- Une fusion congruente ;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

III.3.2.2 Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

III.3.2.3 Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique ;
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable ;
- Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant ;
- Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif.

III.3.2.4 Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité ;
- A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup des matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : les composés inorganiques et organique et les mélange de ces composés (Eutectique).

III.3.3 Différentes types des MCP

III.3.3.1 Les MCP inorganiques

Les matériaux où les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et $+1000\text{ °C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 °C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0 °C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5 °C et 130 °C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150 °C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [27].



Figure III.4 : Hydrates salins.

III.3.3.2 Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [27]

III.3.3.3 Les paraffines

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélange d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont alcanes de formule générale $C_n H_{2n+2}$



Figure III.5 : Les paraffines.

III.3.3.4 Les acides gras

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Ils ont la formule chimique générale suivante : $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$.

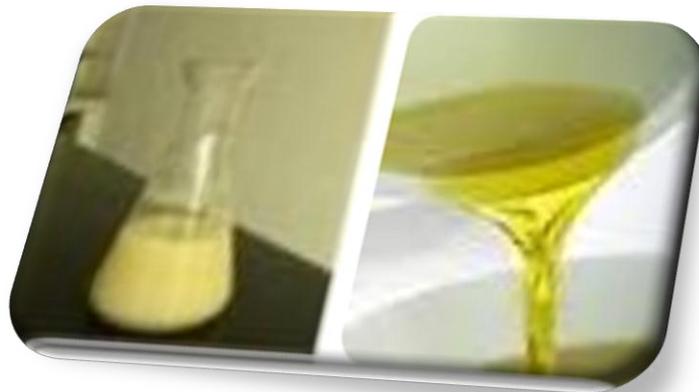


Figure III.6 : Acides gras.

III.3.3.5 Les MCP Eutectique

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, se sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux

inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.



Figure III.7 :MCP Eutectique.

Les caractéristiques de quelques MCP inorganiques sont rassemblées dans le Tableau (III.1)[28]

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Densité ($kg \cdot m^{-3}$)
Substances inorganiques	H ₂ O	0	333	0.612 liq, 20°C	998 liq, 20°C 917 sol, 0°C
	CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	190.8	0.540 liq, 38.7°C 1.088 sol, 23°C	1562 liq, 32°C 1802 sol, 24°C
	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89	162.8	0.490 liq, 95°C 0.611 sol, 37°C	1550 liq, 94°C 1636 sol, 25°C
	MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	168.6	0.570 liq, 120 °C 0.694 sol, 90°C	1450 liq, 120 °C 1569 sol, 20°C
Eutectique inorganique	58.7%Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + 41.3% MgCl ₂ ·6H ₂ O	59	132.2	0.565 liq, 85°C 0.678 sol, 38°C	1550 liq, 50°C 1630 sol, 24°C
Mélange non eutectique de substances inorganiques	50%Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O + 50%HCONH ₂	40.5	255	n.d.	n.d.

Tableau III.1 : MCP inorganiques [28]

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Densité ($kg \cdot m^{-3}$)
Substances organiques	Paraffine C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq, 70°C 0.930 sol, 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq, 83.8°C 0.341 sol, 49.9°C	976 liq, 84°C 1145 sol, 20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène + 32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq, 100°C 0.282 sol, 38°C	n.d.
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153 liq, 38.5°C	878 liq, 45°C 1004 sol, 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 liq, 70°C	848 liq, 100°C 965 sol, 24°C

Tableau III.2 : Les Caractéristiques de quelques MCP organiques [28]

III.3.4 Avantages et les inconvénients des MCP

	Avantages	Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de ségrégation de phase. - Sont chimiquement stables. - La surfusion est négligeable. - Facilement incorporés aux systèmes de stockage de chaleur. - Sobriété écologiques. - 100% recyclables. - Peu sensible aux cycles de fusion/solidification. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K). - Dilatation volumique élevée. - Inflammables. - Coût élevé par rapport aux sels hydratés.
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilité. - Grande chaleur de fusion. - Conductivité thermique élevée. - Faible dilatation volumique. - Bon marché. - Ininflammables. 	<ul style="list-style-type: none"> - La ségrégation. - Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification. - La surfusion. - La corrosivité. - Déshydratation liée aux cycles thermiques.

Tableau III.3 : Avantages et inconvénients des MCP

La bibliographie fournit un grand nombre d'études expérimentales et numériques consacrées à l'étude de la fusion dans les géométries différentes. Parmi les travaux dans le domaine de stockage d'énergie par la chaleur latente nous citons :

Varol et al [30] Ont déterminé expérimentalement les performances d'un capteur solaire (**Fig.III.8.**), utilisant le carbonate de sodium déca hydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) comme matériau à changement de phase, dont la température de fusion est de 306 K. Ils ont comparé ces résultats avec ceux d'un système conventionnel sans MCP et ont prouvé que le système de capteur solaire avec MCP est plus efficace.

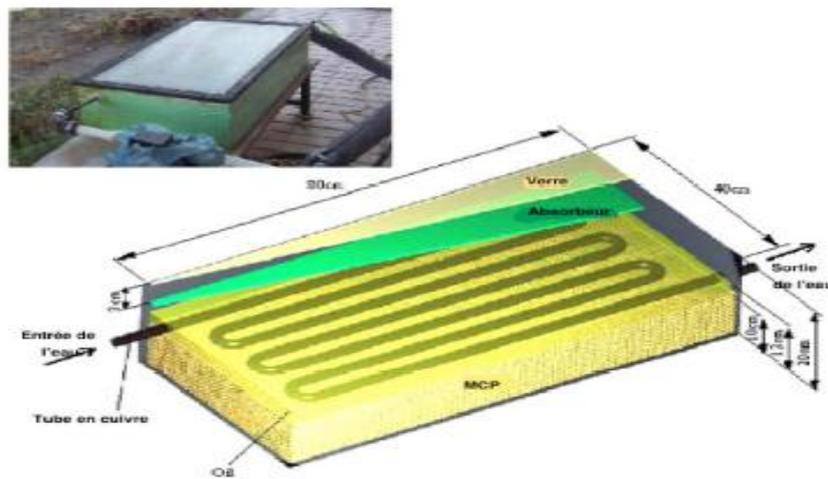


Figure III.8 : Dispositif expérimental et photo réelle du capteur solaire

KhaliketJurinak[31] ont évalué les performances des systèmes de chauffage solaire de l'air à changement de phase en utilisant l'unité de stockage d'énergie. Les principaux objectifs de leur travail étaient de déterminer l'effet de la chaleur latente de fusion MCP sur la performance thermique de l'air des systèmes de chauffage solaire et d'élaborer des modèles empiriques de stockage d'énergie. Le MCP devrait être choisi sur la base du point de fusion plutôt que de sa chaleur latente.

Prakesh [32] a réalisé un chauffe-eau à accumulation contenant une couche de MCP. Pendant les heures d'ensoleillement, l'eau est chauffée et transfère la chaleur vers le MCP en dessous qui la recueille sous forme latente. Pendant les heures hors ensoleillement, par changement de phase de l'état liquide à l'état solide, le MCP libère une énergie récupérable par l'eau froide.

Pour mettre en évidence l'utilité des MCP, deux unités de stockage cylindriques en boucle fermée avec des capteurs solaires plans ont été étudiées séparément au cours d'une journée par Bansal et Buddhi [8] pendant la période de charge et de décharge : une unité de stockage contenant 17,5kg de paraffine ($T_f = 327K$), comme matériau à changement de phase, enfermé dans un échangeur de chaleur en tubes d'aluminium et une autre unité contenant de l'eau comme matériau de stockage dans un réservoir. Il s'est avéré que le stockage par chaleur latente a un rendement relativement plus élevé par rapport au système de stockage approprié.

Benmansouret M.A [18] a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase MCP, traversé par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées est appliqué (Fig.III.9). Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable. Le modèle développé s'applique à la fois pour un processus de changement de phase isotherme et non isotherme. L'évolution de la température à l'intérieur du lit a permis de déterminer les domaines de stockage les plus efficaces et de définir par conséquent les dimensions optimales de l'unité de stockage.

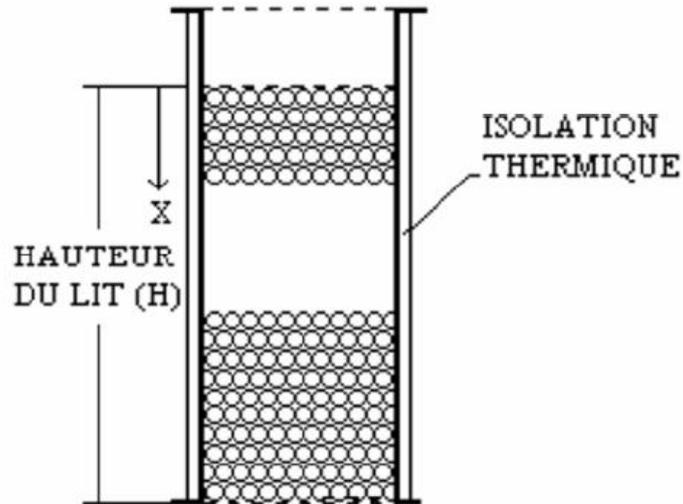


Figure III.9 : Schéma du lit de stockage

Ce modèle a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres dynamiques et thermiques de l'air à l'entrée du lit et de montrer que la vitesse d'écoulement de l'air ainsi que le rapport hauteur/diamètre du lit avaient une influence notable sur le processus de stockage.

Abdeldjellil Benmansour [19] a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C), dans un lit fixe multicouche composé de trois sections de hauteur égale. Chaque section contient un matériau de changement de phase MPC avec des températures de fusion différentes rempli dans des sphères disposées de manière quelconque et traversé par un flux d'air

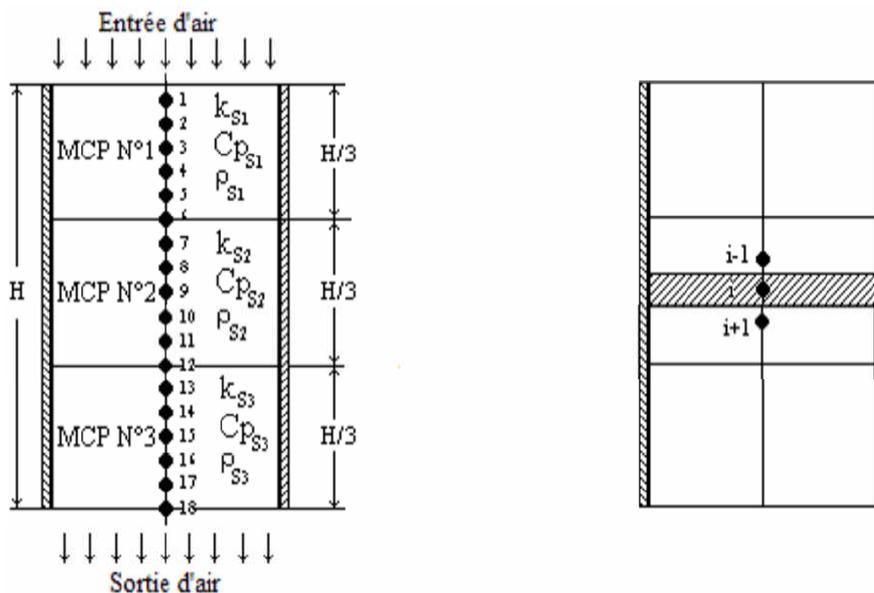


Figure III.10 : Modèle physique d'un Lit de stockage multicouche

Ce modèle a conclu que l'utilisation de trois MCP au lieu d'un seul se traduit par un gain énergétique sensible en particulier pour les faibles débits, et peut être appliqué à un lit multicouches composé d'un nombre de section quelconque.

Abdul Jabbar N [20] a étudié un stockage d'un collecteur solaire qui consiste en pipes du cuivre relié en série est intégré avec un arrière récipient de paraffine solide comme un MCP moyens du stockage thermiques. Pour montrer la possibilité du stockage l'énergie solaire pour un chauffage d'eau.

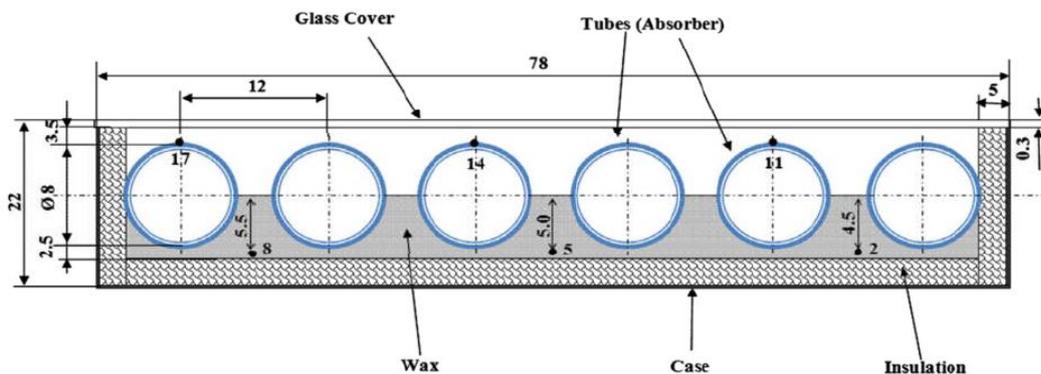


Figure III.11 : un système de stockage

Ce modèle a montré un système c'est refroidi et le MCP liquide a transféré la chaleur à l'eau circulante comme une chaleur utile jusqu'à ce que le MCP ait solidifié, l'eau continue recevoir la chaleur après que le coucher de soleil comme le MCP agisse comme une source de la chaleur. La variation de la plaque moyenne et températures de la cire avec le temps montré une tendance semblable pour les jours clairs de janvier et février, pendant que la température de la cire était pour le jour semi-nuageux de mars trouvez pour être plus grand que la température de l'amortisseur qui signifie le capacité stockage du MCP. Variation presque stable dans le système l'efficacité utile est remarquée pour tous les mois.

A. THIAM [21] a présenté une étude théorique et expérimentale d'un chauffe-eau solaire à changement de phases. Formé de deux sections contiguës dont l'une est remplie de paraffine et l'autre d'eau, ce type de capteur utilise le stockage combiné de la chaleur par l'eau et la paraffine. De faible conductivité thermique, la paraffine est semi-transparente au rayons solaires à l'état solide, elle devient transparente à l'état liquide et en redevenant solide pendant la nuit, elle limite les pertes thermiques de l'eau stockée, ainsi l'eau se conserve à la

température de fusion de la paraffine. Un modèle mono dimensionnel est appliqué au système. Il décrit correctement les performances du capteur en prédisant les évolutions des températures dans la paraffine et dans l'eau stockée. Ce modèle tient compte de la semi-transparente de la paraffine solide et de la convection naturelle dans la paraffine fondue.

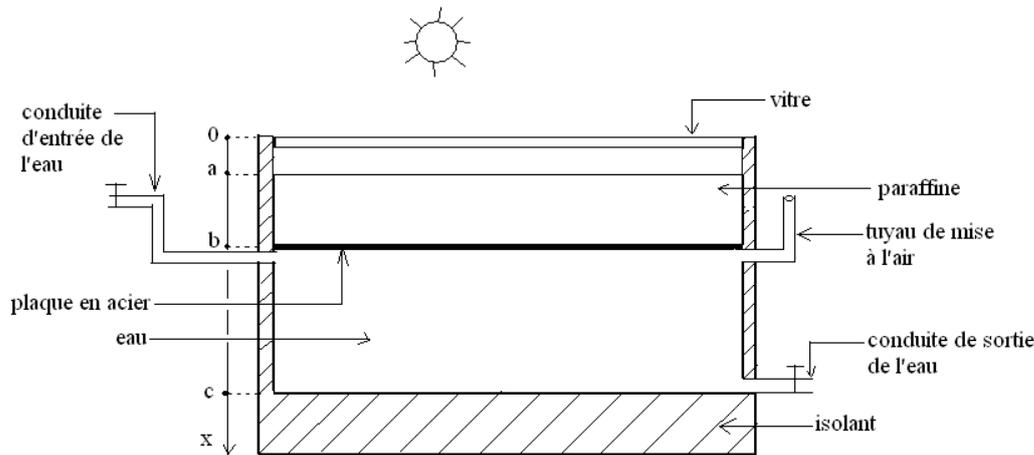


Figure III.12 : Schéma du capteur solaire à changement de phase

S.Tiari, S.Qiu, M.Mahdavi [22] ont présenté une étude numérique des caractéristiques thermiques d'un tuyau à plusieurs ailettes placé dans une unité de stockage par la chaleur latente. Un modèle basé sur les volumes finis à deux dimensions transitoire en employant la technique d'enthalpie-porosité est mis en œuvre pour analyser les performances thermique d'une unité de stockage de forme carré, rempli d'un matériau à changement de phase à température de fusion élevée. L'effet de la longueur et nombre des ailettes de tube ainsi l'influence de la convection naturelle sur le comportement thermique de l'unité de stockage ont été étudiés. Les résultats obtenus montrent que la convection naturelle a un effet considérable sur le processus de fusion du matériau à changement de phase.

L'augmentation du nombre de tubes d'échangeurs de chaleur (en diminuant l'espace entre les caloducs) conduit à l'augmentation la vitesse de fusion et la diminution de la température de la paroi. En outre, l'augmentation de la longueur des ailettes résulte une différence moins importante de température au sein du matériau à changement de phase, avec une répartition plus uniforme de la température. Ils ont montré également que le nombre des ailettes n'a pas un effet significatif sur la performance du système de stockage.

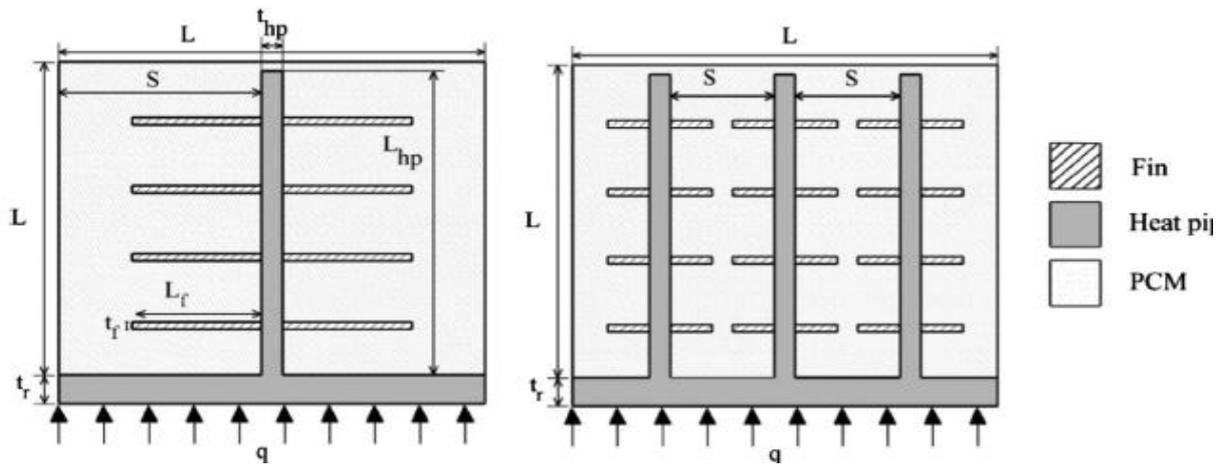


Figure III.13 : Géométrie de l'unité de stockage étudié

J. H. Booa, S.K. Leeband J.K. Kim [23] ont réalisé une analyse numérique transitoire à trois dimensions afin de prédire le transfert de chaleur caractéristiques d'un système de stockage d'énergie thermique pour la gamme de température moyenne-élevée inséré tuyaux. Dans cette étude l'unité de stockage a été remplie d'un matériau à changement de phase (PCM), le nitrate de potassium est traversé par un tube circulaire de 1-m long et 25,4 mm de diamètre étendu entre deux échangeurs de chaleur situées aux extrémités opposées et dans lequel circule de la vapeur chaude Pendant la période de stockage de chaleur. Les températures de vapeur au cours de stockage et déstockage sont 668 K et 513 K, respectivement. La capacité du transfert de chaleur de tube a été représenté par une structure solide avec une très haute conductivité thermique efficace estimée par les données expérimentales dans le domaine de température moyen-élevé. Deux cas de tubes d'échangeurs de chaleur avec et sans ailettes ont été comparés.

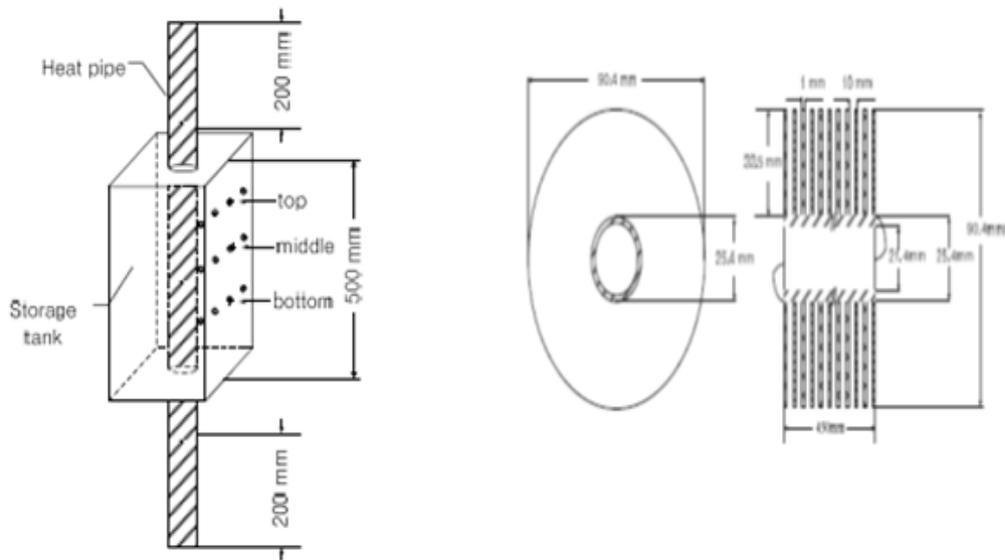


Figure III.14 : Géométrie de l'unité de stockage et le schéma de tube avec des ailettes

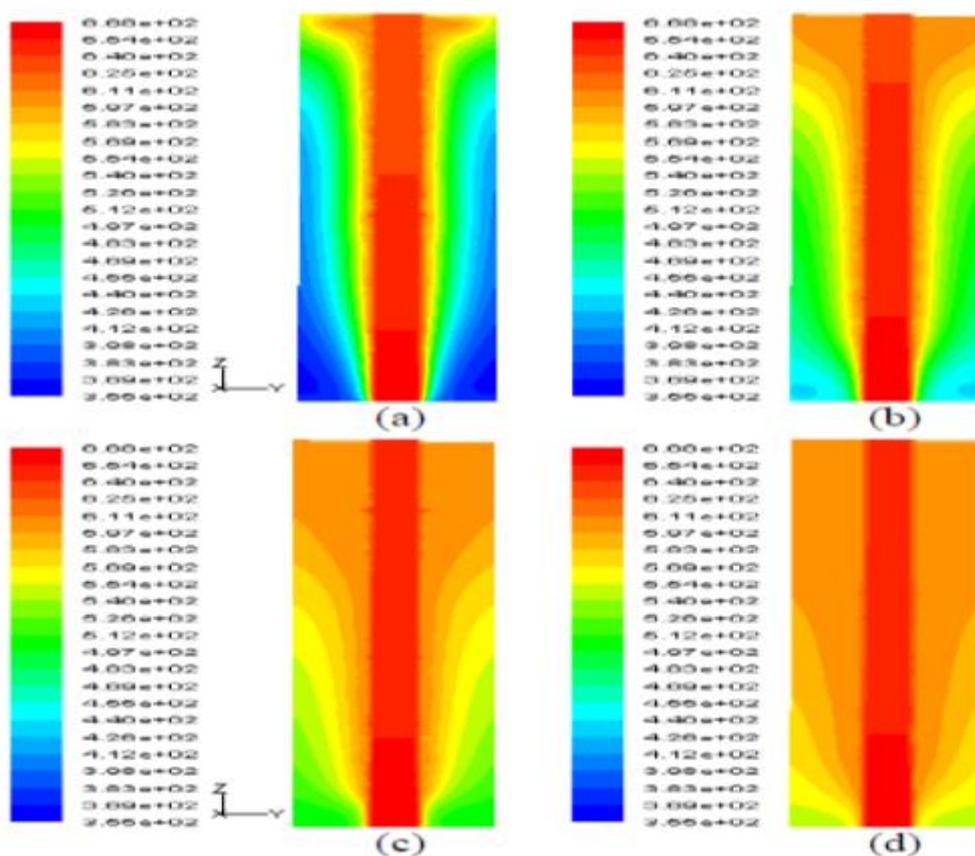


Figure III.15 : l'évolution de la température du MCP durant la période de stockage pour un tube sans ailettes. a)1h, b)2h, c)3h, d)4h

Dans le cadre de l'expérience sur le stockage thermique par la chaleur latente le centre de recherche CEA [24] présente un montage expérimental qui consiste d'un tube de 4 centimètres de diamètre et de 40 centimètres de long, transparent. 40 mesures de température sont effectuées le long du tube pour permettre le suivi précis du front de fusion et la validation des simulations. Le tube est rempli de paraffine et traversé par un serpentin de cuivre dans lequel circule de l'eau chaude. Plus l'eau chaude parcourt le tuyau de cuivre (de gauche à droite) plus la paraffine se liquéfie. Les mouvements de convection naturelle conduisent à un début de liquéfaction de la paraffine à l'extrémité opposée de l'arrivée d'eau chaude (**FigureIII.16**).



FigureIII.16 :Dispositif expérimental de CEA

Chapitre IV

Position

de

problème

IV.1 Introduction

Ce travail porte sur une étude de simulation numérique comparative entre deux méthodes de stockage d'énergie thermique, la première est par la chaleur latente utilisant un matériau à changement de phase MCP et la deuxième est par la chaleur sensible utilisant un matériau solide. La simulation numérique sera effectuée à l'aide du logiciel **Fluent 6.3.2**.

L'élément de stockage d'énergie thermique à étudier est un échangeur thermique de forme cylindrique remplie par un matériau à changement de phase MCP (modèle 1) ou un matériau solide (modèle 2) placé en horizontal et traversé par un tube en aluminium dans lequel circule de l'eau chaude. La géométrie est en trois dimensions.

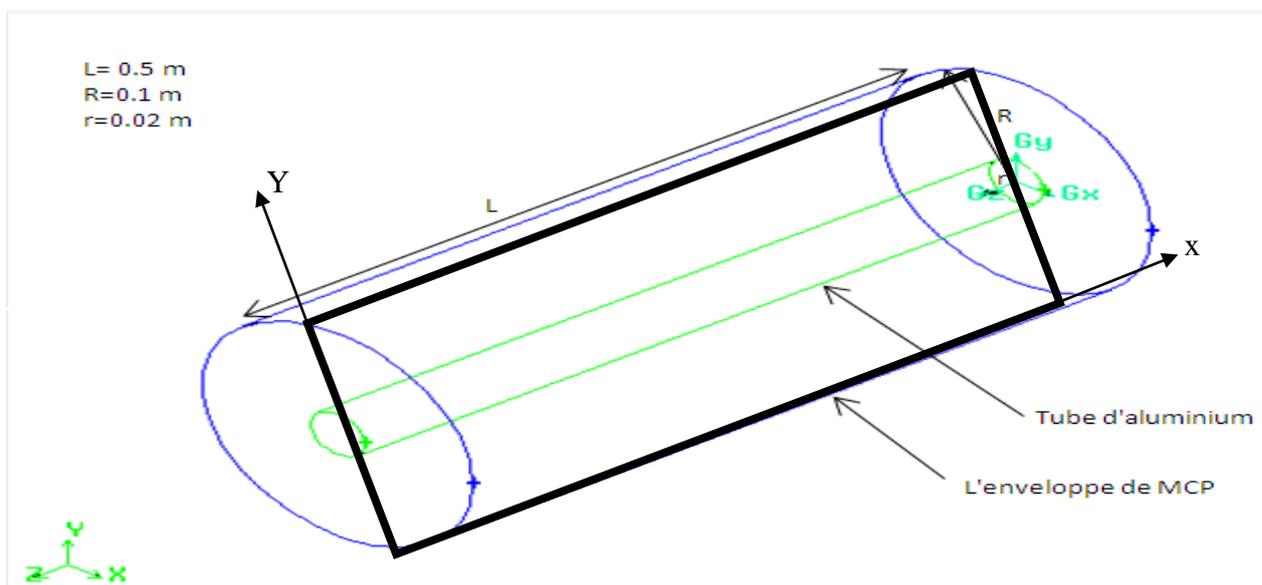


Figure IV.1 : Géométrie de l'élément de stockage en 3D

IV.1.1 Hypothèses simplificatrices :

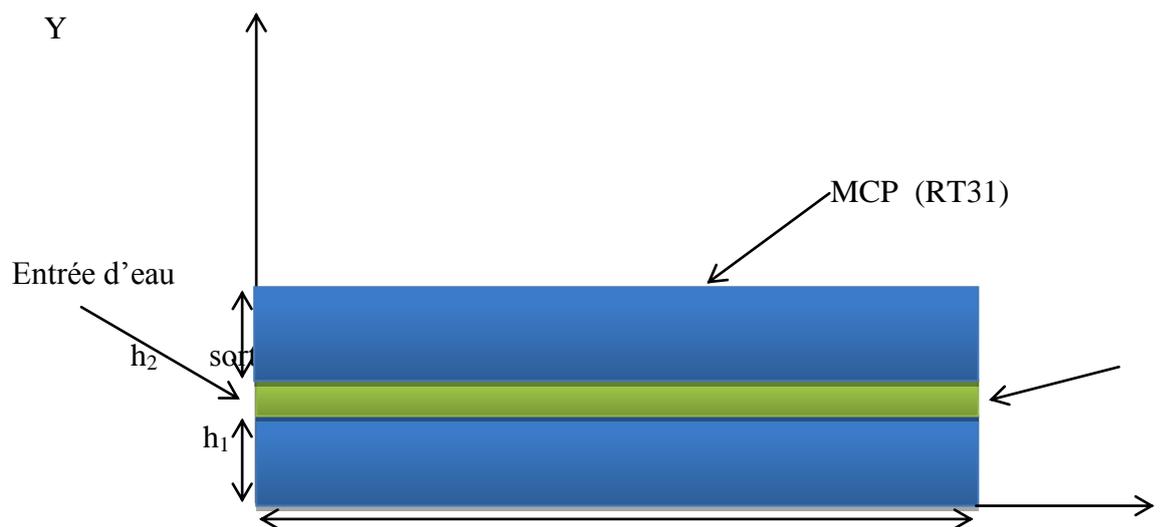
- Le problème est bidimensionnel (le plan (xy) est considéré) et transitoire.
- L'enceinte est parfaitement isolée.
- La loi de Fourier est retenue pour décrire la conduction dans le matériau solide.
- L'écoulement est considéré incompressible et laminaire.
- Les propriétés physiques du MCP sont constantes pour la phase liquide ainsi que la phase solide.
- La convection naturelle dans la phase liquide du MCP est prise en compte par le biais de l'hypothèse de Boussinesq.

- Tout autre phénomène de transfert de chaleur (comme le rayonnement) est négligé.

IV.2 Modèle01 : Stockagethermique par la chaleur latente:

IV.2.1 Modèle physique :

Le modèle physique étudié est un échangeur thermique rempli par un MCP de type RT31 et traversé par un tube en aluminium dans lequel circule de l'eau chaude pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées. Les paramètres géométriques du modèle sont représentés dans la **Fig.IV.2**. Les propriétés thermo-physiques sont données dans les tableaux suivants (**tableau IV.1**) et (**tableau IV.2**), respectivement.



FuguerIV.2. :Géomètre étudié (modèle1)

X

Tableau IV.1. Dimensions de la géométrie étudiée

Démenions	Valeur
Longueur	0.5 m
Epaisseur du MCP $h_1 = h_2$	0.04 m
Diamètre de tube	0.002m

Tableau (IV.2) Propriétés des matériaux utilisé [36]

Propriétés	RT31	L'eau
Masse volumique ρ [Kg/m ³]	820	998.2
Chaleur spécifique c_p [J/Kg k]	2000	4182
Conductivité thermique λ [W/mk]	0.2	0.6
La viscosité dynamique μ [kg /m-s]	0.0234	0.001003
Température de solidus [K]	300	
Température de liquidus [k]	304	
LA chaleur latente [J/kg]	170000	

IV.2.2 Formulations mathématique

Les équations qui gouvernant l'écoulement d'un fluide bidimensionnel, newtonien, incompressible en écoulement laminaire sont :

➤ **Equation de conservation de masse :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

Pour un fluide incompressible la masse volumique demeure constante et on a $\frac{\partial \rho}{\partial t} =$

0, donc :

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

(IV.2)

Où u et v sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y respectivement.

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Suivant (Ox) :

$$\rho \left(\frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} \right) = - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_U \quad (\text{IV.3})$$

Suivant (Oy) :

$$\rho \left(\frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} \right) = - \frac{dp}{dy} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_\infty) + S_v$$

(IV.4)

$\rho g \beta (T - T_{ref})$ Représente de terme de l'approximation de Boussinesq. La masse volumique du fluide varie avec la température et cette variation de la masse volumique est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est faible, on peut traiter la masse volumique comme constante dans les termes transitoire et convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source. Pour notre cas d'étude la température opérationnelle est de 293K et la densité reste constante.

S_x et S_y représentent les termes sources dans les directions x et y , respectivement, utilisées pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région pâteuse. Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions solide et pâteuse :

$$S_x = Au \quad \text{et} \quad S_y = Av \quad (\text{IV.5})$$

Avec A représenté la porosité exprimée par

$$A = C \frac{(1-f_\ell)^2}{f_\ell^3 + 0,000001}$$

(IV.6)

C et f_ℓ représentent la constante du darcy et la fraction massique, respectivement.

$$f_\ell = \begin{cases} 1 & \text{si } T > T_1 \\ \frac{T-T_s}{T_1-T_s} & \text{si } T_s < T < T_1 \\ 0 & \text{si } T < T_s \end{cases}$$

(IV.7)

➤ **Equation de conservation d'énergie :**

En tenant compte du phénomène de changement de phase dans un matériau à changement de phase en cours de la fusion, trois régions distinctes peuvent être considérées : une région solide, une région liquide et une région pâteuse où coexistent les deux phases. Nous avons adopté un modèle enthalpie-porosité dont l'équation gouvernante est celle de l'énergie :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + S_T \quad (\text{IV.8})$$

Avec

$$S_T = -\rho L_s \left(\frac{\partial f_\ell}{\partial t} + U_s \frac{\partial f_\ell}{\partial x} + V_s \frac{\partial f_\ell}{\partial y} \right)$$

(IV.9)

IV.3 Modèle02 : Stockage thermique par la chaleur sensible:

IV.3.1 Modèle physique

Le modèle physique étudié est un échangeur thermique rempli par un matériau solide (la roche) chauffé par un tube en aluminium dans lequel circule de l'eau chaude pour stocker la chaleur durant les périodes ensoleillées. Les paramètres géométriques du modèle02 sont les mêmes représentés dans la **Fig.IV.2** sauf que le MCP est remplacé par un matériau solide. Les propriétés thermo-physiques sont données dans le tableau **(IV.3)**.

Tableau IV.3. : Propriétés du matériau solide.[10]

Propriétés	Matériau solide(la roche)
Masse volumique ρ [Kg/m ³]	2700
Chaleur spécifique c_p [J/Kg k]	920
Conductivité thermique λ [W/mk]	1.5

IV.3.2 Formulation mathématique

Les mêmes équations de conservations du premier modèle01 sont utilisées, seulement le terme de changement de phase dans l'équation d'énergie est supprimé. Alors l'équation de la conservation de l'énergie devienne :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{IV.10})$$

IV.3.3 Les conditions initiales et aux limites :

IV.3.3.1 Conditions initiales :

- pour l'eau :

A l'entrée de tube : on fixe le débit et la température

$$q_m = 0,05 \text{ kg/s}$$

$$T = T_{in} = 323 \text{ k}$$

A la sortie : On suppose un écoulement pleinement développé imposant un gradient nul de toutes les variables :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.11})$$

- pour le MCP et le matériau solide la température initiale est :

$$T=293 \text{ k}$$

IV.3.3.2 Conditions aux limites :

- Aux parois : on suppose des vitesses nulles et les gradients de température sont nuls

$$u = v = 0$$

(IV.12)

$$\frac{dT}{dx} = 0$$

sur les parois verticales

(IV.13)

$$\frac{dT}{dy} = 0$$

sur les parois horizontales

(IV.14)

IV.4 Simulation numérique :

La simulation numérique est effectuée à l'aide du code commercial **Fluent 6.3.2**.
La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

IV.4.1 Création de la géométrie :

On trace la géométrie sur logiciel Gambit 2.3.16 comme indique la **Figure. IV.3**

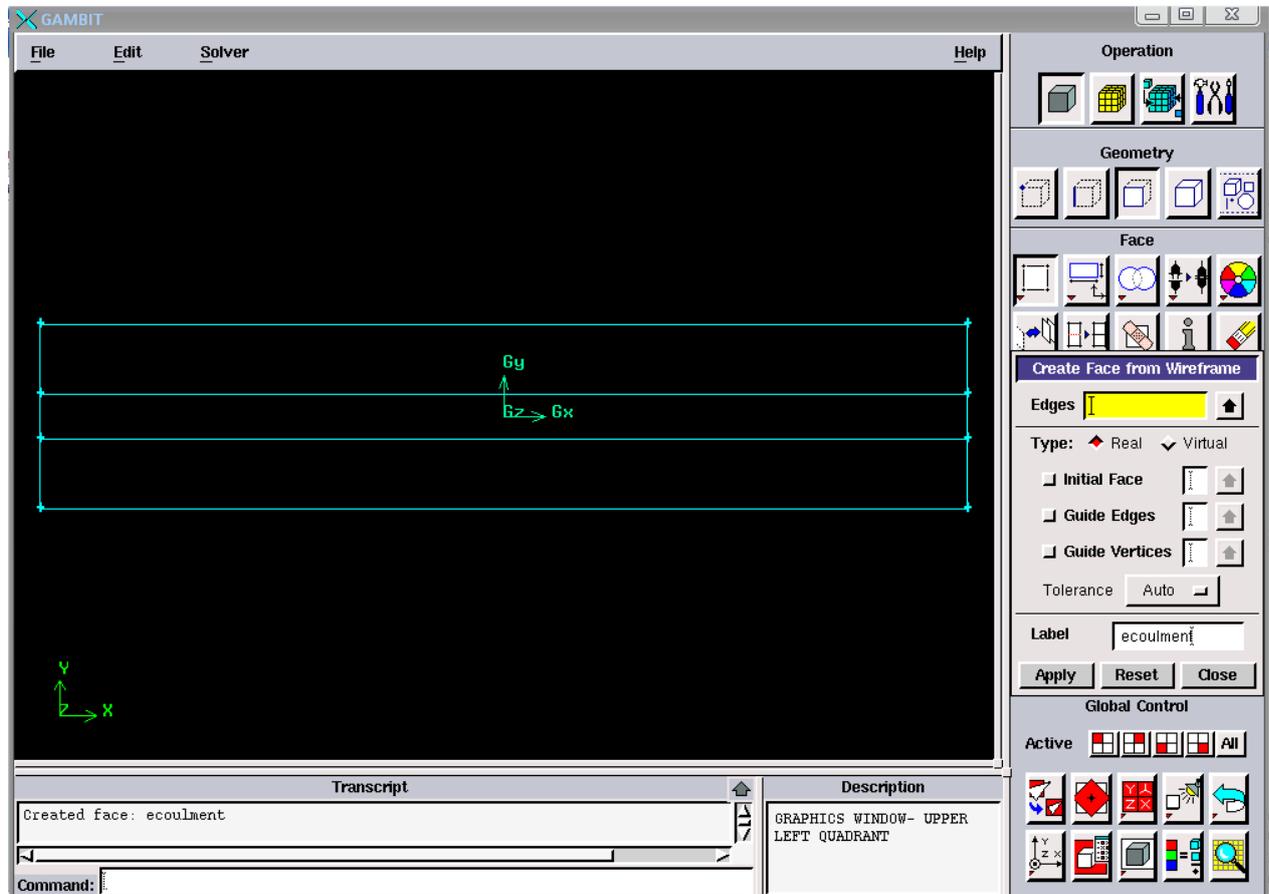


Figure IV.3. :Création de la géométrie.

IV.4.2 Choix du maillage :

Un teste sur le maillage a été effectuée pour déterminer le meilleur temps de calcul pour une meilleure approximation (convergence, précision). Un nombre de nœuds 50000 a été adopté (Figure IV.4)

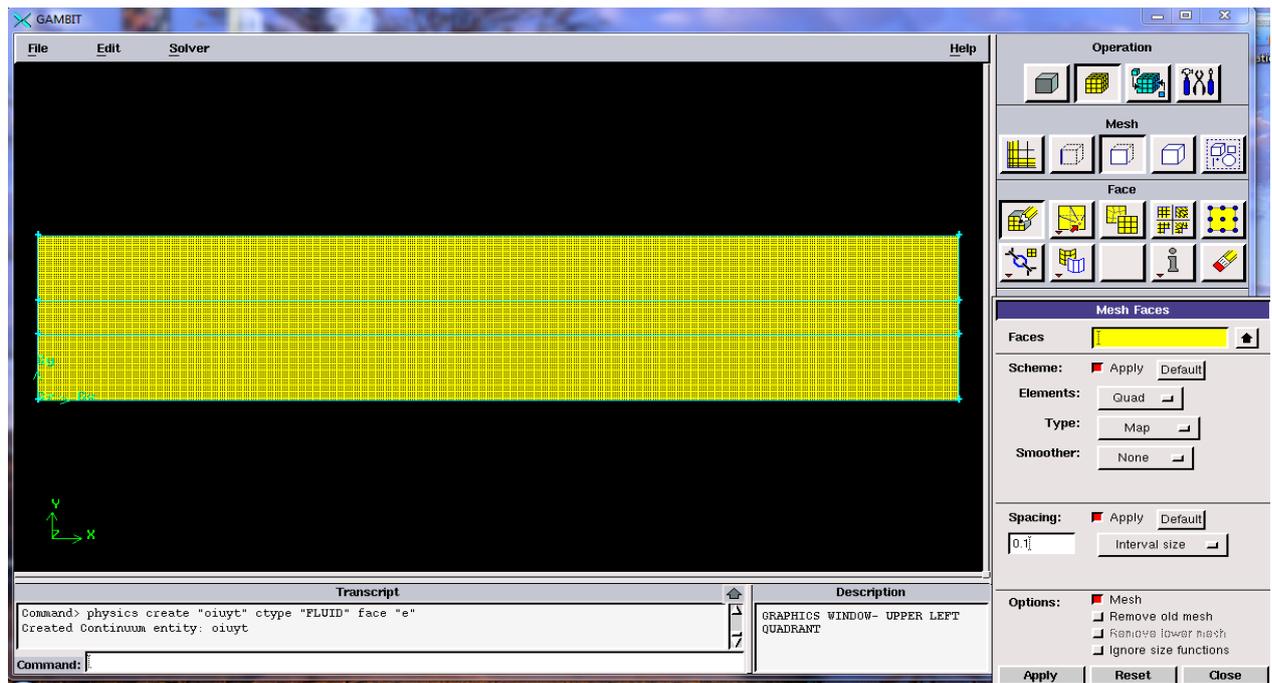


Figure IV.4 : maillage adobté

IV.4.3 Exporte un fichier contient le maillage de notre model physique étudié

Pourtant le nom essaiMCP File → export → msh

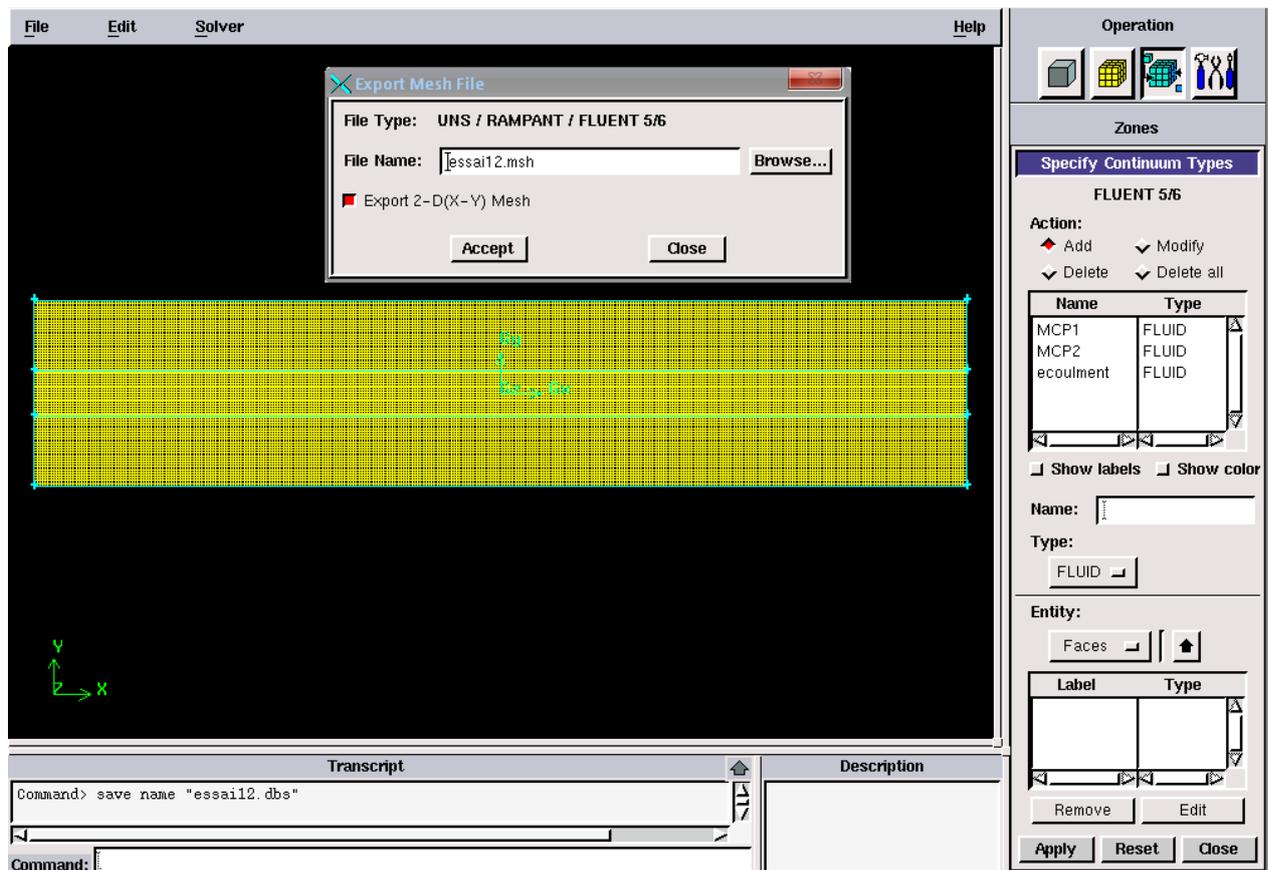


Figure IV.5 :fenêtre d’exportation de maillage.

IV.4.4 Fluent :

File → Import → case, Fig. 4.6

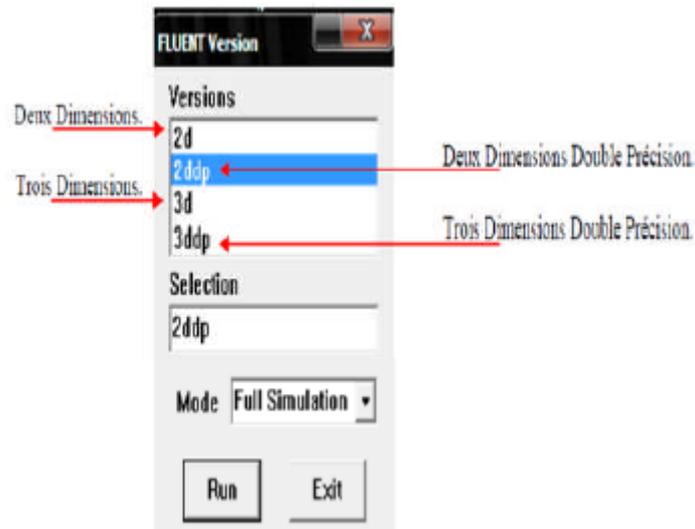


Figure IV.6 : Type de résolution.

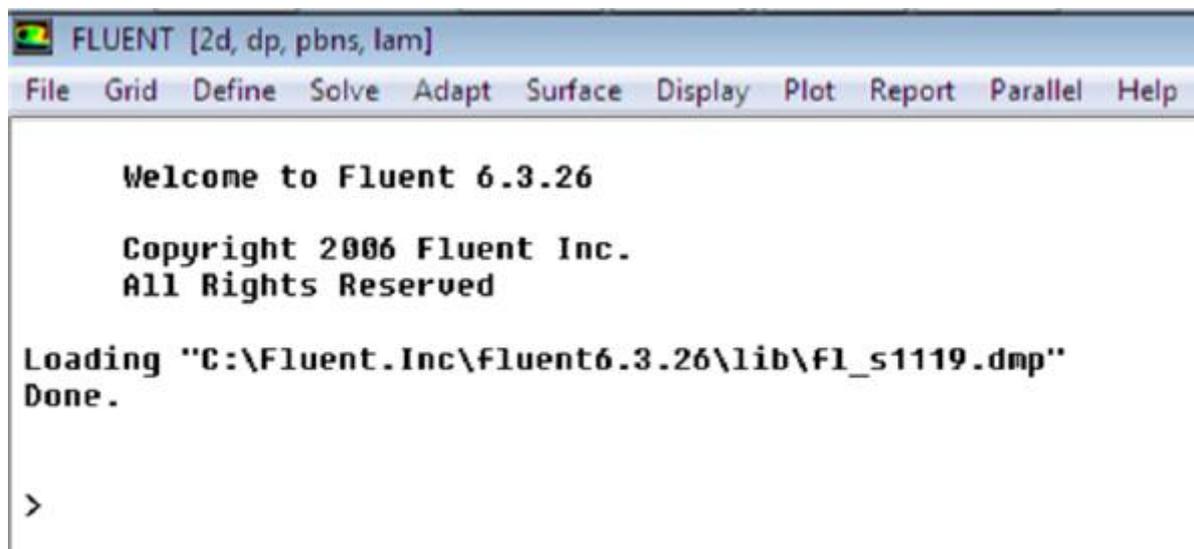


Figure IV.7 : Vue globale

IV.4.5 Importation de la géométrie (*.msh) :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case...

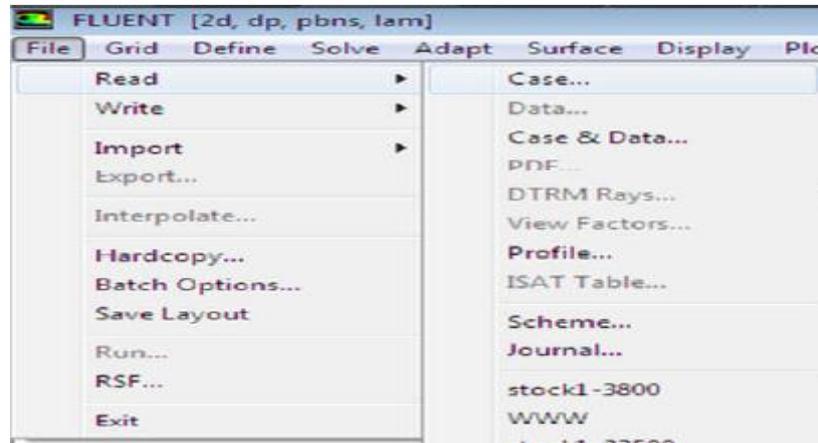


Figure IV.8 : Importation de la géométrie.

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite.

IV.4.6 Sauvegarde des calculs

Pour sauvegarder les calculs : File → write → autosave

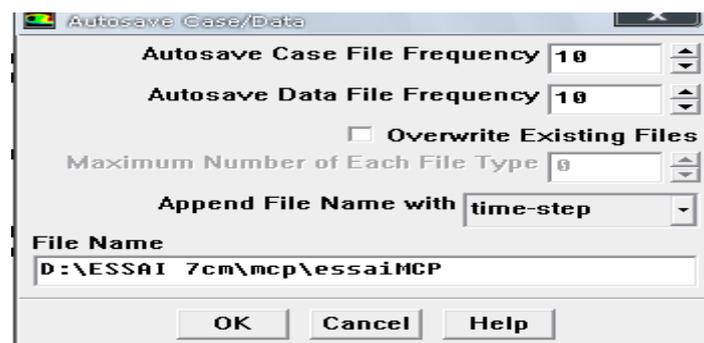


Figure IV.9: Autosave case/data

IV.4.7 Lancement des calculs :

On commence les calculs après le choix du nombre des itérations, et le pas de temps.

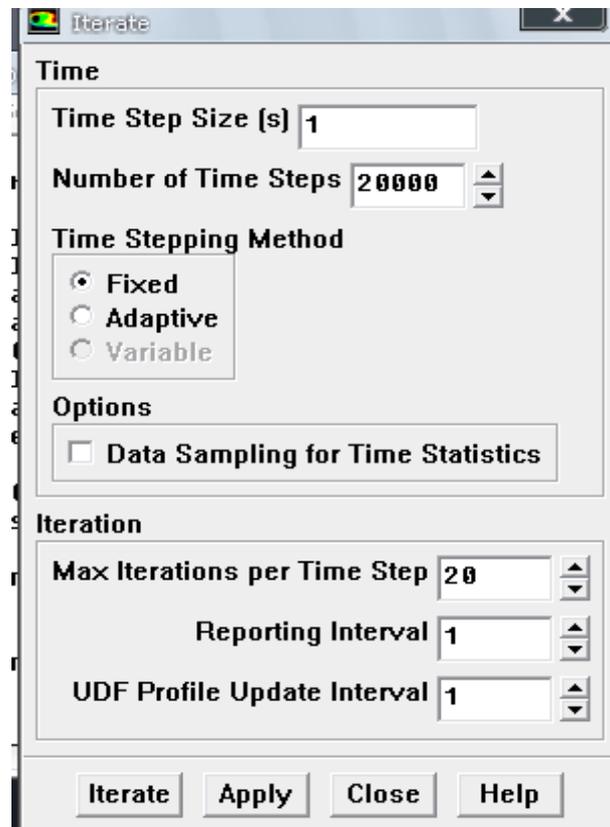


Figure IV.10 : Choix de pas de temps le nombre itérations.

IV.4.8 Résiduel :

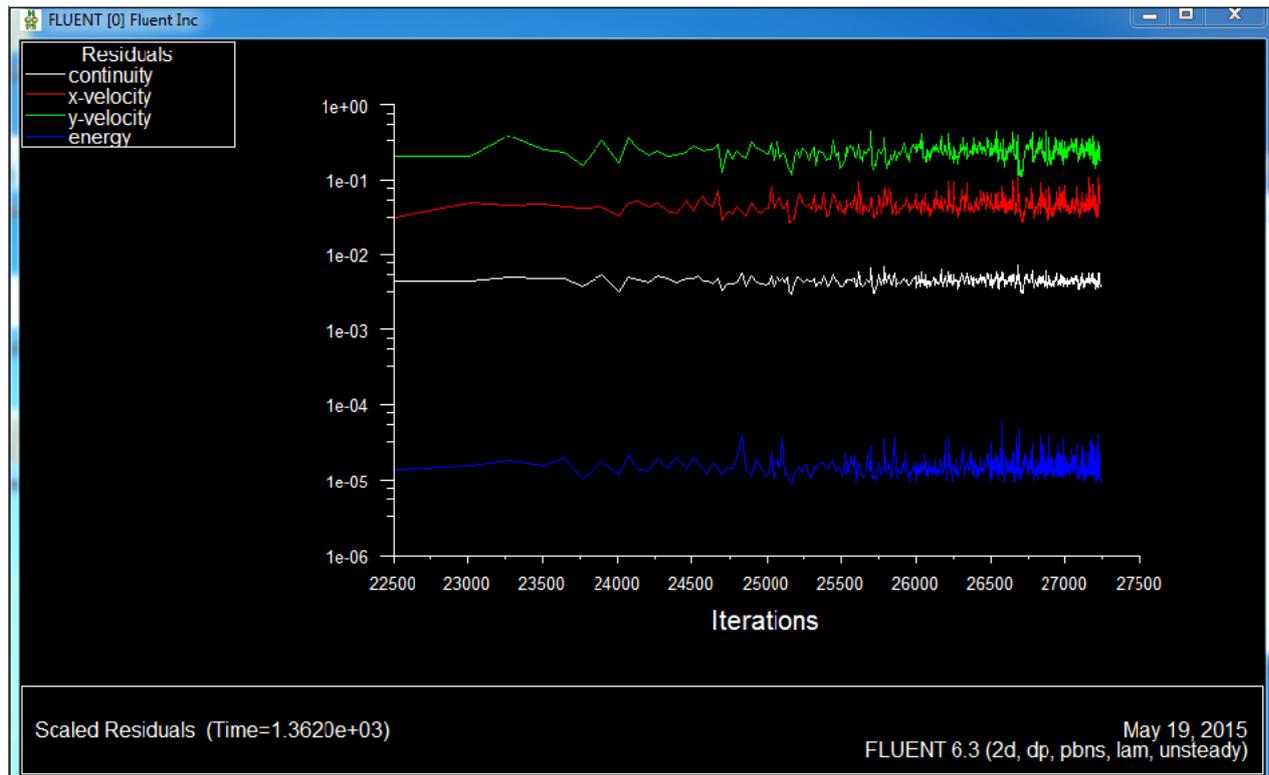


Figure IV.11 :Résiduel.

Chapitre V

Résultats et Interprétation

V. Résultats et discussions

V.1 Modèle 1 : stockage horizontal par la chaleur latente (MCP)

Le modèle 1 étudié consiste d'un élément de stockage en position horizontale remplie par un matériau de changement de phase (RT31) est traversé par un tube en aluminium dans lequel circule l'eau.

V.1.1 Champ de température

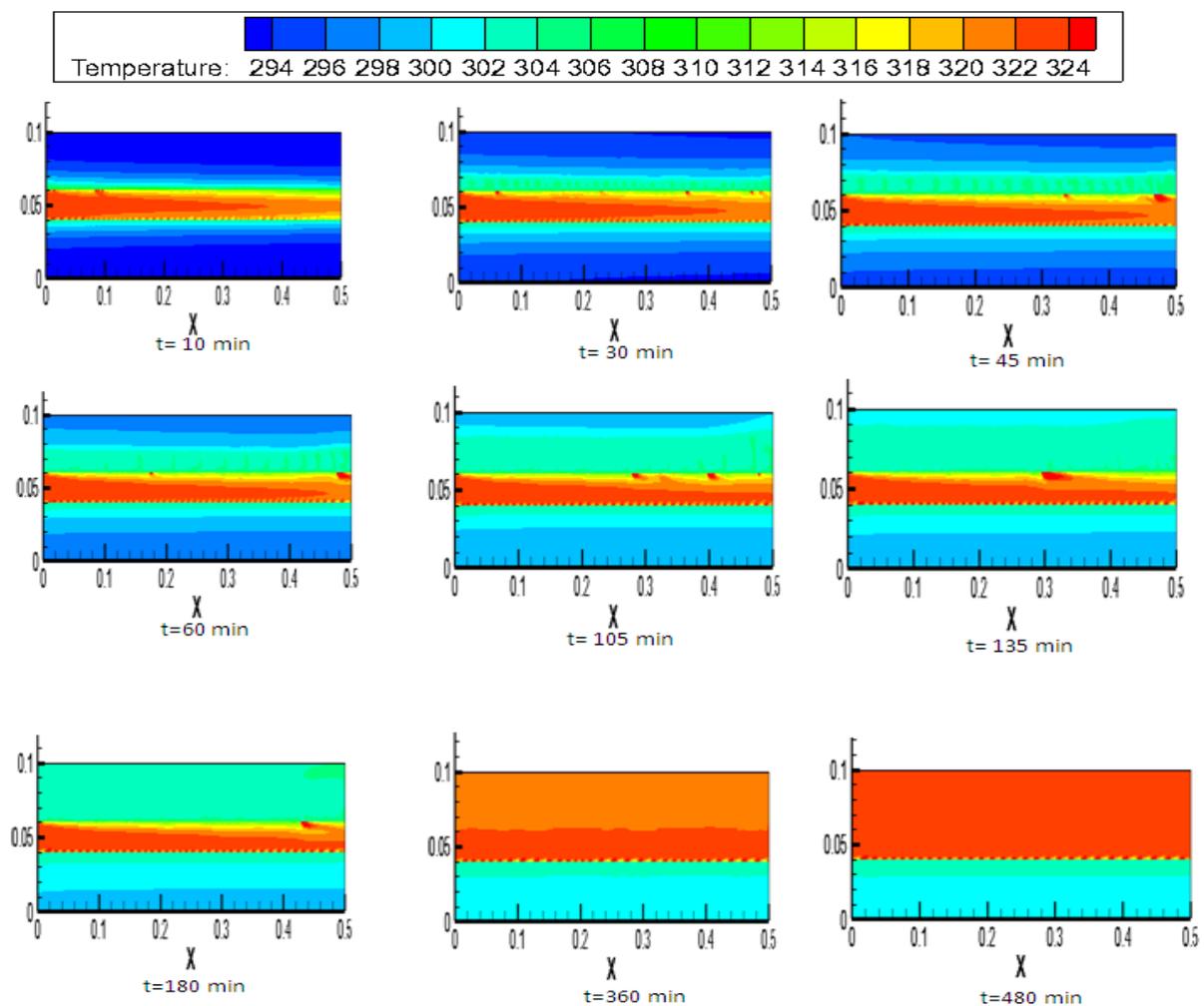


Figure V.1 : Evolution de température en fonction du temps pour le MCP

La figure (VI.1) présenté la variation de la température en fonction du temps (pour $t = 30$ min, 45 min, 60 min, 105 min, 135 min, 180min, 360 min et 480 min) pour MCP,

Initialement, les températures du MCP et de l'eau sont présent à 293 K. A $t = 0$, on impose à l'entrée de la conduite une température de 323 K avec un débit de 0,05 kg/s

A $t=10$ min on remarque que les isothermes sont stratifiées indiquant que le transfert de chaleur est dominé par la conduction cela indique que le matériau à changement de phase est encore totalement à l'état solide.

Pour la région supérieure de l'élément de stockage où l'eau circule au dessous du MCP, on remarque à $t=60$ min que l'évolution des isothermes connaissent une légère courbure du côté droit. Au cours du temps cette courbure devient plus en plus importante où la convection domine le transfert par rapport à la conduction.

Pour la région inférieure de l'élément de stockage où l'eau circule au dessus du MCP, on remarque que les isotherme sont encore stratifiées indiquant que la conduction est toujours dominante ce qui explique le retard de son échauffement par rapport à la région supérieure.

V.1.2 La fraction liquide

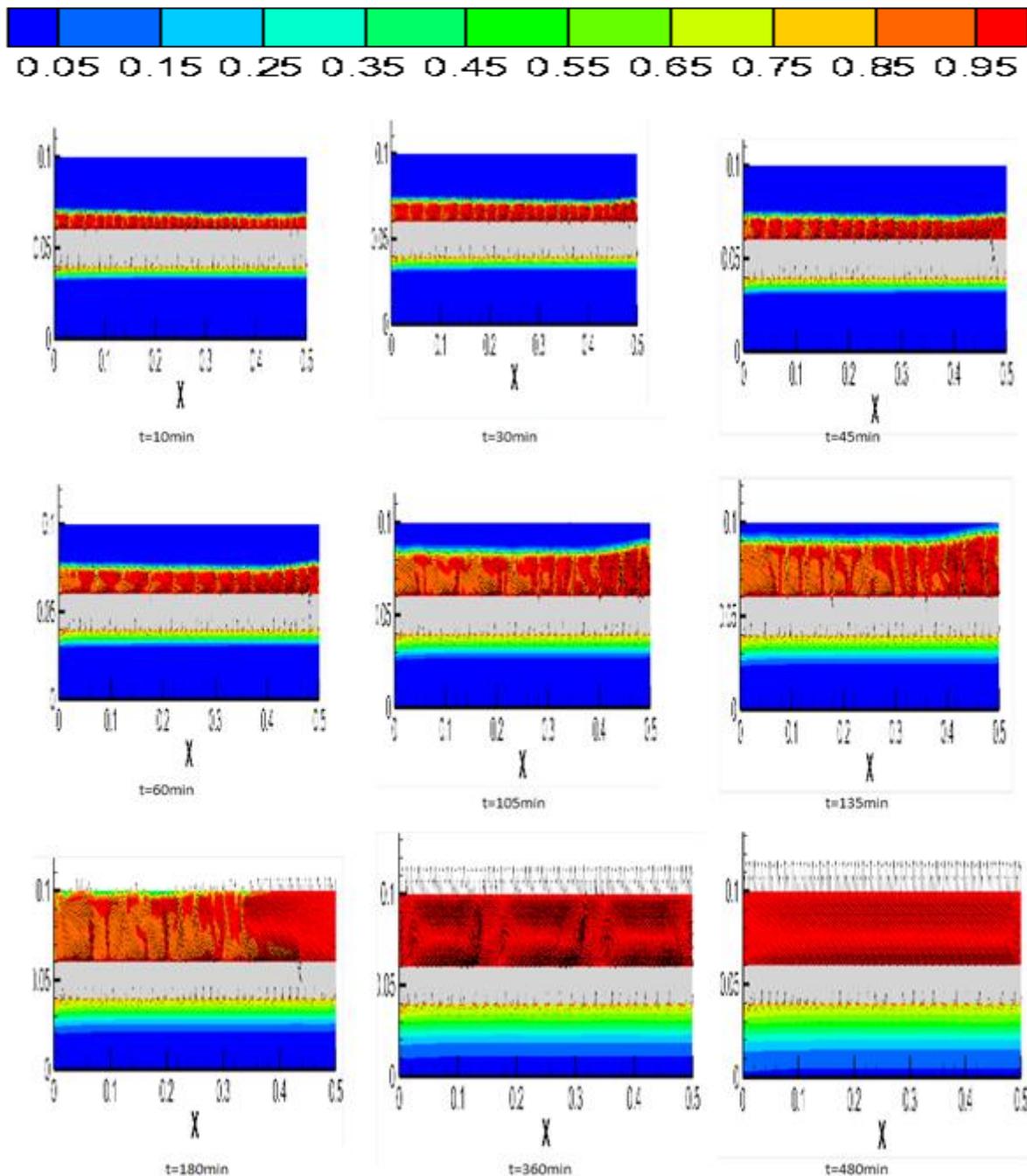


Figure V.2 : évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour le MCP

La figure(VI.2) présente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps, le fond bleu indique la région solide ($f_l=0$) et le fond rouge indique la région liquide ($f_l=1$) et le fond en différent couleur indique la région pâteuse ($0 < f_l < 1$).

A $t = 10$ min on remarque l'apparition d'un film liquide marquant le début de la fusion du MCP dans la région supérieure de l'élément de stockage au voisinage de tube dans lequel circule de l'eau chaude. La température de fusion est 302 K.

Au début de la fusion, on remarque que le front se déplace parallèlement à la surface chauffante (le tube).

A $t = 60$ min une légère déformation de l'interface est remarquée au côté droit de la région supérieure de l'élément de stockage avec une augmentation de la vitesse de fusion. Cela se traduit qu'au fur et à mesure que l'épaisseur fondue augmente, la variation de la masse volumique du matériau liquide avec la température induit des forces de volume qui créent des mouvements de convection naturelle dans le liquide (terme de Boussinesq), ces derniers augmentant de façon non uniforme le transfert de chaleur à l'interface.

A $t = 135$ min l'accélération de la vitesse de fusion est plus remarquable vers le haut que vers le bas à cause du transfert thermique par convection libre, après 360 min le MCP en haut est complètement fondu couleur rouge par contre la région inférieure de l'élément de stockage est encore en différent couleur (une région pâteuse) indiquant que le MCP n'est pas totalement fondu, en plus le front de la fusion se déplace doucement en parallèle avec la surface chauffante indiquant que la fusion est dominée par la conduction au sein de liquide.

On remarque aussi que les vecteurs vitesse montent vers le haut dans la région inférieure de l'élément de stockage indiquant l'absence de la convection naturelle, ce qui explique le retard de la fusion.

A $t = 480$ min la couleur rouge n'est pas encore atteinte.

V.2 modèle2 : stockage horizontal par la chaleur sensible :

Le modèle étudié consiste d'un élément de stockage en position horizontal remplie par un matériau solide la Roche est traversé par un tube en aluminium dans le quel circule de l'eau.

V.2.1 Champ de température

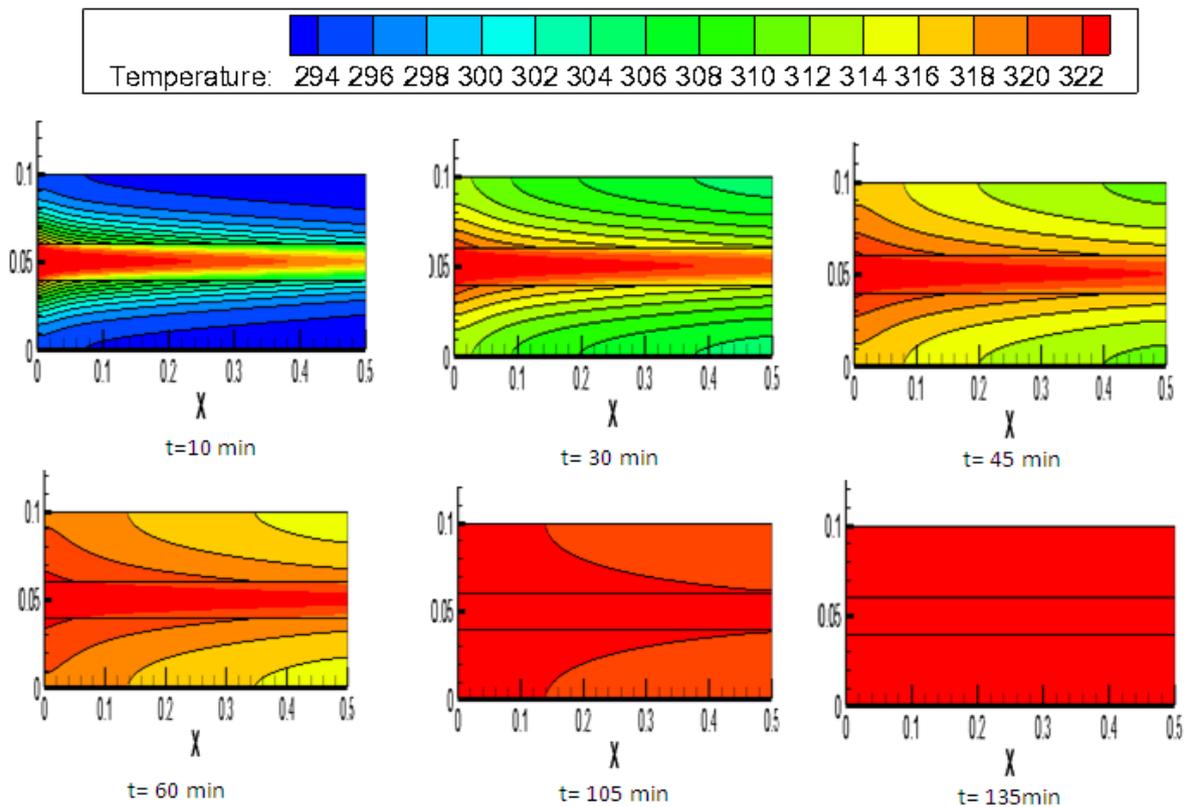


Figure V. 3. Les contours de la variation de température en fonction du temps pour le matériau solide (La Roche)

La figure (VI.3) présente la variation de la température en fonction du temps (pour $t = 30$ min, 45 min, 60 min, 105 min, 135 min) pour un matériau solide (La Roche).

Initialement, les températures du matériau solide et de l'eau sont présentes à 293 K. À $t = 0$, on impose à l'entrée de la conduite une température de 323 K avec un débit de 0,05 kg/s

À $t = 10$ min on remarque que la température de l'eau varie le long du tube qui signifie un échange thermique entre le tube et le matériau solide.

Les isothermes dans le matériau solide sont de forme hyperbolique indiquant que le transfert de chaleur est dominé par conduction.

L'évolution des isothermes connaissent une diminution de gauche vers la droite de l'élément de stockage, on remarque aussi que la répartition de la température est symétrique dans les deux régions supérieure et inférieure de l'élément de stockage.

Au cours de temps l'élément de stockage emmagasine la chaleur transférée par l'eau.

A $t = 135$ min la température est homogène dans tout l'élément de stockage.

V.3 Comparaison entre le stockage par un MCP et le stockage par un matériau solide

V.3.1 Champ de température :

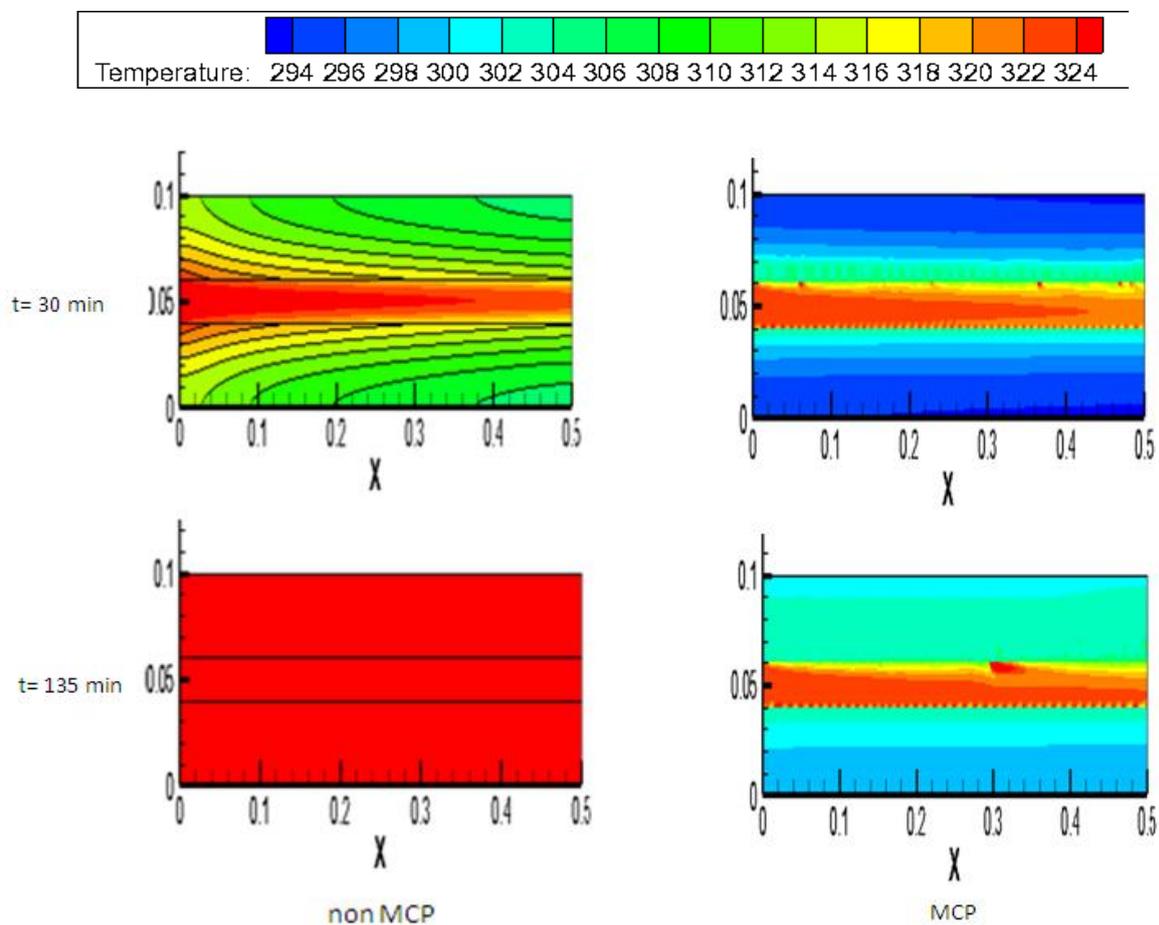


Figure V.4 évolution de température en fonction du temps pour les deux cas MCP et la Roche

La **Figure V.4** présente l'évolution de température en fonction du temps pour les deux cas MCP et la Roche

Au bout de 135min, on remarque que le matériau solide a une température homogène maximale qui t'égale à $T = 323 \text{ K}$.

Le MCP est encore en différents de couleur, pour la région supérieure la température entre 302K et 304K et pour la région supérieure la température entre 298K et 302K indiquant une température inférieure à la température du matériau solide.

On remarque que la température atteinte dans le matériau solide est plus importante que celle atteinte au MCP. En revanche, cette différence de température n'affecte pas l'énergie stockée dans l'élément de stockage rempli par un matériau solide par rapport a ce rempli de MCP.

V.4 L'effet de l'épaisseur

On propose d'augmenter l'épaisseur de l'élément de stockage pour voir son influence sur le champ de température et la fraction liquide. La géométrie et les dimensions sont données dans la **Figure V.5**

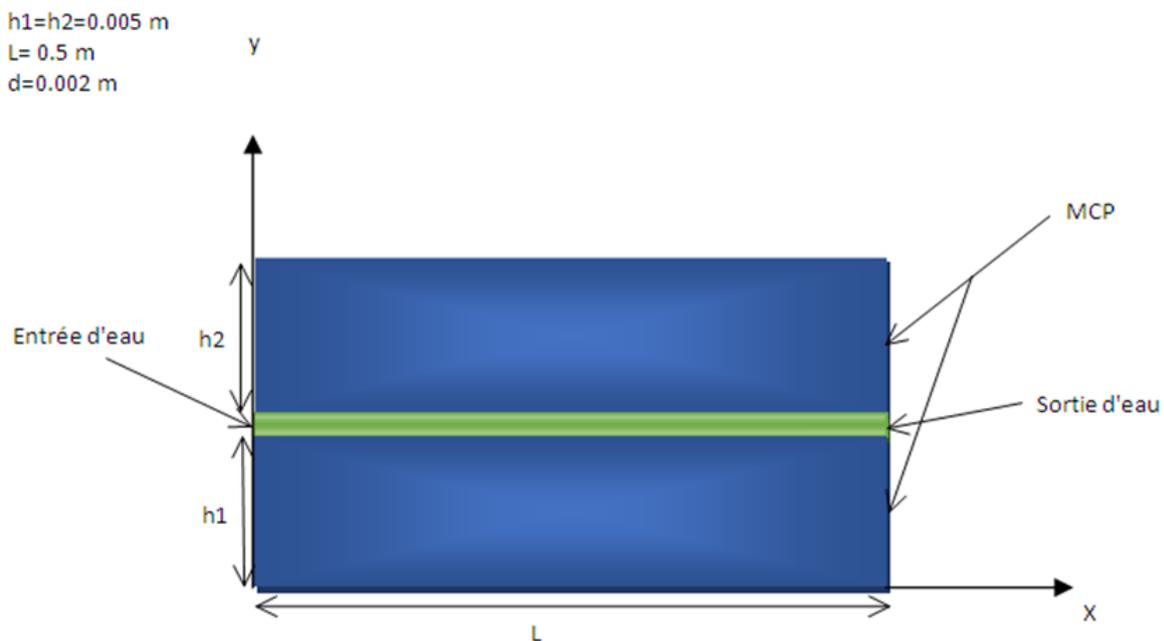


Figure V.5 : géométre étudié

V.4.1 Pour le stockage par MCP

V.4.1.1 Champ de température

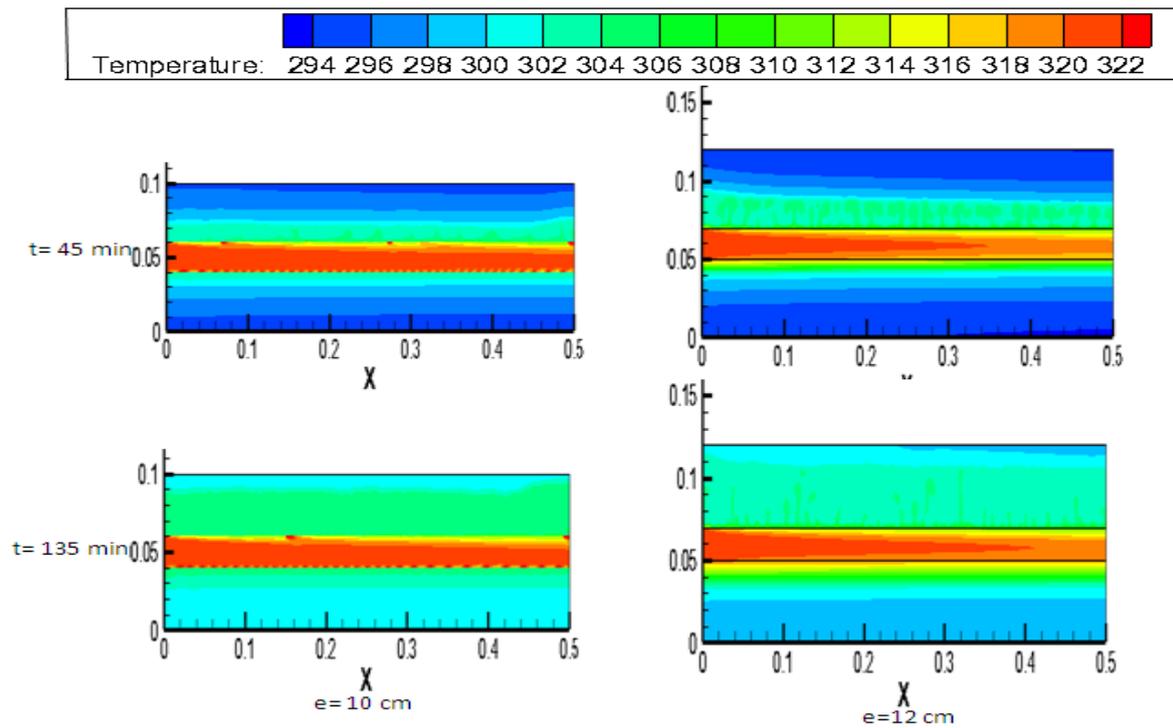


Figure V.6 Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de température en fonction du temps

V.4.1.2 La fraction liquide

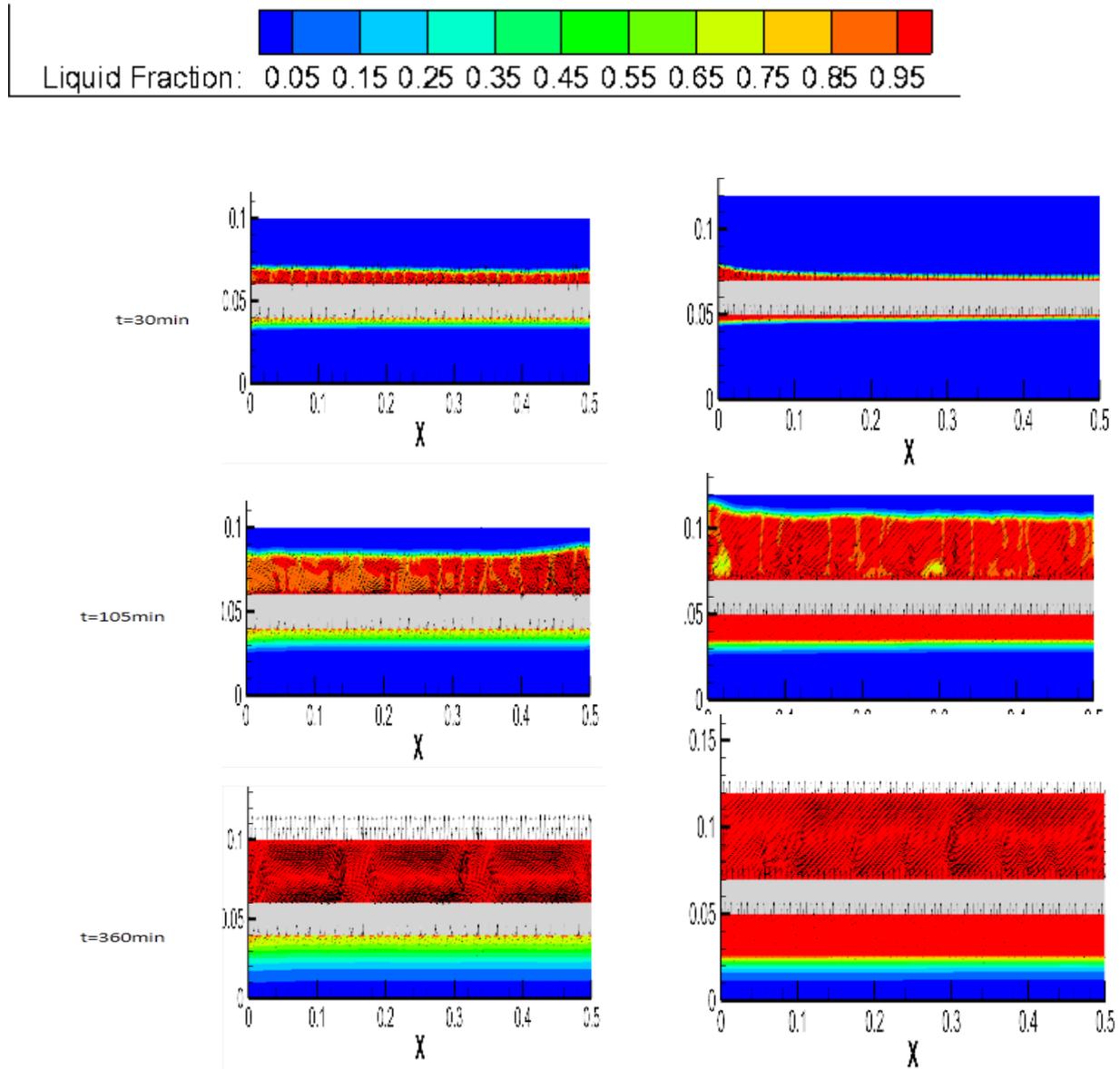


Figure. V.7 : Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps.

Une augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de l'énergie potentiel (augmente, la variation de la masse volumique du matériau liquide avec la température induit des forces de volume qui créent des mouvements de convection naturelle) provoquant une augmentation remarquable de diffusion de la température ainsi que l'accélération du front de fusion.

V.4.2 Pour le stockage par la Roche

V.4.2.1 Champ de température

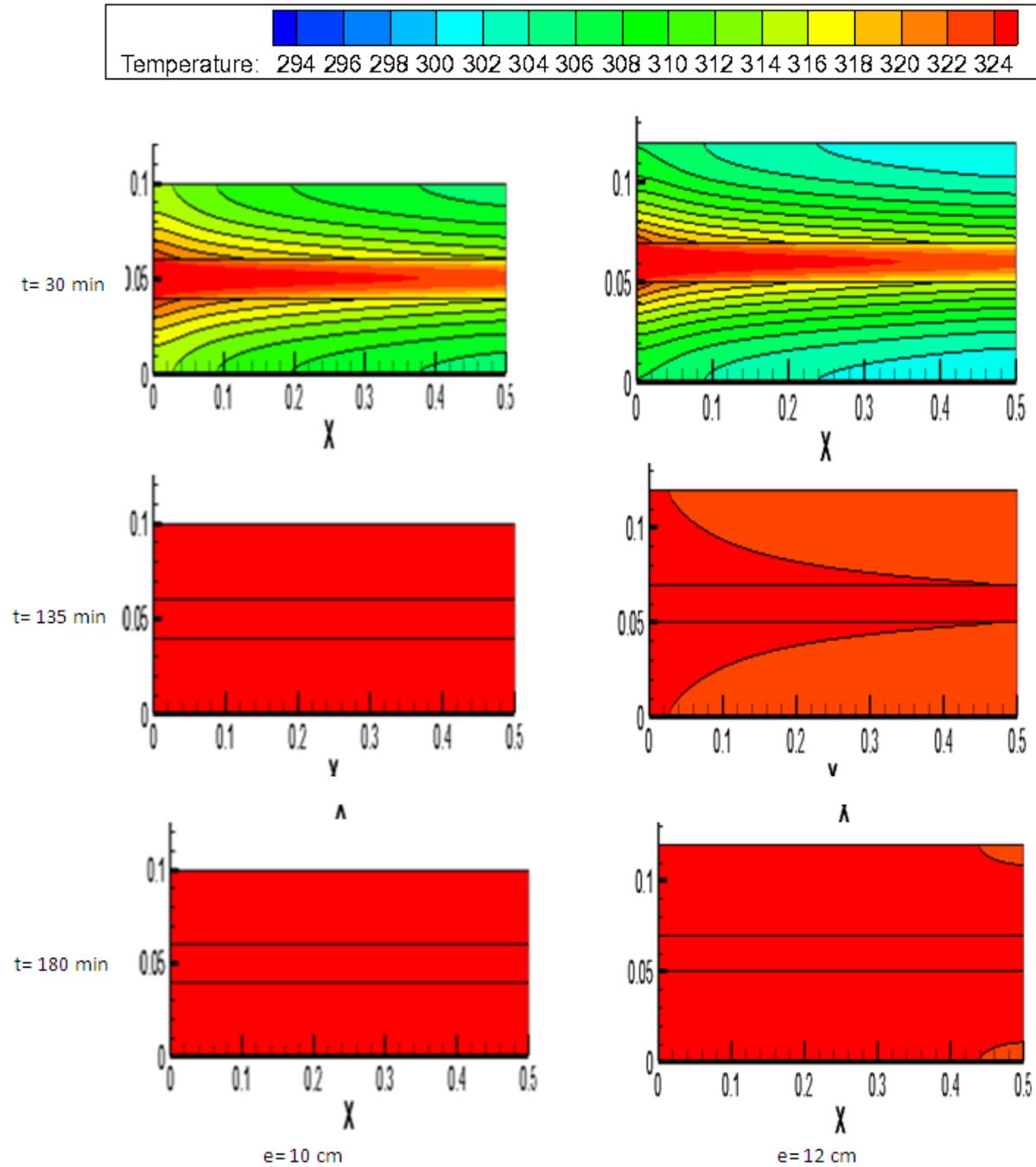


Figure V.8 : Effet de l'épaisseur de l'élément de stockage sur l'évolution de température en fonction du temps

On remarque que l'augmentation de l'épaisseur ralentit la diffusion de la chaleur dans le matériau solide et qui entraîne un temps plus prolongé pour le stockage.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail porte sur une étude de simulation numérique comparative entre deux méthodes de stockage d'énergie thermique, la première est par la chaleur latente utilisant un matériau à changement de phase MCP et la deuxième est par la chaleur sensible utilisant un matériau solide. La simulation numérique sera effectuée à l'aide du logiciel Fluent

L'élément de stockage d'énergie thermique à étudier est un échangeur thermique de forme cylindrique en position horizontal rempli par un matériau à changement de phase MCP (modèle 1) ou un matériau solide (modèle2) est traversé par un tube en aluminium dans lequel circule de l'eau chaude

Les équations qui régissent le problème sont les équations de conservation de masse (continuité), de quantité de mouvement et d'énergie. La méthode enthalpique a été adopté pour modéliser le changement de phase dans le MCP.

Une comparaison sur le comportement dynamique et thermique des deux modèles a été étudiée. L'influence de l'épaisseur de l'élément de stockage sur ces comportements a été examinée.

Les résultats obtenus par la simulation effectuée par Fluent montrent que :

Pour modèle1, la région supérieure de l'élément de stockage où l'eau circule au dessous du MCP, la diffusion de la température est importante où la convection domine le transfert par rapport à la conduction. Tandis que Pour la région inférieure de l'élément de stockage où l'eau circule au dessus du MCP, les isothermes sont encore stratifiées indiquant que la conduction est toujours dominante ce qui explique le retard de sa fusion par rapport à la région supérieure.

après 360 min le MCP en haut est complètement fondu (couleur rouge) par contre la région inférieure de l'élément de stockage est encore en différent couleur (une région pâteuse) indiquant que le MCP n'est pas totalement fondu, en plus le front de la fusion se déplace doucement en parallèle avec la surface chauffante indiquant que la fusion est dominée par la conduction au sein de liquide.

Pour modèle2, L'évolution des isothermes connaissent une diminution de gauche vers la droite de l'élément de stockage, on remarque aussi que la répartition de la température est

Conclusion générale

symétrie dans les deux régions supérieure et inférieure de l'élément de stockage.

Après 135 min la température est homogène dans tout l'élément de stockage .

Pour faire la comparaison entre les méthodes de stockage latente et sensible nous avons analysé le champ de température et la variation de l'enthalpie.

La température atteinte dans le matériau solide est plus importante que celle atteinte au MCP. En revanche, cette différence de température n'affecte pas l'énergie stockée dans l'élément de stockage rempli par un matériau solide par rapport a ce rempli de MCP.

Pour le matériau solide, l'énergie thermique stockée par la chaleur sensible pendant 60min est égal à 9066 J/kg. Mais pour pour le MCP nous avons une énergie thermique stockée par la chaleur latente est égal à 80000 J/kg.

On remarque que le stockage par la chaleur latente est plus important par apport au stockage par la chaleur sensible.

Une augmentation de l'épaisseur de l'élément de stockage entraine une augmentation de l'énergie potentielle provoquant une élévation remarquable de diffusion de la température ainsi que l'accélération du front de fusion.

Finalement, on peut dire que le stockage par la chaleur sensible dans un matériau solide stocke une quantité de chaleur durant un temps court, qui empêche d'en profiter de toute la période d'ensoleillement de la journée (8h).

une augmentation de l'épaisseur de l'élément du stockage provoque un augmentation du volume et une diminution de la vitesse de stockage.

Alors qu'un stockage par la chaleur latente dans un MCP, on profite largement de cette période en stockant une quantité de chaleur plus importante. On peut conclure aussi qu'une augmentation de l'épaisseur d'un stockeur en MCP entraine une augmentation de la vitesse de stockage.

Bibliographie

Bibliographique

- [1] : Laboratoires de Systèmes Energétiques, www.fifel.ch/includes/asp, (2001).
- [2] : Sources d'énergie renouvelable et atténuation du changement climatique ; 04/2012 – GIEC. <http://www.notre-planete.info/ecologie/energie/>
- [3] : Les énergies : « Les différents types d'énergies » Cours de technologie
- [4] : Grubler A et al; Global Energy Assessment—Toward a Sustainable Future – IIASA [notre-planete.info](http://www.notre-planete.info), <http://www.notre-planete.info/ecologie/energie/>. (2012)
- [5] : utilisation rationnelle de l'énergie
- [6] : 6G3 - Energie thermique « Athénée royal Jules Delot, Ciney »
- [7] : Les énergies solaires directes) LE SOLAIRE THERMIQUE
- [8] : enea consulting 89, rue Réaumur 75002 Paris France , www.enea-consulting.com
- [9] : Y. DIAB, “ محاضرات في 'تخزين الطاقة الكهربائية' ”, University of Damascus, 2009
- [10] : Amina akrouche « etude du stockage et déstockage dans un matériau à changement de phase », Université M'Hamed BOUGARA ,BOUMEDES
- [11] : « Le stockage stationnaire de l'énergie » , *Technologies disponibles et recherches du CEA* Jeudi 18 octobre 2012, Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019, www.cea.fr
- [12] : Jean-Sébastien SAVARD, mémoire, Université du Québec à Rimouski, 300, allée des ursulines, Rimouski (Québec), Canada, G5L 3A1, jean-sebastien.savard@uqar.qc.ca
- [13] : HASNAIN S.M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: Heat storage materials and techniques, Elsevier Science Ltd., 1998.
- [14] : Mohammed BECHIRI et Kacem MANSOURI « Stockage d'Energie par Chaleur Sensible dans les Conduites Planes et Cylindriques avec Convection Forcée Laminaire » *Laboratoire d'Energetique, Mecanique et Ingénierie, UMB Boumerdès, Algérie*

Bibliographique

- [15] : W. FOU DHIL et S.BENJABRALLAH, « simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible», Faculté des Sciences de Tunis, Tunis, Tunisie , *2eme Congres de l'Association Marocaine de Thermique 2000*
- [16] : R. Kharchi 1, N. Aït Messaoudène« Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct », Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie ,Institut de Mécanique, Université de Blida, Algérie,*Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 115-119*
- [17] : Claudio Ferone ET Francesco Colangelo , Department of Engineering, University of Naples —Parthenope||, National Interuniversity Consortium of Materials Science and Technology (INSTM), *Article* , Finite Element Method Modeling of Sensible Heat Thermal Energy Storage with Innovative Concretes and Comparative Analysis with Literature Benchmarks , www.mdpi.com/journal/energies
- [18] : A. Benmansour et M.A. Hamdan « Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase », Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran 2001
- [19] : AbdeldjellilBenmansour« Etude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouches », Laboratoire de Mécanique Appliquée, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran BP 1505 El - M'Naouer Oran, Algérie, Grenoble, 27-31 août 2007.
- [20] : Abdul Jabbar N. Khalifa , Kadhim H. Suffer, Mahmoud Sh. Mahmoud « A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material », Nahrain University, College of Engineering, Jadiriya, P.O. Box 64040, Baghdad, Iraq , Available online 23 June 2012

Bibliographique

- [21] : Ababacar THIAM « etudetheorique et experimentale d'un capteur solaire a changement de phase »,Laboratoire d'Energétique Appliquée, Ecole Supérieure Polytechnique, BP : 5085, Dakar, Sénégal, Journal des Sciences ,<http://www.ucadjds.org>
- [22] : SaeedTiari, SonggangQiu , MahboobeMahdavi “Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material”, Department of Mechanical Engineering, Temple University, 1947 N. 12th Street, Philadelphia, PA 19122, USA, Energy Conversion and Management, journal homepage, www.elsevier.com/locate/enconman
- [23] : J. H. Booa, S.K. Lee and J.K. Kimc, “Numerical Analysis of a Thermal Storage System with Inserted Heat Pipes for Medium-High Temperature Range”, Korea Aerospace University, Goyang, 412-791, Korea, Environment Technology Research Center, ChungHoNais, Bucheon, 420-800, Korea, *10th IHPS, Taipei, Taiwan, Nov. 6-9, 2011*
- [24] : Ahmad, M, “Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Energetique de l'enveloppe des Batiments”, ph ,D ,Thesis, Universite Joseph Fourier, 2004
- [25] : Farid et autres. 2004 et Vineet Veet, 2005
- [26] : Stéphanie HONGOIS (Ingénieur) « Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle », L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1er avril 2011
- [27] : J. Patry, “stockage par chaleur latent” ,PYC edition, solvay, pour le stockage thermique abas temperature, casotherm 281
- [28] : A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [29] : J.J. Jurinak et S.I. AdbelKhalik, «On the performance of air-based solar heating systems utilizing phase change energy storage», Solar Energy 24 (1979), pp. 503–522.

Bibliographique

[30] : J. Prakash, H.P. Garget G. Datta, «A solar water heater with a built-in latent heat storage», *Energy Convers Manage* 25 (1985), pp. 51–56.

[31] : N.K. Bansale D. Buddhi, «An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder», *Solar Energy* 33 (4) (1992), pp. 235–242.

[32] : S-H. Wei, S.Chen and X.G .Gong, *Phys. Rev B* 75, 205209 (2007).

[33] : M. PIERRE PARDO. « DEVELOPPEMENT D'UN PROCEDE DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE PAR VOIE THERMOCHIMIQUE. », **DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**, le lundi 9 décembre 2013

[34] : Rong-Tsonglce and Wu-Yao Chiou, 'Finite element analyses of phase-change problem using multivel techniques', *Numerical heat transfer*, (1995), 277-290.

[35] : Brent, A.D., Voller, V.R. et Reid, K.J, Enthalpy - porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, *Numerical Heat Transfer*, vol. 13, p. 297-318, 1988.

[36] : EEC-Safety data sheet, " *RUBITHERM® RT 31*" PHASE CHANGE MATERIAL
Version: 1 Date: 15.01.2007 Revision: 03/04/2009