

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Laboratoire de recherche scientifique

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie mécanique  
Spécialité : Installation énergétique et turbomachines

Etude dynamique des écoulements à l'intérieur de l'enceinte  
d'une cuve de stockage thermique à changement de phase

Proposé et encadré par :  
Dr K MEHALAINE  
Pr D SEMMAR

Réalisé par :  
BENHAMDINE Chekikene Lamine  
MEZGHRANI Yasser

OCTOBRE 2020

---

# Remerciements

---

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous remercions Monsieur **Mehalaine Koceila** et Monsieur **Semmar Djafer** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

---

---

# DEDICACES

---

---

- ❖ Je dédie ce travail tout particulièrement aux personnes qui me sont les plus chères au monde ; Mes très chers **parents** pour leur patience, soutien et confiance,
  - ❖ Ma **mère** n'a pas cessé de prier pour moi, m'encourager et me soutenir et qui a su m'entourer de tout son amour et son affection,
  - ❖ Mon **père** qui s'est sacrifié afin que rien n'entrave le déroulement de mes études,
  - ❖ Je dédie ce travail également à ma **sœur** et mon **frère** et à tous les membres de ma famille,
    - ❖ Bien sûr à mes **amis** et **collègues** de la promotion sortante,
- A tous ceux qui **m'aiment**.....

Mezghrani Yasser

Je dédie ce mémoire à :

- ❖ Ma très chère mère pour tout son amour et son dévouement, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.
- ❖ A mon père qui a toujours été là pour moi et qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance,
- ❖ Mes adorables sœurs pour leur soutien moral et leurs sacrifices tout au long de ma formation
- ❖ A tous les membres de ma famille, petits et grand qui m'ont encouragé dans les moments difficiles. Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection
- ❖ A mes chères amis en témoignage des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Benhamdine Chekikene Lamine

# TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCTION	3
1.2	TRAVAUX SUR LE STOCKAGE	3
1.3	LES DIFFERENTS TYPES STOCKAGE DE L'ENERGIE	11
1.3.1	<i>Stockage d'énergie mécanique</i>	12
1.3.2	<i>Stockage d'énergie électrique</i>	12
1.3.3	<i>Stockage d'énergie thermochimique</i>	12
1.3.4	<i>Stockage thermique</i>	12
1.4	LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)	13
1.4.1	<i>Propriétés cinétiques et chimiques</i>	14
1.5	CLASSIFICATION DES MCP	15
1.5.1	<i>Les MCP inorganiques</i>	15
1.5.2	<i>Les MCP organiques</i>	16
1.5.3	<i>Les MCP eutectiques</i>	16
1.6	LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES PARAFFINES	17
1.6.1	<i>Les avantages</i>	17
1.6.2	<i>Les inconvénients</i>	18
1.7	PROPRIETE OU CARACTERISTIQUES	18
1.8	LES PERFORMANCES DES MCP COMME SUPPORT DE STOCKAGE	21
1.9	CONCLUSION	24
<b>2</b>	<b>CHAPITRE 2 : MODELISATION</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUCTION	25
2.2	DESCRIPTION DU PROBLEME	25
2.3	DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CUVE	26
2.4	MISE EN EQUATION	27
2.4.1	<i>Equations</i>	27
2.5	RESOLUTION NUMERIQUE	29
2.5.1	<i>La méthode des volumes finis</i>	29
2.5.2	<i>Discrétisation du domaine</i>	30
2.5.3	<i>Discrétisation des équations</i>	31
2.5.4	<i>Forme générale d'approximation</i>	34

<i>Propriétés de A et de B</i> :	36
2.6 LES SCHEMAS DE DISCRETISATION :	39
2.6.1 <i>Schéma centré</i> :	39
2.6.2 <i>Schéma Upwind (décentré amont)</i> :	40
2.6.3 <i>Autres schémas</i> :	41
2.7 ALGORITHMES DE RESOLUTION POUR LE COUPLAGE PRESSION VITESSE :	42
2.7.1 <i>Algorithme SIMPLE</i> :	42
2.7.2 <i>Algorithme SIMPLER</i> :	43
2.8 OUTIL DE SIMULATION GAMBIT ET FLUENT :	44
2.8.1 <i>L'outil gambit</i> :	44
2.8.2 <i>L'outil Fluent</i> :	45
<b>3 CHAPITRE 3 : SIMULATIONS ET RESULTATS</b>	<b>49</b>
3.1 INTRODUCTION :	49
3.2 MAILLAGE :	49
3.3 L'EXECUTION DE FICHIER AVEC ANSYS FLUENT :	51
3.4 CONVERGENCE :	52
3.5 RESULTATS :	53
3.6 CONCLUSION :	58
<b>4 CONCLUSION GENERALE</b> :	<b>59</b>
<b>5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> :	<b>60</b>

## Liste des figures

FIGURE 1.1 :SCHEMA DU SYSTEME DE STOCKAGE PCM [1].....	4
FIGURE 1.2: TEST DE LA CONFIGURATION DU SYSTEME DE STOCKAGE THERMIQUE LORSQUE LE FLUIDE DE TRANSFERT EST DE L'AIR [2].....	5
FIGURE 1.3: PRESENTATION DU SYSTEME [4].....	6
FIGURE 1.4: MONTAGE GENERAL [6] .....	7
FIGURE 1.5: PRESENTATION DU SYSTEME EXPERIMENTALE [9] .....	9
FIGURE 1.6: PRESENTATION DU SYSTEME EXPERIMENTALE [10].....	10
FIGURE 1.7: DIAGRAMME SCHEMATIQUE DE LA PROCEDURE EXPERIMENTALE [11].....	11
FIGURE 1.8: CAPACITE THERMIQUE DES PCM.....	14
FIGURE 1.9: CLASSIFICATION DES PCM (PHASE CHANGE MATERIALS FOR COOLING APPLICATIONS IN BUILDINGS: A REVIEW) .....	15
FIGURE 1.10: COMPARAISON DES CAPACITES DE STOCKAGE DE DIFFERENTS MATERIAUX..	22
FIGURE 1.11: SYSTEMES DE STOCKAGE DE CHALEUR. (A) ANNULUS A AILETTES CONTENANT DU PCM. (B) CYLINDRE A AILETTES CONTENANT DU PCM. (C) BANCS DE TUBES ENTOURES DE PCM.....	23
FIGURE 2.1: DISCRETISATION DU MODELE.....	30
FIGURE 2.2: FLUX TOTAL A L'INTERFACE .....	34
FIGURE 2.3: VUE GLOBALE .....	45
FIGURE 3.1: DEFINITION DU DOMAINE SUR GAMBIT .....	49
FIGURE 3.2: MAILLAGE NON STRUCTURE AVEC GAMBIT .....	50
FIGURE 3.3: CHOIX DU SOLVEUR SOUS FLUENT.....	51
FIGURE 3.4: ÉVOLUTION DES RESIDUS AU COURS DES ITERATIONS.....	53
FIGURE 3.5: L'ÉVOLUTION DES TEMPERATURES DE L'EAU ET LA PARAFFINE DANS LA CUVE DE STOCKAGE. ....	54
FIGURE 3.6: ÉVOLUTIONS DE LA TEMPERATURE A PARTIR DE 2 HEURES DE LA PHASE DE CHARGE DANS LA CUVE DE STOCKAGE .....	55
FIGURE 3.7: POSITION DE L'INTERFACE SOLIDE –LIQUIDE POUR 110MINUTES [10].....	55
FIGURE 3.8: ÉVOLUTIONS DE LA TEMPERATURE A PARTIR DE 3 HEURES DE LA PHASE DE CHARGE DANS LA CUVE DE STOCKAGE .....	56
FIGURE 3.9: ÉVOLUTIONS DE LA TEMPERATURE A PARTIR DE 4 HEURES DE LA PHASE DE CHARGE DANS LA CUVE DE STOCKAGE .....	57
FIGURE 3.10: POSITION DE L'INTERFACE SOLIDE –LIQUIDE POUR 210MINUTES [10] .....	58

## Liste des tableaux

TABLEAU 1.1: LES TYPES DE PCM COMPRENANT LES CIRES DE PARAFFINE, LES PRODUITS ORGANIQUES SANS PARAFFINE, LES SELS HYDRATES ET LES METAUX. [18].....	20
TABLEAU 1.2: PCM TYPIQUES DE CIRE DE PARAFFINE. [18].....	21
TABLEAU 2.1: PROPRIETEPHYSIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....	26
TABLEAU 3.1: SUITE DES OPERATIONS A EFFECTUER .....	52

## Nomenclature

### Lettres latines

$A_f$	surface transversale du fluide de la cuve de stockage	$m^2$
$A_p$	surface transversale de la paroi de la cuve de stockage	$m^2$
$A_l$	surface latérale de la cuve de stockage	$m^2$
$A_f$	diffusivité thermique du fluide	$m/s^2$
$C_f$	Chaleur spécifique du fluide	$J/Kg K$
$C_p$	Chaleur spécifique de la paroi	$j/Kg K$
$D_s$	Diamètre de la spire	$m^2$
$T_f$	Température du fluide	$^{\circ}C$
$T_p$	Température de la paroi	$^{\circ}C$
$T_e$	Température ambiante	$^{\circ}C$
$D$	Diamètre de la cuve	$m$
$e_{ec}$	épaisseur du tube de l'échangeur	$m$
$e_a$	épaisseur de la cuve de stockage	$m$
$e_{is}$	épaisseur de l'isolant	$m$
$h$	coefficient d'échange par convection	$m$
$H_c$	hauteur de la cuve de stockage	$m$
$U_{ec}$	Coefficient d'échange global de l'échangeur	$W/m^2K$
$H_{ec}$	hauteur de l'échangeur	$m$
$K_{eq}$	coefficient d'échange global de la cuve de stockage	$W/m^2K$
$Nu$	nombre Nusselt	
$Nu_{eq}$	nombre Nusselt équivalent	
$Pr$	nombre de Prandtl	
$P$	rapport hauteur/diamètre	
$Q$	rapport hauteur/épaisseur	
$R$	rapport des capacités thermiques du fluide et de la paroi	
$S$	rapport de la conductivité thermique du fluide et de la paroi	
$T^*$	température adimensionnelle	
$T$	temps adimensionnel	



## Indices

f	fluide
p	paroi
ec	échangeur
Is	isolant
a	acier
o	valeur initiale

## Symboles Grec

$\mu$	viscosité dynamique du fluide	Kg/ms
$\nu$	viscosité cinématique du fluide	m <sup>2</sup> /s
$\lambda$	conductivité thermique	W/mK
$\rho$	masse volumique m <sup>3</sup> /kg	

## Introduction générale :

De nos jours, la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter avec le développement de la technologie et la croissance de la population mondiale. De plus les principales sources d'énergie sont les combustibles fossiles ce qui provoque des dommages sur l'environnement. Aussi, cette source d'énergie est épuisable dont les prix ne sont pas stables.

Pour cette raison, au vu des publications et des recherches menées dans ce domaine visant à améliorer l'efficacité énergétique et à réduire les gaz à effet de serre, le développement des nouvelles énergies est l'enjeu majeur le plus important de notre époque.

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables, elle peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer se chauffer et cuisiner ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques.

En attendant le développement de technologies permettant la production de masse d'énergie écologique et renouvelable à un prix moins coûteux, l'intérêt se porte sur la maîtrise des dépenses énergétiques et la régulation de la consommation.

Le stockage d'énergie peut être développé dans ce sens car il peut préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure, Il permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes. Evitant ainsi des pics de surproduction aux heures de pointe, qui sont coûteux en termes de coûts d'installation.

Ce stockage d'énergie peut utiliser des matériaux à changement de phase (PCM), également appelés matériaux de stockage de chaleur latente, tels que la cire, l'eutectique et l'hydrate de sel...

L'utilisation de matériaux à changement de phase permet de réduire le volume de stock en raison de leur grande chaleur latente de fusion ou de solidification. Ces dernières années, dans la perspective du développement et de l'évaluation de nouveaux systèmes par la modélisation et la simulation numérique plutôt que par l'expérimentation, le stockage de chaleur en PCM a fait l'objet de nombreuses études ce qui permet d'économiser du temps et des ressources matérielles.

Pour cette raison, nos recherches sont basées sur la simulation numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une cuve de stockage en utilisant le code commercial ANSYS Fluent.

Afin d'atteindre les objectifs déterminés dans cette étude, le travail est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, présentant des publications sur le stockage d'énergie et présente les différents matériaux à changement de phase et leurs applications.

Le deuxième chapitre présente le modèle numérique d'une cuve de stockage dont on applique des équations différentielles de la température du fluide et de la paroi.

Le troisième chapitre est consacré à la discussion et interprétation des résultats.

En fin dans la conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus.

## Recherche bibliographique :

### 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons faire une brève revue bibliographique sur le stockage de l'énergie ; c'est une technologie innovante et prometteuse d'économie d'énergie c'est un domaine de recherche qui n'a suscité d'intérêt qu'à la fin des années 1970 et au début des années 1980. Il est essentiel pour renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles. Ces dernières années, la conservation de l'énergie a été l'un des objectifs de la recherche énergétique. Bien que la recherche sur le stockage de la chaleur latente des systèmes de chauffage solaire continue de susciter beaucoup d'intérêt, beaucoup envisagent de plus en plus la récupération et le stockage de la chaleur résiduelle des équipements industriels.

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification).

### 1.2 Travaux sur le stockage :

#### **PILLAI (1976) :**

A conclu dans sa thèse que les matériaux à changement de phase offrent un moyen pratique de stocker de l'énergie thermique de faible qualité Sur des systèmes compacts. Une large gamme de PCM est disponible mais la sélection dépend entièrement de la situation particulière qu'on peut considérer. Les données thermo-physiques des PCM sont en cours de collection, et une banque de données, adaptée à la sélection des matériaux ayant des combinaisons de propriétés souhaitées sont en cours de mise en place. Alors que le processus de stockage utilisant des PCM est simple en principe, les difficultés attachés à prévoir leur fonte, leurs comportements ont limité la production de conceptions de travail. Etudes d'optimisation de la conception, compte tenu du stockage et de la chaleur. [1]

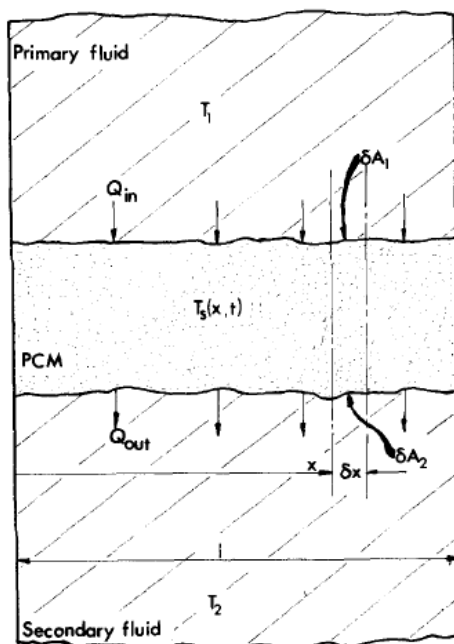


Figure 1.1 : Schéma du système de stockage PCM [1]

**Dr George A. Lane (1980) :**

Grâce à des tests de comportement de congélation-fusion en laboratoire et à la détermination des propriétés thermo physiques, un groupe de matériaux de stockage de chaleur à changement de phase prometteurs a été sélectionné. Des moyens ont été développés pour encapsuler ces matériaux dans des récipients en métal ou en plastique. Quatre de ces matériaux à changement de phase, convenablement encapsulés, ont été testés dans une unité de stockage thermique sous-chou frisé d'une capacité d'environ 20 MJ, l'air a été utilisé comme liquide de refroidissement, et quatre des quatre matériaux à changement de phase correctement encapsulés ont été testés. La capacité de stockage de chaleur mesurée dépasse 90% de la valeur théorique. Après avoir vérifié certains systèmes de chauffage et de refroidissement utilisant un stockage de chaleur à changement de phase, Il a choisi une conception de stockage de chaleur central à air chaud forcé, utilisant du Calcium chloridehexahydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) encapsulé dans des tuyaux en plastique. Une maison a été conçue et un balcon à deux étages a été utilisé pour la collecte solaire avec vitrage vertical et isolation mobile. [2]

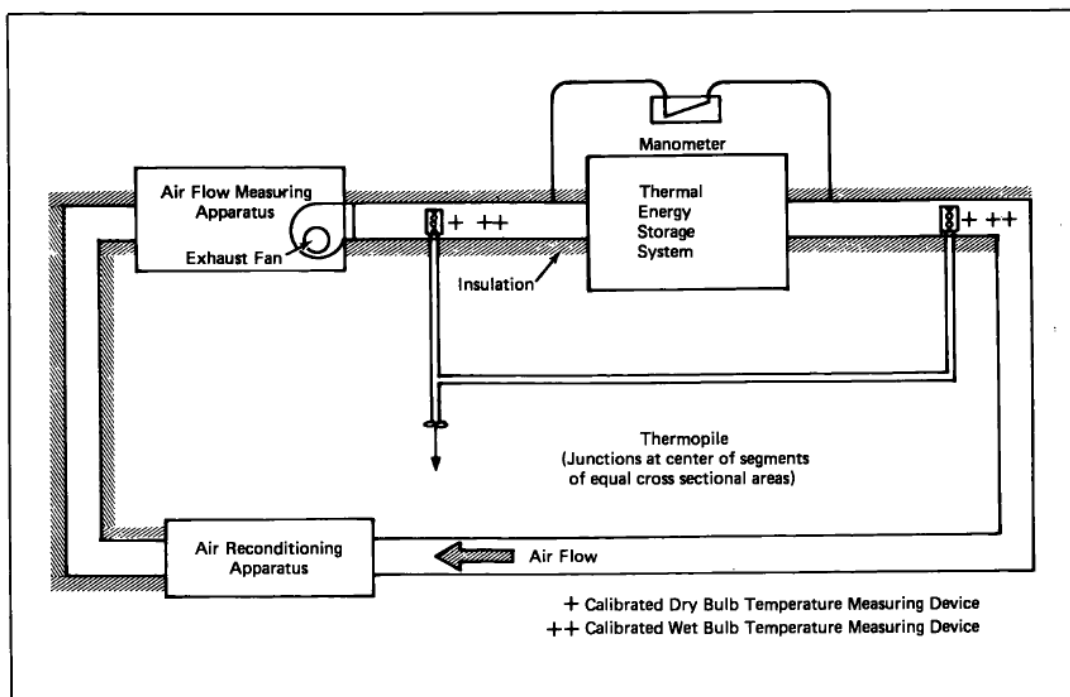


Figure 1.2: Test de la configuration du système de stockage thermique lorsque le fluide de transfert est de l'air [2]

#### Farid et Kanzawa (1989) :

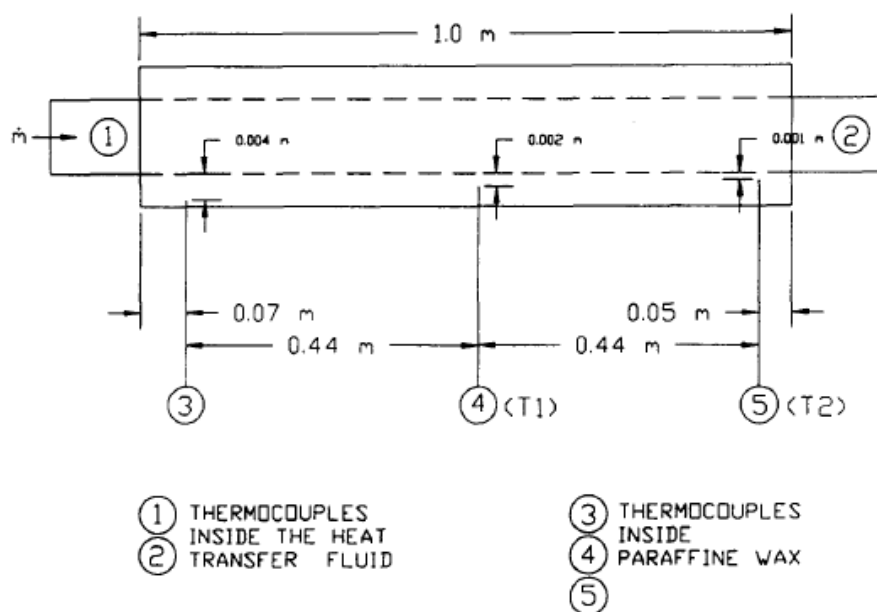
Grâce à des expériences et à des analyses, ils ont étudié un élément de stockage d'énergie par chaleur latente, qui consiste en plusieurs capsules cylindriques montées verticalement et fixées dans un tube isolant. Les capsules sont divisées en trois groupes, chacun contenant trois MCP différents.

Lors de la charge, l'air chaud traverse la capsule, La température de fusion des trois MCP diminue dans le sens de l'écoulement. Cependant, lors de la décharge, la direction du flux d'air est inversée.

D'autres rapportent que le taux de transfert de chaleur a été amélioré pendant la charge et la décharge, et leurs modèles numériques sont conformes à l'expérience. [3]

**Lacroix (1993) :**

Un modèle théorique a été développé pour prédire le comportement transitoire d'une unité de stockage à coque et tube, où le matériau à changement de phase (PCM) côté coque et le fluide caloporteur (HTF) circulent à l'intérieur du tube. Le problème de la transition de phase multidimensionnelle est résolu en combinant la méthode basée sur l'enthalpie et le transfert de chaleur par convection du HTF. La prédiction numérique a été vérifiée par des données expérimentales. Ensuite, une série d'expériences numériques ont été menées pour évaluer l'influence de divers paramètres thermiques et géométriques sur le processus de transfert de chaleur et les performances du système. Les résultats montrent que le rayon de coque, le débit massique et la température d'entrée du HTF doivent être soigneusement sélectionnés pour optimiser les performances de l'équipement. [4]



**Figure 1.3: Présentation du système [4]**

**Louadi, Lacroix et Galanis (1994) :**

Une étude théorique a été menée pour évaluer les performances thermiques de l'unité de chauffage du panneau de ventilation. L'appareil utilise une méthode de stockage d'énergie thermique latente pour équilibrer l'énergie électrique nécessaire au chauffage domestique pendant les heures de pointe. Un modèle unidimensionnel semi-empirique a été établi pour prédire le comportement thermique dynamique de la cellule mémoire sous fusion cyclique et solidification. Les résultats montrent que la cellule de stockage peut être chargée et déchargée plus de deux fois par jour, et le temps de charge est plus court que le temps de décharge. La température de la carte en contact avec l'air ambiant peut être contrôlée pour atteindre une valeur plus élevée sans affecter la puissance de chauffage de l'appareil. [5]

**Pierre UZABAKILHO (1995) :**

Il a étudié le stockage d'énergie par chaleur latente. Un matériau à changement de phase à haute densité thermique « la paraffine » est utilisée au point de fusion

La fusion et la solidification de la cire de paraffine à l'état fermé ont été étudiées expérimentalement. Et une Analyse des phénomènes de convection et de conduction rectangulaires, et étude de la taille du conteneur, de l'utilisation des ailettes et de leurs effets sur la fusion et la solidification du PCM, et les effets de l'expansion de la paraffine. [6]

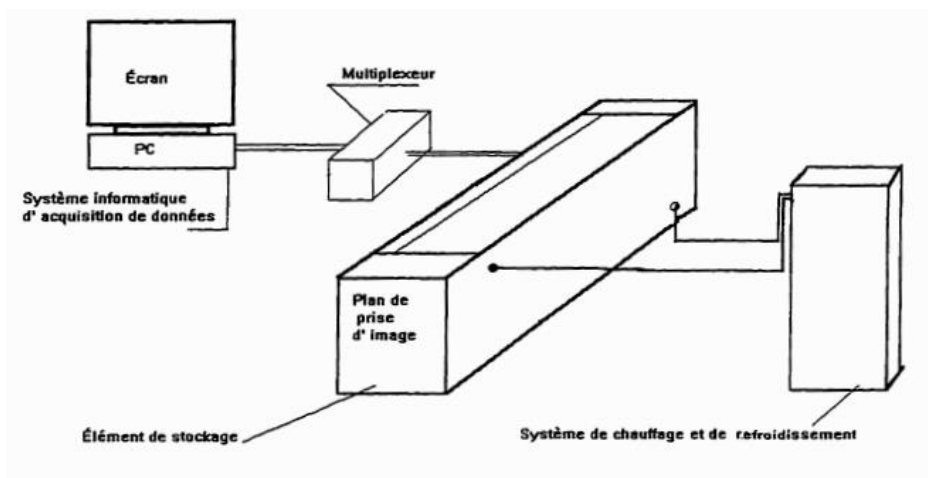


Figure 1.4: Montage général [6]



**Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid (2003) :**

Des études expérimentales limitées sur les panneaux muraux PCM ont été menées. Ce travail accompagne le nouveau développement MCP à base de paraffine. Ce matériau qui ne nécessite aucun revêtement est introduit cavité en brique creuse. Le but est d'étudier son effet sur l'inertie thermique à la recherche d'un mur de briques pour un confort thermique en été. La principale conclusion est qu'un mur PCM est capable de capter une grande partie du rayonnement solaire incident sur les murs ou le toit d'un bâtiment. [7]

**Hamid EI QARNIA (2005) :**

Le comportement transitoire d'un système de stockage d'énergie thermique a été étudié numériquement. Le système de stockage est composé d'un certain nombre de canaux rectangulaires pour le fluide caloporteur (HTF), séparés par un matériau à changement de phase (PCM). En utilisant une méthode d'enthalpie, la fusion du PCM est résolue. Le transfert de chaleur par convection forcée à l'intérieur des canaux a été analysé en résolvant l'équation d'énergie, qui a été couplée à l'équation de conduction thermique dans la paroi du conteneur. Le profil de vitesse pour le canal rectangulaire est donné par une solution analytique exacte. Un code numérique basé sur la méthode des différences finies a été développé et validé en comparant les prédictions numériques avec les solutions analytiques exactes disponibles dans la littérature. Les paramètres qui contrôlent le comportement thermique ont été identifiés. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées pour évaluer les effets du nombre de Reynolds sur le processus de transfert de chaleur du système lors de la fusion d'un PCM. [8]

**D. Lafri, D. Semmar, A. Hamid<sub>1</sub> & M. Ouzzane (2018) :**

Ils ont étudié expérimentalement le processus de transfert de chaleur pendant la fusion d'un PCM. Deux réservoirs de stockage du même volume avec des positions de remplissage différentes de PCM sont utilisés dans la configuration. Dans le premier réservoir, la paraffine est intégrée directement dans sa partie latérale, et dans le second, le contenu de PCM est centré sur l'axe. Ils ont observé que la fusion totale du PCM dans la première configuration dure presque deux fois plus longtemps que dans la seconde.

De plus, l'analyse du comportement thermique du stockage a montré que le changement de phase pendant la fusion a lieu sur des couches éloignées de la surface d'échange. [9]

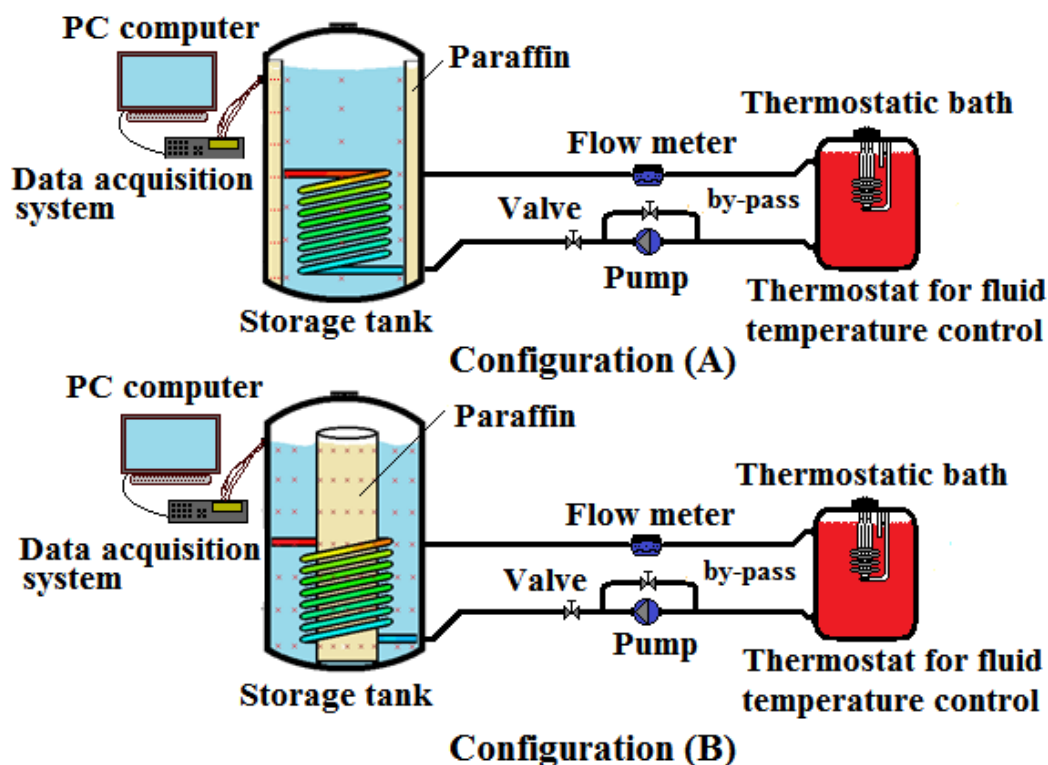


Figure 1.5: Présentation du système expérimentale [9]

#### D. LAFRI (2019) :

Il a comparé le phénomène de stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente. La première partie concerne l'étude du stockage par chaleur sensible. Un modèle numérique a été développé qui décrit tous les modes de transfert de chaleur impliqués dans les phases de chargement et de relaxation. Les résultats théoriques et expérimentaux sont en bon accord, avec un écart inférieur à 10%, et les effets du débit, de l'emplacement de l'échangeur de chaleur et de la nature de la paroi du réservoir sont traités.

La deuxième partie concerne l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans le stockage sensible. Deux cuves de stockage de configurations différentes ont été testées.

Dans la première cuve, le contenu de la paraffine est directement intégré dans la partie latérale, et pour la deuxième configuration, le MCP est centré dans le réservoir. Il a analysé la distribution et le changement de la température interne du matériau à changement de phase au cours du temps et la détermination de l'interface solide / liquide pendant le processus de charge. La durée de la fusion totale de la 2<sup>ème</sup> configuration est presque deux fois plus grande que la 1<sup>ère</sup> configuration.

Il a également étudié le processus de solidification, et les expériences montrent que la plage de solidification est différente de la plage de fusion, le transfert de chaleur par conduction est dominant. Et la solidification dans le cas de la 2<sup>ème</sup> configuration, dure plus longtemps que la fusion. [10]

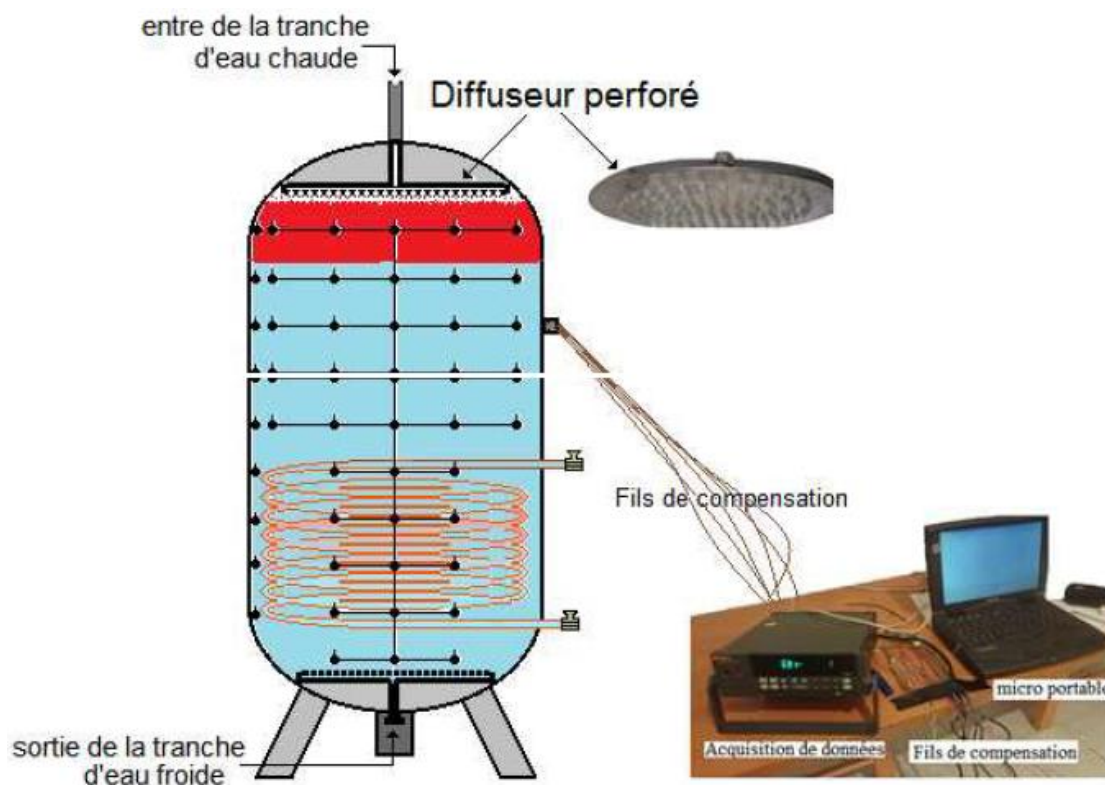


Figure 1.6: Présentation du système expérimentale [10]

**Abdellah Nabil KORTI, Hocine GUELLIL (2020) :**

Ce travail implique la réalisation de recherches expérimentales sur le processus de fusion des matériaux à Changement de phase (paraffine) dans une coque carrée en verre, isolée et chauffée de son côté. Leurs recherches les ont conduits aux conclusions suivantes :

La conduction contrôle la fusion et contrôle la propagation au début du processus de la Fusion dans le MCP encore solide. Au fil du temps, le volume de fusion augmente et la fusion est progressivement dominée par la convection naturelle.

Une cavité chauffée par le bas accélère le temps global de la fusion par 25 min et 3h par rapport à une cavité inclinée à 45° et une cavité chauffée par le côté.

Un seul vortex domine la convection naturelle dans une cavité chauffée par le côté. Lorsqu'elle est chauffée par le bas Le phénomène de Rayleigh-Bénard domine la convection naturelle. Pour une inclinaison de 45° ces deux phénomènes vont interagir l'un avec l'autre, et le nombre de cellules Réduis de 11 rouleaux à 6 rouleaux. [11]

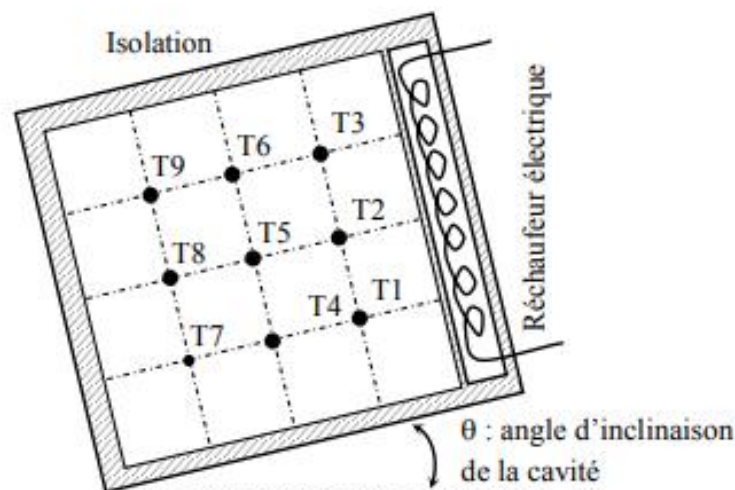


Figure 1.7: Diagramme schématique de la procédure expérimentale [11]

### 1.3 Les différents types stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie peut être sous différentes formes

- stockage d'énergie mécanique
- stockage d'énergie électrique
- le stockage d'énergie thermique
- stockage d'énergie thermochimique

### 1.3.1 Stockage d'énergie mécanique :

C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde. Il peut être utilisé pour le stockage à court terme. [12]

On peut aussi citer le stockage par air comprimé ; ce système utilise l'énergie à stocker pour comprimer de l'air. Et au moment où l'on veut récupérer cette énergie, il suffit de relâcher l'air comprimé. [13]

Hydro stockage basé sur le pompage d'eau pour le stocké dans des bassins ensuite le turbiner pour fournir l'énergie mécanique aux générateurs d'électricité (remonter l'eau à travers des barrages).

### 1.3.2 Stockage d'énergie électrique :

Connecter la batterie directement à une source de courant, lorsqu'elle se décharge, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique.

### 1.3.3 Stockage d'énergie thermochimique :

C'est le mode le plus courant de stockage mais poserait des problèmes de pollution

L'avantage de stocker de l'énergie sous forme de liaisons chimiques est qu'il peut garder l'énergie sans perte pendant une longue période. Le système convient au stockage saisonnier. Cependant, l'inconvénient du stockage thermochimique est la grande perte d'énergie nécessaire Pontage des étapes de stockage (chargement) et Libérer de l'énergie (décharge). Ce type de stockage pourrait être couplé à une centrale à tour [14,15] à un Dish parabolique [16] ou à des cylindro-paraboliques [17]

### 1.3.4 Stockage thermique :

#### 1.3.4.1 Stockage par chaleur sensible :

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

changement d'état. La variation de la quantité d'énergie Q stockée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT$$

Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), Cp est la chaleur spécifique du matériau de stockage (J.kg<sup>-1</sup> .K<sup>-1</sup>) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

1.2.1.2. Stockage thermique par chaleur Latente Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie

### 1.3.4.2 Stockage thermique par chaleur latente:

Pendant le changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur, l'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente. Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Les matériaux utilisés dans ce cas sont appelés : Matériaux à Changement de Phase (MCP, PCM pour change phase matérielle). De nombreuses substances ont été étudiées comme des matériaux à changement de phase potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation.

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

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), Cp,s et Cp,l sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J.kg<sup>-1</sup> .K<sup>-1</sup> ), ΔL est l'enthalpie infinitésimale de changement de phase (J.kg<sup>-1</sup> ) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

## 1.4 Les matériaux à changement de phase (MCP) :

Le PCM est utilisé dans les applications thermiques depuis des décennies. Ils ont des propriétés thermo physiques (la chaleur latente du changement de phase et la conductivité thermique doivent être élevées, et les changements de densité et de volume pendant le changement de phase doivent être respectivement élevés et faibles pour minimiser la capacité de stockage)

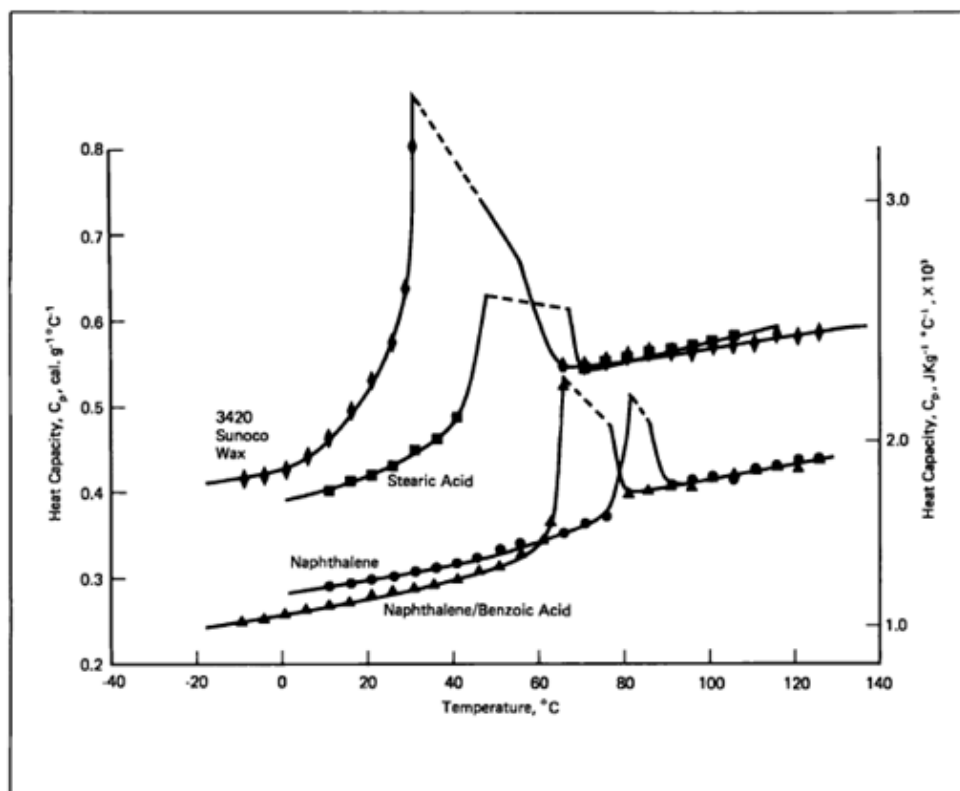


Figure 1.8: Capacité thermique des PCM

#### 1.4.1 Propriétés cinétiques et chimiques :

##### 1.4.1.1 Les propriétés cinétiques idéales :

- Le matériau ne présente pas de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10  $^\circ\text{C}$  peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage.

- Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

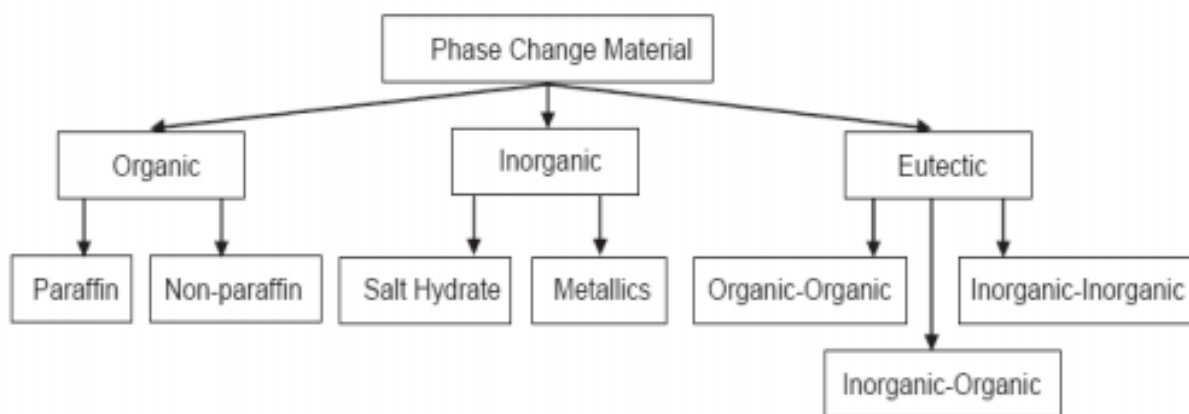
#### 1.4.1.2 Les propriétés chimiques idéales :

- La stabilité chimique à long terme permet le cyclage des MCP, sans dégradation chimique du matériau. Pour un système de stockage, on appelle « cyclage », la succession des charges et des décharges.

- Le MCP n'est ni toxique, ni explosif, ni dangereux pour l'environnement.

- Son potentiel de corrosion est faible et il est compatible avec les matériaux utilisés dans la construction de l'échangeur (acier, inox, cuivre, aluminium etc....) ainsi qu'avec le fluide caloporteur (vapeur, eau, huile thermique etc....).

### 1.5 Classification des MCP :



**Figure 1.9: Classification des PCM (Phase Change Materials for cooling applications in buildings: A review)**

#### 1.5.1 Les MCP inorganiques :

Les matériaux inorganiques ont une température de fusion comprise entre - 100 ° C et + 1000 ° C. Les plus couramment utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 ° C), les solutions salines (température de fusion inférieure à 0 ° C), le sel hydraté (température de fusion entre 5 ° C et 130 ° C), les mélanges salins, mélange



métalliques (température de fusion supérieure à 150 ° C). Ils présentent plusieurs avantages :

Ils ont une chaleur latente importante et une conductivité thermique élevée. Ils ont un point de fusion net ; une plage de fusion étroite. Ils sont ininflammables, pas très chers et sont généralement faciles à obtenir.

### **1.5.2 Les MCP organiques :**

Les matériaux organiques ont une température entre 0 ° C et 150 °. Les plus couramment utilisés sont essentiellement à base de paraffine, d'acides gras et d'alcools de sucre. Comparés aux avantages des PCM inorganiques, ils présentent certains inconvénients : ils ont une conductivité solide et liquide inférieure, une chaleur latente de fusion plus faible et une inflammabilité. En revanche, ils présentent des avantages majeurs. Ils peuvent être utilisés dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux de structure traditionnels, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils ne sont pas réactifs dans la plupart des cas et peuvent être recyclés.

### **1.5.3 Les MCP eutectiques :**

Le MCP eutectique est une substance composée de plusieurs MCP purs. Habituellement, il s'agit d'un mélange de PCM organique et inorganique.

Ils présentent deux avantages principaux : leur point de fusion net est similaire à celui des substances pures, et leur volume de chaleur latente est légèrement supérieur à celui des composés organiques purs.

Leurs deux principaux inconvénients sont qu'il existe peu de données sur les propriétés thermiques de ces matériaux et qu'ils sont rarement utilisés dans les systèmes industriels.

## 1.6 Les avantages et les inconvénients des paraffines :

### 1.6.1 Les avantages :

Il existe plusieurs classes de matériaux à changement de phase. Les cires de paraffine sont les PCM les plus courants pour la gestion thermique de l'électronique car :

- L'enthalpie de fusion varie de 180 à 230 kJ / kg. Par rapport à d'autres matériaux organiques avec une capacité thermique spécifique de 2,1 kJ / kg.K, cette valeur est importante. En considérant deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), nous obtenons une énergie stockée à haute densité. La capacité de stockage de chaleur volumétrique est de 4 à 5 fois celle de l'eau.

- Le degré de sous-refroidissement est négligeable. Même à des températures relativement élevées, la pression de la vapeur fondue est très faible.

- Ils sont chimiquement stables, mais l'air doit être évité pour éviter l'oxydation. Surtout lorsqu'ils sont très chauds, leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.

- Ils n'ont pas de séparation de phase.

- La cire de paraffine est chimiquement inerte à presque tous les matériaux (à l'exception de certains plastiques ou du cuivre) (d'où le nom de cire de paraffine). Par conséquent, la cire de paraffine et son récipient ne présentent pratiquement aucun problème de corrosion. En effet, la cire de paraffine est utilisée pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).

- La paraffine ne présente aucun risque écologique. Ils n'ont aucun effet négatif sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Ils sont non toxiques et 100% recyclables.

- Certaines cires de paraffine commerciales conviennent aux applications solaires. Pour les applications dans les bâtiments, un mur contenant 3 cm de paraffine équivaut thermiquement à un mur en béton de 40 cm.

- La cire de paraffine et ne présente pratiquement aucun problème de corrosion. Elle est même utilisée pour protéger les matériaux de la corrosion.

- Elle ne présente aucun risque écologique. N'a aucun effet négatif sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes, non toxiques et 100% recyclables.

- La paraffine ordinaire est généralement un mélange d'hydrocarbures, et le prix est raisonnable. Selon leur composition, elle présente différents points de fusion. En revanche, la paraffine pure est très chère.

### **1.6.2 Les inconvénients :**

- La paraffine est inflammable et donc facile à brûler.

- La conductivité thermique de la cire de paraffine est très faible (0,18-0,25 W / m K). Cette propriété réduit la vitesse de stockage / déstockage de chaleur pendant le cycle de fusion / solidification. Cette faible conductivité thermique est généralement un obstacle, bien que ce soit un avantage dans le transport des aliments, elle peut être compensée par une plus grande surface d'échange ou un emballage adéquat.

## **1.7 Propriété ou Caractéristiques :**

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de la sélection d'un matériau à changement de phase. Un PCM idéal aura une chaleur de fusion élevée, une conductivité thermique élevée, une chaleur et une densité spécifiques élevées, une fiabilité à long terme lors de cycles répétés et un comportement de congélation fiable. Dans le tableau 1.1, le vert indique des caractéristiques attrayantes, tandis que le rouge indique des défis.

Propriété ou Caractéristiques	Paraffine	PCM organiques sans paraffine	Sels hydratés	mélange métalliques
Température de fusion	élevé	élevé	élevé	moyen
Conductivité thermique	Très basse	basse	élevé	Très élevé
Température de fusion (°C)	-20 à 100+	5 à 120+	0 à 100+	150 à 800+
Chaleur Latente (kJ/kg)	200 à 280	90 à 250	60 à 300	25 à 100
Corrosivité	Non-Corrosif	Moyennement Corrosif	Corrosif	Varie

Cycle thermique	Stable	température élevée peut provoquer une décomposition	Instable sur des cycles répétés	Stable
Poids	Moyen	Moyen	Léger	Lourd

**Tableau 1.1: Les types de PCM comprenant les cires de paraffine, les produits organiques sans paraffine, les sels hydratés et les métaux. [18]**

Les paraffines sont les PCM les plus courants pour la gestion thermique de l'électronique. Ils sont chimiquement compatibles avec la plupart des métaux. Ils ont une grande chaleur latente et peuvent être obtenus sur une large plage de températures.

Le tableau 1.2 montre certaines cires de paraffine de haute pureté utilisées dans de nombreuses applications électroniques. Les plages de température de 72-76 ° C, 66-70 ° C et 59-66 ° C sont bonnes pour assurer un fonctionnement sûr de nombreux appareils électroniques. De nombreux autres choix de PCM sont également disponibles, avec des points de fusion différant de quelques degrés de -9 ° C à 90 ° C

Examples of Paraffins	$C_{36}H_{74}$	$C_{32}H_{66}$	$C_{30}H_{62}$
Density <sub>solid</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	857	809	810
Latent Heat (kJ/kg)	223	261	249
T <sub>melt</sub> (°C)	72 to 76	66 to 70	59 to 66

Tableau 1.2: PCM typiques de cire de paraffine. [18]

### 1.8 Les performances des MCP comme support de stockage :

L'utilisation d'un PCM n'est justifiée que lorsqu'elle offre des avantages significatifs par rapport à un stockage d'un système utilisant un stockage de chaleur sensible.

La capacité de stockage de certains PCM par rapport à celle de l'eau et des roches est illustrée à la figure 1.10 :

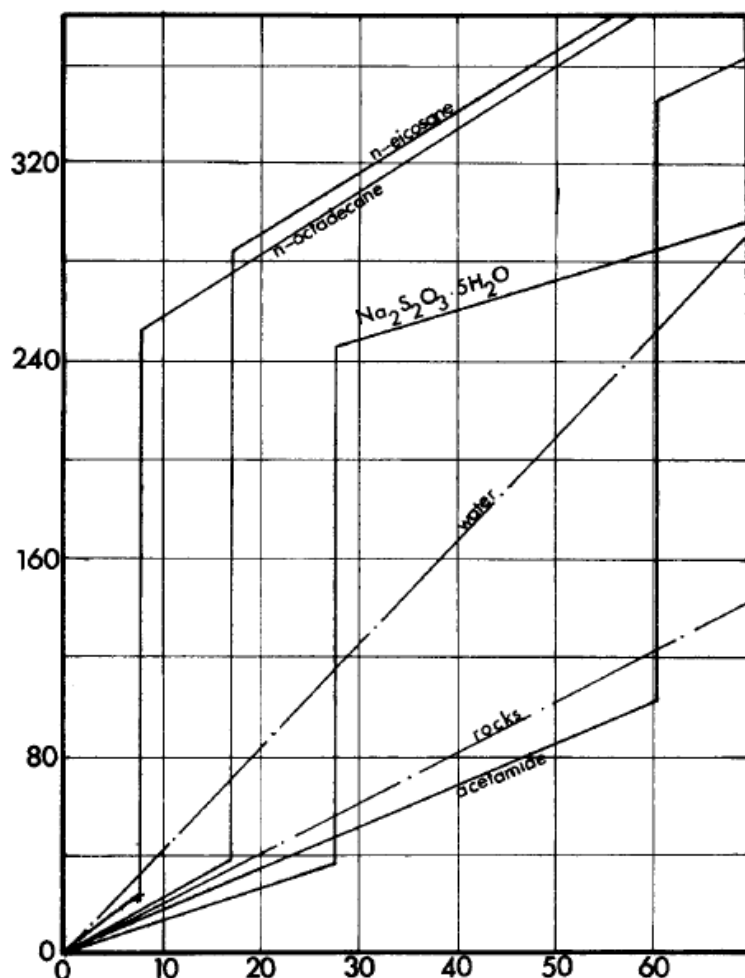
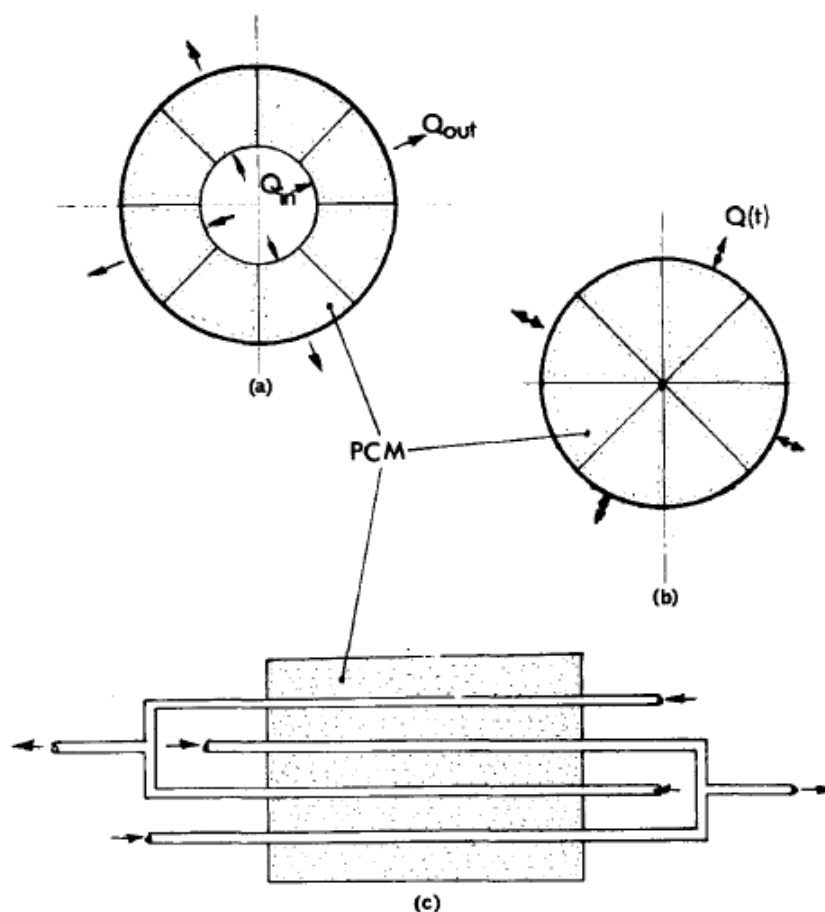


Figure 1.10: Comparaison des capacités de stockage de différents matériaux.

Une comparaison des coûts ne doit être effectuée que lorsque les niveaux de température de stockage et l'isolation et les coûts de confinement ont été déterminés. Il est clair cependant, que le transfert de chaleur et les besoins peuvent être mieux satisfaisants et que les pertes peuvent être réduites avec la condition de constante de température imposée par le PCM. [19]

La conception des systèmes de stockage utilisant des PCM est contrôlée par l'entrée et la sortie avec des exigences à respecter. Certains des systèmes envisagés sont illustrés à la figure 1.11 :



**Figure 1.11: Systèmes de stockage de chaleur. (a) Annulus à ailettes contenant du PCM. (b) Cylindre à ailettes contenant du PCM. (c) Bancs de tubes entourés de PCM**

De toute évidence, le PCM agit non seulement comme un moyen de stockage, mais aussi comme un moyen d'échange de chaleur entre deux substances. [20]

Ainsi, toute conception de système doit en plus de fournir une capacité de stockage requise, être capable de faire face à l'apport d'énergie dominant et les conditions de sortie. L'exigence de stockage peut être exprimée simplement comme suit :

$$S \geq \int_0^{t_p} [Q_{in}(t) - Q_{out}(t)] dt$$

Avec :  $S$  = capacité de stockage.

$Q_{in}$  = flux de chaleur dans le système.

$Q_{out}$  = taux d'extraction de chaleur.



## 1.9 Conclusion :

Nous avons vu que plusieurs méthodes et techniques d'accumulation d'énergie thermique par changement de phase qui ont été discutées et que différentes conclusions ont été tirées.

L'intégration du MCP à la cuve a un impact direct sur l'augmentation de la capacité de d'énergie thermique stocké. Par conséquent, le couplage avec des systèmes actifs peut faire une utilisation plus efficace de la chaleur latente. Afin d'augmenter la capacité de stockage et d'utiliser efficacement la chaleur stockée, et d'utiliser le matériau à changement de phase (PCM) largement utilisé dans les laboratoires aujourd'hui

Ainsi, dans le cadre de l'étude des systèmes de stockage d'énergie thermique par changement de phase, nous étudierons un modèle simplifié d'un système de stockage d'eau qui intègre le MCP dans la cuve de stockage et suivre son comportement thermique.

## Chapitre 2 : Modélisation

### 2.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter le système étudié et les équations physiques qui représentent le modèle mathématique. La résolution sera numérique, une description de la méthode utilisée et des logiciels sera aussi faite.

### 2.2 Description du problème :

Nous considérons ici une cuve métallique de rayon intérieur est initialement remplie du MCP solide. À l'instant  $t > 0$ , une température uniforme supérieure que la température de fusion de MCP est imposée sur la surface extérieur de la paroi :

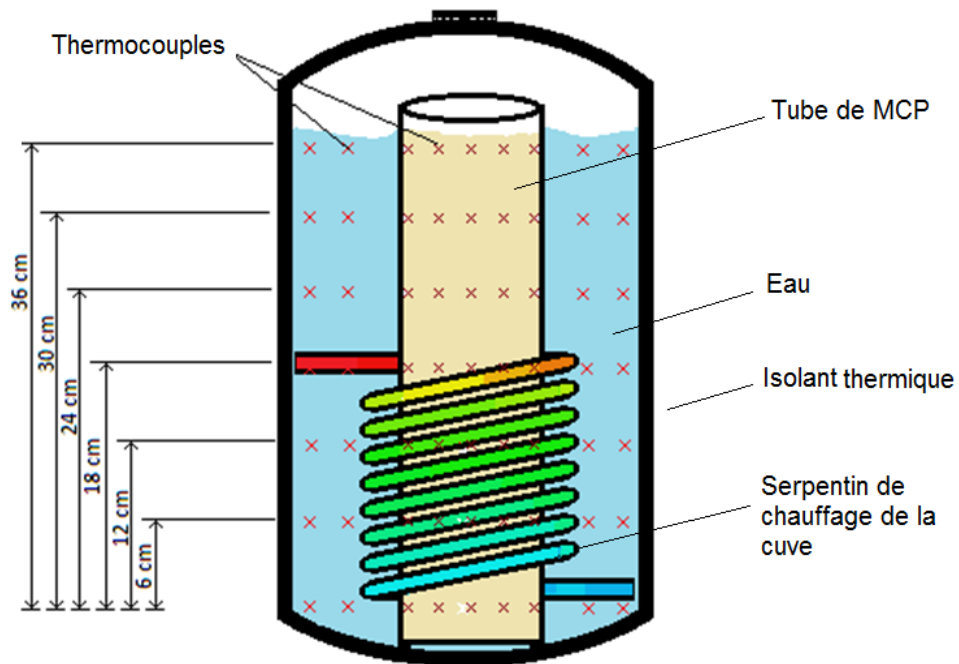


Figure 2.1 Schéma de la cuve [12]

### 2.3 Description du fonctionnement de la cuve :

On prend une cuve de stockage avec de la paraffine insérée au centre de stockage, le système est équipé d'une vingtaine de thermocouples situés à différentes positions dans le PCM ; et une autre vingtaine dans la partie eau du réservoir.

Le système utilise l'énergie thermique stockée dans un matériau à changement de phase (PCM) appelé paraffine pour chauffer l'eau. La cire de paraffine étant un solide à température ambiante avec un point de fusion typique d'environ 46 à 68 ° C.

Il comprend un réservoir de stockage avec un PCM et eau dans un circuit séparé et un système de chauffage électrique

Afin de simplifier la résolution du problème, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- Le fluide est incompressible.
- La phase liquide est un fluide Newtonien.
- L'écoulement est laminaire et sans dissipation visqueuse.
- La quantité d'eau dans la cuve reste constante.
- La pression à l'intérieur de la cuve est égale à la pression atmosphérique.
- On suppose que le coefficient d'échange est constant sur toute la longueur de l'échangeur.

Propriétés	Chaleur spécifique (kJ/kg K)	Densité (kg/l)	Conductivité thermique (W/m.K)	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
PCM solide	1.8	0.90	0.21	54 à 56	185.0
PCM liquide	2.4	0.75	0.21		

Tableau 2.1: Propriété physiques des matériaux utilisés

## 2.4 Mise en équation :

### 2.4.1 Equations :

Tous les problèmes CFD sont basés sur les lois de base de la mécanique des fluides, les phénomènes de la solidification ou de fusion à une température constante ou dans un intervalle de températures sont représentés par une formulation d'enthalpie-porosité, où la zone pâteuse (liquide-solide) est traitée comme zone poreuse avec la porosité égale à la fraction liquide.

**Equation de conservation :**

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

(2-1)

**Equation de la conservation de la quantité de mouvement :**

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - S_x$$

(2-2)

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) - S_y$$

(2-3)

$$S_x = A u \text{ et } S_y = A v$$

avec :

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

C : la constante du darcy et  $f_l$  est la fraction massique :

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

**Equation de la conservation de l'énergie :**

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \Gamma \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_T$$

(2-4)

$$S_T = -\rho L_s \left( \frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right)$$

Avec  $\rho$  est la masse volumique

Et  $\Gamma$  est le coefficient de diffusion

Et  $\mu$  est la viscosité dynamique

U et V les composantes de la vitesse

x est la coordonnée cartésienne

h est l'enthalpie totale

**Conditions initiales :**

Pour le champ de vitesse, les vitesses sont nulles sur tout le domaine

$$U(x, y, t=0) = V(x, y, t=0) = 0$$

Champ de température  $T(x, y, t=0) = T_0$

**Conditions aux limites :**

Les deux parois verticales sont supposées comme une isolation parfaite donc

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L}$$

(2.5)

## 2.5 Résolution numérique :

### 2.5.1 La méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est l'une des techniques d'approximation d'équations différentielles partielles les plus couramment utilisées en sciences de l'ingénieur.

Il s'agit d'une méthode de discrétisation des lois de conservation due à l'équilibre naturel. Selon cette méthode, le domaine d'analyse considéré est divisé en cellules formées autour de chaque nœud de la grille. Cette méthode consiste à discrétiser la forme intégrale du problème à résoudre sur chaque grandeur de contrôle (volume fini) la forme intégrale du problème à résoudre à la place de sa forme différentielle.

L'équation de conservation est intégrée sur chaque volume fini. La variation du nombre  $\Phi$  entre les centres de deux volumes finis voisins peut être linéaire ou quadratique.

Après la discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues par des méthodes numériques ce qui donne une solution exacte

Donc la méthode des volumes finis est une approximation des équations, ce qui signifie que nous recherchons des solutions précises à partir d'équations approximatives. Cette méthode peut facilement déterminer s'il y a des obstacles dans l'écoulement des fluides et gèrent naturellement les conditions aux limites. Les avantages de cette technique est qu'elle peut facilement s'adapter aux géométries complexes impliquées dans de nombreux problèmes industriels. La principale difficulté se trouve dans l'estimation des flux à la limite de chaque volume de contrôle

### 2.5.2 Discrétisation du domaine :

La discrétisation du domaine est abordée par un maillage constitué d'un réseau de nœuds dans un repère cartésien. Par conséquent, un élément de volume est défini autour du nœud (Volume de Control) qui intégrera les équations aux dérivées partielles dans la figure. Dans les deux nœuds consécutifs, chaque volume de contrôle doit avoir une extrémité commune. De sorte que l'union de tous les volumes forme le domaine initial. Ceci va mettre en évidence la conservation des flux locaux et globaux au sein du volume de contrôle et du domaine. Le choix de la grille doit favoriser, les propriétés de conservation en passant d'un volume de contrôle à un autre, et aussi faciliter la résolution numérique du système d'équations et le traitement des conditions aux limites.

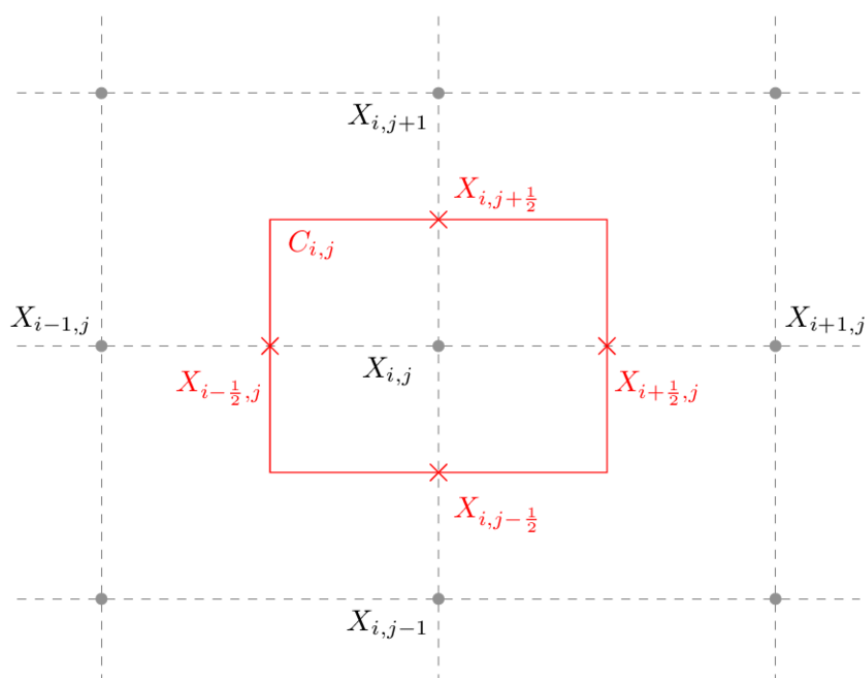


Figure 2.1: Discrétisation du modèle

### 2.5.3 Discrétisation des équations :

Une application de la discrétisation de l'équation de la convection-diffusion dans le cas bidimensionnel donne un aperçu général sur la méthode des volumes finis, le problème dans le cas bidimensionnel régi par l'équation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + s$$

$\Phi$  représente la variable indépendante,

$\Gamma$  coefficient de diffusion

$s$  le terme source relatifs à la variable  $\Phi$ .

Les flux Totaux aux interfaces suivant x et y définis par :

$$J_x = \rho u\Phi - \Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x} \quad (2-6)$$

$$J_y = \rho v\Phi - \Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y} \quad (2-7)$$

Et l'équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = s \quad (2-8)$$

On intègre l'équation sur le volume de contrôle autour du nœud P

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial J_y}{\partial y} dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n S dx dy dt \quad (2-9)$$



Pour évaluer les différents termes de cette équation (2-9), on a quelques règles à respecter :

1- Le terme source doit être linéaire et sa forme est :

$$S = S_u + S_p \Phi_p$$

Avec,  $S_u$  est une partie constante et  $S_p$  est une pente qui ne peut pas être positive. On suppose que ce soit le montant de contrôle qui doit être unifié pour être intégré.

2- Cohérence de l'interface, si deux volumes de contrôle partagent une surface, alors le flux qui quitte le premier volume de contrôle à travers cette face doit être le même que celui qui entre dans le second volume de contrôle.

Pour le premier terme de l'équation (2-9), nous choisissons un schéma complètement implicite et donc :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial t} (\rho\Phi - \rho^0\Phi^0) \Delta x \Delta y \tag{2-10}$$

On suppose que le flux est uniforme sur l'interface (suivant la direction y si on intègre suivant x, et suivant la direction x si on intègre suivant y), alors on aura :

$$\frac{(\rho\Phi - \rho^0\Phi^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y + J_e - J_w + J_n - J_s = (S_u + S_p \Phi_p) \Delta x \Delta y \tag{2-11}$$

Avec :

$$J_e = \int_s^n J_{xe} dy ;$$

$$J_w = \int_s^n J_{xw} dy ;$$

$$J_n = \int_w^e J_{yn} dx ;$$

$$J_s = \int_w^e J_{ys} dx$$

$J_{xi}$  ( $i=e,w$ ) et  $J_{yi}$  ( $i=n,s$ ) sont donnés respectivement dans les relations (2-6) et (2-7) à l'interface considérée. L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (2-12)$$

Dans notre cas, elle se met sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V) = 0 \quad (2-13)$$

Après intégration de cette dernière équation dans le volume de contrôle, et l'utilisation du schéma complètement implicite, on aura :

$$(\rho - \rho^0) \Delta x \Delta y + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta t + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x \Delta t = 0 \quad (2-14)$$

On pose :

$$\begin{aligned} F_e &= (\rho u)_e \Delta y \quad ; \quad F_n = (\rho v)_n \Delta x \\ F_s &= (\rho v)_s \Delta x \quad ; \quad F_w = (\rho u)_w \Delta y \end{aligned} \quad (2-15)$$

Où  $F$  représente l'importance de la convection ou de l'écoulement. Il peut prendre des valeurs positives ou négatives

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{\Gamma_e}{(\delta x)_e} \Delta y \quad ; \quad D_n = \frac{\Gamma_n}{(\delta y)_n} \Delta x \\ D_s &= \frac{\Gamma_s}{(\delta x)_s} \Delta x \quad ; \quad D_w = \frac{\Gamma_w}{(\delta x)_w} \Delta y \end{aligned} \quad (2-16)$$

Où  $D$  représente l'importance de la diffusion. Il ne peut pas prendre des valeurs négatives. Donc l'équation (2-14) devient :

$$\frac{(\rho - \rho^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) = 0 \quad (2-17)$$

On multiplie cette dernière équation par la grandeur physique  $\Phi_p$  et on la soustrait à l'équation (2-11), on aura :

$$(\Phi_p - \Phi_p^0) \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - F_e \Phi_p) - (J_w - F_w \Phi_p) + (J_n - F_n \Phi_p) - (J_s - F_s \Phi_p) = (S_u + S_p \Phi_p) \Delta x \Delta y \quad (2-18)$$

Le problème dans l'équation (2-18) est la détermination des flux aux interfaces. Pour cela, des schémas d'approximation sont entrepris sous la forme générale suivante :

#### 2.5.4 Forme générale d'approximation :

On s'intéresse au flux total  $J$  qui traverse l'interface entre les nœuds  $i$  et  $i+$

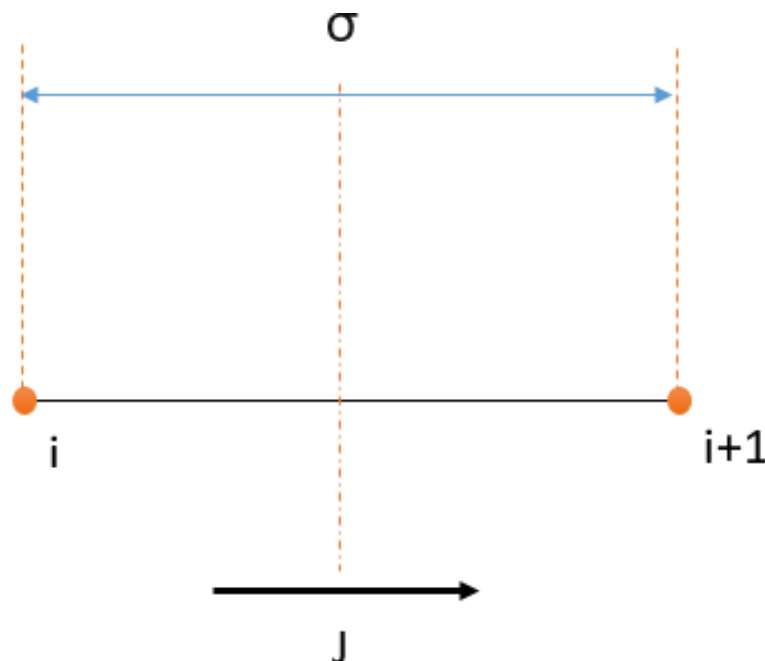


Figure 2.2: Flux total a l'interface

La valeur du flux total qui traverse l'interface est donnée par :

$$J = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2-19)$$

On pose la forme adimensionnelle :

$$J^* = J \frac{\delta x}{\Gamma} = Pe \phi - \frac{\partial \phi}{\partial (\frac{x}{\delta x})} \quad (2-20)$$

Avec  $Pe$  qui est le nombre de PECLET, Il exprime le rapport du transport convectif sur le transport diffusif.

$$Pe = \frac{\rho u \delta x}{\Gamma}$$

La grandeur physique  $\Phi$  à l'interface peut être représentée par :

$$\phi = \alpha \phi_i + (1 - \alpha) \phi_{i+1}$$

Et le gradient :

$$\frac{\partial \phi}{\partial (\frac{x}{\delta x})} = \beta (\phi_{i+1} - \phi_i)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes, on aura donc :

$$J^* = Pe [ \alpha \phi_{i+1} + (1 - \alpha) \phi_{i+1} ] - \beta (\phi_{i+1} - \phi_i) \quad (2-21)$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$J^* = B \phi_i - A \phi_{i+1} \quad (2-22)$$

Où A et B sont des fonctions de Pe.

**Propriétés de A et de B :**

On suppose qu'on se trouve dans le cas où  $\Phi_i$  est égale à  $\Phi_{i+1}$ , donc pas de diffusion. Alors on aura d'après l'équation adimensionnelle (2-20) combinée à l'équation (2-22) :

$$B = A + Pe$$

Si on inverse l'axe des coordonnées, Pe devient négatif, alors A et B interchangent les rôles :

$$A(-Pe) = B(Pe)$$

$$B(-Pe) = A(Pe)$$

Donc il suffit de connaître A(Pe) pour les valeurs de Pe positives, on pourra connaître B(Pe) pour les valeurs de Pe négatives.

Généralement, quel que soit Pe on a :

$$A(Pe) = A(|Pe|) + [-Pe, 0]$$

$$B(Pe) = A(|Pe|) + [Pe, 0]$$

avec  $\|a,b\|$  signifie choisir le maximum entre a et b.

D'après l'équation (2-20), on trouve la forme adimensionnelle :

$$J^* - Pe\Phi_i = A(\Phi_i - \Phi_{i+1}) \tag{2-23}$$

$$J^* - Pe\Phi_{i+1} = B(\Phi_i - \Phi_{i+1}) \tag{2.24}$$

Les équations (2-6) et (2-7) s'écrivent :

$$J - F\phi_i = AD(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (2.25)$$

$$J - F\phi_{i+1} = BD(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (2.26)$$

En appliquant les formes des équations (2-25) et (2-26) sur le nœud principal P on aura

Suivant x :

$$J_e - F_e\phi_P = (AD)_e(\phi_P - \phi_E) \quad (2.27)$$

$$J_w - F_w\phi_P = (BD)_w(\phi_w - \phi_p) \quad (2.28)$$

Et suivant y :

$$J_n - F_n\phi_P = (AD)_n(\phi_P - \phi_N) \quad (2.29)$$

$$J_s - F_s\phi_P = (BD)_s(\phi_s - \phi_p) \quad (2.30)$$

Enfin on remplace ces équations dans l'équation (2-18), on aura :

$$\begin{aligned} (\phi_p - \phi_p^0) \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (AD)_e(\phi_P - \phi_E) - (BD)_w(\phi_w - \phi_p) \\ + (AD)_n(\phi_P - \phi_N) - (BD)_s(\phi_s - \phi_p) = (S_u + S_p \phi_p) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2.31)$$

**Discrétisation générale de l'équation :**

L'équation (2-21) peut se mettre sous la forme :

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (2.32)$$

Les coefficients de l'équation (2-32) s'écrivent en fonction de A et B pour n'importe quels nombres de PECLET  $Pe$  par la formule générale suivante :

$$A(P_e) = A(|P_e|) + [-P_e, 0] \quad (2.33)$$

$$B(P_e) = A(|P_e|) + [P_e, 0] \quad (2.34)$$

Et les coefficients de l'équation (2-32) s'écrivent :

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + [-F_e, 0] \quad (2-35)$$

$$a_W = D_w A(|Pe_w|) + [F_w, 0] \quad (2-36)$$

$$a_N = D_n A(|Pe_n|) + [-F_n, 0] \quad (2-37)$$

$$a_S = D_s A(|Pe_s|) + [F_s, 0] \quad (2-38)$$

$$b = S_u \Delta x \Delta y + a_p^0 \phi_p^0 \quad (2-39)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \quad (2-40)$$

Avec

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

(2-41)

## 2.6 Les Schémas de discrétisation :

Il est nécessaire d'avoir un schéma d'approximation pour représenter l'évolution des différents paramètres physiques. Chaque schéma a ces avantages et ces inconvénients, il y a des schémas qui n'approchent pas la solution analytique et d'autres qui l'approchent mais sont coûteux et prennent beaucoup de temps lors de la résolution.

### 2.6.1 Schéma centré :

Généralement ce schéma est employé pour des écoulements qui ont des nombres de RAYLEIGH faibles.

L'interpolation linéaire pour obtenir la variation de la grandeur physique  $\Phi$  entre deux nœuds successifs correspond aux différences centrées des développements en série de Taylor au deuxième ordre.

Ce qui donne :

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P)$$

$$\phi_s = \frac{1}{2}(\phi_S + \phi_P)$$

$$\phi_w = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_W)$$

$$\phi_n = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_N)$$

(2.42)

Et donc les coefficients de l'équation discrétisée (2-32)  $a_i$  ( $i=E, W, N, S$ ) s'écrivent :

$$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$$



$$\begin{aligned}
 a_N &= D_n - \frac{F_n}{2} \\
 a_W &= D_w + \frac{F_w}{2} \\
 a_S &= D_s + \frac{F_s}{2} \\
 a_p &= \sum_i a_i + a_p^0 + (F_e - F_w + F_n - F_s)
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

Ces coefficients peuvent être négatifs ou positifs, mais il faut imposer des conditions sur ces coefficients de manière à satisfaire la règle de base qui consiste à les avoir tous positifs pour garder la réalité physique des problèmes de convection-diffusion. Donc, pour chaque point  $i$  du réseau, on a :  $|F_i| < 2D_i$

Correspondant à :  $|Pe_i| < 2$

### 2.6.2 Schéma Upwind (décentré amont) :

Il est mis au point par REES (1952) et conclu par WOLPSHTEIN (1969).

Il est construit pour éviter de dire que si la convection est forte dans une direction, l'information en un point peut venir de l'aval (comme c'est le cas avec le schéma centré).

Les termes de diffusion sont toujours traités de la même manière que le schéma centré (variation linéaire de  $\Phi$ ) puisque la quantité de chaleur convectée est plus importante que celle diffusée.

Pour les termes convectifs, on a :

Dans la direction  $W \rightarrow E$  :

$$\Phi_w = \Phi_P \quad \text{Si } F_w < 0 \text{ correspondant à } U_w < 0$$

$$\Phi_w = \Phi_W \quad \text{Si } F_w > 0 \text{ correspondant à } U_w > 0$$

$$\Phi_e = \Phi_P \quad \text{Si } F_e > 0 \text{ correspondant à } U_e > 0$$

$$\Phi_e = \Phi_E \quad \text{Si } F_e < 0 \text{ correspondant à } U_e < 0$$

Le même mouvement est applicable dans la direction S → N

Donc, on ne tient compte que des effets de la maille en amont, les coefficients s'écrivent :

$$a_E = D_e + [-F_e, 0]$$

$$a_N = D_n + [-F_n, 0]$$

$$a_W = D_w + [F_w, 0]$$

$$a_S = D_s + [F_s, 0]$$

$$a_p = \sum_i a_i + a_p^0 + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

(2.44)

Ces coefficients ne sont jamais négatifs.

Les solutions sont toujours physiquement acceptables

### 2.6.3 Autres schémas :

- **Le schéma hybride** : Mis au point par SPALDING en 1972. Ce schéma combine les schémas Upwind et centré.
- **Power Law** : Les expressions de  $a_E$  s'écrivent comme suit :

$$Pe < -10 ; \frac{a_E}{D_e} = -Pe$$

$$-10 < Pe < 0 ; \frac{a_E}{D_e} = (1 + 0.1Pe)^5 - Pe$$

$$0 < Pe < 10 ; \frac{a_E}{D_e} = (1 - 0.1Pe)^5$$

$$Pe > 10 ; \frac{a_E}{D_e} = 0$$

## 2.7 Algorithmes de résolution pour le couplage pression vitesse :

### 2.7.1 Algorithme SIMPLE :

La solution du système d'équations couplées vitesse-pression nécessite un algorithme de calcul spécial qui est l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Les étapes principales de l'algorithme sont présentées dans ce qui suit :

- Ajustement du maillage, des conditions aux frontières et construire la grille décalée pour les composantes de la vitesse.

- il donne le champ de pression estimé  $p^*$ .

- il donne le champ de vitesse estimé  $U^*$  et  $V^*$ .

- il calcule les coefficients  $a_{nb}$  donnés par les équations discrétisées.

- il calcule les nouvelles composantes de vitesse  $U^*$  et  $V^*$  par résolution des équations de conservation et quantités de mouvement.

- il calcule le champ de pression corrigé  $P$  par la somme de  $P'$  avec  $P^*$ , où  $P'$  est obtenue par l'équation de correction de pression afin d'améliorer le champ de vitesse.

- il calcule les composantes de la vitesse  $U$  et  $V$ .

- il calcule le champ de température à partir de l'équation de l'énergie.

- il vérifie le test de convergence. S'il est satisfait, il arrête la procédure, sinon il retourne vers la deuxième étape avec :

$P^* = P ; U^* = U ; V^* = V$ , il répète toutes les procédures jusqu'à la convergence.

### 2.7.2 Algorithme SIMPLER :

Il existe un autre algorithme nommé SIMPLER (Simple Revised) qui peut donner une convergence vers la solution exacte plus rapidement que l'algorithme SIMPLE. Cet algorithme consiste à combiner judicieusement l'équation de continuité et les équations de Navier-Stokes pour déterminer le champ de pression et le champ de vitesse. Cette procédure permet de définir la pseudo-vitesse à partir de l'équation de quantité de mouvement discrétisée, Les étapes principales de cet algorithme sont présentées comme suit :

- Même procédure que la première étape de SIMPLER.
- il donne un champ de vitesse initial.
- il calcule les pseudo-vitesses après avoir calculé les coefficients  $a_{nb}$  donnés par les équations discrétisées.
- il calcule les coefficients de l'équation de pression pour obtenir le champ de pression  $P$ .
- il calcule les composantes  $U^*$  et  $V^*$  à partir des équations des quantités de mouvement avec  $P^* = P$ .
- il calcule  $P'$ .
- il corrige le champ de vitesse.
- il calcule le champ de température avec la résolution de l'équation de l'énergie discrétisée.
- il retourne à la deuxième étape jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints.

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

## 2.8 Outil de simulation Gambit et fluent :

### 2.8.1 L'outil gambit :

**GAMBIT** est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous **FLUENT**.

Le meilleur est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

#### 2.8.1.1 Construction d'un maillage :

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante :

- définir la géométrie.
- réaliser le maillage.
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques  $x$  et  $y$  ou indices  $I$  et  $J$ .

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

### 2.8.1.2 Notice d'utilisation de gambit :

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l'utilisateur. Les différentes étapes d'utilisation de GAMBIT sont définies dans la notice suivante.

### 2.8.1.3 Vue globale :

Après avoir lancé le logiciel, l'interface d'utilisation apparaît.

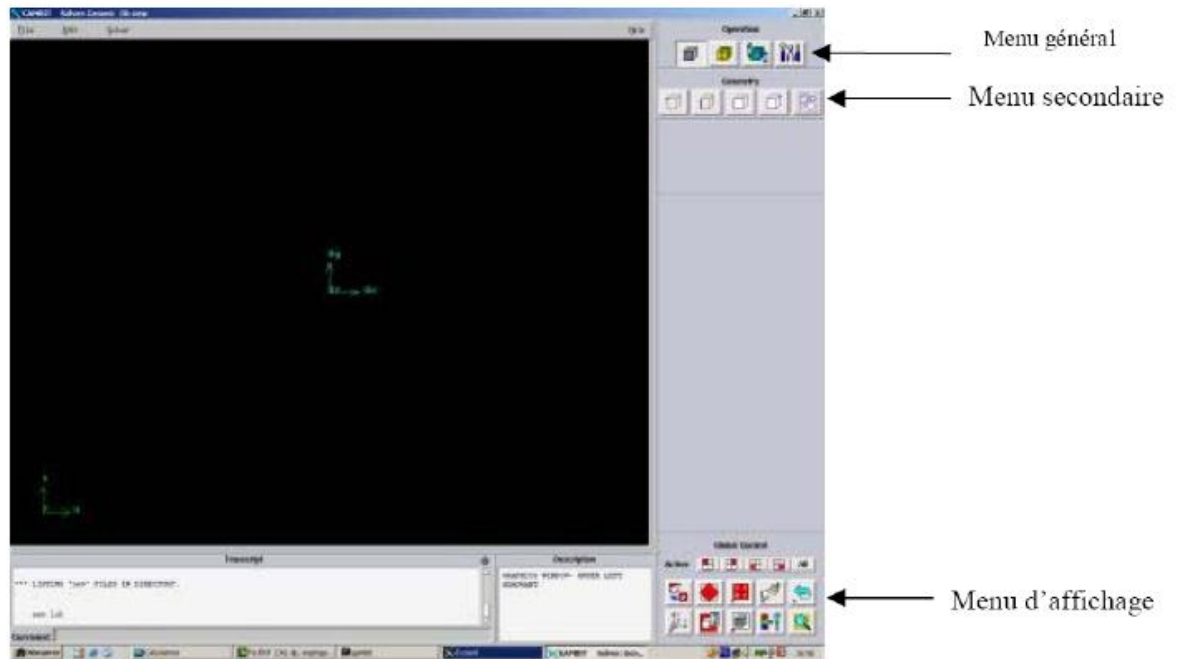


Figure 2.3: Vue globale

La première chose à faire quand on entre sur Gambit est de nommer le système qu'on va construire de telle manière de ne pas le perdre bêtement.

L'utilisation de Gambit est simple : principalement il faut prendre les menus en haut à droite et effectuer les tâches en partant du menu de gauche pour aller jusqu'à celui de droite (où normalement on doit avoir fini notre maillage).

### 2.8.2 L'outil Fluent :

La simulation en Mécanique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics : CFD), est utilisée pour la modélisation, la visualisation et l'analyse des écoulements fluides et transferts thermiques. Elle permet aux utilisateurs d'optimiser

les performances des nouveaux concepts, tout en réduisant le cycle de commercialisation, les risques associés et les coûts.

Depuis plus de 10 ans, Fluent, leader mondial en Simulation numérique des écoulements Fluides logiciels et services. S'emploie à offrir la solution de simulation la plus adaptée, que ce soit pour l'ensemble de l'industrie, la recherche ou la formation des ingénieurs de demain. Cette solution passe par des services d'assistance technique, d'études à façon, et par des formations personnalisées.

### 2.8.2.1 Notice d'utilisation de fluent :

Fluent est un code CFD commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides (champs de vitesses, de température...), c'est la raison pour laquelle on l'a choisi pour réaliser notre simulation.

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. Le premier menu que nous allons étudier est le menu **GRID**. La première chose à faire est d'utiliser l'option check afin de vérifier si le maillage importé comporte des anomalies comme des problèmes de jointure entre les différentes surfaces du maillage. Pour choisir l'échelle d'étude du maillage et par conséquent réfléchir en nombres adimensionnels, il faut utiliser l'option scale (choix est très important car souvent suivant les dimensions du domaine, les phénomènes mis en jeu ne sont pas les mêmes).

Remarque : il est possible de vérifier tout de suite la forme de la grille en cliquant sur **DISPLAY** et ensuite sur grid. On peut de cette façon vérifier que la géométrie correspond bien à ce que l'on veut.

Le second menu que l'on va utiliser est le menu **DEFINE**. La démarche à suivre est de partir des options du haut du menu secondaire et de descendre au fur et à mesure. Nous trouvons donc l'option Models qui se décompose aussi en un autre menu. solve permet de choisir le type de solveur que l'on souhaite utiliser (implicite, explicite, stationnaire, 2D...). viscous permet de choisir le modèle de turbulence que l'on va prendre pour résoudre le problème (laminaire,  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , LES...). Energy permet de choisir si oui ou non on doit faire intervenir l'équation de l'énergie dans la résolution du système (dès qu'un gradient de température intervient dans les

phénomènes il faut utiliser cette équation pour d'une part observer une solution réaliste mais aussi souvent pour faciliter la convergence).

Dans le menu Models radiation qui sont à utiliser en fonction de l'énoncé du problème. Vient ensuite le sous menu Materials qui permet de choisir le fluide gravity et entrer la valeur voulue de la gravité. On peut aussi entrer, et cela est souhaitable, la valeur initiale de la densité et lui donner une valeur sous Fluent (ceci montre que même si l'on a fait une erreur de condition sous Gambit, on peut encore tout modifier sous Fluent).

Pour une entrée de fluide, on fixe la vitesse ainsi que le niveau de turbulence ; pour un mur on peut fixer soit un flux constant, soit une température constante et bien d'autres possibilités (telles que la rugosité du mur par exemple).

Maintenant que la géométrie est en place, nous pouvons paramétrer et initialiser le solver de Fluent dans le menu suivant : le menu **SOLVE**. Le premier sous-menu est le menu Control qui comprend tout d'abord l'option solution. C'est grâce à cette option que l'on va pouvoir entrer les différents facteurs de sous-relaxation du système : pression, température etc.... Ces facteurs peuvent être modifié au cours de la résolution. Leur principal intérêt est de forcer la solution a convergé : en les baissant, on diminue la vitesse de convergence mais on l'améliore (encore que ces constatations soient valables en générales, mais pas nécessairement dans tous les cas).

Dans ce menu, on peut à la façon de discrétiser chaque variable (pression, moment...) d'autre sous-menu de SOLVE est Initialise. Ce menu permet de fixer les conditions initiales du système d'itérations que l'on veut faire pour résoudre le système et aussi la valeur limite des résidus que l'on veut se fixer.

Une fois que l'on estime que la convergence est atteinte, on peut visualiser les résultats grâce au post-traitement de Fluent. Principalement, on utilise le menu **DISPLAY** et les sous-menus contours et velocity vectors. Dans le premier, on observe les variations des variables (vitesse, température...) avec les iso-surfaces. Dans le second, les valeurs sont traduites par des vecteurs ; ceci est surtout utile pour la visualisation des vecteurs vitesses. Il est également possible dans ces menus d'observer les résultats sur les faces de la géométrie et pour les vecteurs de faire des projections.



Pour visualiser des zones précises du maillage (lignes, plans...), le menu **SURFACE** permet de créer des lignes ou de plans dans la géométrie à partir de points. Ensuite on peut pour les plans, les choisir pour visualiser les contours ou les vecteurs, et pour les lignes, on utilise le menu **PLOT**, qui offre la possibilité de faire des graphes en 2D de toutes les variables sur les lignes créées par l'utilisateur. Pour exporter des images, on peut, soit faire une copie d'écran (de loin le plus simple), soit cliquer dans **FILE**, hard copy et choisir TIFF pour créer une image Tiff de la fenêtre actuellement affichée (l'utilisateur peut choisir diverses options comme couleur ou noir et blanc...).

### **2.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, les équations qui régissent les phénomènes physiques à l'intérieur de la cuve ont été montrées. Par ailleurs, nous avons introduit les bases de la méthode des volumes finis, car elle est utilisée par de nombreux logiciels commerciaux (comme FLUENT). Toutes ces étapes sont programmées à l'aide d'une interface graphique, ce qui facilite le choix du schéma a utilisé.

## Chapitre 3 : Simulations et Résultats

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous réaliserons une simulation numérique sur le stockage thermique avec un matériau à changement de phase (PCM) à l'intérieur d'une cuve de stockage et son comportement thermique. La simulation numérique est effectuée sur le logiciel Fluent.

Le modèle est basé sur la conduction et convection dans le fluide, la méthode des volumes est utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

### 3.2 Maillage :

La figure suivante montre la géométrie et le maillage générés par le code Gambit. Le maillage est de type quadratique non structuré pour le solide (MCP) et fluide (Eau).

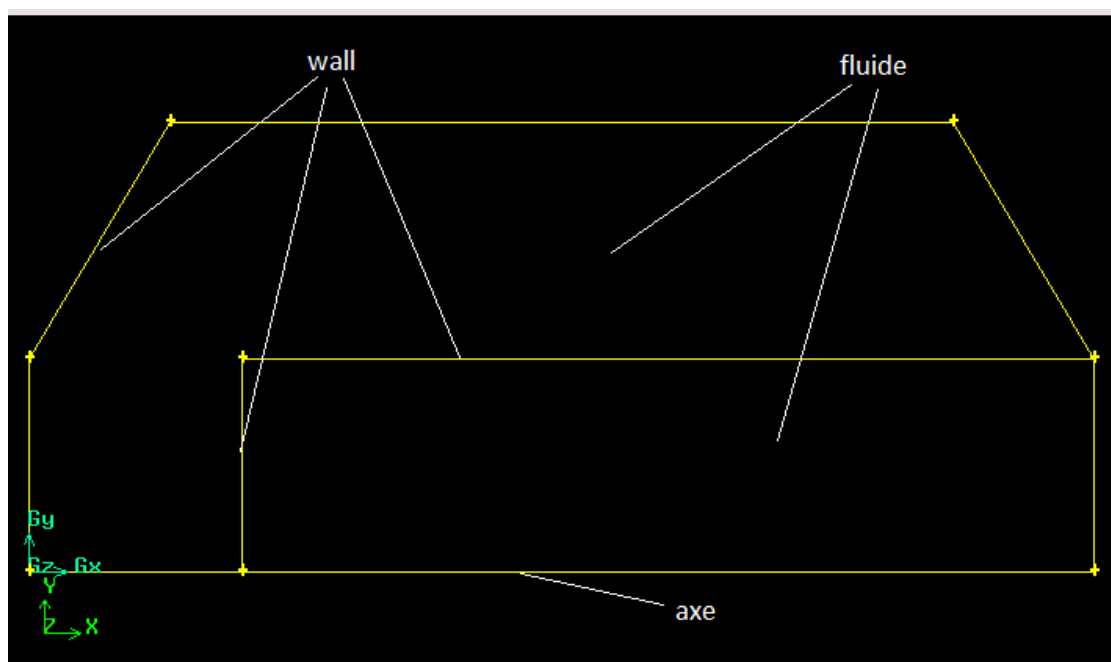


Figure 3.1: Définition du domaine sur GAMBIT

On a utilisé GAMBIT afin de réaliser une géométrie et de générer un maillage non structuré ses éléments sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. Pour permettre de définir les conditions aux limites aux frontières du domaine de calcul.

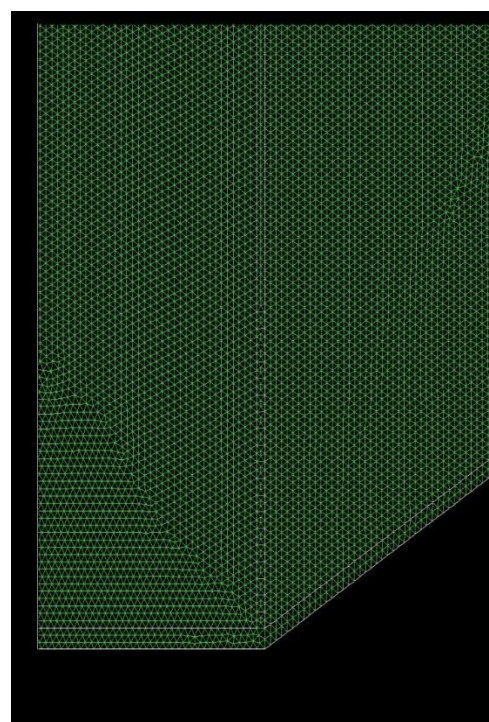
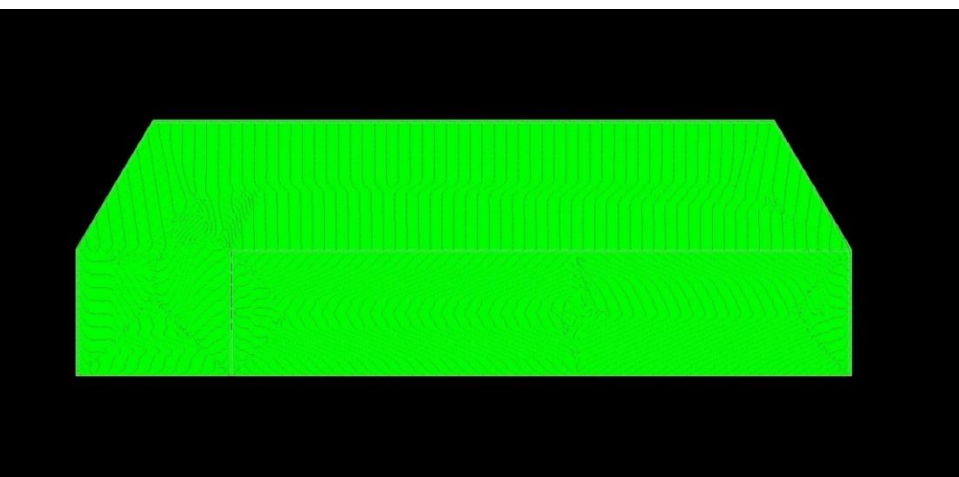


Figure 3.2: Maillage non structuré avec GAMBIT

### 3.3 L'exécution de fichier avec ansys fluent :

On commence par lancer la version 2d de Fluent

On charge le modèle (File → Read → Case) et on vérifie l'absence de volumes négatifs pour la grille (Grid → Check).

Et une vérification de la dimension de la grille (Grid → Scale)

Choix du solveur : Define→Models→ Solver... comme montré sur la figure :

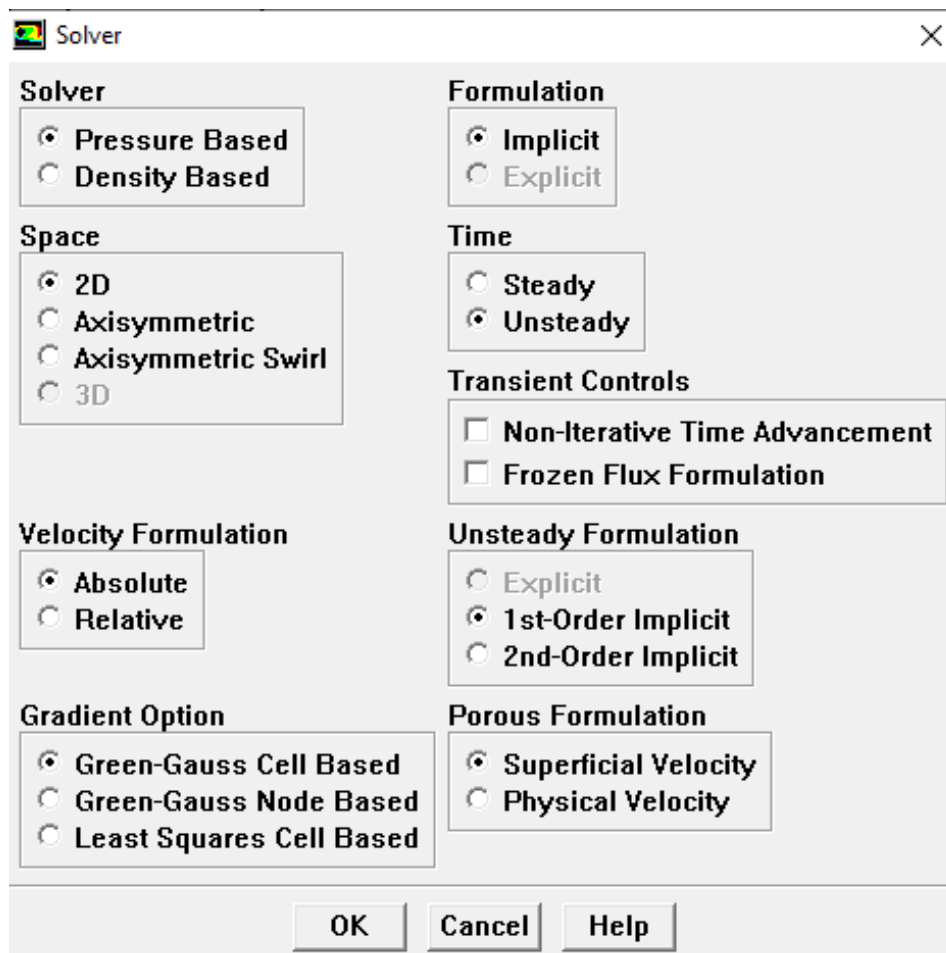


Figure 3.3: Choix du solveur sous Fluent

La suite des opérations à effectuer sur Fluent est résumée dans le tableau suivant :

Menu	Category	Parameter	Value
Define	Models-Solver	Solver	Pressure Based
		Space	2D
		Velocity Formulation	Absolute
		Gradient Option	Green-Gauss CellBased
	Models-Energy	Energy Equation	On
	Models – S/M	Solidification/Melting	On
		Include Pull Velocities	No
Solve	Controls-Solutions	Equations	Flow & Turbulence
		Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE

**Tableau 3.1: Suite des opérations à effectuer**

### 3.4 Convergence :

On fixe le critère de convergence dans la fenêtre *Residual Monitors*. Les critères que nous allons utiliser sont :

Tous les résidus (équation de continuité, et vitesse suivant x, y) sont inférieurs à  $10^{-3}$ .

Le résidu de l'équation de l'énergie est inférieur à  $10^{-6}$ .

Le graphe des résidus pour ce calcul en mode de circulation naturelle est donné sur la figure 3.6

Comme nous le constatons la convergence est atteinte après environ 100 itérations

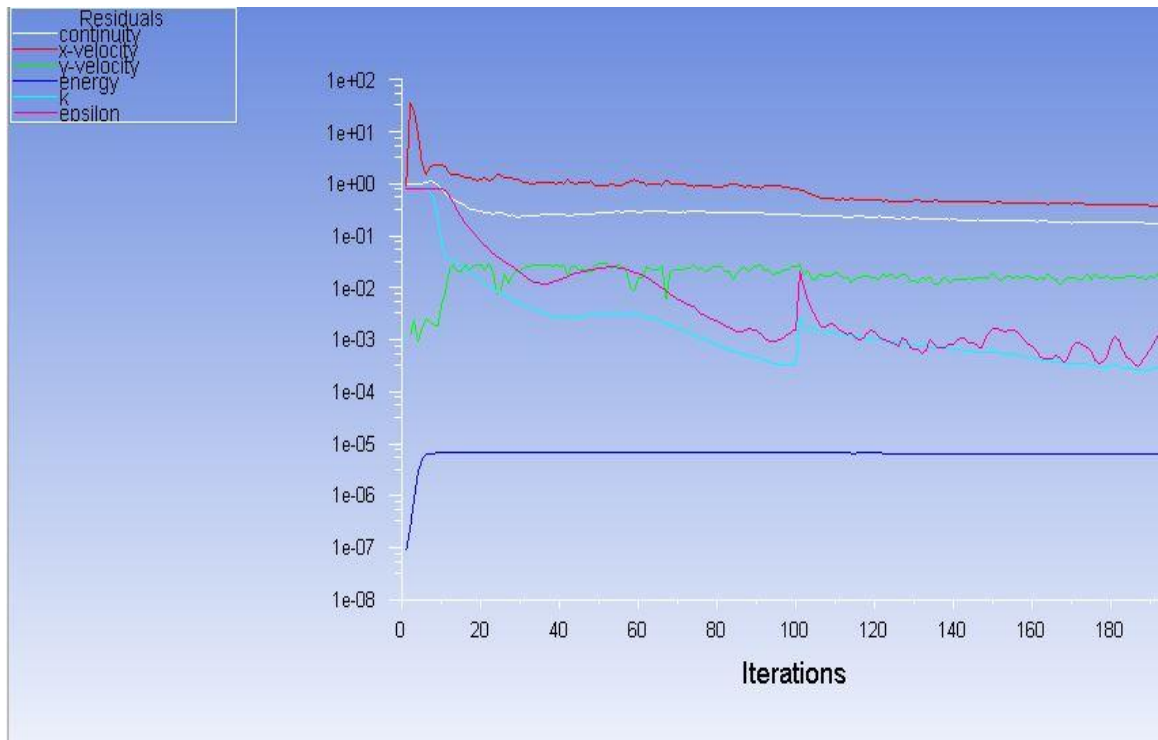


Figure 3.4: Evolution des résidus au cours des itérations.

### 3.5 Résultats :

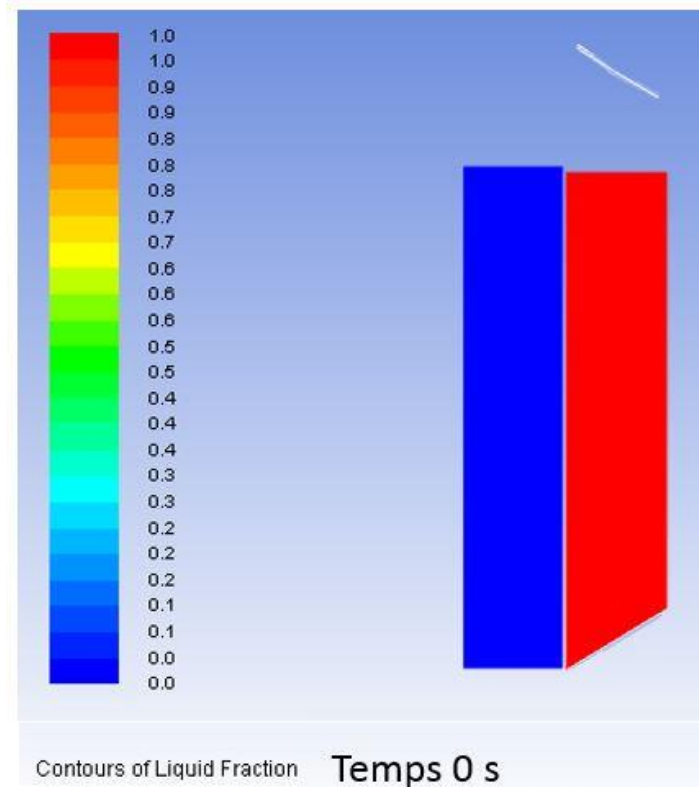
Pour valider notre système on a fait des tests de mesures des températures de l'eau et de la paraffine à l'intérieur de la cuve de stockage.

La température initiale de l'eau dans la cuve de stockage est presque uniforme.

#### Pour temps=0

La figure3-7 représente l'évolution des températures de l'eau et la paraffine dans la cuve de stockage.

On remarque que la température de l'eau est supérieure à celle de la paraffine qui est encore solide on comprend alors que le transfert de la chaleur se fait dans un seul sens de l'eau vers la paraffine :



**Figure 3.5: L'évolution des températures de l'eau et la paraffine dans la cuve de stockage.**

**Pour temps = 2H :**

La figure 3-9 représente l'évolution des températures de l'eau et la paraffine dans la cuve de stockage à partir de 2 heures de la phase de charge.

Nous avons remarqué que la température de la paraffine augmente avec un début de fusion du MCP car il était à l'état solide.

Cette augmentation est au niveau de la paroi, cela est dû au transfert de chaleur provoqué par la conduction.

Les vitesses sont relativement faibles car la température de la paraffine augmente au début et une fois la température de fusion atteinte elle devient constante pendant un moment.

On constate donc que la paraffine ne fondra pas instantanément après que la température de fusion est atteinte.

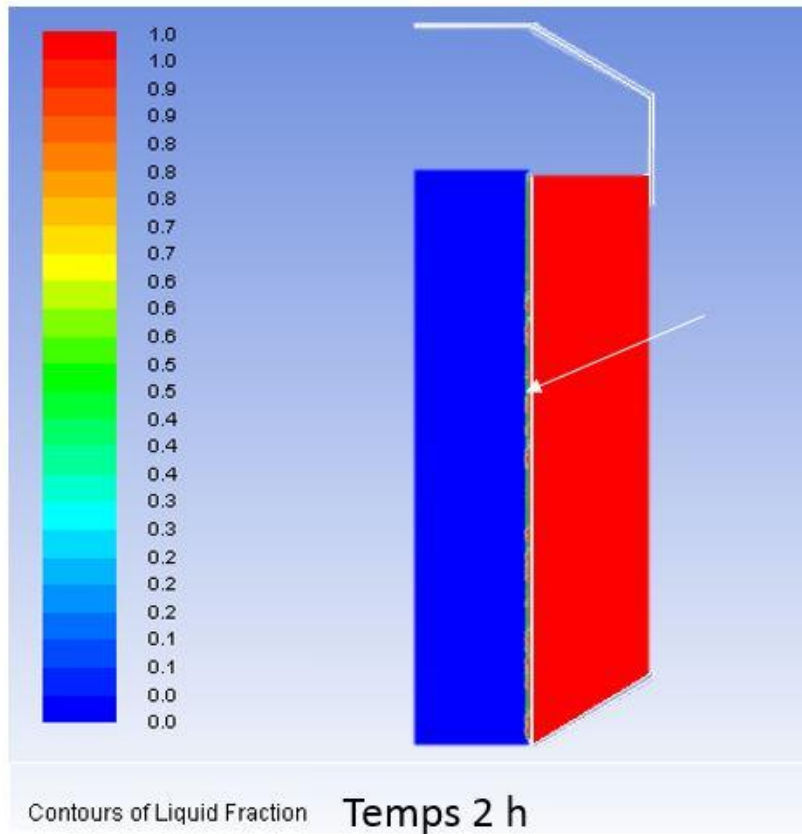


Figure 3.6: Évolutions de la température à partir de 2 heures de la phase de charge dans la cuve de stockage

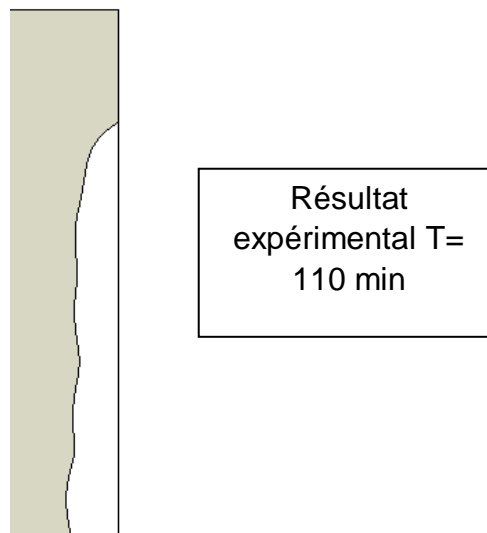


Figure 3.7: Position de l'interface solide –liquide pour 110minutes [10]

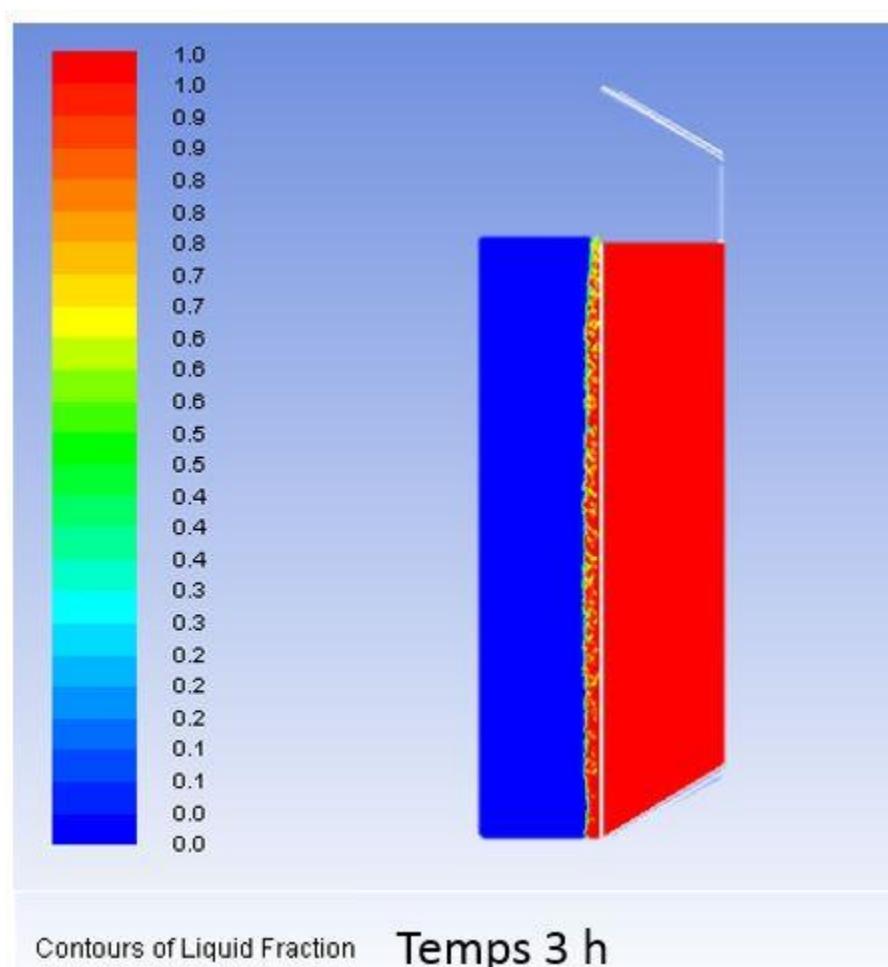


**Pour temps= 3 heures :**

La figure 3-10 représente l'évolution de la température de l'interface solide-liquide à partir de 3 heures de la phase de charge dans la cuve de stockage.

On remarque que la température de la paraffine continue d'augmenter et on observe un début de changement de phase, car elle continue de fondre.

On constate donc qu'au fur et à mesure que l'épaisseur de la masse fondue augmente, elle provoque une augmentation du transfert de chaleur irrégulier à l'interface.



**Figure 3.8: Évolutions de la température à partir de 3 heures de la phase de charge dans la cuve de stockage**

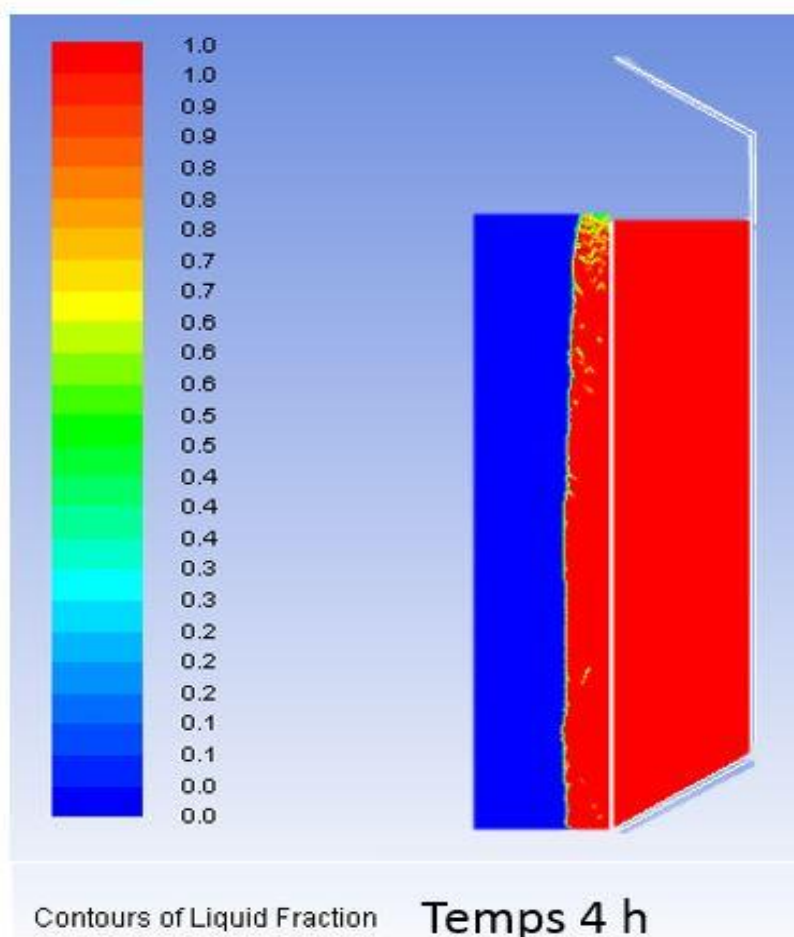
**Pour temps=4h :**

La figure 3-11 représente les évolutions de la température à partir de 4 heures de la phase de charge dans la cuve de stockage

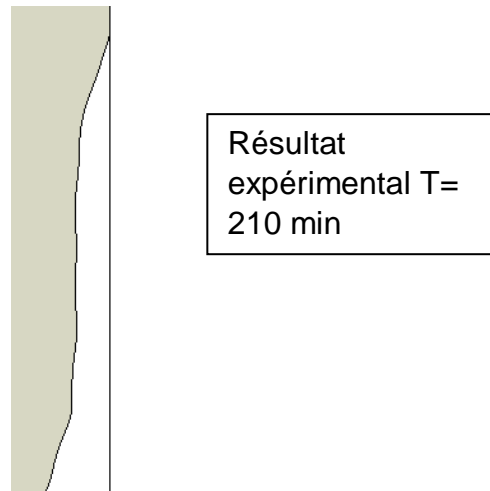
On remarque que la paraffine a changé d'état de la matière (a fondu) cela se traduit par l'augmentation de la vitesse de fusion qui influe sur le processus de changement d'état, surtout dans la partie supérieure de l'enceinte.

Ce résultat est très satisfaisant, car dans cette simulation l'isolation est parfaite avec le milieu extérieur ( $Q=0$ ) et cela est impossible dans la réalité

On constate que la capacité d'énergie stockée dans la paraffine augmente, et que le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état.



**Figure 3.9: Évolutions de la température à partir de 4 heures de la phase de charge dans la cuve de stockage**



**Figure 3.10: Position de l'interface solide –liquide pour 210minutes [10]**

### **3.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence les phénomènes qui se manifestent dans les processus impliquant le changement d'état solide-liquide et liquide- solide. L'analyse des résultats expérimentaux lors du changement de phase a permis de suivre l'interface pour les deux emplacements.

Pendant la fusion, le front se déplace parallèlement à la surface de la paroi, mais au fur et à mesure que l'épaisseur fondue augmente, elle provoque une augmentation du transfert de chaleur à l'interface. Cela se traduit par la déformation de l'interface et par l'augmentation de la vitesse de fusion qui influe sur le processus de changement d'état.

On est arrivé à des résultats très satisfaisants, car les paramètres comme l'isolation entre la cuve et le milieu extérieur dans les expériences réelles ne peuvent pas être aussi parfait..

## **Conclusion générale :**

Dans ce mémoire on a fait une recherche bibliographique qui nous a montré que le stockage de chaleur est devenu une nécessité dans l'industrie de l'énergie récente. On a fait une recherche théorique des matériaux à changement de phase basée sur les dernières connaissances, y compris une généralité du stockage d'énergie thermique. Nos recherches nous ont montré que le système de cuve de stockage n'est pas très étudié et la forme de stockage la plus utilisée reste l'énergie solaire.

Dans la partie modélisation on a montré le système étudié ainsi que les hypothèses considérées. Les équations différentielles, et la méthode utilisée pour leurs résolution ; on aussi été présentées.

Dans la dernière partie on a montré les étapes nécessaires pour le maillage et la simulation. On a remarqué que le début de la fusion du PCM est de 2 heures et que pendant le processus de fusion, la partie avant se déplace parallèlement à la surface de la paroi, mais quand l'épaisseur de la masse fondue augmente, elle provoque une augmentation du transfert de chaleur.

## Références bibliographiques :

[1] K. K. PILLAI and B. J. BRINKWORTH (1976), Solar Energy Unit, Department of Mechanical Engineering and Energy Studies, University College, Newport Road, Cardiff (Wales). These «THE STORAGE OF LOW GRADE THERMAL ENERGY USING PHASE CHANGE MATERIALS».

[2] Dr George A. Lane (1980), Low temperature heat storage with phase change materials, International Journal of Ambient Energy, Central Research Inorganic Laboratory, The Dow Chemical Company, Midland, Michigan, USA.

[3]: Mohammed M. Farid, Atsushi Kanzawa (1989) Thermal performance of a heat storage module using PCM's with Different Melting Temperatures. J. Sol. Energy Eng. May 1989, 111(2): 152-157.

[4] M.LACROIX (1993), NUMERICAL SIMULATION OF A SHELL-AND-TUBE LATENT HEAT THERMAL ENERGY STORAGE UNIT. Département de Génie Mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J 1K 2R1.

[5] A Laouadi, M Lacroix (1994), Thermal performance of a planar latent heat energy storage unit with electric heat sources. International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 42, Issue 2, 2 January 1999, Pages 275-286.

[6] Pierre OZABAKILHO (1995) Etude expérimental de la fusion et la solidification de la paraffine. Département de Génie Mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

[7] M.Khudhair Mohammed M.Farid (2003), A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials Energy Conversion and Management Volume 45, Issue 2, January 2004, Pages 263-275.

[8] Hamid El QARNIA (2004), Theoretical study of transient response of a rectangular latent heat thermal energy storage system with conjugate forced convection. June 2004 Energy Conversion and Management.

[9] D. Lafri, D. Semmar, A. Hamid, M. Ouzzane (2018), Experimental Investigation on Combined Sensible and Latent Heat Storage in Two Different Configurations of Tank Filled With PCM. LTSM, Department of Renewable Energies, University Saad

Dahlab, Blida 1, Route De Soumâa BP 270, 09000, Blida-Algeria .Mechanical Engineering Department, Islamic University in Madinah, Madinah (K.S.A).

[10] D. LAFRI (2019), ANALYSE ET COMMANDE D'UN STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE. Université de Saad Dahlab Blida 1, Département de Mécanique.

[11] Abdellah Nabil KORTI, Hocine GUELLIL (2020), EFFET DE L'ORIENTATION DE LA SURFACE CHAUFFANTE D'UNE CAVITE CARREE SUR LA FUSION DE LA PARAFFINE. ETAP Laboratory, University of Tlemcen, 230,13000.

[12] « Xenius : volant d'inertie », <https://www.youtube.com/watch?v=cfRL96ZkBkg>.

[13] Article de « Planète énergie » publié le 1 Octobre 2019

[14] Singh A., Tescari S., Lantin G., Agrafiotis C., Roeb M., Sattler C. Solar thermochemical heat storage via  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$  looping cycle: Storage reactor modelling and experimental validation. Sol. Energy. 144 (2017), p.453-465.

[15] Koll G. et al. (2009), The solar tower Jülich – A research and demonstration plant for central receiver systems. Proceedings of 15th SolarPACES International Symposium, 15-18 September, Berlin, Germany

[16] Siegel N. P., Thermal energy storage for solar power production. Wires energy environ. 1 (2012), p.119-131.

[17] Tamme R., Laing D., Steinmann W.D., Zunft S. Innovative thermal energy storage technology for parabolic trough concentrating solar power plants. In: Proceedings EuroSun 2002, the 4th ISES Europe Solar Congress (2002)

[18] <https://www.1-act.com/products/pcm-heat-sinks/pcmselection/>

[19] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.

[20] S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight, et S. McGarry, "Selection of materials for high temperature latent heat energy storage", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 107, no. 0, pp. 20-27, Dec.2012.

