

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

KHERRAFI Mohammed Abdelbassit et **KHELLADI Mohammed**

Sujet

Simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas

Soutenu le 06 juillet 2021 devant le jury composé de :

M SAIM R.	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M GUELLIL H.	MCB	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mme SAIB H.	MAA	Univ. Tlemcen	Encadrant
M KORTI A.N.	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2020 - 2021

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont à nos promoteurs, Mme H. SAIB et Monsieur A.N. KORTI pour leur aide, leurs critiques constructives, leurs explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de leurs orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres de jury, R. SAIM et H. GUELLIL qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Tout d'abord merci à Dieu de m'avoir donné la force pour terminer ce travail.

Je voudrais bien prouver ma gratitude envers ceux qui, de loin ou de près m'ont supporté tant matériellement que moralement. Ainsi je dédie ce travail :

À mes très chers parents que Dieu les protège et les garde pour moi.

À ma sœur Fatima Zohra qui a toujours été à mes côtés.

À tous mes amis.

Kherrafi Mohammed Abdelbassit

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail :

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu

A toute ma famille

A mes amis

Khelladi Mohammed

ملخص

يركز هذا العمل على المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج ANSYS Fluent 15.0.7 لصهر مادة متغيرة الطور داخل قالب مسخن من الأسفل. من أجل التحقق من صحة النتائج ، تم استخدام النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في عمل سابق. يتعلق التحقق التجريبي باختبار الشبكة، واختبار الخطوة الزمنية، إدخال شروط الحدود الحقيقية وتأثير ثابت Darcy. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر قيمة خطأ متوسطة تبلغ 22٪.

الكلمات المفتاحية: مواد تغير الطور (PCM)، ANSYS Fluent، إنصهار، محاكاة رقمية.

Abstract

The present work focuses on the numerical simulation using ANSYS Fluent 15.0.7 software of the melting of a phase change material in a bottom heated cavity. In order to validate the results, the experimental results obtained previously in the previous work were used. The experimental validation covers the mesh test, the time step test, the integration of the real boundary conditions and the effect of the Darcy constant. The results obtained show an average error of 22%.

Keywords : Phase change materials (PCM), ANSYS Fluent, Melting, Numerical simulation.

Résumé

Le présent travail porte sur la simulation numérique à l'aide de logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 de la fusion d'un matériau de changement de phase dans une cavité chauffée par le bas. Afin de valider les résultats, les résultats expérimentaux obtenus précédemment dans les travaux antérieurs ont été utilisés. La validation expérimentale porte sur le test de maillage, le test de pas du temps, l'intégration des conditions aux limites réelles et l'effet de la constante de Darcy. Les résultats obtenus montrent une erreur moyenne de 22%.

Mots-clés : Matériaux à changement de phase (MCP), ANSYS Fluent, Fusion, Simulation numérique.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I

Stockage de l'énergie et les matériaux à changement de phase

I.1 Introduction :	4
I.2 Types de stockage de l'énergie :	4
I.2.1 Stockage d'énergie chimique :	4
I.2.2 Stockage d'énergie électrochimique :	4
I.2.3 Stockage d'énergie électrique :	5
I.2.4 Stockage d'énergie mécanique :	5
I.2.5 Stockage d'énergie thermique :	5
I.3 Méthode de stockage de l'énergie thermique :	5
I.3.1 Stockage par chaleur sensible :	6
I.3.1.1 Matériaux utilisés pour un stockage sensible :	7
I.3.2 Stockage par chaleur latent :	9
I.3.2.1 Matériaux utilisés pour un stockage latent :	10
I.3.3 Stockage thermochimique :	11
I.4 Matériaux à changement de phase :	14
I.4.1 Introduction :	14
I.4.2 Choix d'un matériau a changement de phase :	14
I.4.3 Types des matériaux à changement de phases :	16
I.4.3.1 Matériaux organiques :	17
I.4.3.2 Matériaux inorganiques :	19
I.4.3.3 Eutectiques :	20

I.4.4 Avantages et inconvénients des différents types des MCP :.....	21
I.4.5 Applications des MCP pour le stockage thermique :.....	22
I.4.5.1 Dans les bâtiments :.....	22
I.4.5.2 Intégrations des MCP dans les fenêtres et les rideaux :.....	23
I.5 Conclusion :.....	24

Chapitre II

Recherche bibliographique

II.1 Travaux antérieurs :.....	26
II.2 Travaux expérimentaux :.....	26
II.3 Travaux numériques.....	29

Chapitre III

Position du problème

III.1 Introduction :.....	45
III.2 Problème physique :.....	46
III.3 Modèle Mathématique :.....	47
III.3.1 Modèle dynamique :.....	47
III.3.2 Modèle thermique :.....	48
III.4 Condition initiale et aux limites :.....	49
III.4.1 Condition initiale :.....	49
III.4.2 Conditions aux limites :.....	49
III.5 Simulation numérique.....	50
III.5.1 Création de la géométrie.....	50
III.5.2 Maillage de la cavité.....	51
III.5.3 Calcul numérique :	51

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Matériel informatique :	55
IV.2 Validation numérique :	55
IV.2.1 Test de maillage :	55
IV.2.2 Test de pas du temps :	58
IV.2.3 Evolution de la fraction liquide :	59
IV.3 Intégration des conditions aux limites réelles :	60
IV.3.1 Température de la paroi inférieure :	60
IV.3.2 Coefficient de transfert par convection :	61
IV.3.3 Test de la constante de Darcy :	65
IV.4 Résultats et discussions :	66
IV.4.1 Evolution de la fusion :	66
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	71

Nomenclatures

C_p	Capacité calorifique massique	[J/kg.K]
m	masse	[kg]
T	Température	[K]
H	Enthalpie	[J]
L_f	Chaleur latente (fusion)	[J/kg]
L_v	Chaleur latente (vaporisation)	[J/kg]
$C_{p_s}(T)$	Capacité de masse thermique du corps à l'état solide	[J/kg.K]
$C_{p_l}(T)$	Capacité de masse thermique du corps à l'état liquide	[J/kg.K]
n	Nombre de moles	[mol]
ΔH_r	Enthalpie de la réaction	[J/mol]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
t	Temps	[s]
Q	Densité de flux de chaleur	[W/m ²]
ρ	Densité du matériau	[kg/m ³]
P	Puissance	[W]

f_l	Fraction liquide	
s	surface	$[m^2]$
p	Pression	$[Pa]$
h	Coefficient de convection	$[W/m^2.K]$
μ	Viscosité dynamique	$[kg/m.s]$
β	Coefficient de dilatation thermique	$[K^{-1}]$
p	Pression	$[N/m^2]$
S_m	Terme source de l'équation de mouvement	$[N/m^3]$
S_e	Terme source de l'équation d'énergie	$[J/m^3.s]$
S_T		
v	Vitesse du fluide	$[m/s]$
u	Vitesse du fluide	$[m/s]$
μ	Viscosité dynamique	$[kg/m.s]$
ε	constante de calcul	

Abréviations

MCP	Matériaux à Changement de Phase
PCM	Phase Change Material
TES	Thermal Energy Storage
SHTES	Sensible Heat Thermal Energy Storage
LHS	Latent Heat Storage
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
HTF	Heat Transfer Fluid
SHS	Sensible Heat Storage

Liste des figures

Figure I. 1. Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur	6
Figure I. 2. Variation d'enthalpie d'un fluide lors d'un chauffage ou d'un refroidissement sensible.....	6
Figure I. 3. Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente.....	10
Figure I. 4. Processus de charge, de décharge et de stockage d'un système de stockage thermochimique.	12
Figure I. 5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique	13
Figure I. 6. Le processus de fusion/solidification.....	14
Figure I. 7. Chaleur latente en fonction de la température de fusion des grandes familles de MCP	16
Figure I. 8. Paraffine	18
Figure I. 9. Acide stéarique (acide gras).....	19
Figure I. 10. Application typique du MCP dans les bâtiments.....	22
Figure I. 11. Exemple de fonctionnement du système a double vitrage.....	23
Figure II. 1. Phase de fusion	26
Figure II. 2. Phase de solidification	26
Figure II. 3. Phase de fusion pour différents MCP	27
Figure II. 4. Schéma du Banc d'essai réalisé.....	28
Figure II. 5. Fusion d'un MCP dans une cavité avec une grille de ZAMAK.....	28
Figure II. 6. Schéma de la cavité pour les différents positions.....	29
Figure II. 7. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant	30
Figure II. 8. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant	30
Figure II. 9. Evolution expérimentale de la fraction liquide.....	31
Figure II. 10. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant	32

Figure II. 11. Comparaison des résultats numériques d'interfaces solide-liquide avec différents angles d'inclinaison à trois moments choisis	33
Figure II. 12. Le processus de fusion de la paraffine à 0°. (a) Fraction liquide ; (b) variation de température	34
Figure II. 13. Comparaison de l'évolution de fraction liquide numérique	35
Figure II. 14. Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique.....	36
Figure II. 15. Propagation du front de fusion capturée par la caméra	36
Figure II. 16. Effet de la constant de Darcy sur l'évolution du front de fusion.....	37
Figure II. 17. Schéma du problème étudié.....	37
Figure II. 18. Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour des maillages différent.....	38
Figure II. 19. Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour des pas du temps différent.....	38
Figure II. 20. Effet de constante de Darcy sur Variation de la fraction liquide en fonction du temps	39
Figure II. 21. Test de maillage	39
Figure II. 22. Test du pas de temps.....	39
Figure II. 23. Photographies de fusion, lignes de courant et distributions de température dans l'enceinte 0°-1-fin à différents moments	40
Figure II. 24. Effet de l'intégration de la forme des ailettes sur le processus de fusion (t=5min)	41
Figure II. 25. Description du principe d'amélioration du comportement thermique à un temps d'inversion représentatif de 0,4t*	42
Figure II. 26. Evolution de la fraction liquide et les lignes de courant.....	43
Figure III. 1. Cavité face avant	45
Figure III. 2. Cavité face arrière	45
Figure III. 3. Dimensions du modèle physique étudié.....	46
Figure III. 4. Conditions aux limites pour un système isolé.....	49
Figure III. 5. Création de la géométrie dans DESIGN MODELER	50
Figure III. 6. Création du maillage dans MESHING.....	51
Figure III. 7. Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé.....	52
Figure III. 8. Constante de Darcy utilisée	52

Figure III. 9. Facteurs de sous relaxation.....	53
Figure IV. 1. Contours des fractions liquides en fonction du temps pour des différents maillages	56
Figure IV. 2. Evolution de la fraction liquide pour les quatre maillages.....	57
Figure IV. 3. Evolution de la fraction liquide pour des différent pas du temps	58
Figure IV. 4. Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique	59
Figure IV. 5. Evolution de la température de la paroi inférieure.....	60
Figure IV. 6. Evolution de coefficient de convection sur la paroi supérieure h_{top}	61
Figure IV. 7. Evolution de coefficient de convection sur la paroi vertical droite h_{right}	62
Figure IV. 8. Evolution de coefficient de convection sur la paroi vertical gauche h_{left}	63
Figure IV. 9. Evolution de la fraction liquide dans les trois cas expérimental, isolation et pertes thermiques	64
Figure IV. 10. Evolution de la fraction liquide pour différentes constantes de Darcy .	65
Figure IV. 11. Comparaison entre l'évolution de la fusion et du front de changement de phase obtenus expérimentalement et numériquement	67
Figure IV. 12. Evolution des lignes de courant et des isothermes pendant la fusion de la paraffine	69

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique pour différents matériaux.....	8
Tableau I. 2: Principales propriétés pour choix des MCP	11
Tableau I. 3: Principales caractéristiques des différentes catégories du MCP	16
Tableau I. 4: Propriétés thermiques de certains MCP organiques.....	17
Tableau I. 5: Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques.....	19
Tableau I. 6: Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP	21
Tableau III. 1: Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée.....	47
Tableau IV. 1: Temps de calcul des quatre maillages	55
Tableau IV. 2: Calcul d'erreur par rapport au maillage plus raffiné	58
Tableau IV. 3: Temps de calcul pour les pas du temps testés dt	58
Tableau IV. 4: Calcul d'erreur pour les différents pas du temps.....	59
Tableau IV. 5: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{top}	61
Tableau IV. 6: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{right}	62
Tableau IV. 7: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{left}	63
Tableau IV. 8: Calcul d'erreur de la fraction liquide par rapport à l'expérimentale	64
Tableau IV. 9: Calcul d'erreur pour les différentes constantes de Darcy	65

Introduction générale

L'homme a toujours stocké l'énergie sous forme de chaleur par de simples gestes, en faisant chauffer une pierre au soleil et l'utiliser après pour le chauffage ou la cuisson.

L'un des principaux problèmes de l'énergie est sans aucun doute son stockage. Qu'il s'agisse d'optimiser les sources d'énergie ou de les valoriser, il permet de réguler la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes, ce qui est indispensable dans le cas des énergies renouvelables. Face à une production d'énergie intermittente ou fluctuante, le stockage permet également de réagir avec une constante.

Il existe plusieurs formes de l'énergie. Parmi les principales c'est l'énergie thermique qui génère de la chaleur, l'énergie électrique, mécanique, chimique et électrochimique. Chaque catégorie considère le stockage d'une forme différente d'énergie.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois méthodes : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et le stockage thermochimique. Pour chaque système de stockage, il existe une grande variété de matériaux en fonction de la plage de température et de l'application.

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

Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur.

Le but de ce travail est d'étudier numériquement les comportements dynamique et thermique de la paraffine lors de la fusion dans une cavité chauffée par le bas et les comparer avec les résultats expérimentaux existents. Ce mémoire s'articule selon les points suivants :

- Le premier chapitre donne un aperçu sur les types principaux de stockage d'énergie, les méthodes de stockage d'énergie, les matériaux à changement de phase et les matériaux utilisés pour ce type de stockage.

- Le deuxième chapitre est rayonné par une recherche bibliographique présentant les travaux expérimentaux et numériques effectués dans le domaine du stockage thermique par les matériaux à changement de phase à diverses configurations et différentes méthodes pour la simulation numériques.
- Le troisième chapitre est consacré à la position du problème, formulation mathématique et les conditions initiale et aux limites.
- Une validation du modèle numérique avec les résultats expérimentaux existent est faite dans le chapitre quatre, plus une présentation des différents résultats obtenus et leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I :

Stockage de l'énergie et les
matériaux à changement de
phase

I.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie est une technologie pour maintenir la durabilité des ressources énergétiques renouvelables, et aussi pour éliminer l'inadéquation entre l'offre et la demande. Dans le présent chapitre, une projection globale sur les différents types de stockage d'énergie thermique, la méthode de stockage et les matériaux à changement de phase.

I.2 Types de stockage de l'énergie :

Il existe différents types de systèmes de stockage d'énergie qui sont actuellement utilisés dans divers domaines d'applications techniques.

I.2.1 Stockage d'énergie chimique :

Les réactions chimiques peuvent absorber ou libérer une quantité importante d'énergie lorsque les liaisons chimiques se rompent ou forment de nouvelles substances. Les combustibles chimiques, tels que le charbon, l'essence, le carburant diesel, le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le propane, le butane, l'éthanol, le biodiesel et l'hydrogène, peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie dans leurs liaisons chimiques. Ce processus est connu sous le nom de power-to-gas ou power-to-liquid, selon la phase des combustibles chimiques de sortie.

I.2.2 Stockage d'énergie électrochimique :

Les unités de production d'énergie électrochimique convertissent simplement l'énergie chimique en électricité. Trois types de dispositifs électrochimiques sont fréquemment utilisés dans des applications très diverses pour stocker/libérer de l'énergie :

- Les condensateurs électrochimiques ;
- Les batteries ;
- Les piles à combustible.

L'intégration de batteries dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, tels que l'énergie photovoltaïque ou éolienne, peut permettre de stocker la quantité excessive d'énergie produite pendant les périodes hors demande. L'énergie stockée peut être déchargée en douceur des batteries et fournie au consommateur lorsque la demande est supérieure à la production.

I.2.3 Stockage d'énergie électrique :

Ce stockage est relatif à une utilisation locale d'énergie électrique, stationnaire ou mobile. Il se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Supraconducteurs magnétiques : stockage électromagnétique.
- Photovoltaïque : piles, accumulateurs.

I.2.4 Stockage d'énergie mécanique :

L'énergie électrique générée à partir d'une ressource renouvelable peut être convertie en énergie mécanique, potentielle ou cinétique, afin de stocker la quantité excessive d'énergie produite pour une utilisation ultérieure. Dans les techniques traditionnelles de stockage mécanique l'une des méthodes suivantes est utilisée :

- L'hydroélectricité par pompage ;
- L'air comprimé ;
- Le volant d'inertie.

Parmi les autres stratégies de stockage d'énergie, les applications de stockage d'énergie mécanique offrent la possibilité de stocker une quantité importante d'énergie.

I.2.5 Stockage d'énergie thermique :

Le stockage d'énergie thermique (TES) est réalisé par la variation de température d'une substance (chaleur sensible), le changement de phase d'une substance (chaleur latente), et la réaction thermochimique du milieu de stockage.

Dans le TES à chaleur sensible, la quantité d'énergie stockée (Q en J) est liée à la masse (m), à la capacité thermique volumétrique et à la variation de température (ΔT) du matériau de stockage. Dans le système TES à chaleur latente, outre la masse de l'unité de stockage, la chaleur latente de fusion est la propriété thermophysique critique de l'unité de stockage.

I.3 Méthode de stockage de l'énergie thermique :

Les méthodes de stockage d'énergie thermique (TES) sont couramment utilisées pour les applications de chauffage / refroidissement résidentielles ou commerciales ou pour fournir une production d'électricité continue dans les centrales à base d'énergie renouvelable. Les systèmes TES fournissent non seulement un équilibre entre l'offre et

la demande, mais augmentent également les performances et la fiabilité des systèmes énergétiques.

Les techniques utilisées pour les applications de chauffage ou de refroidissement sont le stockage de chaleur sensible, le stockage de chaleur latente et le stockage de chaleur thermochimique [1].

Les méthodes de stockage d'énergie thermique sont présentées dans la figure I.1 [8].

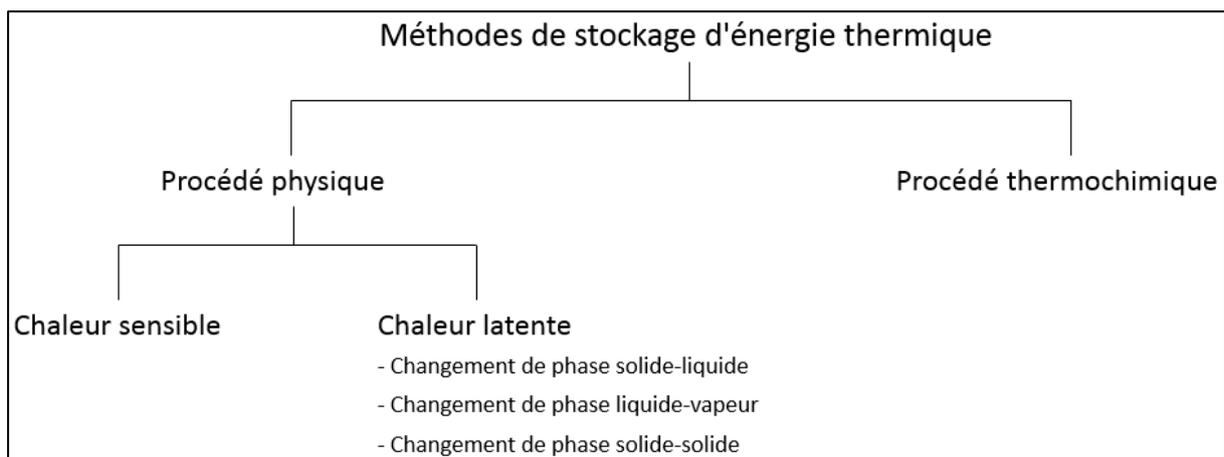


Figure I. 1. Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur

I.3.1 Stockage par chaleur sensible :

Le stockage de chaleur sensible est obtenu en augmentant ou en diminuant la température du milieu de stockage. Un cycle typique de système de stockage d'énergie thermique à chaleur sensible (SHTES) implique des processus de chauffage et de refroidissement sensibles comme indiqué dans la figure I.2 [1].

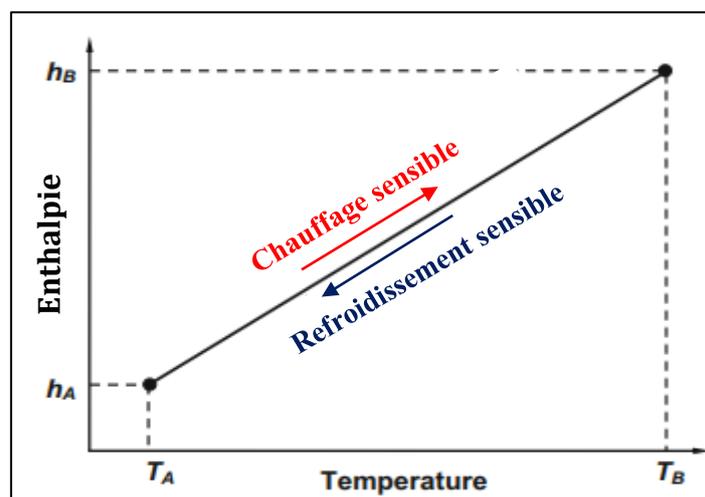


Figure I. 2. Variation d'enthalpie d'un fluide lors d'un chauffage ou d'un refroidissement sensible

Le processus de chauffage augmente l'enthalpie du milieu de stockage. Pour un support de stockage incompressible, la quantité de chaleur emmagasinée dans le système dépend de la chaleur spécifique (C_p en J / kgK) du fluide, de la différence de température (ΔT) et de la masse de le support de stockage (m en kg).

La variation d'énergie totale d'un système SHTES peut être définie comme suit:

$$\Delta E = \int_{h_A}^{h_B} mdh = m(h_B - h_A) \quad (I.1)$$

$$\Delta E = \int_{T_A}^{T_B} mC_p dT = mC_p(T_B - T_A)$$

$C_p(T) = \text{cste}$, la relation ça devient :

$$m(h_B - h_A) = mC_p(T_B - T_A) \quad (I.2)$$

Si :

$T_A > T_B$ c'est le stockage du chaud.

$T_B > T_A$ c'est le stockage du froid.

La méthode de stockage par chaleur sensible consiste à stocker une énergie thermique par la variation de la température d'un matériau. Les matériaux utilisés peuvent être à l'état solide comme le béton ou la brique ou à l'état liquide comme l'eau. Les gaz ont une très faible capacité thermique volumétrique et ne sont pas utilisés pour le stockage de chaleur sensible [3].

On a donc deux types de stockage par chaleur sensible :

Stockage sensible de la chaleur par un matériau liquide.

Stockage sensible de la chaleur par un matériau solide.

I.3.1.1 Matériaux utilisés pour un stockage sensible :

Stockage sensible de la chaleur par un matériau liquide : Les systèmes de stockage d'énergie utilisant un liquide comme matériau de stockage et de transfert de chaleur ont été préféré pour les applications du stockage thermique à base température et moyenne [4].

Stockage par l'eau : L'eau a des valeurs de capacité thermique très élevées par rapport aux autres matériaux. Elle est disponible, moins chère et facile à manipuler et à stocker. Donc c'est le meilleur choix de stockage thermique, comme indique le tableau I.1.

Stockage par huile organique : Ils sont utilisables à des températures supérieures à 300 °C mais inférieures à 350 °C afin d'éviter la décomposition [6].

Stockage sensible de la chaleur par un matériau solide :

Les matériaux de stockage solides sont principalement préférés pour répondre aux besoins de stockage thermique dans les applications de chauffage des locaux et de chauffage à haute température. Habituellement, les matériaux de stockage solides utilisés pour ces applications peuvent être exploités à des températures allant de 40 à 75° C pour les lits rocheux / béton et de plus de 150 ° C pour les métaux [7].

Propriétés des différents matériaux utilisés dans le stockage par chaleur sensible sont indiquées dans le tableau I.1 [5]:

Tableau I. 1: Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique pour différents matériaux (valeur moyenne sur la plage de température [4 °C – 100 °C] et P= 0,1 MPa)

Matériau	Chaleur spécifique Cp (J/kg.K)	Capacité thermique volumétrique (kJ/m ³ .K)
Eau	4200	4200
Fer	500	3600
Cuivre	400	3500
Paraffine	2900	2600
Aluminium	900	2500
Or	100	2500
Verre	800	2200
Béton	800	2100
Granit	800	2100
Huile	2000	2000

PVC	1000	1300
Sable	800	1200
Brique	800	1200
Bois	1800	900
Laine de verre	700	30

I.3.2 Stockage par chaleur latente :

Le stockage de chaleur latente (LHS) est basé sur le dégagement de chaleur ou l'absorption de chaleur pendant le changement de phase d'un matériau de stockage du solide au liquide ou du liquide au gaz ou vice versa. Les MCP (paraffine, hydrates de sel et sels fondus) présentent un avantage visible par rapport aux matériaux de stockage de chaleur sensible.

Le stockage de chaleur latente (LHS), par rapport au stockage de chaleur sensible (SHS), offre une densité de stockage d'énergie plus élevée avec des changements de température proches de zéro. Cependant, des difficultés surviennent généralement en réalité en raison du faible changement de densité, de la conductivité thermique, du sous-refroidissement des matériaux à changement de phase, de la stabilité des propriétés sous cyclage prolongé et parfois de la ségrégation de phase. Les matériaux à changement de phase sont spécifiquement utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie thermique latente, et par conséquent, le MCP peut également être appelé matériau de stockage de chaleur latente. Le transfert d'énergie thermique du MCP se produit pendant le processus de charge ou de décharge (fusion ou solidification) au cours duquel l'état ou la phase du matériau passe de liquide à solide ou de solide à liquide. Au début du chauffage du matériau, la température du MCP augmente en absorbant l'énergie thermique. Lorsque le matériau atteint une plage de température spécifique, il commence à fondre lorsque le matériau commence à subir une transition de phase de l'état solide à l'état liquide. Cependant, contrairement aux matériaux de stockage de chaleur sensible, pendant le processus de transition de phase, le MCP libère ou absorbe de la chaleur à une température constante ou presque constante. De nombreux auteurs ont expérimenté différents types de MCP en les subdivisant en types organiques, inorganiques et eutectiques. Cependant, la majorité du matériau à changement de phase ne possède pas

les propriétés recommandées pour un milieu d'énergie thermique idéal, et ainsi, des amplificateurs thermiques sont utilisés pour améliorer les inconvénients que le milieu peut avoir [9].

La variation d'énergie totale d'un système LHS peut être définie comme suit:

$$\Delta E = \int_{T_1}^{T_f} mC_{ps} dT + mL_f + \int_{T_f}^{T_2} mC_{pl} dT \quad (I.3)$$

Avec:

C_{ps} : Capacité thermique massique du corps à l'état solide (J/kg.K).

C_{pl} : Capacité thermique massique du corps à l'état liquide (J/kg.K).

L_f : Chaleur latente (J/kg).

$C_{ps}(T) = cste$ et $C_{pl}(T) = cste$, la relation ça devient :

$$m(h_2 - h_1) = mC_{ps}(T_f - T_1) + mL_f + mC_{pl}(T_2 - T_f) \quad (I.4)$$

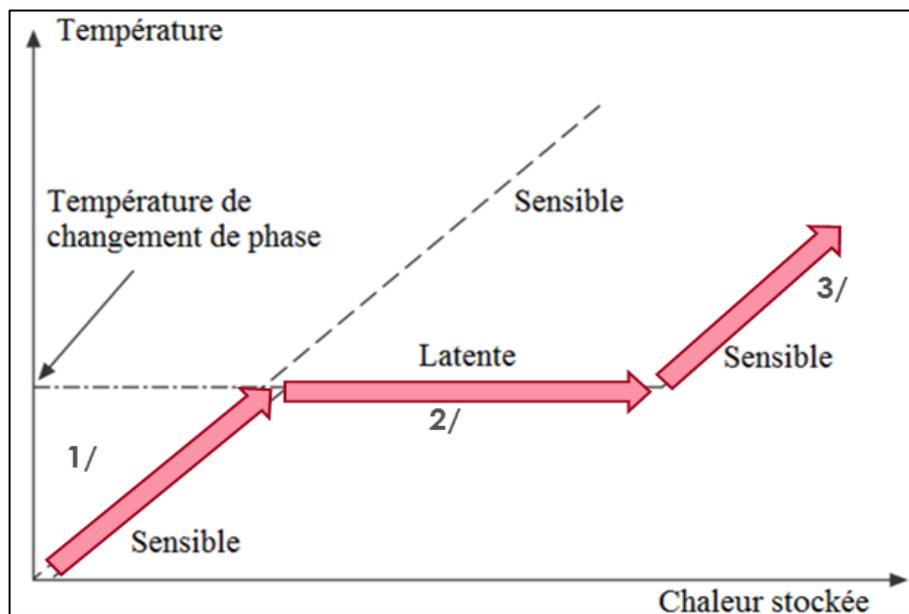


Figure I. 3. Les différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente

I.3.2.1 Matériaux utilisés pour un stockage latent :

Les matériaux de stockage de chaleur latente sont appelés MCP. Le transfert d'énergie thermique se produit lorsqu'un matériau passe du solide au liquide ou du liquide au solide. Qui s'appelle un changement d'état. Ces MCP solides-liquides fonctionnent comme des matériaux de stockage sensible, leur température augmente à

mesure qu'ils absorbent la chaleur. Contrairement aux matériaux de stockage sensibles, le MCP absorbe et libère de la chaleur à une température presque constante [10].

Les principales propriétés désirées pour choisir un MCP sont présentées dans le tableau I.2 [10] :

Tableau I. 2: Principales propriétés pour choix des MCP

Propriétés thermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Température de transition de phase appropriée. • Chaleur latente de transition élevée. • Conductivité thermique élevée en phase liquide et solide. • Bon transfert de chaleur.
Propriétés physiques	<ul style="list-style-type: none"> • Équilibre de phase favorable. • Haute densité. • Petit changement de volume. • Faible pression de vapeur.
Propriétés cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de surfusion. • Taux de cristallisation suffisant.
Propriétés chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilité chimique à long terme. • Compatibilité avec les matériaux de construction. • Aucun risque d'incendie.
Propriétés économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Abondantes. • Disponibles. • Rentables.

I.3.3 Stockage thermochimique :

Dans un système de stockage d'énergie thermochimique, l'énergie est stockée après une réaction de rupture ou de dissociation des liaisons chimiques au niveau moléculaire qui libère de l'énergie puis récupérée dans une réaction chimique réversible. Semblable à l'autre type de systèmes de stockage d'énergie thermique, le système de stockage de chaleur thermochimique peut également subir des processus de charge, de stockage et de décharge [11].

La figure I.4 représente le processus de charge, de décharge et de stockage d'un système de stockage thermochimique.

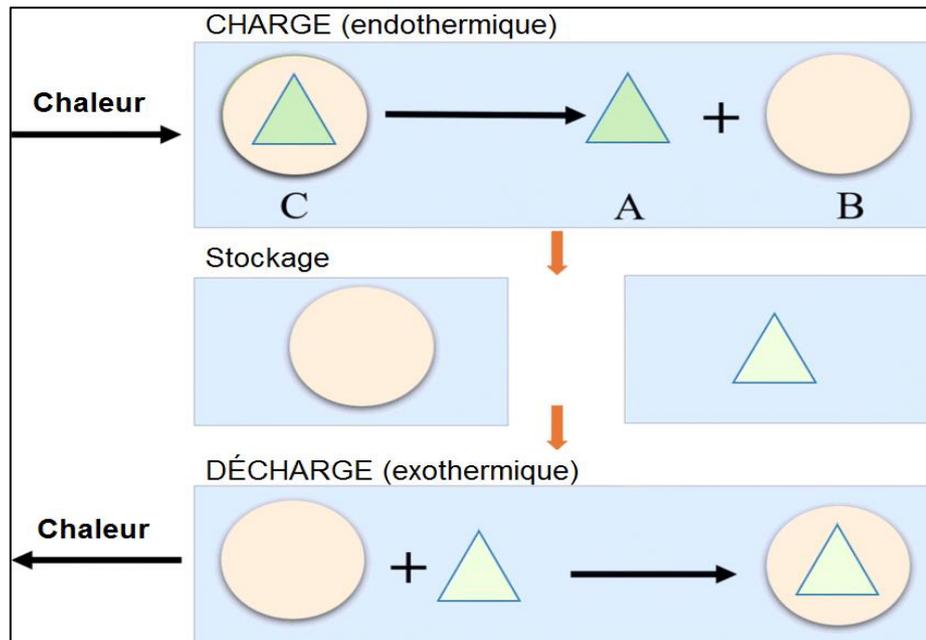
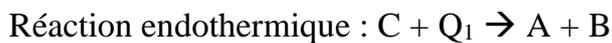


Figure I. 4. Processus de charge, de décharge et de stockage d'un système de stockage thermochimique

Le stockage de chaleur thermochimique peut subir divers processus, notamment des réactions chimiques et photochimiques réversibles, la libération d'eau et d'hydrates et la production carburant.

Le principe de base du stockage thermochimique est :



La réaction doit être complètement réversible pour que le processus ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles.

Dans le processus de charge, l'énergie thermique arrivée d'une source de chaleur permet la réaction endothermique de survenir, dans cette réaction les produit A et B sont séparés et stockés. Lorsqu'on veut restaurer cette énergie thermique, les produits A et B sont à nouveau en contact pour réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restaurer la chaleur stockée et régénérer le produit C.

La quantité d'énergie stockée dans une réaction chimique est exprimée dans la relation suivante :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{p,i} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \quad (I.5)$$

Avec:

E : la quantité d'énergie stockée (J).

n_A : le nombre de moles du produit A (mol)

ΔH_r : l'enthalpie de la réaction ($J \cdot mol^{-1}_A$)

Le stockage par sorption et le stockage chimiques sont les deux grands domaines nécessaires à la réalisation de travaux de recherche actifs et potentiels pour charger et décharger efficacement l'énergie disponible. Les phénomènes de stockage par sorption peuvent être classés en stockage par adsorption et par absorption (Figure I.5 [30]) . De même, le stockage chimique peut être rendu efficace grâce aux phénomènes électrochimiques, électromagnétiques, thermochimiques sans sorption, d'adsorption chimique et d'absorption chimique [12].

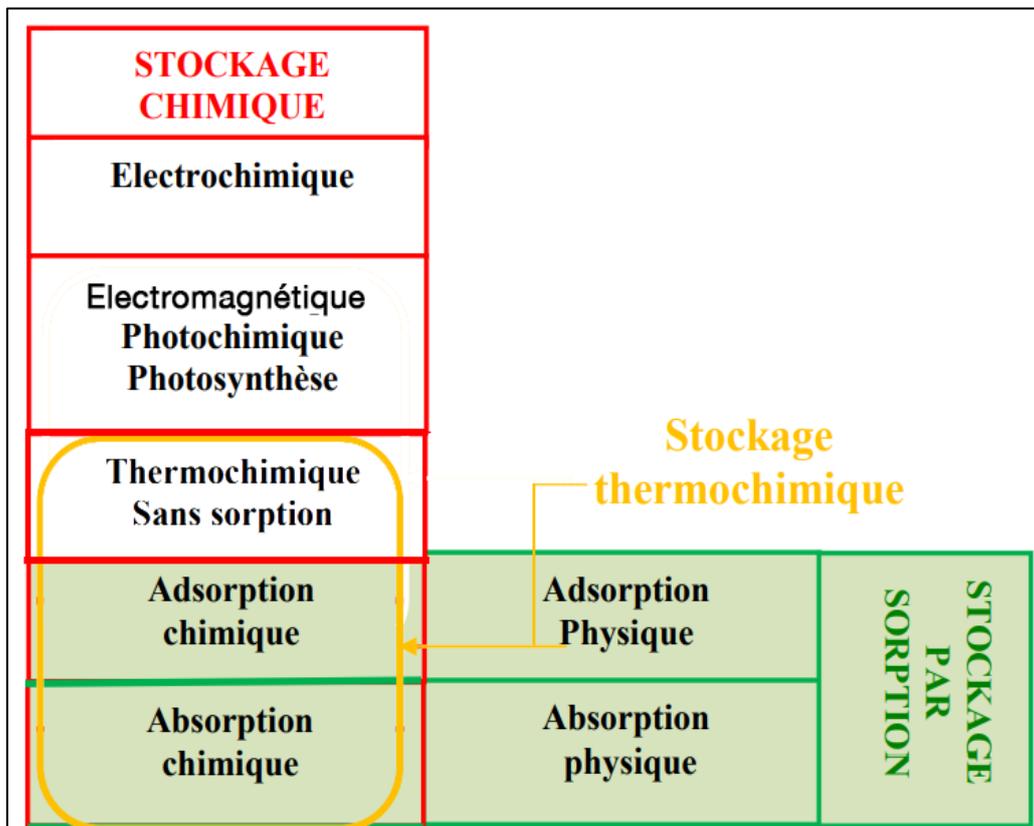


Figure I. 5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique

I.4 Matériaux à changement de phase :

I.4.1 Introduction :

Un matériau à changement de phase (MCP) est un matériau qui change de phase à une certaine température. Pendant le processus de changement de phase, un MCP absorbe ou libère une grande quantité de chaleur afin d'effectuer la transformation. Cette action est connue sous le nom de chaleur latente de fusion (L_f) ou de vaporisation (L_v), et grâce à ce processus, l'énergie est stockée.

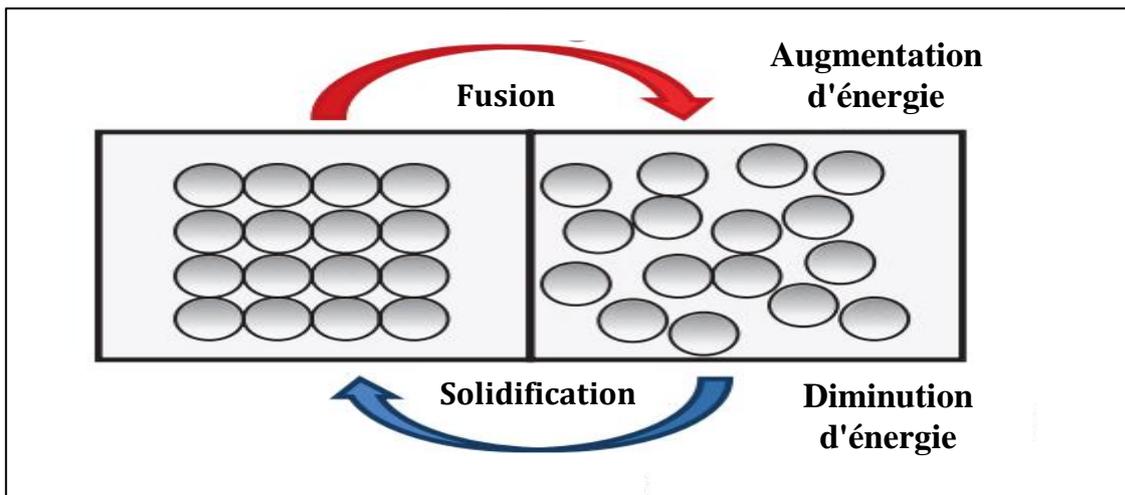


Figure I. 6. Le processus de fusion/solidification

Le stockage d'énergie thermique avec les matériaux à changement de phase (MCP) offre une densité de stockage thermique élevée avec une variation de température modérée et a attiré l'attention en raison de son rôle important dans la réalisation de la conservation de l'énergie dans les bâtiments à confort thermique [13].

I.4.2 Choix d'un matériau à changement de phase :

La sélection d'un MCP se fait principalement en fonction de sa température de fusion, chaleur latente et aussi les propriétés suivantes [15] :

- Les propriétés thermiques :
 - Une plage ou une température de changement de phase adaptée.
 - La chaleur latente volumique doit être la plus grande possible.
 - La conductivité thermique doit être suffisante pour assurer les transferts de chaleur dans le matériau.
- Les propriétés physiques :
 - Une grande densité.

- Une dilatation volumique raisonnable pour limiter les problèmes de conditionnement.
- Les propriétés cinétiques :
 - Pas d'effet de surfusion.
 - Un taux de cristallisation suffisant.
- Les propriétés chimiques :
 - Une stabilité chimique à long terme
 - Pas de toxicité.
 - Une résistance au feu suffisante pour les normes en vigueur dans la construction
- Autres propriétés :

Le MCP peut présenter des caractéristiques thermophysiques et chimiques idéales, il doit aussi présenter des caractéristiques économiques intéressantes pour rivaliser avec le stockage sensible dans l'industrie. Les caractéristiques économiques idéales sont les suivantes [16]:

- Le coût du MCP est faible.
- Il est disponible et abondant.
- Son coût de fabrication est moindre et n'impacte pas l'environnement. Idéalement, le MCP provient d'un procédé bio-sourcé et est un co-produit d'une unité de production encore non valorisé.

La figure I.8 montre une classification des grandes familles de MCP suivant leur chaleur latente et leur température de fusion [14].

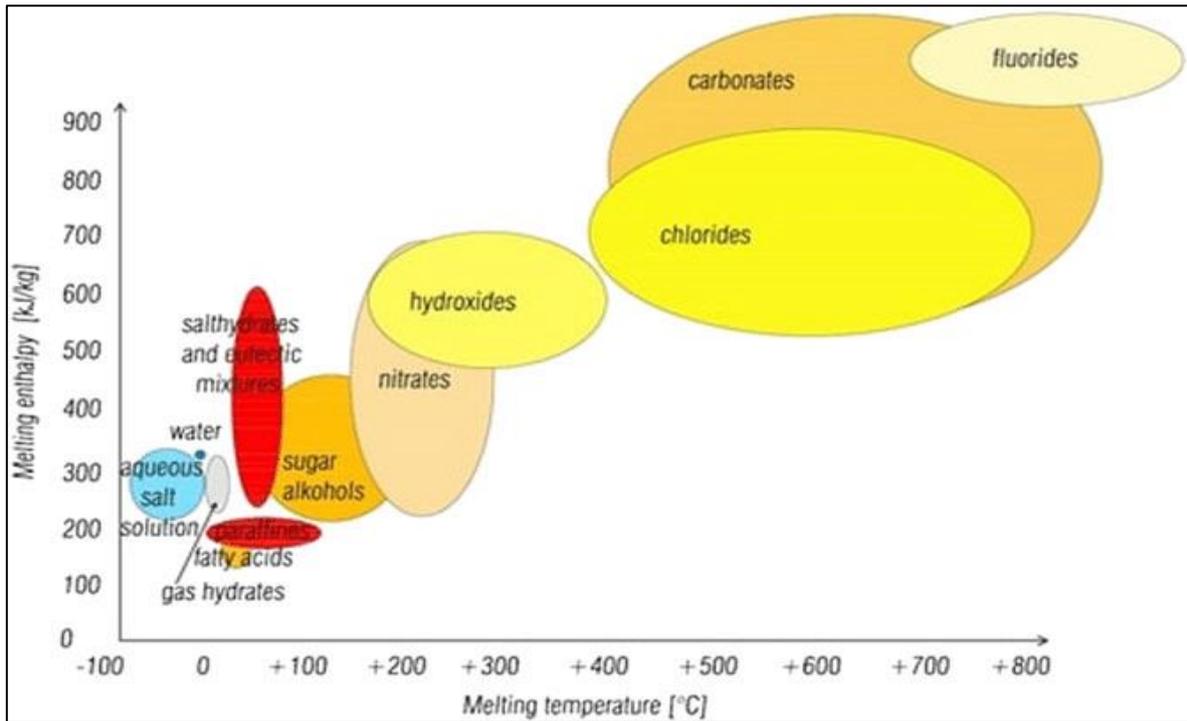


Figure I. 7. Chaleur latente en fonction de la température de fusion des grandes familles de MCP

I.4.3 Types des matériaux à changement de phases :

Les matériaux à changement de phase utilisés sont :

- Les matériaux organiques, paraffines (C_nH_{2n+2}), non-paraffine et acides gras ($CH_3(CH_2)_nCOOH$).
- Les matériaux inorganiques : notamment sels hydratés (MnH_2O) et les métaux.
- Les mélanges eutectiques de corps organiques et/ou inorganiques.

Caractéristiques des différents types du MCP sont indiquées dans le tableau I.3 [21,22].

Tableau I. 3: Principales caractéristiques des différentes catégories du MCP

Type du MCP	Composition	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (J/kg K)	Coût
Organique	Paraffine	-12 – 71	190 – 260	Coûteux
	Non-Paraffine	8 – 187	130 – 250	Très coûteux
Inorganique	Sels hydratés	11 – 120	100 – 200	Peu coûteux
	Métaux	30 – 96	25 – 90	Coûteux
Eutectique	Paraffine	4 – 93	100 – 230	Coûteux
	Non-Paraffine	-12 – 71	190 – 260	Coûteux

I.4.3.1 Matériaux organiques :

Les produits organiques sont sans doute le type de MCP le plus populaire. Les produits organiques peuvent inclure une large gamme de MCP tels que ceux de la famille des alcanes (paraffine) (C_nH_{2n+2}) et de la famille des acides gras ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$). Les PCM organiques ont tendance à être abondamment disponibles, relativement peu coûteux et faciles à utiliser. Les alcanes et les acides gras ont des caractéristiques physiques similaires, présentant une surface blanche qui est d'apparence molle et cireuse.

Les produits organiques, en particulier la paraffine, sont les MCP les plus couramment étudiés pour la gestion thermique de l'électronique. La plage de fusion des matériaux de la famille des paraffines a tendance à être de 35 °C à environ 70 °C, en fonction de la structure de l'hydrocarbure spécifique, ce qui en fait une excellente correspondance avec l'électronique qui a une température de jonction maximale d'environ 85 °C [17].

Le tableau I.4 présente les propriétés thermiques pour des MCP organiques [18].

Tableau I. 4: Propriétés thermiques de certains MCP organiques

Type	Composé	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	Cp (kJ/kg)	k (W/m K)
Paraffine	Octadécane	29	244	814 (sol)	2150 (sol)	0.358 (sol)
				724 (liq)	2180 (liq)	0.152 (liq)
Paraffine	Tétracosane	51.5	207.7	773.6 (liq)	2924 (liq)	0.137 (liq)
Paraffine mélangée	IGI 1230A	54.2	278.2	880 (sol)	2800 (liq)	0.25 (sol)
				770 (liq)		0.135 (liq)
Acides gras	Acide caprique	32	153	1004 (sol)	1950 (sol)	0.153 (liq)
				878 (liq)	1720 (liq)	
Acides gras	Acide laurique	44	178	1007 (sol)	1760 (sol)	0.147 (liq)
				965 (liq)	2270 (liq)	
Acides gras	Acide stéarique	69	202	965 (sol)	2830 (sol)	0.172 (liq)
				848 (liq)	2380 (liq)	

Paraffine :

La cire de paraffine est constituée d'un mélange de n alcanes à chaîne droite principalement $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$. La cristallisation de la chaîne (CH_2) libère une grande quantité de chaleur latente à la fois au point de fusion et la chaleur latente de fusion augmente avec la longueur de la chaîne. La paraffine est qualifiée de chaleur des matériaux de stockage de fusion en raison de leur disponibilité dans une large plage de températures. Cependant, pour des raisons de coût, seules des paraffines de qualité technique peuvent être utilisées comme MCP dans les systèmes de stockage de chaleur latente. La paraffine est sûre, fiable, prévisible, moins chère et non corrosive. Ils sont chimiquement inertes et stables en dessous de 500°C , présentent de faibles variations de volume lors de la fusion et ont une faible pression de vapeur sous forme fondue [19].



Figure I. 8. Paraffine

Non-paraffine :

Des esters, acides gras ; alcools et glycols peuvent être utilisés comme medium organiques de stockage thermique par chaleur latente. Ces matériaux doivent être conditionnés car ils sont inflammables et ne doivent pas être exposés à des agents oxydants. Leurs caractéristiques sont assez différentes d'une substance à l'autre contrairement aux paraffines [20].



Figure I. 9. Acide stéarique (acide gras)

I.4.3.2 Matériaux inorganiques :

Les matériaux inorganiques sont également classés en hydrates de sel et en métaux. Ces MCP ne se surfondent pas sensiblement et leurs chaleurs de fusion ne se dégradent pas avec le cycle.

Propriétés thermiques des MCP inorganique sont indiquées dans le tableau I.5 [25,26].

Tableau I. 5: Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques

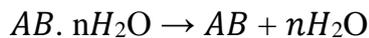
Composé	Temperature de fusion (°C)	Chaleur latent (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	k (W/m K)
MgCl ₂ · 6H ₂ O	117	168.6	1569 (sol)	0.694 (sol)
			1450 (liq)	0.579 (liq)
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	170 – 192	1802 (sol)	1.008 (sol)
			1562 (liq)	0.561 (liq)
NaSO ₄ · 10H ₂ O	32	251	1485 (sol)	0.544
NaNO ₃	307	172	2260 (sol)	0.5
KNO ₃	333	266	2110 (sol)	0.5
NaCl	802	492	2160 (sol)	5.0

Hydrates de sels :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB \cdot nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C . On peut aussi citer la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$, $Li_2SO_4 \cdot H_2O$ et autres sels ioniques tels que $NaCl$ et KCl et ayant une température de fusion autour de $98.9 \text{ }^\circ\text{C}$ [23].

Métaux :

La famille des métaux et est peut-être la plus sous-utilisée de toutes les familles de MCP, peut-être en raison de la faible chaleur latente que présentent la plupart de ces matériaux. Cependant, malgré cela, les métaux sont prometteurs dans certaines applications. Les MCP à base de métaux comprennent un certain nombre de matériaux dont les points de fusion se situent dans l'intervalle des applications MCP souhaitées. Nombre de ces métaux sont faciles à travailler et sont utilisés depuis des années dans d'autres applications nécessitant des métaux fondus [24].

I.4.3.3 Eutectiques :

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques.

Les eutectiques fondent et gèlent presque toujours sans ségrégation car ils gèlent en un mélange intime de cristaux, laissant peu de possibilités de séparation des composants.

Lors de la fusion, les deux composants se liquéfient simultanément, la séparation étant à nouveau peu probable.

I.4.4 Avantages et inconvénients des différents types des MCP :

Les principaux avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau I.6 [27,28,29] :

Tableau I. 6: Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP

	Avantages	Inconvénients
Organique	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible dans une large gamme de températures • Inerte chimiquement • Ne subissent pas de ségrégation de phase • Thermiquement stables pour des cycles répétés de congélation/fusion • Faible pression de vapeur à l'état fondu • Chaleur de fusion relativement faible • Non corrosif, ou légèrement corrosif (acides gras) • Compatible avec les matériaux de construction • Faible changement de volume lors des transitions de phase • Peu ou pas d'effet de sursurcoolissement pendant la congélation • Inoffensif (généralement non-toxique et non-irritant ; les types non-paraffines peuvent présenter différents niveaux de toxicité) • Stable en dessous de 500 °C (le type non paraffiné présente une instabilité à températures élevées) • Recyclable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible conductivité thermique (environ 0,2 W/m K) • Modérément inflammable • Non compatible avec les récipients en plastique • Densité peu importante.

<p>Inorganique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur de stockage volumétrique élevée • Chaleur de fusion élevée • Conductivité thermique élevée • Facilement disponible • Ininflammable • Compatible avec les récipients en plastique • Changement de phase brutal • Faible impact environnemental • Potentiellement recyclable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ségrégation de phase pendant les transitions • Corrosif pour les métaux • Irritant • Pression de vapeur élevée • Faible durabilité Stabilité chimique modérée • Changement de volume élevé
<p>Eutectiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Température de fusion élevée • Capacité de stockage thermique volumétrique élevée (légèrement inférieure aux PCM organiques) 	<p>L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.</p>

I.4.5 Applications des MCP pour le stockage thermique :

I.4.5.1 Dans les bâtiments :

Le début de la commercialisation de ce type de matériaux débute dans les années 1990. On retrouve les matériaux à changement de phase dans le bâtiment principalement sous la forme de plaques où les MCP sont encapsulés. La capsule permette de garder la solidité de la paroi du bâtiment.

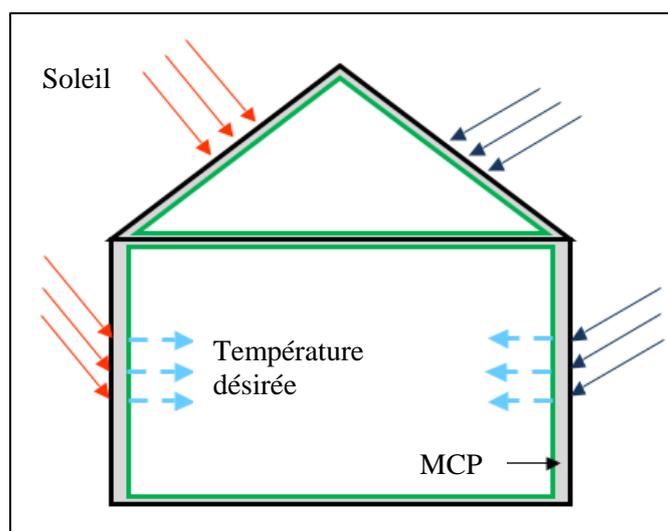


Figure I. 10. Application typique du MCP dans les bâtiments

L'énergie stockée dans les parois (enthalpie de fusion) n'est pas transmise à l'intérieur de l'édifice. Ce n'est que lorsque le bâtiment se refroidit que les MCP se solidifient et que l'énergie stockée est restituée.

I.4.5.2 Intégrations des MCP dans les fenêtres et les rideaux :

L'utilisation de chauffage ou de climatisation a un coût relativement important malgré le confort que cela procure. Un système de fenêtres à double-vitrage utilisant des MCP permet de réduire les pertes de chaleur. Le MCP peut circuler entre les deux vitrages. Le MCP liquide est introduit dans l'intervalle entre les deux vitrages par l'intermédiaire d'une pompe qui est activée pour une différence de température donnée.

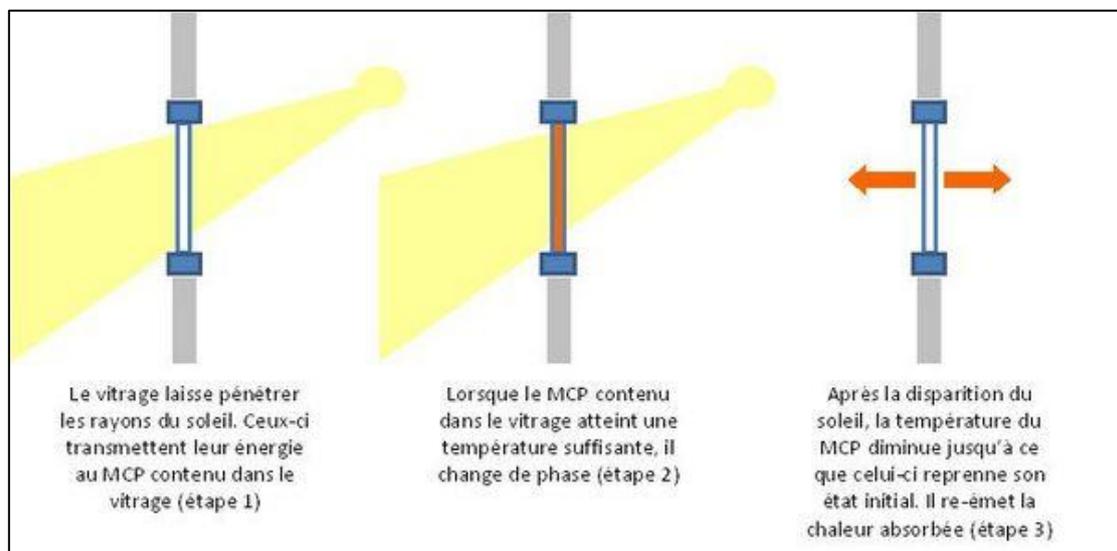


Figure I. 11. Exemple de fonctionnement du système à double vitrage

I.5 Conclusion :

L'étude réalisée montre l'importance de stockage de l'énergie thermique pour limiter les autres sources d'énergie.

La comparaison des différents types de stockage thermique a permis de montrer les avantages de l'utilisation du stockage latent, notamment les MCP dans n'importe quelle forme, particulièrement les paraffines pour ces meilleurs caractéristiques en comparaison avec les autres types des matériaux à changement de phase.

Chapitre II :

Recherche bibliographique

II.1 Travaux antérieurs :

Les études qui ont été effectuées dans le domaine de la fusion d'un matériau à changement de phase peuvent être classées en trois axes de recherche: travaux expérimentaux, numériques et analytiques.

Dans ce domaine la littérature révèle que la plupart des travaux réalisés sur les problèmes de changement de phase solide-liquide sont soit expérimentaux soit numériques. La grande majorité étudie la fusion et la solidification du n-octadécane (cire de paraffine) comme MCP, qui procède une température de fusion peu élevée.

Contrairement aux travaux expérimentaux et numériques, il existe peu de travaux de recherche à caractères analytiques sur les problèmes de changement de phase. Ils ont tous développés des solutions sans tenir compte de la convection naturelle afin d'éviter les solutions mathématiques complexes.

II.2 Travaux expérimentaux :

A.N. Korti et al. [45], ont étudié le comportement d'un MCP durant les deux processus charge (fusion) et décharge (solidification) dans un stockeur l'énergie thermique par chaleur latente.

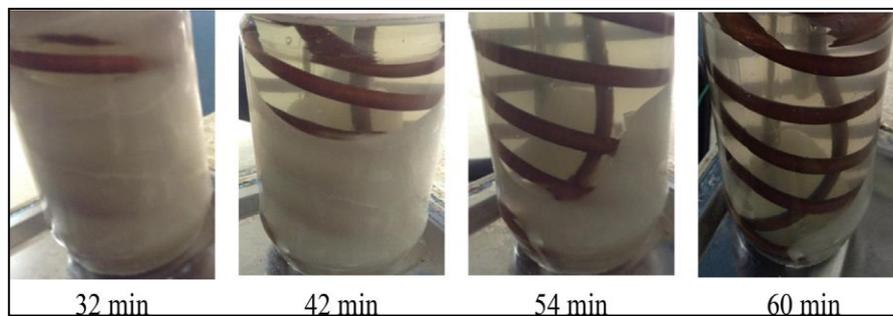


Figure II. 1. Phase de fusion

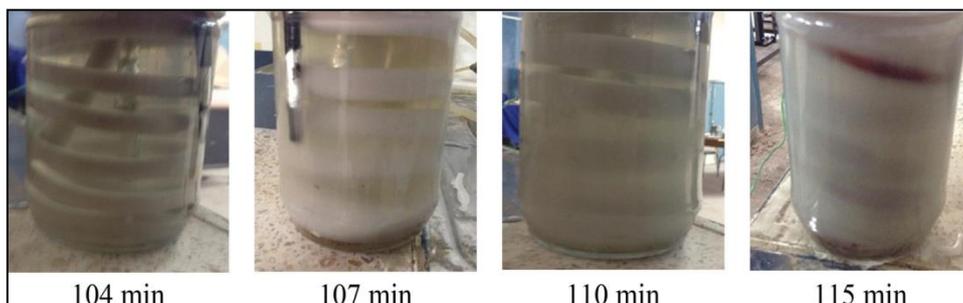


Figure II. 2. Phase de solidification

Après, trois différents types de paraffines en tant que matériau à changement de phase (MCP) ont été étudiés afin de traiter les effets de la température d'entrée HTF (L'eau est utilisée comme fluide caloporteur), débit et du type de MCP durant les deux processus de charge et de décharge. Ils ont conclu que la température d'entrée a un effet significatif sur les performances de l'échangeur de telle que la phase de charge est accélérée de 54,5 % et la phase de décharge est retardée de 48,5 %. L'ajout de l'huile de moteur à la paraffine a amélioré la vitesse du processus de charge et de décharge respectivement de 42,4 et de 66 %.

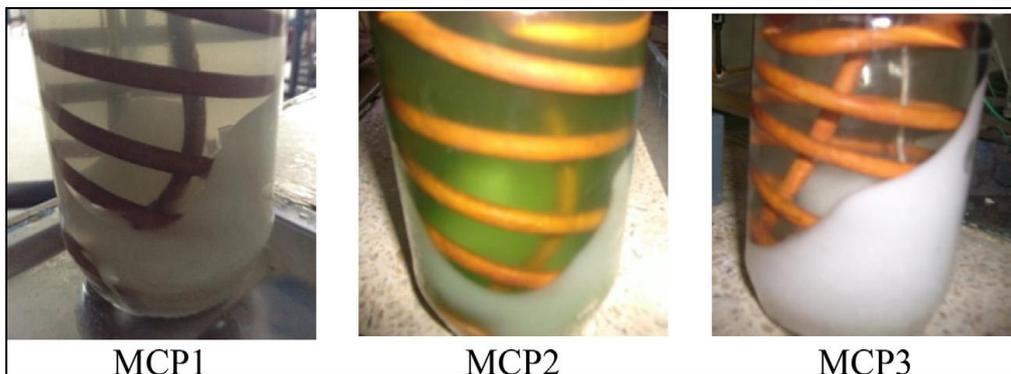


Figure II. 3. Phase de fusion pour différents MCP

H. Guellil et al. [46] : ont réalisé une étude expérimentale pour analyser la performance d'une nouvelle unité de stockage d'énergie thermique de chaleur latente (LHTES) pendant les deux processus charge et décharge. Un échangeur de chaleur d'air à tube à ailerons est rempli de MCP en matériau à changement de phase et enfermé dans une unité de stockage isolante. Ils ont étudié l'effet de l'alimentation électrique, du débit-masse d'air et de l'utilisation des ailettes plates sur le comportement thermique et l'efficacité. Les expériences ont montré que les ailettes peuvent accélérer le temps de début et de fin de fusion d'environ 55 et 72 %, respectivement. La phase de charge peut être prolongée à 94% en augmentant l'alimentation de 32 %, ce qui leur a également permis pour stocker et récupérer plus de 5 fois l'énergie thermique. Les résultats montrent que pour une puissance fixe, la réduction du débit de 54 % accélère la phase de charge, augmente la température maximale jusqu'à 18,3 % et prolonge la phase de décharge.

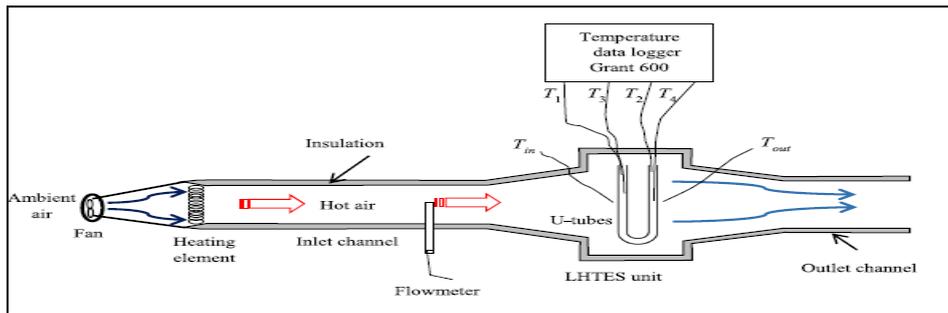


Figure II. 4. Schéma du Banc d'essai réalisé

A.N. Korti et al. [47], ont réalisé une étude expérimentale pour analyser le comportement thermique de la paraffine fondue dans une cavité thermique en intégrant des différents métaux (zamak, aluminium et cuivre) avec des différentes configurations. L'originalité de l'étude est d'essayer de prédire le meilleur duo qui respecte à la fois l'amélioration de la conductivité thermique et l'énergie stockée. Les expériences montrent que l'ajout de plaques perforées d'aluminium dans la paraffine accélère le processus de fusion d'environ 19% et augmente l'énergie stockée de 5,18%.



Figure II. 5. Fusion d'un MCP dans une cavité avec une grille de ZAMAK

A.N. Korti, H. Guellil et al. [48] ont étudié l'effet de l'inclinaison sur le comportement thermique lors de la fusion d'un MCP contenu dans une cavité carrée. La plage d'angle d'inclinaison de 0° (vertical), 45° (incliné) et 90° (bas) est prise en compte. Les effets de l'inclinaison et le phénomène de retrait sont analysés en visualisant l'interface solide-liquide et en mesurant les températures par thermocouples et caméra infrarouge. Les résultats montrent que l'angle d'inclinaison a une grande influence sur le comportement naturel de convection, et affecte la progression du front de fusion et le taux de transfert de chaleur.

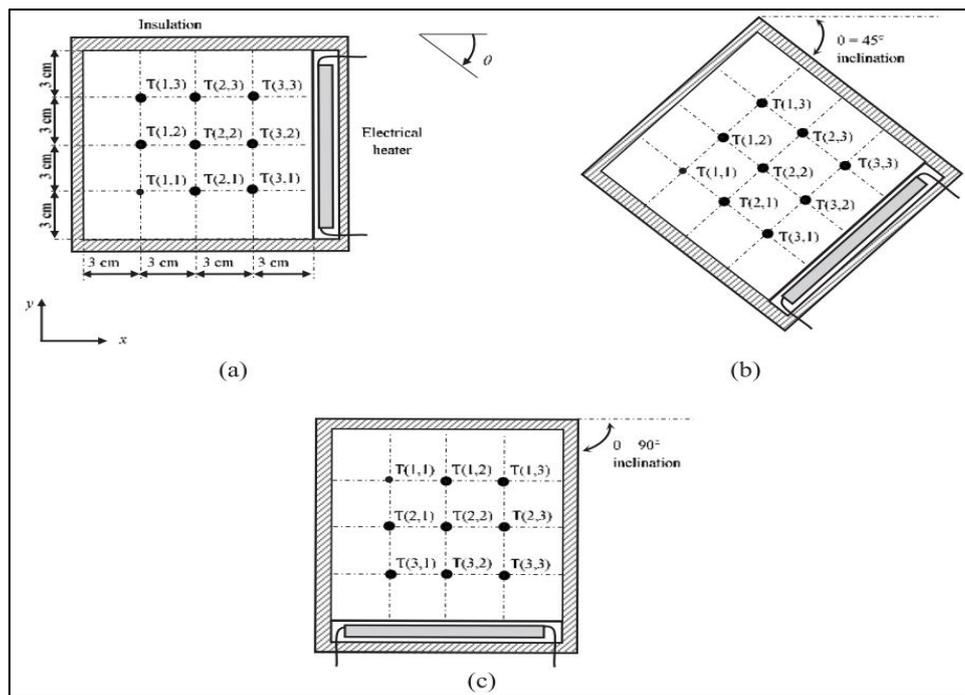


Figure II. 6. Schéma de la cavité pour les différentes positions

II.3 Travaux numériques

Un grand nombre des études sont axées sur la modélisation numérique. Cependant, la plupart de ces modèles sont validés à l'aide d'une expérience inadéquate (basse température). Pour affronter les conflits entre le numérique et l'expérimental, plusieurs paramètres sont mise en jeu à cause de leurs influence sur le processus.

Parmi ces travaux on cite :

S. Madruga et J. Curbelo [43] dans leur étude, ont identifié et décrit les principaux régimes dynamiques se produisant lors de la fusion du MCP dans des couches horizontales de plusieurs tailles chauffées par le bas. Cette configuration permet de couvrir une large gamme de nombres de Rayleigh effectifs sur la phase liquide du MCP, jusqu'à 10^9 sans modifier aucun contrôle de paramètre externe. Ils ont identifié quatre différents régimes au cours de l'évolution du temps : (i) le régime conducteur (ii) le régime linéaire, (iii) le régime de grossissement et (iv) le régime turbulent.

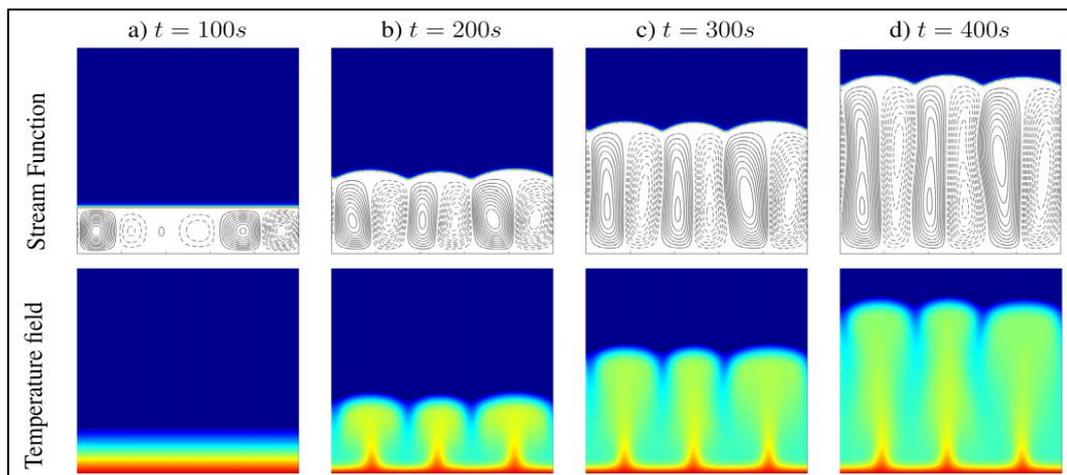


Figure II. 7. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant

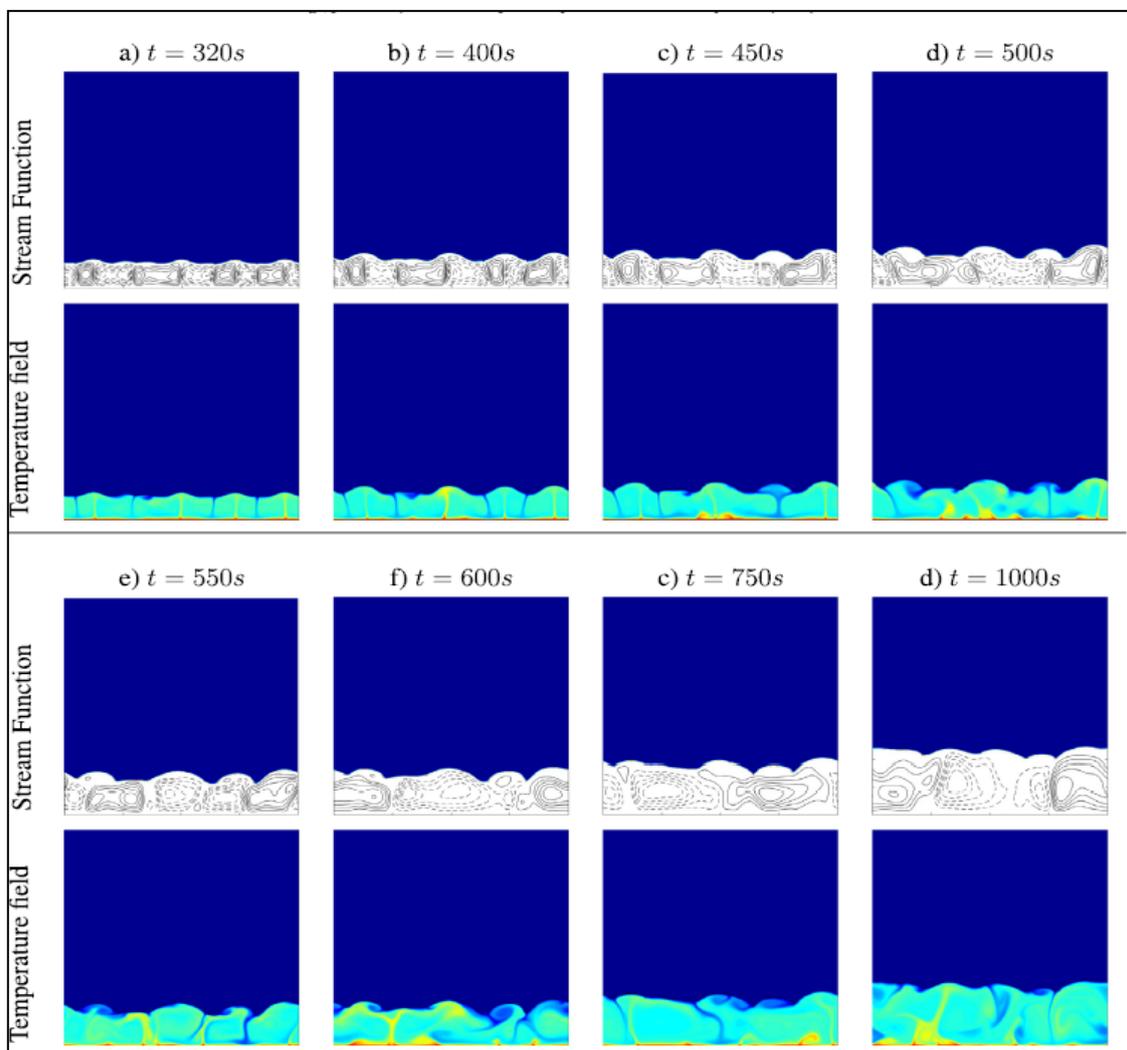


Figure II. 8. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant

Dans un autre travail Santiago et al. [49] ont fait une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la fusion du tétracosane de paraffine dans un cube

de 8 cm chauffé par le bas. La configuration numérique se compose d'un cube avec Paroi inférieure échauffée à 80°C et le reste des parois sont adiabatiques. Ils ont effectué une simulation numériques d'un système des équations de quantité de mouvement et la formulation enthalpie-porosité pour dépisiter le mouvement d'interface solide / liquide



Figure II. 9. Evolution expérimentale de la fraction liquide

Les résultats expérimentaux révèlent que l'évolution de la température et les lignes de courant correspond au régime turbulent ainsi que l'observation de l'interface solide/liquide est une mesure utile pour identifier l'état de fusion global thermique et dynamique (visualisation des cellules convectives).

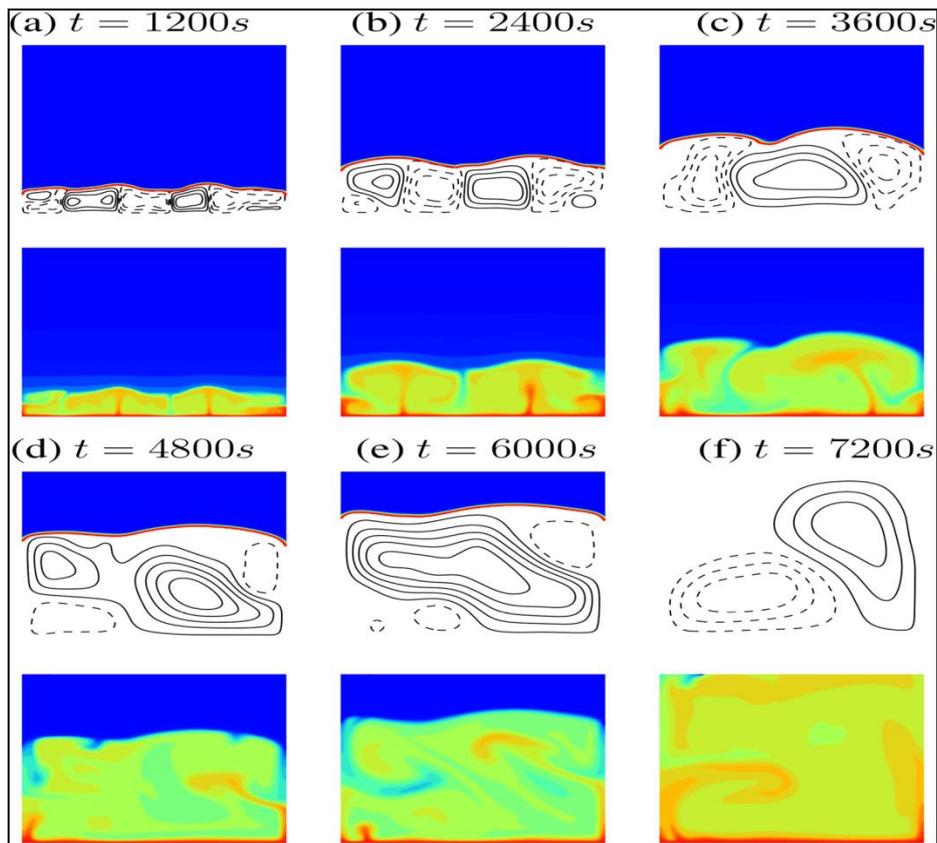


Figure II. 10. Contour de l'évolution de la température et de ligne de courant

Y. Wang et al. [37] ont étudié le processus de fusion d'un matériau à changement de phase dans une cavité rectangulaire à différents angles d'inclinaison. La paraffine est utilisée comme matériau à changement de phase dans cette étude. Un côté de la cavité est chauffé tandis que les autres côtés sont considérés comme adiabatiques. Les angles d'inclinaison étudiés comprennent 0° (chauffage horizontal inférieur), 30° , 60° , 90° (chauffage vertical), 120° , 150° et 180° (chauffage horizontal supérieur). Les résultats révèlent que les angles d'inclinaison ont un impact significatif sur le comportement de fusion de la paraffine. Lorsque l'angle augmente de 0° à 180° le temps de fusion complète augmente de manière non linéaire.

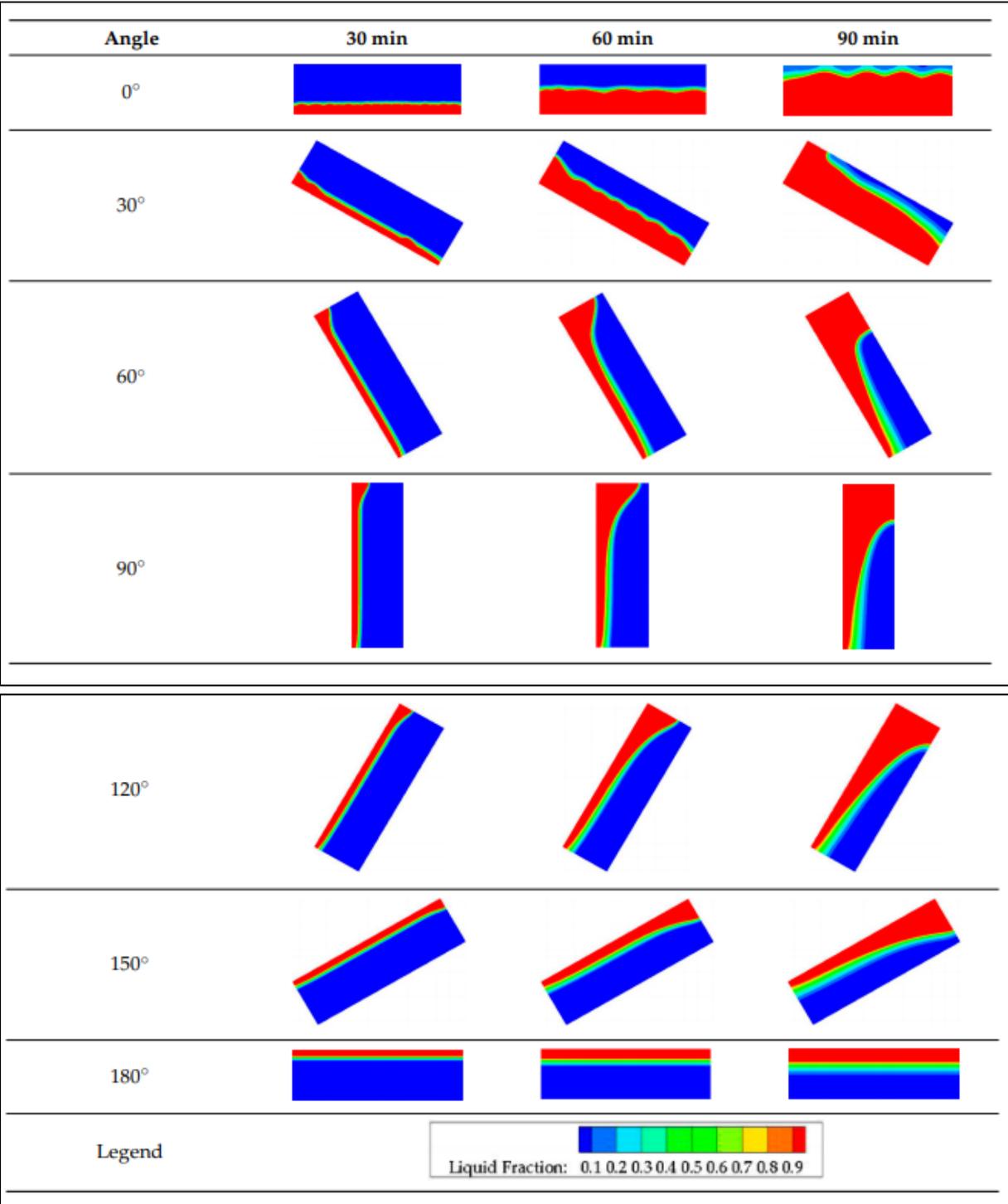


Figure II. 11. Comparaison des résultats numériques d'interfaces solide-liquide avec différents angles d'inclinaison à trois moments choisis

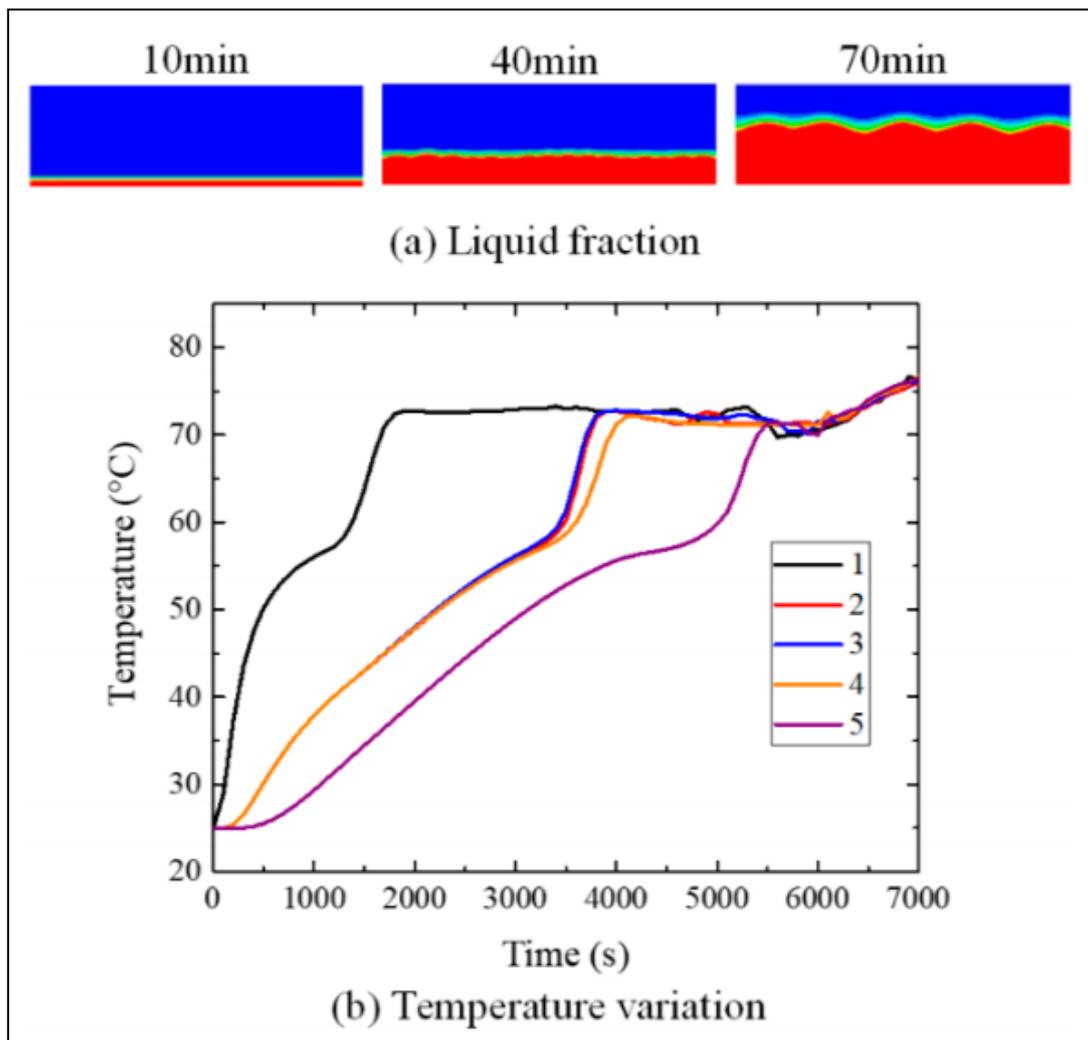


Figure II. 12. Le processus de fusion de la paraffine à 0° . (a) Fraction liquide ; (b) variation de température

Les résultats montrent que l'interface solide-liquide est presque plate pendant la phase initiale de la fusion car le mode dominant de transfert de chaleur est la conduction thermique. Au fur et à mesure que le temps passe, la forme de l'interface solide liquide devient ondulée à cause du phénomène de convection. Grâce à l'effet des cellules de convection, la température de chaque point de contrôle est presque la même après la fusion complète de la paraffine.

B. Kamkari et al. [2] ont fait une étude numérique de la fusion du matériau à changement de phase (MCP) dans des enceintes rectangulaires verticales et inclinée. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux révèle que les simulations numériques de la fusion du MCP dans des enceintes verticales peuvent prédire avec précision l'évolution temporelle de l'interface solide-liquide. Quel que soit le Nombre

de Stephan, le temps de fusion complet dans les enceintes inclinées à 0° et 45° est respectivement d'environ 52% et 37% plus court par rapport à l'enceinte verticale. Dans les enceintes inclinées ($\theta=45^\circ$ et 0°), les simulations numérique bidimensionnelle prévoient moyennement les fractions liquides avec un écart maximum inférieur à 6,5 % par rapport aux expériences. Toutefois, les formes des interfaces capturées montrent quelques divergences avec les observations expérimentales en raison de la formation de structures d'écoulement tridimensionnelles dans le MCP liquide.

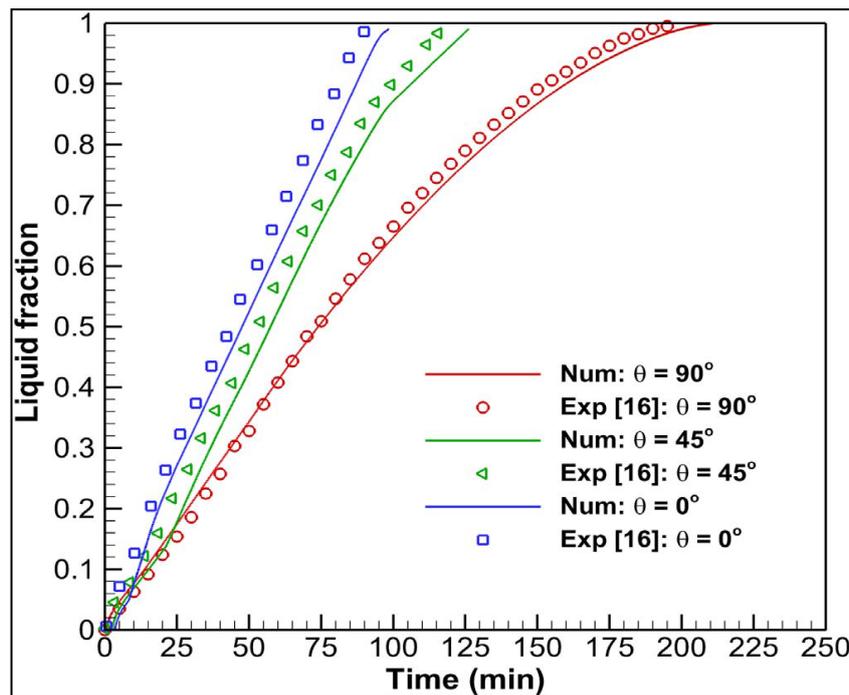


Figure II. 13. Comparaison de l'évolution de fraction liquide numérique

A. Marušić et D. Lončar [34] dans leur étude, un dispositif expérimental est présenté pour l'analyse de la fusion de MCP à haute température en enregistrant directement la propagation du front de fusion. Les résultats obtenus sont utilisés pour la validation du modèle numérique.

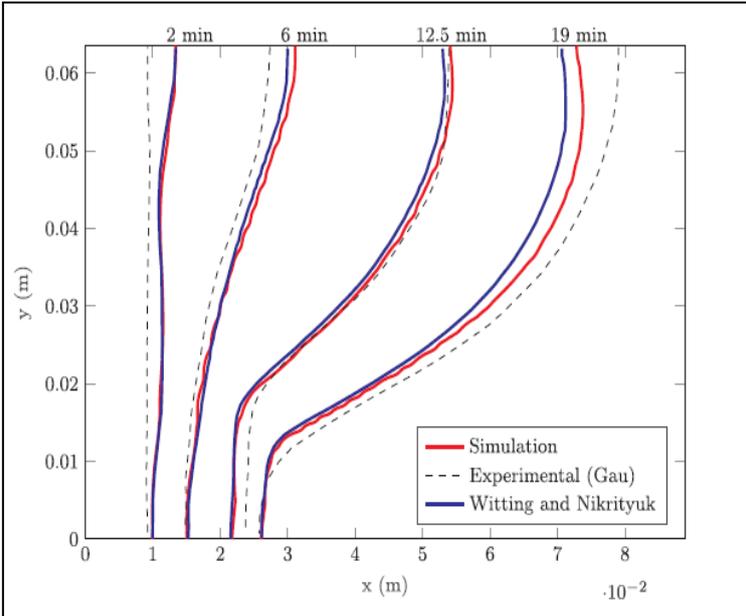


Figure II. 14. Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique

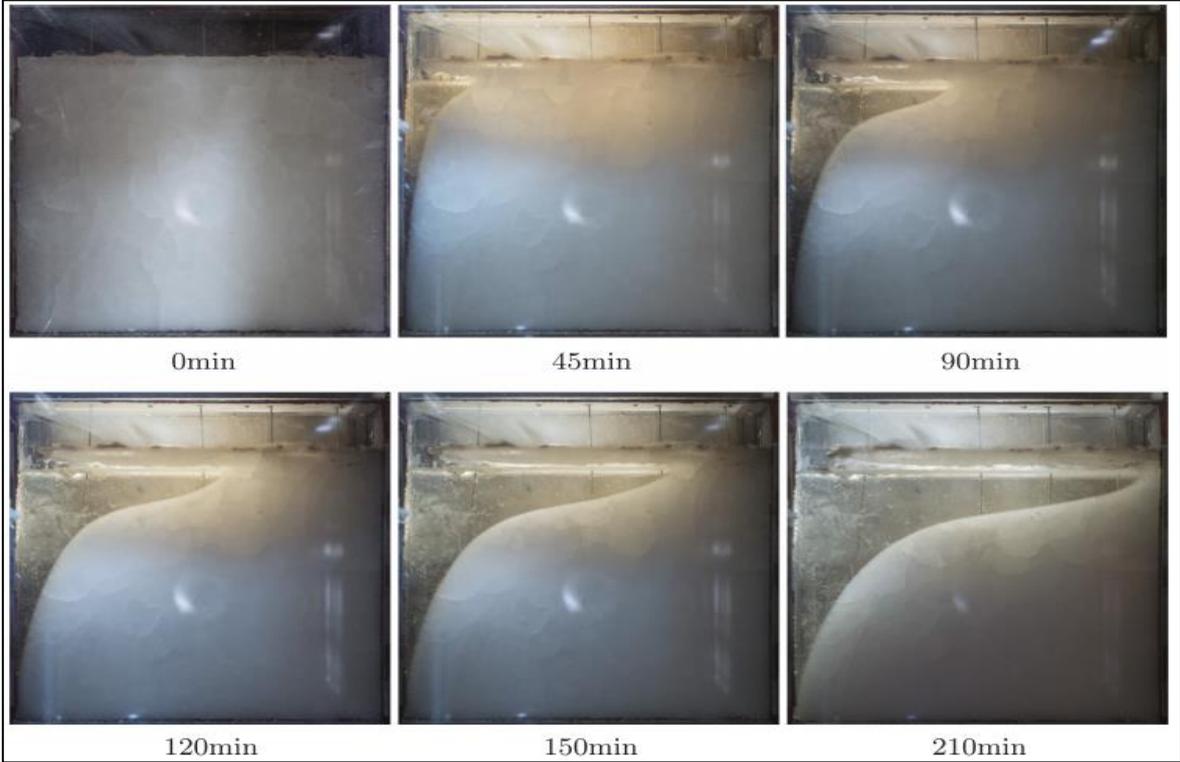


Figure II. 15. Propagation du front de fusion capturée par la caméra

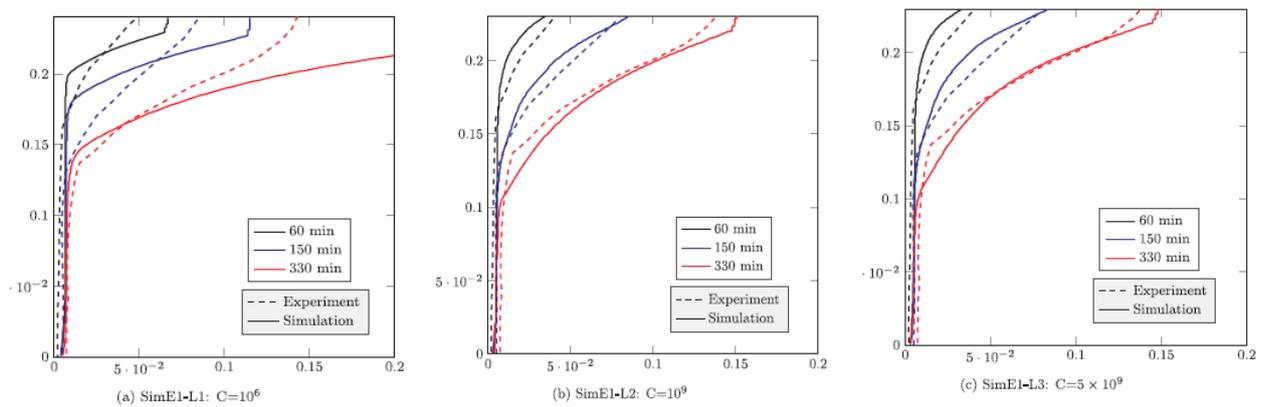


Figure II. 16. Effet de la constante de Darcy sur l'évolution du front de fusion

Une comparaison des résultats de simulation pour les trois valeurs différentes de C avec les données expérimentales de l'évolution de la fraction liquide a été faite. Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant la très grande valeur de $C = 10^9$.

M. S. Mahdi et al. [33] ont étudié numériquement et expérimentalement les processus de chargement et de déchargement du MCP dans une unité à faisceau tubulaire.

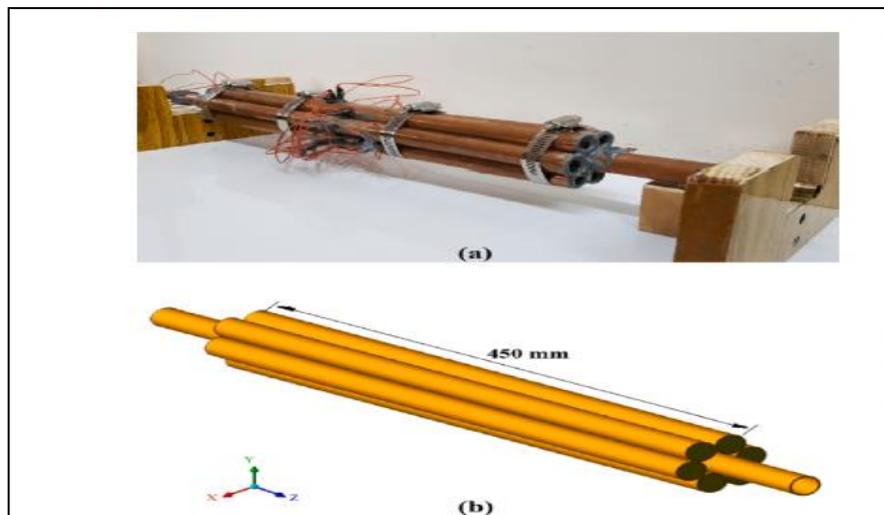


Figure II. 17. Schéma du problème étudié

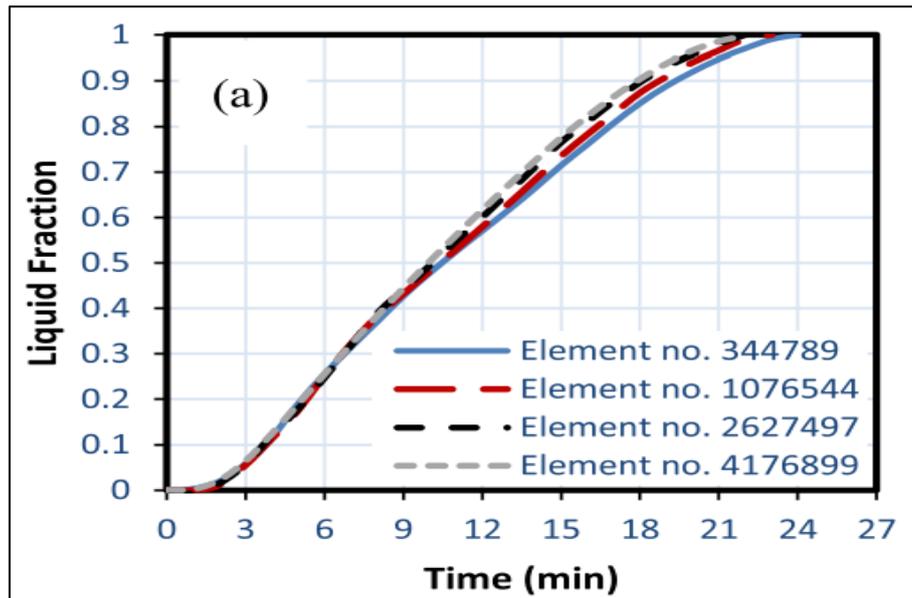


Figure II. 18. Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour des maillages différent

Pour que la solution numérique soit indépendante de la densité de maillage et du pas de temps, la fraction de liquide pour le processus de charge a été calculée pour différents nombres d'éléments et de pas de temps, comme le montrent les figures 5 et 6. Le nombre d'éléments sélectionné était de 2627497 cellules, et le pas de temps était de 0,1 s. Les figures a et b montrent qu'aucun changement significatif n'a eu lieu dans la fraction liquide calculée lorsque ces valeurs ont été modifiées.

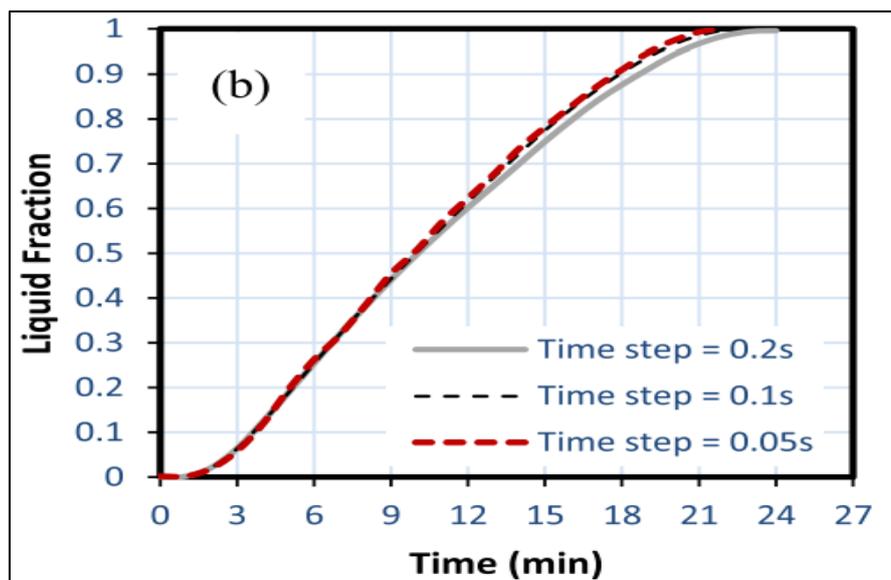


Figure II. 19. Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour des pas du temps différent

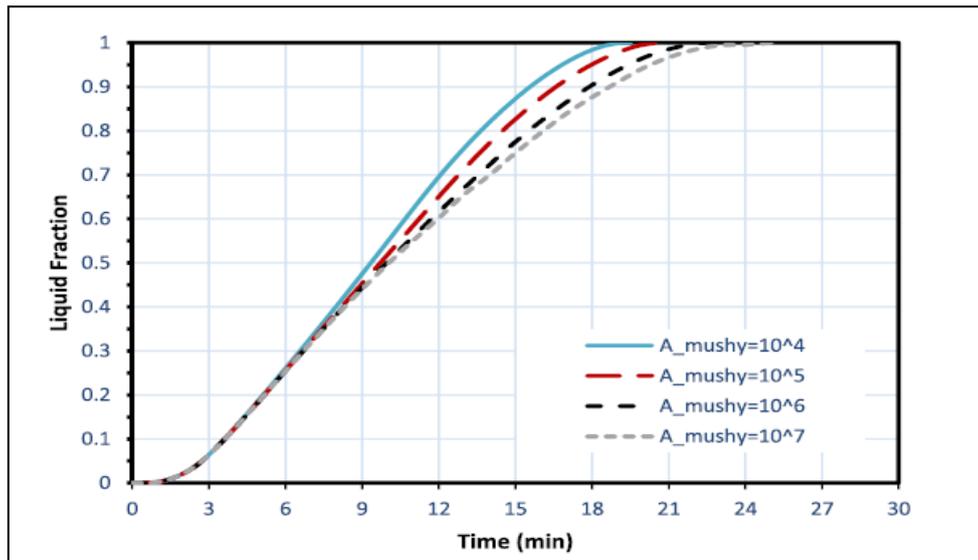


Figure II. 20. Effet de constante de Darcy sur Variation de la fraction liquide en fonction du temps

Le coefficient A_{mushy} est la constante de zone pâteuse (Darcy). Sa valeur est comprise entre 10^4 et 10^7 , où une valeur plus élevée indique un taux d’amortissement de vitesse plus élevé. Toutefois, si cette valeur devient excessivement importante, la solution changera. Les résultats ont révélé que la conception proposée à une performance thermique supérieure et une période de charge et de décharge rapide.

A. K. Ray et al. [31] ont étudié un système basé sur la fusion du silicium à haute température qui pourrait fournir une densité de stockage latent et un taux de stockage d’énergie significatifs. Une technique numérique hybride combinant les méthodes de l’enthalpie-porosité et de la capacité thermique effective a été mise en œuvre avec succès pour analyser le comportement dynamique et thermique du processus de changement de phase non linéaire.

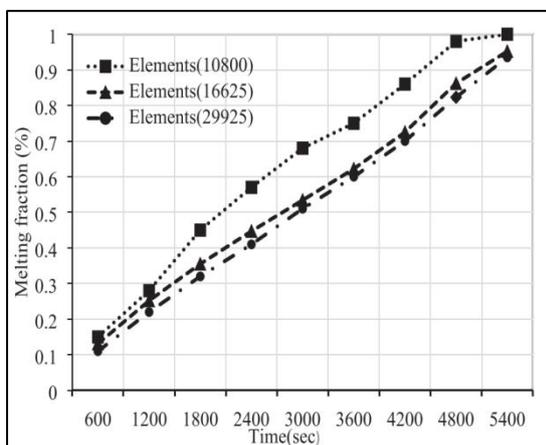


Figure II. 21. Test de maillage

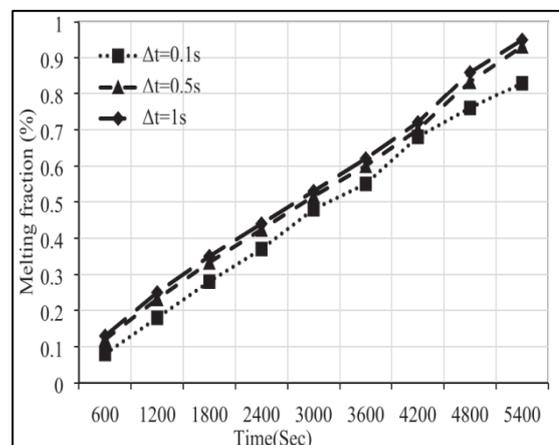


Figure II. 22. Test du pas du temps

Les résultats montrent que les solutions numériques sont généralement sensibles au pas de temps de l'écoulement et à la taille des éléments du domaine maillé.

R. Karami et B. Kamkari [42] ont présenté le comportement thermique du MCP dans des unités de stockage thermique rectangulaires chauffées d'un côté à différents angles d'inclinaison. Des simulations numériques transitoires ont été réalisées afin d'explorer le champ d'écoulement, la distribution de température et le stockage de l'énergie thermique pendant fusion du MCP dans les enceintes à 1 et 3 ailettes sous des angles d'inclinaison variant de 0° à 180° .

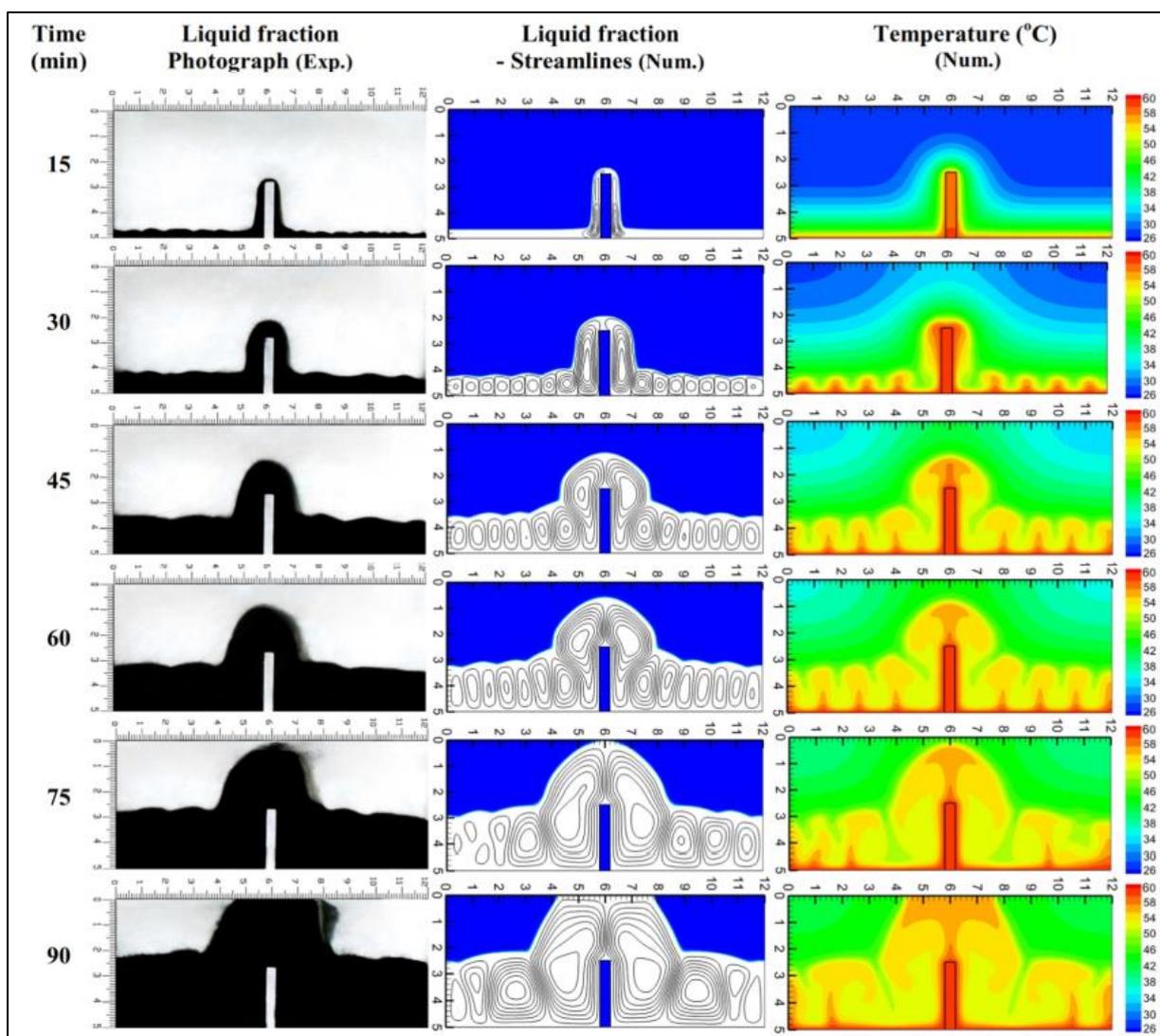


Figure II. 23. Photographies de fusion, lignes de courant et distributions de température dans l'enceinte 0° -1-fin à différents moments

La figure II.23 montre le processus de fusion du MCP dans l'enceinte 0° -1-fin chauffée par la surface inférieure. De multiples paires de tourbillons contrarotatifs se développent dans le MCP liquide sur la paroi chauffée de l'enceinte. Les contours de température montrent que les cellules rotatives du MCP liquide chaud près de la surface inférieure se déplacent vers le haut entre chaque paire de tourbillons et frappent l'interface solide-liquide. De même, les flux de liquide chaud sur les deux côtés verticaux de l'ailette s'élèvent et forment deux grands tourbillons formant un panache thermique au-dessus de l'extrémité de l'ailette. L'ondulation de l'interface est due aux panaches thermiques sur l'interface.

T. Bouhal et al. [38] ont étudié numériquement pour un but d'analyser le processus de fusion dans une enceinte rectangulaire remplie d'un matériau à changement de phase (MCP) chauffé verticalement d'un côté.

Un modèle numérique transitoire est développé pour étudier le transfert de chaleur et les comportements de fusion, et la convection naturelle est prise en compte. Pour améliorer le transfert de chaleur et le processus de fusion du MCP, des ailettes de forme rectangulaire et triangulaire sont proposées. Les résultats montrent que l'ailette rectangulaire accélère la fusion du MCP plus rapidement que la forme triangulaire de l'ailette grâce à l'augmentation de la surface d'échange.

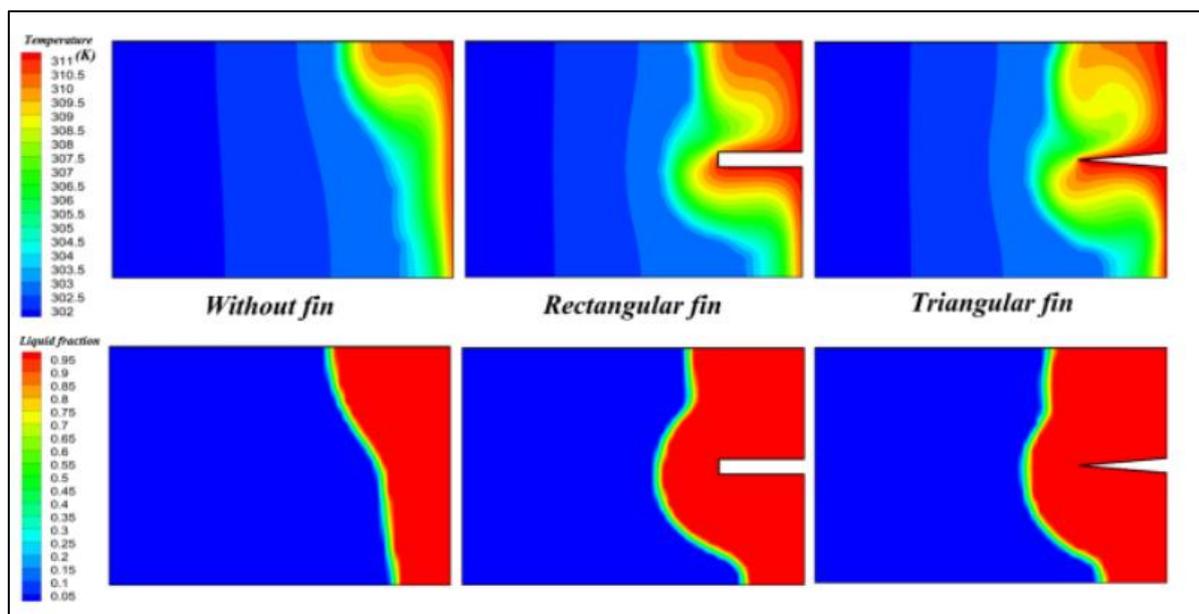


Figure II. 24. Effet de l'intégration de la forme des ailettes sur le processus de fusion (t=5min)

Ils ont constaté aussi que, les ailettes ont amélioré le temps de fusion. En effet, pendant 5 min, une partie importante du MCP a été fondue pour les configurations avec ailettes par rapport au cas de référence (sans ailette).

La fusion par changement de phase solide-liquide d'un matériau à changement de phase (MCP, paraffine) est simulée par Y. Hong et al. [40] dans une cavité rectangulaire avec deux parois verticales partiellement actives sur le plan isothermique. Un concept d'inversion de la cavité à différentes étapes du processus de fusion est proposé comme une méthode possible d'amélioration des comportements thermiques dans le stockage d'énergie thermique à chaleur latente avec MCP.

Il est confirmé que l'inversion de la cavité est une méthode efficace pour améliorer le comportement thermique du MCP. 24,3 % d'augmentation de la fraction liquide pendant le processus de fusion du MCP pour le meilleur cas d'inversion à 40 % unité d'heure standard.

D'autre part, la cavité inversée est également une technique simple pour améliorer le transfert de chaleur de fusion par changement de phase solide-liquide par rapport aux techniques disponibles examinées.

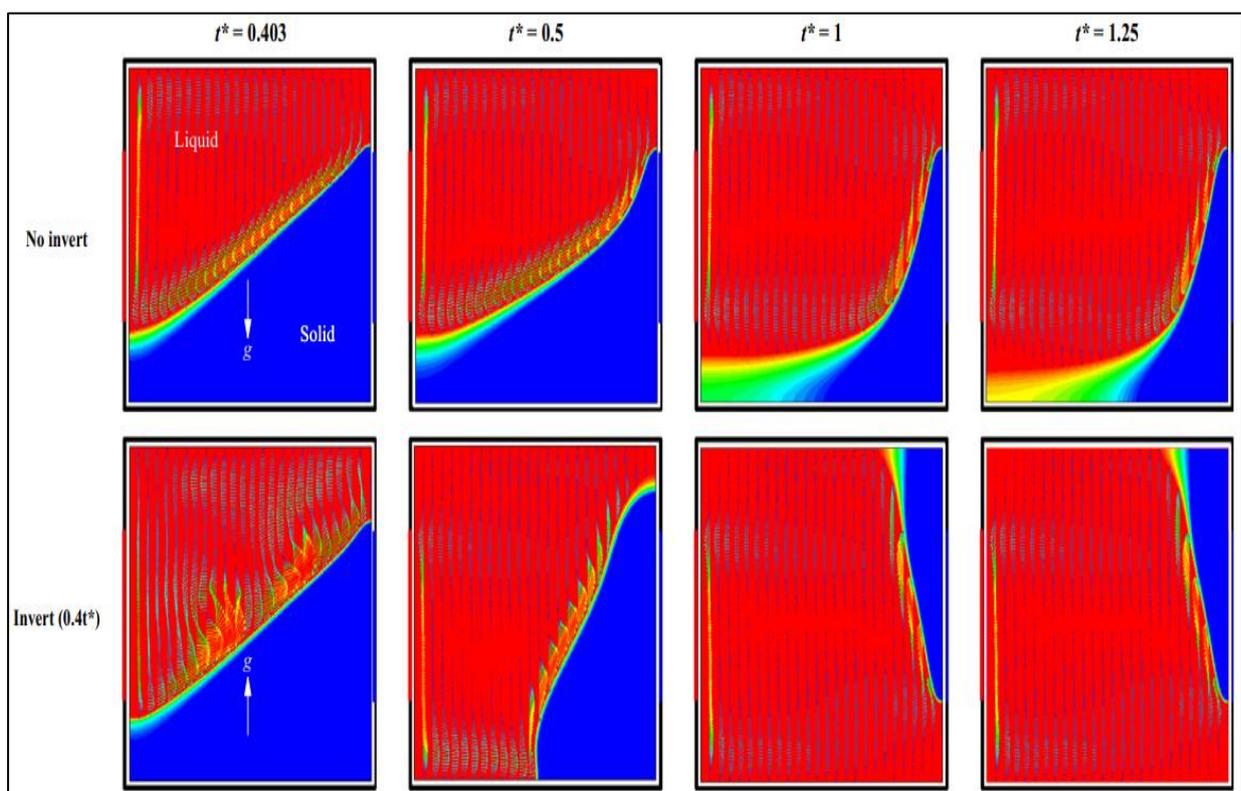


Figure II. 25. Description du principe d'amélioration du comportement thermique à un temps d'inversion représentatif de $0,4t^*$

En outre, la méthode conclue est également suggérée pour incliner la cavité MCP de quelques degrés si une inversion complète n'est pas disponible dans certaines situations. En conclusion, cette preuve de concept devrait fournir un nouveau champ de développement de l'amélioration du transport thermique dans le stockage d'énergie thermique à chaleur latente.

S. Kaba et al. [36] ont fait dans leurs travaux, une approche numérique améliorée pour les problèmes de changement de phase de convection. Un modèle numérique de changement de phase complet et efficace, compatible avec la formulation fonction d'écoulement-vorticité, est développé. Le modèle est basé sur le terme source de la méthode enthalpie-porosité dérivée de la loi de Darcy. Les résultats du modèle sont comparés à ceux de la fusion de l'étain. Dans ce cas, la méthode démontre sa capacité à traiter ce cas controversé en utilisant une grille optimale. La comparaison avec les résultats obtenus en utilisant cette approche est satisfaisante.

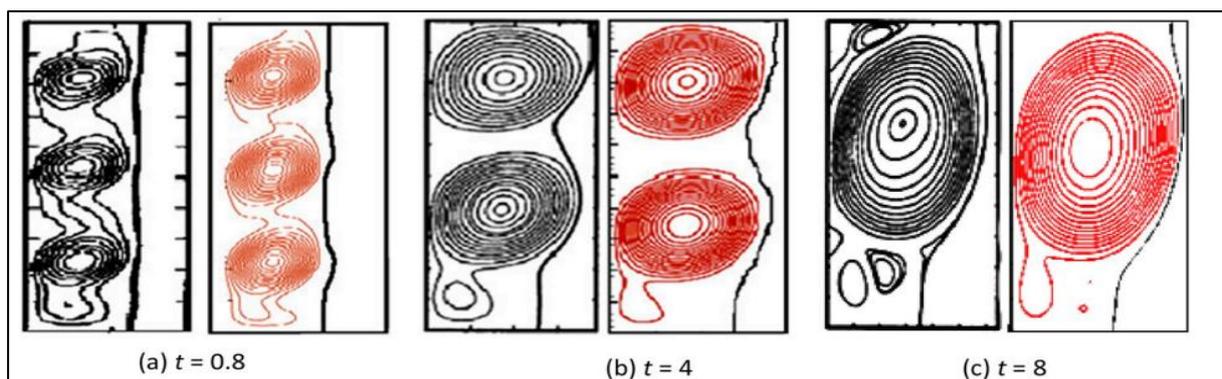


Figure II. 26. Evolution de la fraction liquide et les lignes de courant

Chapitre III :

Position du problème

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 a été développée et validée par des résultats expérimentaux déjà réalisés à l'université de Tlemcen (ABOU BEKR BELKAID) au sein du laboratoire de recherche énergétique et thermique appliquée n°63 ETAP [6]. L'étude porte sur l'analyse du comportement dynamique et thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une cavité chauffée par le bas. La cavité est isolée par les parois extérieures à l'aide de laine de roche. Différents thermocouples sont utilisés pour suivre l'évolution de la température de la paraffine et évaluer les pertes thermiques.



Figure III. 1. Cavité face avant



Figure III. 2. Cavité face arrière

III.2 Problème physique :

Le domaine étudié est une cavité rectangulaire de 12 cm de large et 10,5 cm de hauteur remplie d'un matériau à changement de phase (paraffine). La cavité est soumise à un flux thermique constant par le bas. Les autres côtés de la cavité sont isolés thermiquement de manière non parfaite, induisant des pertes thermiques quantifiées expérimentalement. La figure III.3 montre le système de coordonnées et le modèle physique de la cavité. Les caractéristiques thermo-physiques de la paraffine utilisée dans les calculs sont indiquées dans le tableau III.1.

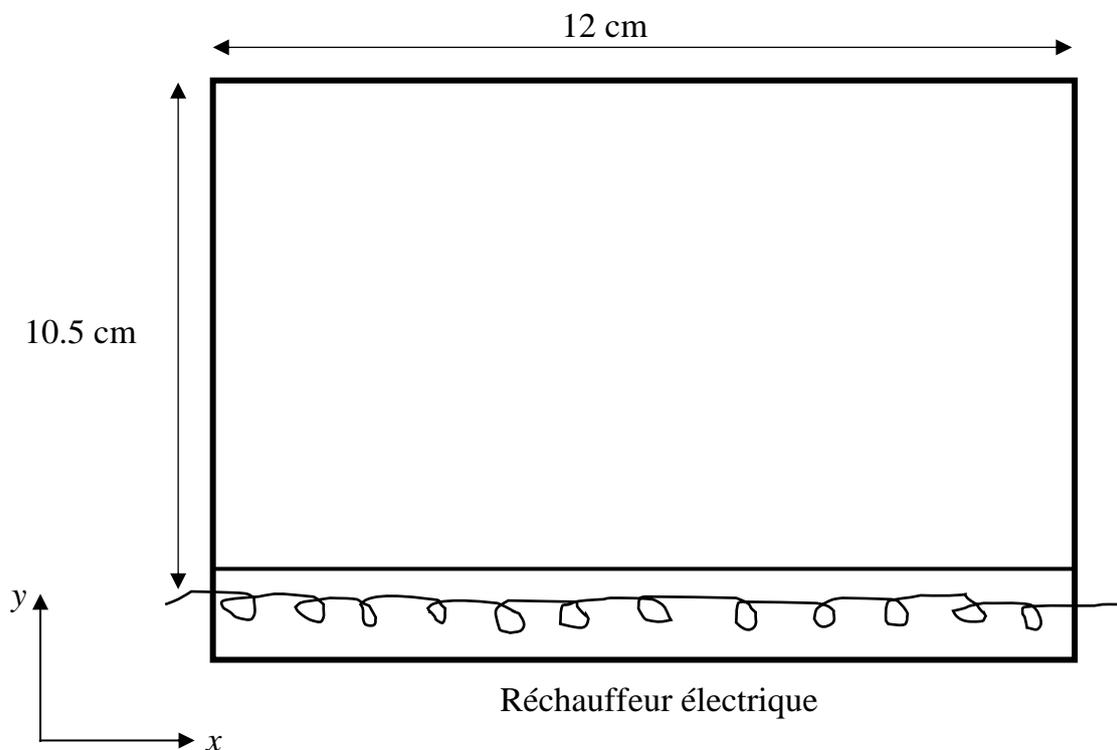


Figure III. 3. Dimensions du modèle physique étudié

Tableau III. 1: Propriétés thermo-physiques de la paraffine utilisée [48]

Propriétés	Symboles	Valeur
température du début de la fusion [°C]	T_s	49
température de la fin de fusion [°C]	T_L	54
Chaleur latente de fusion [J/kg]	L_f	176000
Chaleur spécifique (solide) [J/kg.K]	C_p	2700
Conductivité thermique (solide) [W/m.K]	λ	0.21
Masse volumique (solide à 24°C) [kg/m ³]	ρ	916
Viscosité dynamique [kg/m.s]	μ	0.0036
Coefficient de dilatation thermique [K ⁻¹]	β	9.1×10^{-4}

III.3 Modèle Mathématique :

III.3.1 Modèle dynamique :

Le modèle d'écoulement est basé sur les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement d'un fluide incompressible et instationnaire, modifiées pour tenir compte des spécificités de changement de phase. Les équations gouvernantes sont celles de la conservation de la masse et celle de quantité de mouvement :

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

Pour un fluide incompressible ρ est constante donc ($\partial \rho / \partial t = 0$), donc l'Eq. (III.1) devient

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.2})$$

u et v sont les composante de la vitesse suivant les directions X et Y.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u \quad (\text{III.3})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) + S_v \quad (\text{III.4})$$

Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans la région solide :

$$S_u = -A \frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3 + \varepsilon)} u \quad (\text{III.5})$$

$$S_v = -A \frac{(1-f_l)^2}{(f_l^3 + \varepsilon)} v \quad (\text{III.6})$$

p : désigne la pression

$\rho g \beta (T - T_{ref})$: désigne l'approximation Boussinesq

β est le coefficient de la dilatation thermique.

A : constante de Darcy.

L'approximation de Boussinesq :

Dans les écoulements du fluide accompagnés d'un transfert de chaleur la densité ρ du fluide varie avec la température, cette variation de la densité est la cause du mouvement du fluide. Si la variation est petite on peut traiter la densité comme constante dans le terme transitoire et le terme convectif et la traiter comme uniformément variable dans le terme source.

III.3.2 Modèle thermique :

En tenant compte du phénomène de changement de phase dans notre matériau (MCP) 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. Pour tenir compte de la présence de ces trois régions, nous avons adopté un modèle enthalpique porosité dont l'équation gouvernante est celle de l'énergie :

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

Avec :

$$S_T = -\rho L \left(\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) \quad (\text{III.8})$$

Pour modéliser les problèmes de changement de phase, le code commercial ANSYS Fluent utilise la technique de l'enthalpie-porosité. Dans cette technique, le suivi explicite du front de fusion n'est pas pris en compte et la proportion de fusion est calculée en utilisant l'équilibre enthalpique. Le front de fusion est une variation de la proportion de fusion de 0 (solide) à 1 (liquide). On traite la zone solide-liquide comme une zone poreuse avec un écart de porosité de 1 (liquide) à 0 (solide).

L est utilisé pour déterminer la valeur de la chaleur latente. Pour la fraction liquide, on peut définir comme suit :

$$f_l = 0 \quad \text{si} \quad T < T_{\text{solidus}} \quad (\text{III.9})$$

$$f_l = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{si} \quad T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \quad (\text{III.10})$$

$$f_l = 1 \quad \text{si} \quad T > T_{\text{liquidus}} \quad (\text{III.11})$$

III.4 Condition initiale et aux limites :

III.4.1 Condition initiale :

La température initiale dans la paraffine correspond à la moyenne des températures initiales mesurées lors des essais expérimentaux. La température initiale du système est fixée à 20 °C, $u = v = 0$.

III.4.2 Conditions aux limites :

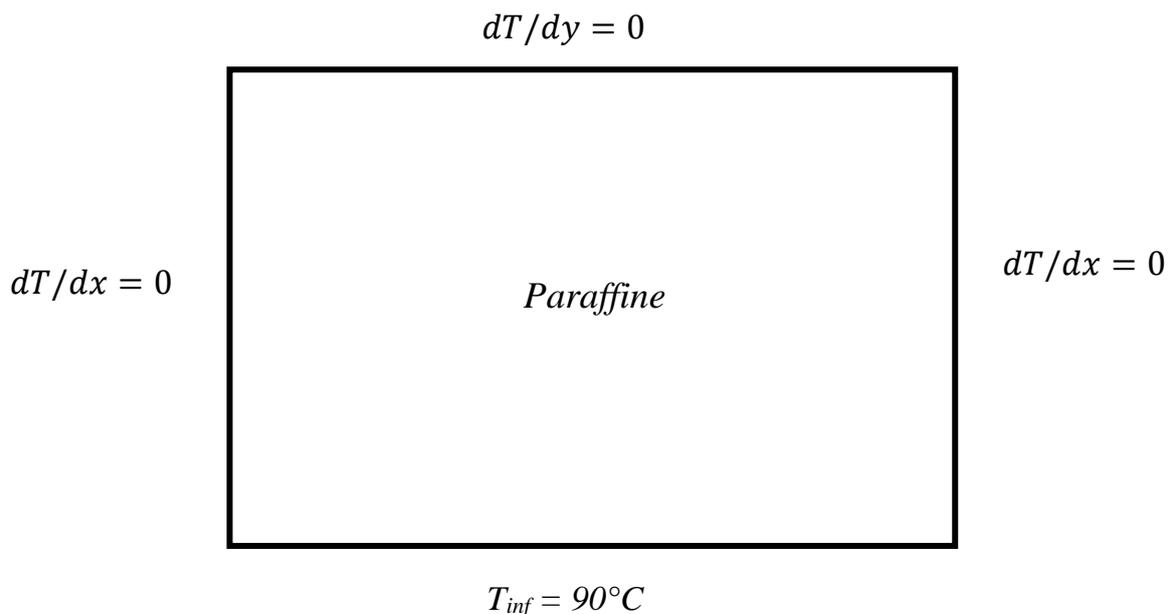


Figure III. 4. Conditions aux limites pour un système isolé

- La paroi inférieure de la cavité est chauffée avec une température fixe $T_{inf} = 90^{\circ}\text{C}$.
- Les parois extérieures de la cavité sont supposées isolées $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ (n désigne la normale à la surface).
- Ainsi que la condition de non glissement (**Type Wall**) est imposée (vitesses nulles sur la paroi) : $u = v = 0$

III.5 Simulation numérique

Les calculs numériques ont été effectués par le code du calcul ANSYS Fluent 15.0.7.

III.5.1 Création de la géométrie

L'acquisition géométrique est réalisée dans le logiciel (**DESIGN MODELER**)

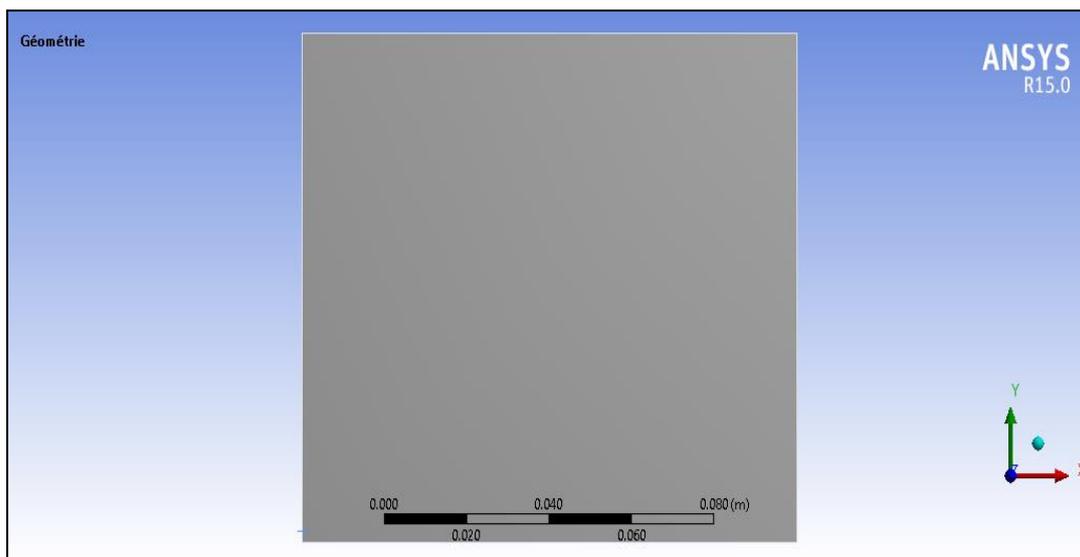


Figure III. 5. Création de la géométrie dans DESIGN MODELER

III.5.2 Maillage de la cavité

La cavité est maillée à l'aide du mailleur **Meshing**

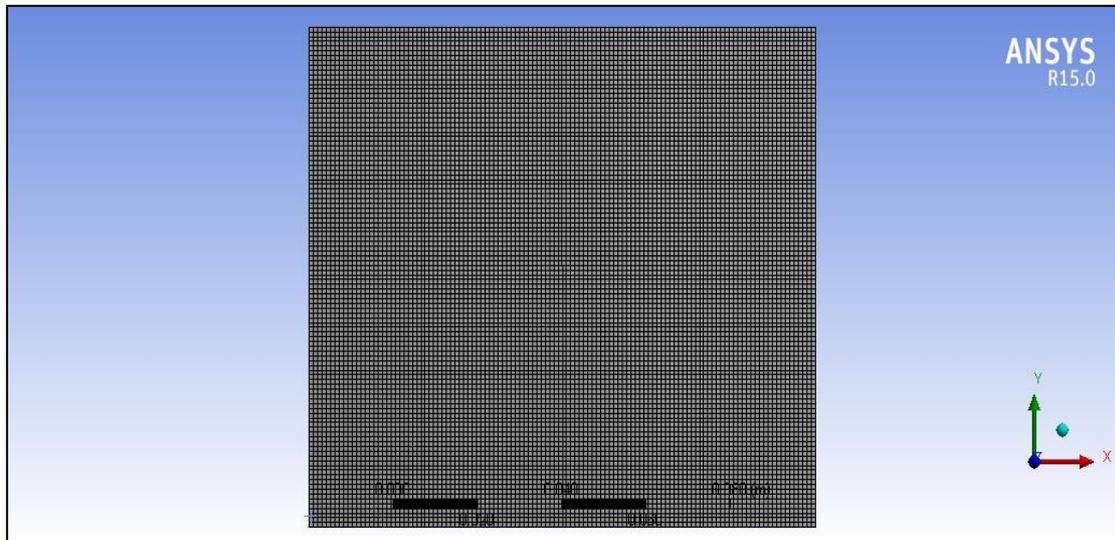


Figure III. 6. Création du maillage dans MESHING

III.5.3 Calcul numérique :

Pour Les calculs numériques effectué sous FLUENT, nous avons adopté les configurations suivants :

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

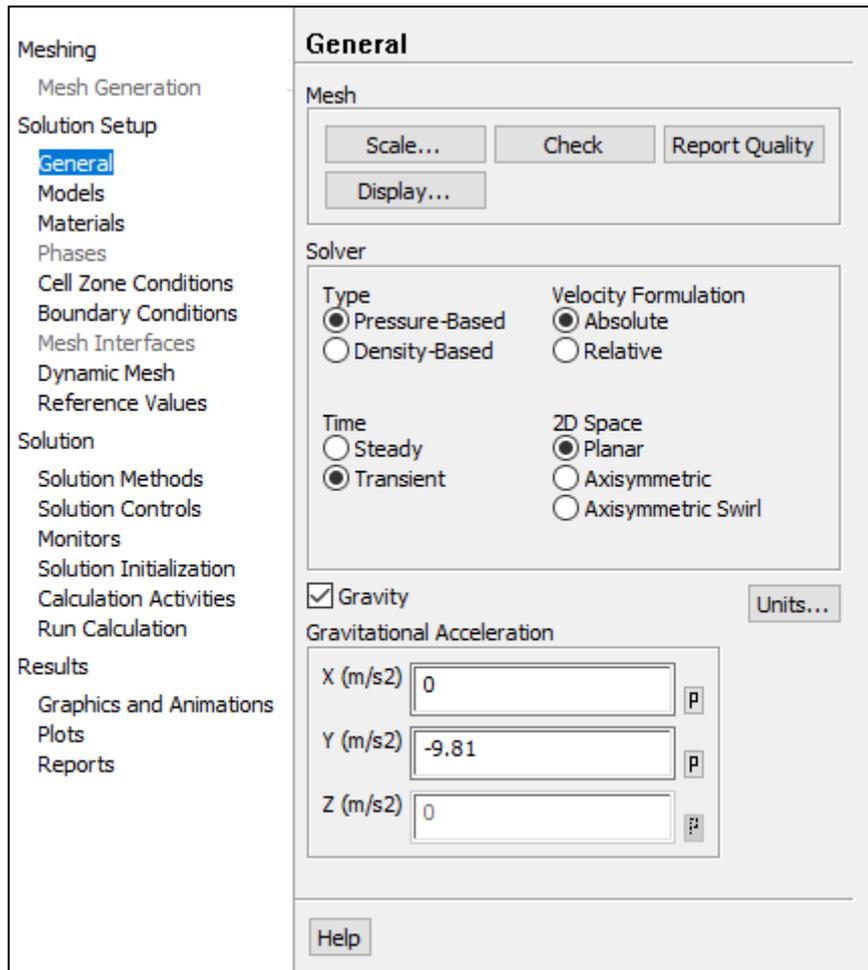


Figure III. 7. Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé

3. Pour le suivi de la fraction liquide, le modèle melting-solidification est adopté avec une constante de Darcy $C=10^5$.

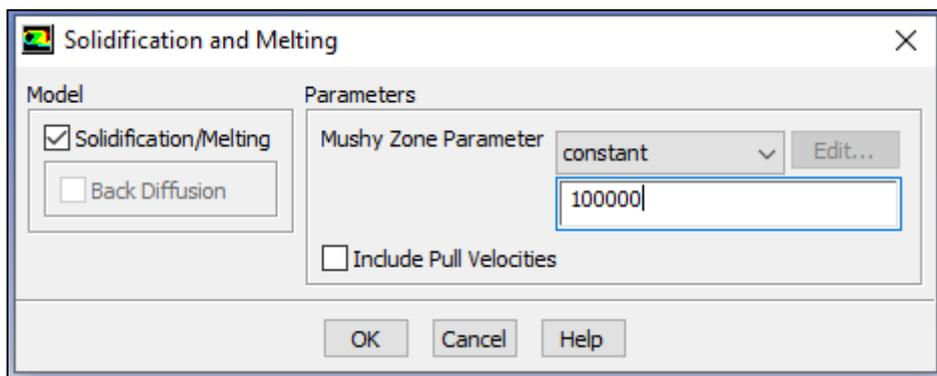
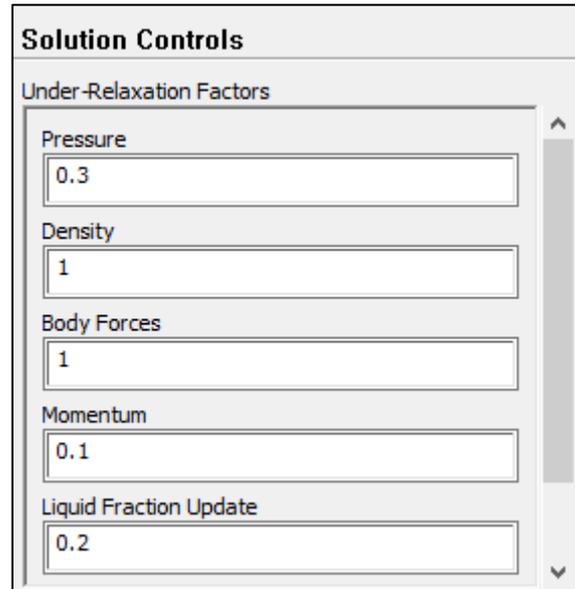


Figure III. 8. Constante de Darcy utilisée

4. **Définir les paramètres de la résolution** : Pour le couplage pression-vitesse dans l'équation de Navier-Stokes, Fluent propose plusieurs schémas, à savoir **SIMPLE**, **PISO** et autres. Dans cette étude, le schéma **SIMPLE** est adopté [2].

5. Les facteurs de sous relaxation qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure III.9:



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

Parameter	Value
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.1
Liquid Fraction Update	0.2

Figure III. 9. Facteurs de sous relaxation

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Matériel informatique :

Toutes les simulations effectuées au cours de cette étude sont développées par un ordinateur ayant les spécifications suivantes :

- Processeur Intel **I5 2.40GHz 6^{ème} génération.**
- RAM de **4Gb.**

IV.2 Validation numérique :

IV.2.1 Test de maillage :

Un test de maillage a été effectué pour déterminer les meilleur temps de calculs pour une meilleure approximation (convergence, précision). Quatre différent tailles de maillage ont été testées, à savoir 105×120, 140×160, 180×205, 240×274 (12600, 22400, 36900, 65760 cellules). Le tableau IV.1 donne le temps de calcul nécessaire pour chaque maillage.

Tableau IV. 1: Temps de calcul des quatre maillages

Maillage	Nombre des cellules	Temps de calcul
105×120	12 600	5 jours 11 heures 18 min
140×160	22 400	6 jours 5 heures 23 min
180×205	36 900	7 jours 8 heures 20 min
240×274	65 760	8 jours 2 heures 49 min

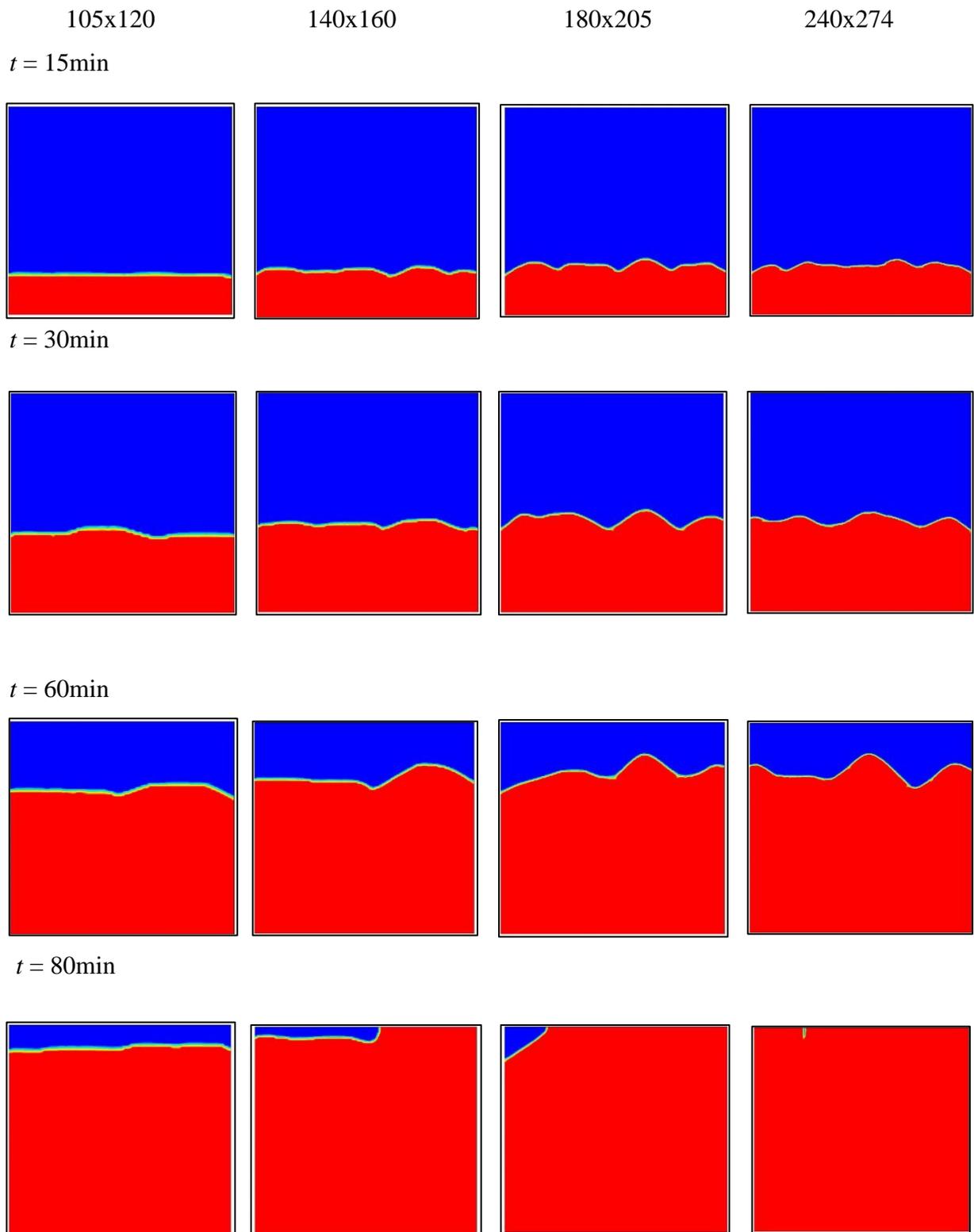


Figure IV. 1. Contours des fractions liquides en fonction du temps pour des différents maillages

La figure IV.1 représente l'évolution de la fraction liquide de la paraffine en fonction du temps respectivement pour les quatre tailles de maillage testées. La couleur rouge indique la partie liquide, le bleu indique la partie solide et les différents couleurs indiquent la zone pâteuse (front de fusion). Dès le début de la fusion, nous remarquons qu'un maillage raffiné nous permet de mieux capter les ondulations du front de fusion et donc la formation des cellules. On remarque aussi que la forme du front de fusion est assez identique pour les deux maillages (180×205) et (240×274) jusqu'à l'instant $t = 80\text{min}$.

Estimation d'erreur :

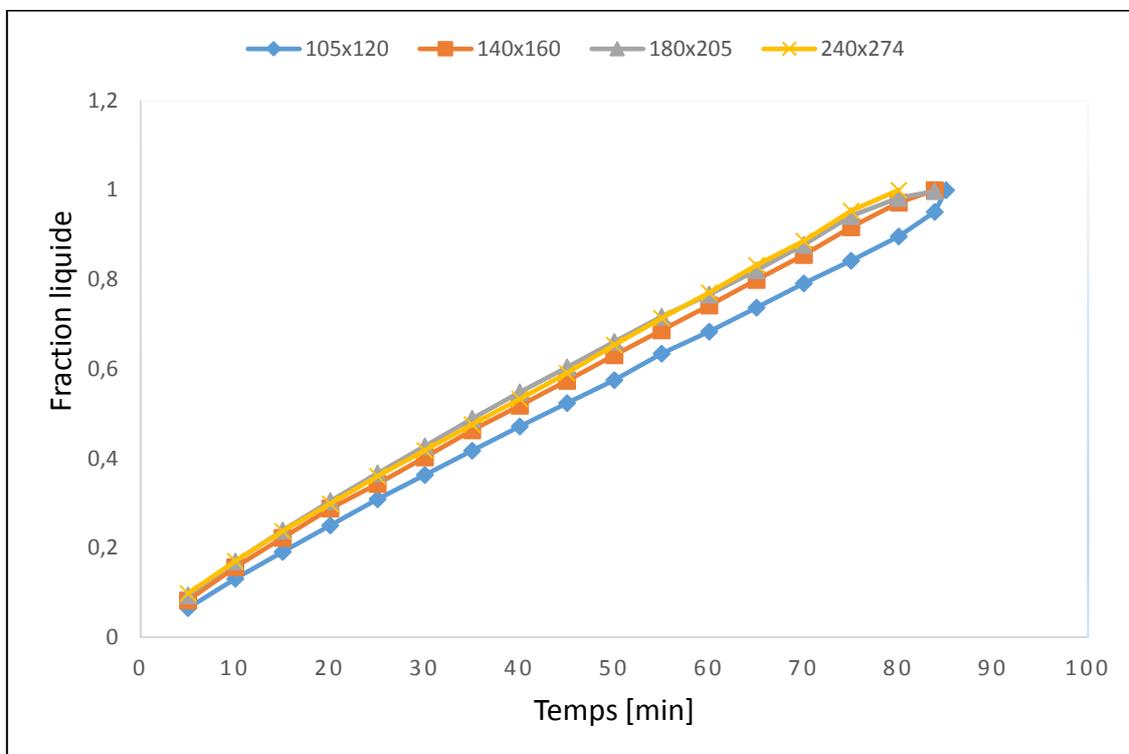


Figure IV. 2. Evolution de la fraction liquide pour les quatre maillages

La figure IV.2 représente l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour les quatre maillages testés. Une estimation des erreurs est faite par rapport au maillage le plus raffiné (240×274) (65760 cellules). Une très faible erreur est observée avec le maillage 180×205. Cependant, pour mieux prédire la fin de la fusion, un maillage plus raffiné de 240×274 est choisi.

Tableau IV. 2: Calcul d'erreur par rapport au maillage plus raffiné

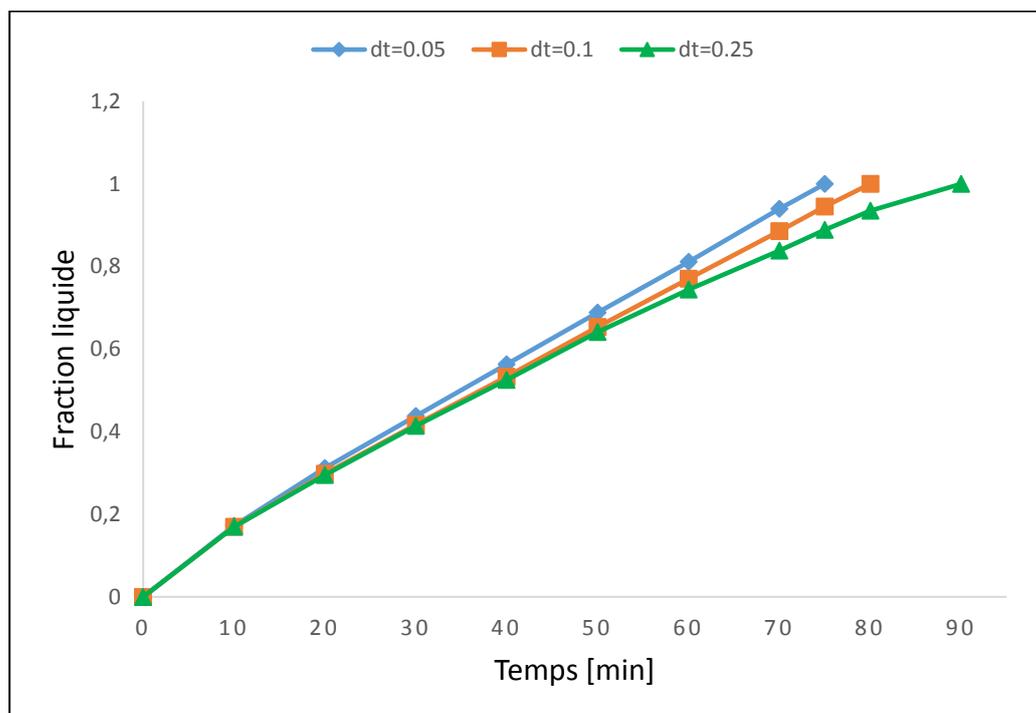
Maillage	Erreur moyenne	Erreur maximal
105×120 (12600 cellules)	6.70 %	11.13 %
140×160 (22400 cellules)	2.14 %	3.64 %
180×205 (36900 cellules)	0.08 %	1.75 %

IV.2.2 Test de pas du temps :

Trois tests de pas du temps ont été effectués, à savoir, 0.05, 0.1 et 0.25.

Tableau IV. 3: Temps de calcul pour les pas du temps testés dt

Pas du temps	Temps de calcul
0.05	15 jours 3 heures 16 min
0.1	8 jours 2 heures 49 min
0.25	4 jours 3 heures 45 min

**Figure IV. 3.** Evolution de la fraction liquide pour des différent pas du temps

La figure IV.3 représente l'évolution de la fraction liquide pour trois pas du temps dt 0.05, 0.1 et 0.25. Une estimation des erreurs est faite par rapport au pas du temps $dt = 0.05$ dans le tableau IV.4. Vu les écarts entre les courbes, un pas de temps de 0.05 est plus recommandé. Cependant, le temps de calcul de ce dernier est une véritable contrainte et un pas de temps de 0.1 est adopté.

Tableau IV. 4: Calcul d'erreur pour les différents pas du temps

Pas du temps	Erreur moyenne	Erreur maximal
0.1	4.63 %	5.76 %
0.25	6.99 %	11.3 %

IV.2.3 Evolution de la fraction liquide :

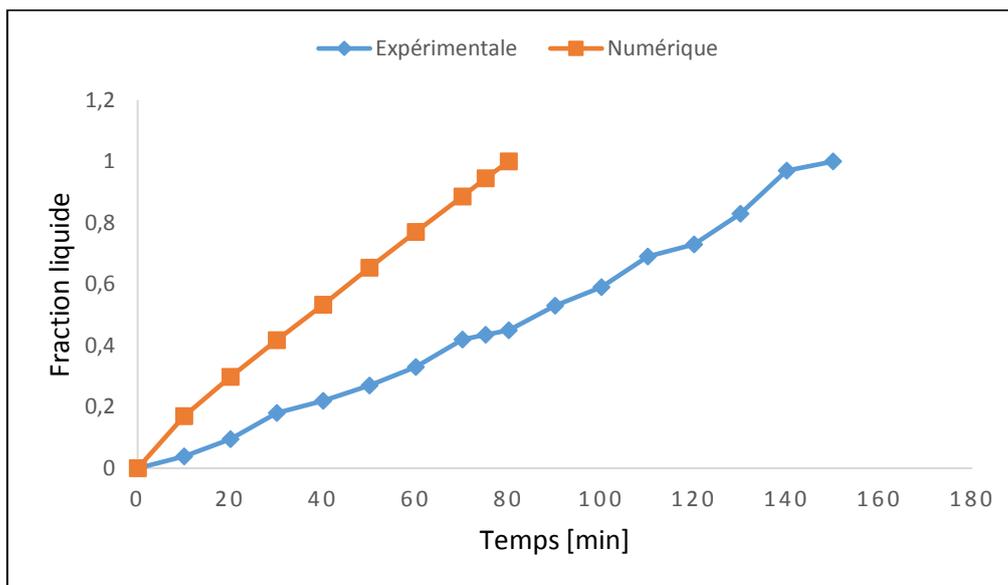


Figure IV. 4. Comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique

La figure IV.4 représente une comparaison entre la fraction liquide expérimentale et celle obtenue numériquement avec un maillage de 65760 cellules, un pas du temps de 0.1s et une constante de Darcy égal à 10^5 . On remarque que l'évolution obtenue numériquement est nettement plus rapide que celle expérimentale. Afin d'améliorer la précision des calculs, on propose d'intégrer les conditions aux limites réelles des pertes thermiques.

IV.3 Intégration des conditions aux limites réelles :

Pour une amélioration d'avantage de la fraction liquide numérique par rapport à l'expérimentale nous avons intégré les conditions aux limites réelles suivantes :

IV.3.1 Température de la paroi inférieure :

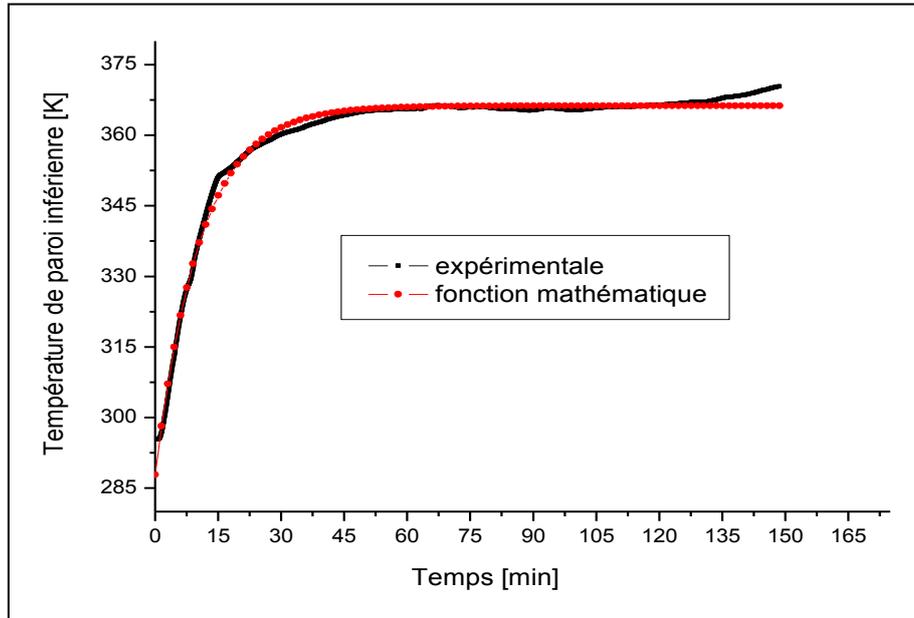


Figure IV. 5. Evolution de la température de la paroi inférieure

La Figure IV.5 représente l'évolution de la température de la paroi inférieure mesurée dans les expériences. On utilise les résultats obtenus précédemment dans les travaux intérieurs [6]. L'expression mathématique approximant l'évolution expérimentale a été développée par logiciel OriginPro.

$$T_p(t) = 366.25436 - 78.67946 \cdot \exp(-0.00157 \cdot t) \quad (\text{IV.4})$$

IV.3.2 Coefficient de transfert par convection :

a. Coefficient de transfert de la paroi supérieur h_{top} :

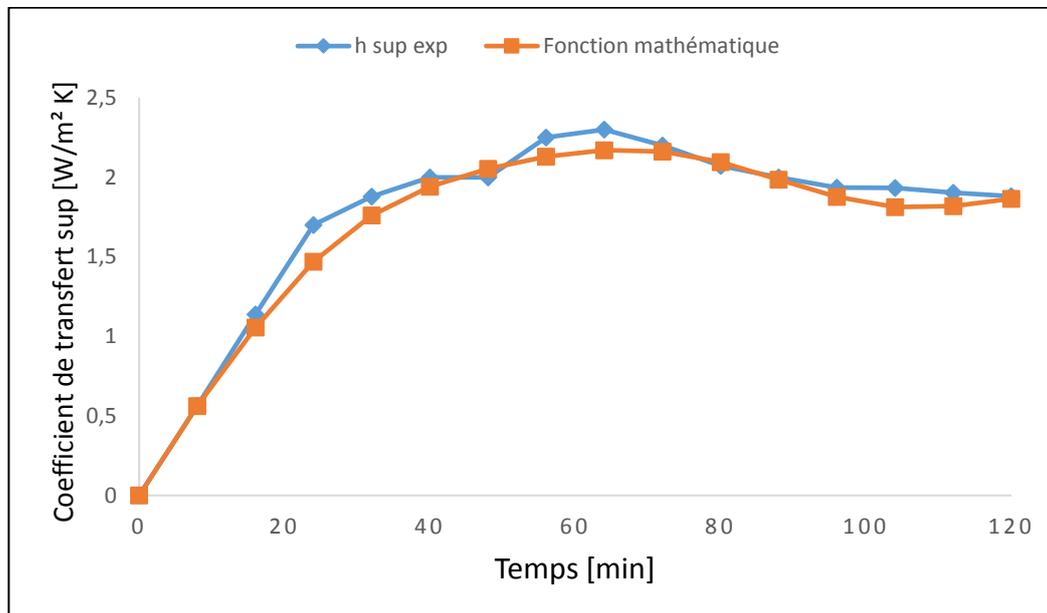


Figure IV. 6. Evolution de coefficient de convection sur la paroi supérieure h_{top}

La Figure IV.6 représente l'évolution du coefficient de convection de la paroi supérieure mesurée dans les expériences. On utilise les résultats obtenus précédemment dans les travaux antérieurs [6]. La fonction mathématique approximant l'évolution expérimentale a été développée par logiciel Graph 4.4.2. L'erreur moyenne avec l'expérimental est donné dans le tableau IV.5.

$$\begin{aligned}
 h_{top}(t) = & -1.57560296 \cdot 10^{-36} \cdot t^{10} + 7.49080562 \cdot 10^{-32} \cdot t^9 - 1.49124408 \cdot 10^{-27} \cdot t^8 \\
 & + 1.61368627 \cdot 10^{-23} \cdot t^7 - 1.03070958 \cdot 10^{-19} \cdot t^6 + 3.94425767 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 \\
 & - 8.72770518 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 + 1.01794809 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 7.04510686 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0.00134143 \cdot t \\
 & + 0.00679701
 \end{aligned}$$

Tableau IV. 5: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{top}

Coefficient de transfert	Erreur moyenne	Erreur maximal
h_{top}	3.60 %	19.7 %

b. Coefficient de transfert de la paroi vertical droite h_{right} :

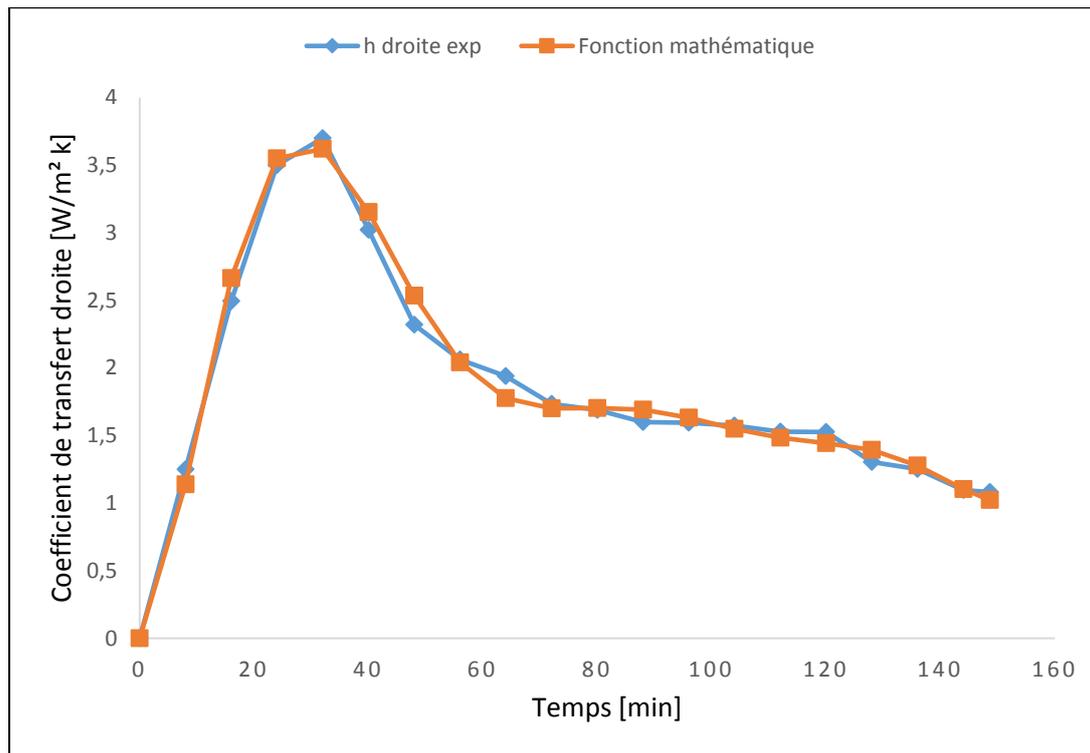


Figure IV. 7. Evolution de coefficient de convection sur la paroi vertical droite h_{right}

La Figure IV.7 représente l'évolution du coefficient de convection de la paroi verticale droite mesurée dans les expériences. On utilise les résultats obtenus précédemment dans les travaux antérieurs [6]. La fonction mathématique approximant l'évolution expérimentale a été développée par logiciel Graph 4.4.2. L'erreur moyenne avec l'expérimental est donné dans le tableau IV.6.

$$\begin{aligned}
 h_{right}(t) = & -2.45269329.10^{-36}.t^{10} + 1.13497724.10^{-31}.t^9 - 2.1422337.10^{-27}.t^8 \\
 & + 2.06710864.10^{-23}.t^7 - 9.95403302.10^{-20}.t^6 + 1.22870346.10^{-16}.t^5 \\
 & + 9.57398913.10^{-13}.t^4 - 4.33471041.10^{-9}.t^3 + 5.51124331.10^{-6}.t^2 + 0.00057448.t \\
 & + 0.02077977
 \end{aligned}$$

Tableau IV. 6: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{right}

Coefficient de transfert	Erreur moyenne	Erreur maximal
h_{right}	0.14 %	18.1 %

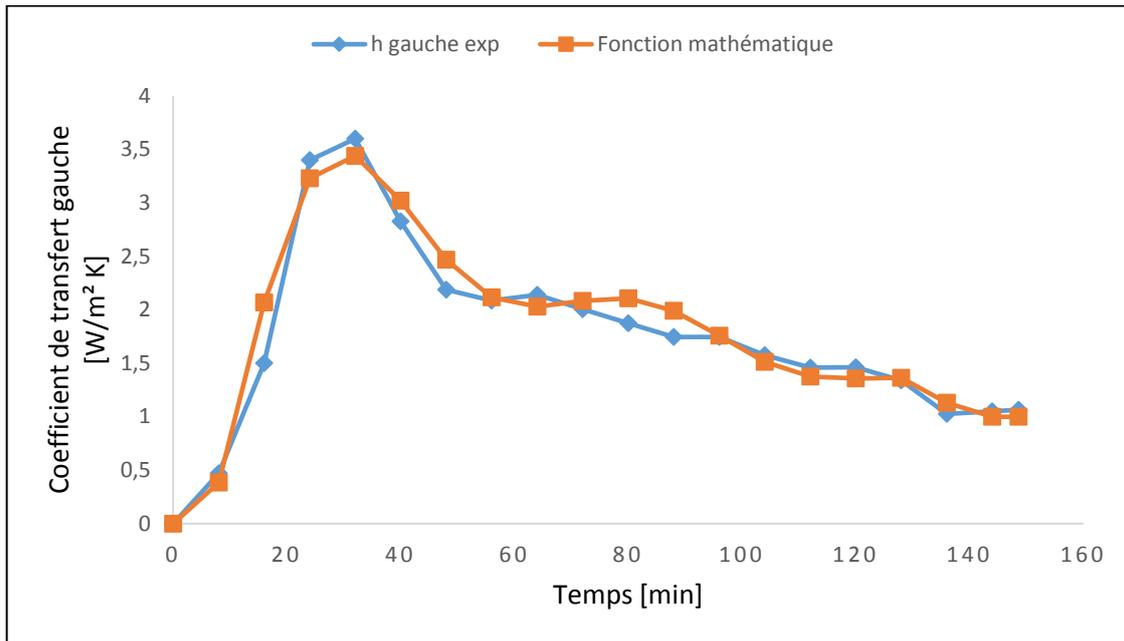
c. Coefficient de transfert de la paroi vertical gauche h_{left} :

Figure IV. 8. Evolution de coefficient de convection sur la paroi vertical gauche h_{left}

La Figure IV.8 représente l'évolution du coefficient de convection de la paroi verticale gauche mesurée dans les expériences. On utilise les résultats obtenus précédemment dans les travaux antérieurs [6]. La fonction mathématique approximant l'évolution expérimentale a été développée par logiciel Graph 4.4.2. L'erreur moyen avec l'expérimental est donné tableau IV.7.

$$\begin{aligned}
 h_{left}(t) = & -4.57870961 \cdot 10^{-36} \cdot t^{10} + 2.09346574 \cdot 10^{-31} \cdot t^9 - 3.89823663 \cdot 10^{-27} \cdot t^8 \\
 & + 3.70864485 \cdot 10^{-23} \cdot t^7 - 1.76676303 \cdot 10^{-19} \cdot t^6 + 2.2704436 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 \\
 & + 1.57247347 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 - 7.4170192 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + 1.09561492 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0.00305972 \cdot t \\
 & + 0.06213466
 \end{aligned}$$

Tableau IV. 7: Calcul d'erreur entre la fonction et l'évolution expérimentale h_{left}

Coefficient de transfert	Erreur moyenne	Erreur maximal
h_{left}	2 %	8.8 %

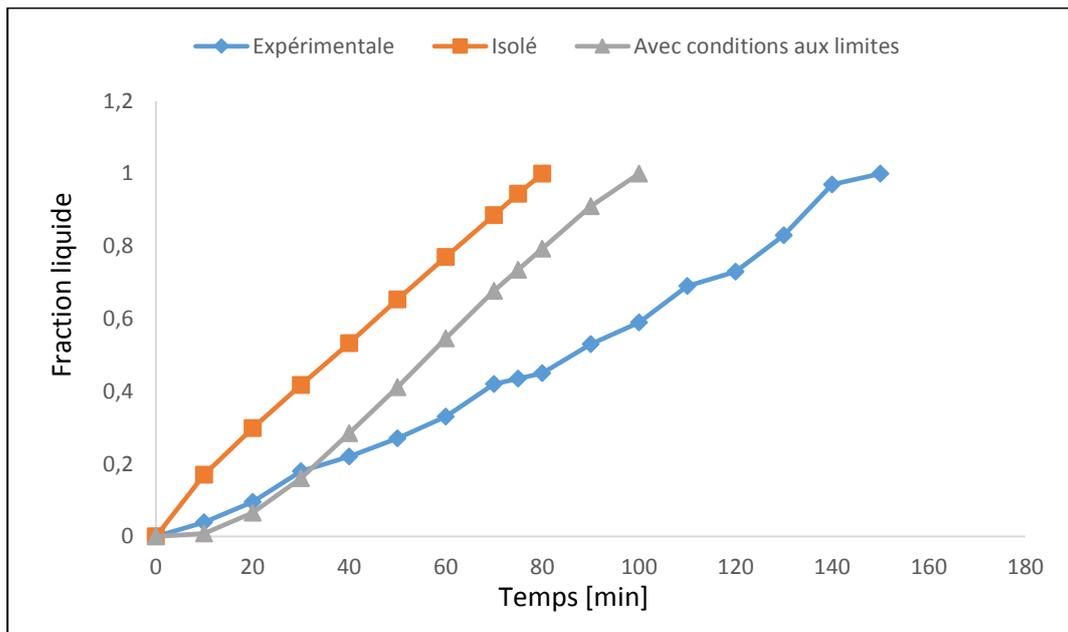


Figure IV. 9. Evolution de la fraction liquide dans les trois cas expérimental, isolation et pertes thermiques

La figure IV.9 représente une comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique (cavité isolé et avec intégration des pertes thermiques). Nous remarquons une nette amélioration des résultats obtenus en intégrant les conditions aux limites plus réelles.

Tableau IV. 8: Calcul d'erreur de la fraction liquide par rapport à l'expérimentale

	Erreur moyenne	Erreur maximal
Avec isolation	53.82 %	77.04 %
Avec pertes thermiques	34.45 %	70 %

IV.3.3 Test de la constante de Darcy :

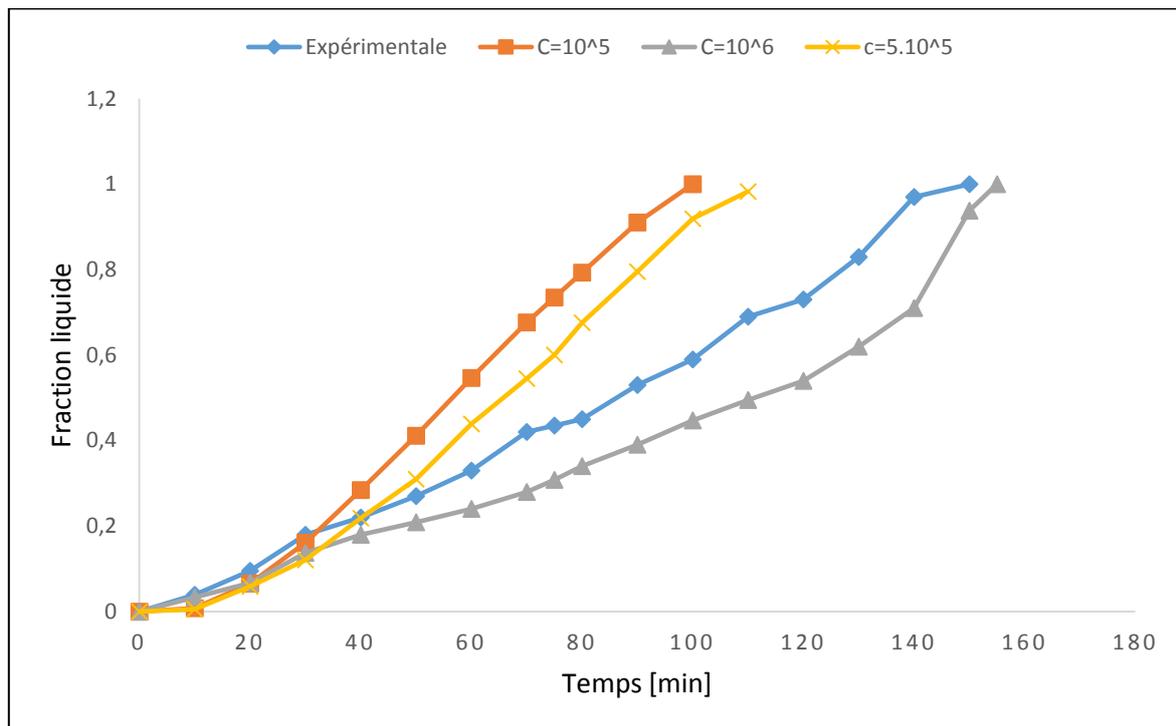


Figure IV. 10. Evolution de la fraction liquide pour différentes constantes de Darcy

La figure IV.10 représente une comparaison entre la fraction liquide expérimentale et numérique pour différentes valeurs des constantes de Darcy. Nous remarquons que la constante de Darcy influe considérablement sur la vitesse de la fusion et donc le temps de fusion de la paraffine. Pour une constante égale à $C = 10^6$, la courbe de la fraction liquide numérique suit la même forme que celle de l'expérience avec un retard estimé par une erreur moyenne de 22 %.

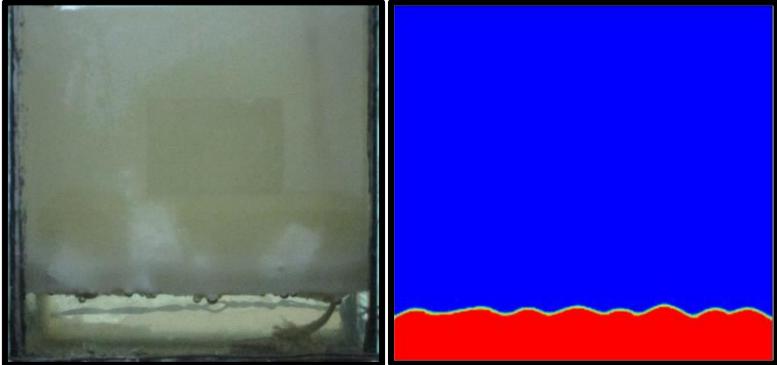
Tableau IV. 9: Calcul d'erreur pour les différentes constantes de Darcy

Constante de Darcy	Erreur moyenne	Erreur maximal
$C=10^5$	34.45 %	70 %
$C=5 \times 10^5$	34.52 %	61.53 %
$C=10^6$	22 %	33 %

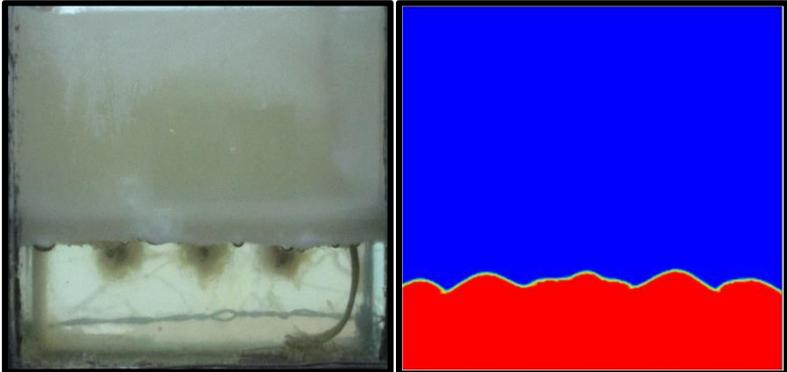
IV.4 Résultats et discussions :

IV.4.1 Evolution de la fusion :

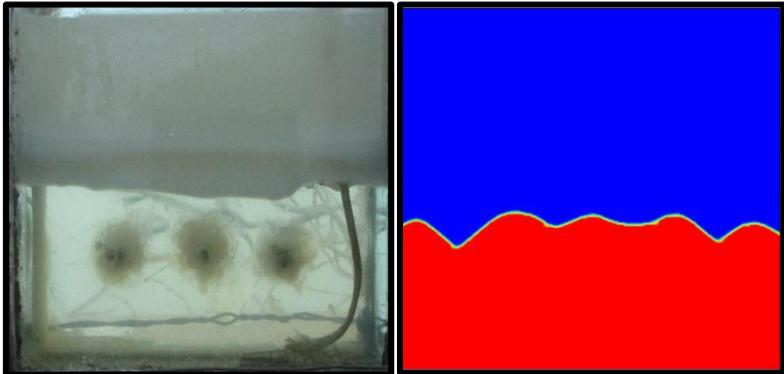
t = 30 min



t = 60 min



t = 90 min



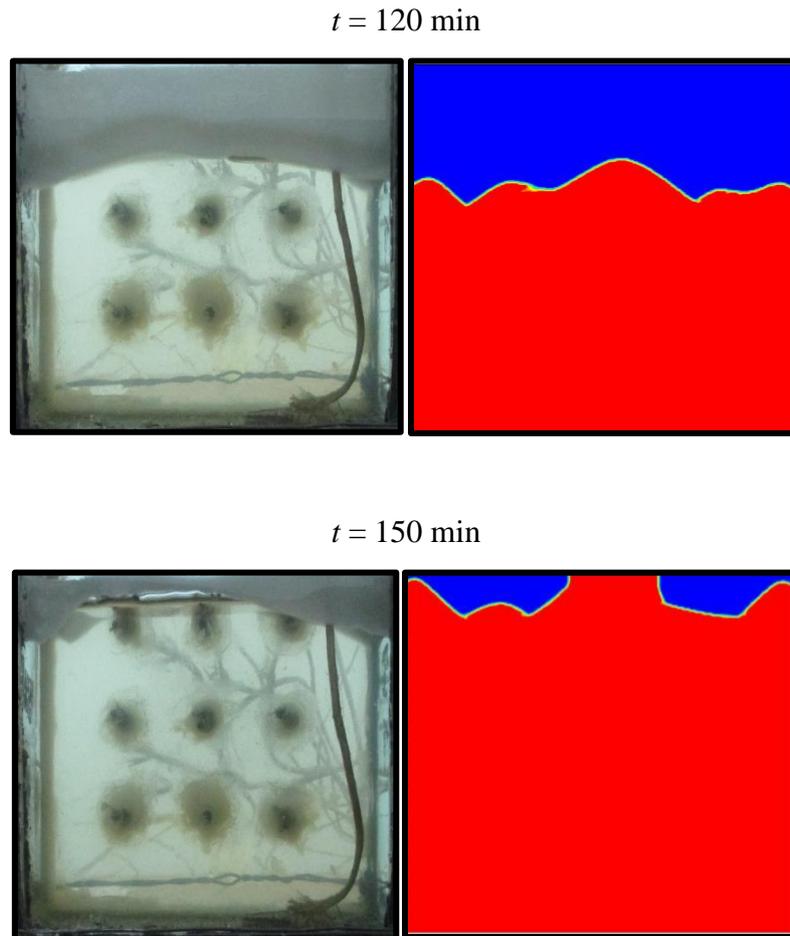
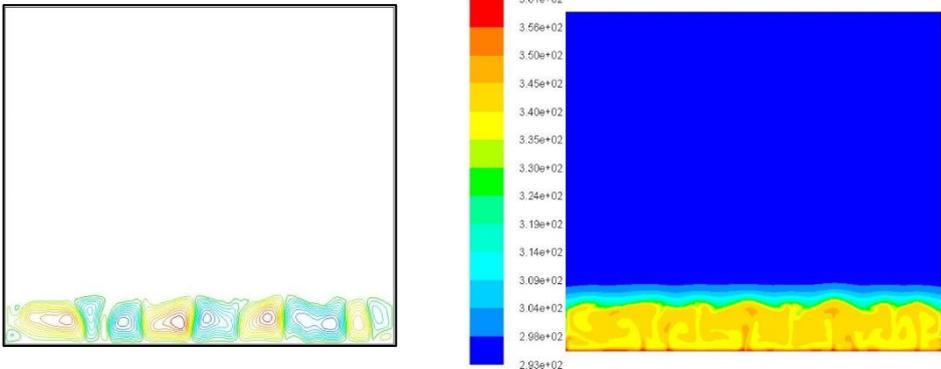


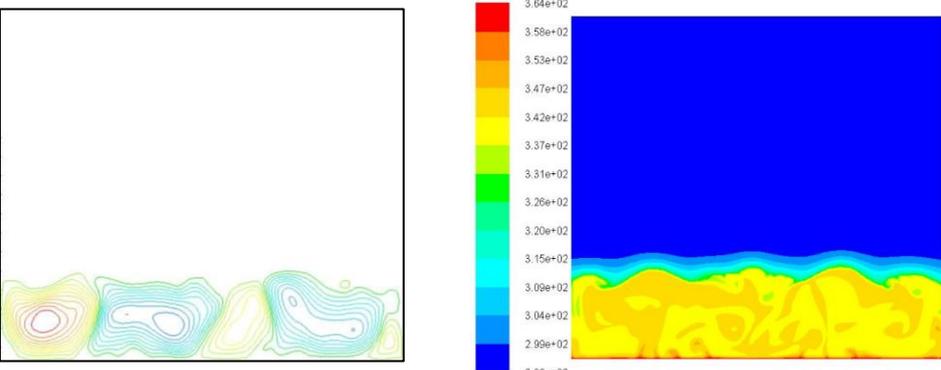
Figure IV. 11. Comparaison entre l'évolution de la fusion et du front de changement de phase obtenus expérimentalement et numériquement

La figure IV.11 montre une comparaison entre l'évolution de la forme et la position du front de fusion obtenues expérimentalement et numériquement pour une constante de Darcy égale à 10^6 . Il est assez clair que le modèle numérique arrive à bien suivre la position du front durant la fusion de la paraffine. Cependant, les formes des ondulations observées sont assez différentes montrant la complexité de la convection développée dans la phase liquide d'un MCP chauffée par le bas.

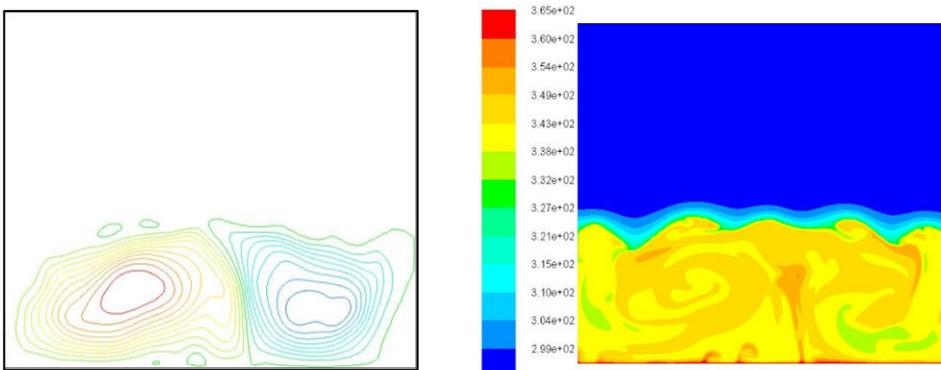
$t = 30 \text{ min}$



$t = 60 \text{ min}$



$t = 90 \text{ min}$



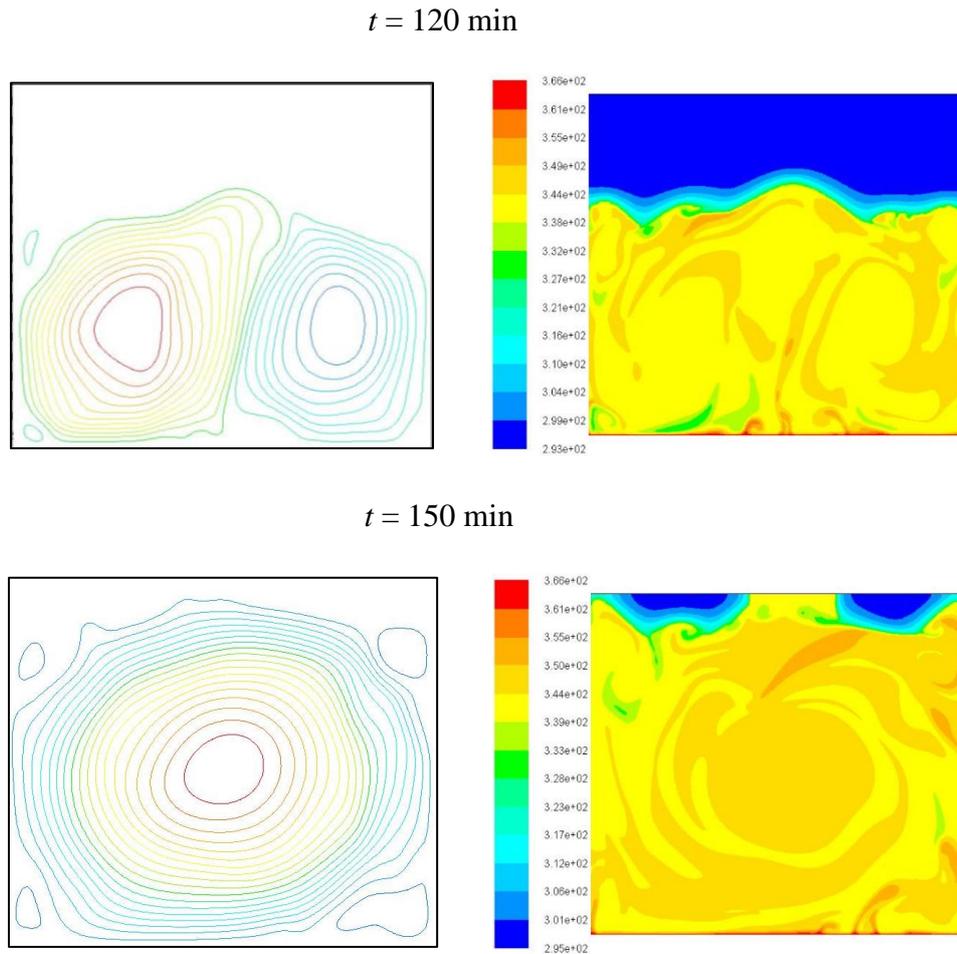


Figure IV. 12. Evolution des lignes de courant et des isothermes pendant la fusion de la paraffine

La figure IV.12 montre l'évolution des lignes de courant et des isothermes pendant la fusion de la paraffine. A 30 min, la convection thermique naturelle se développe au sein de la phase liquide sous forme de 9 cellules contre-rotatives de Rayleigh-Bénard. Le développement de la phase liquide entraîne l'élargissement de l'écart entre la paroi chaude (bas) et le front de fusion. Cela provoque le regroupement des cellules contre-rotatives de Rayleigh-Bénard et le nombre des cellules diminuent. Ainsi, on trouve une seule cellule de convection dans le sens inverse des aiguilles d'une montre qui domine le transfert thermique à la fin de fusion. Les cellules contre-rotatives de Rayleigh-Bénard entraînent la montée de la chaleur vers le haut par effet de flottabilité sous forme d'un champignon.

Conclusion générale

Le présent travail porte sur la simulation numérique et l'analyse du comportement dynamique et thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une cavité chauffée par le bas. La simulation est développée par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 et validée par les résultats expérimentaux obtenus précédemment [6]. À partir des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. Un maillage raffiné de 36900 cellules nous permet de mieux capter les ondulations du front de fusion et donc la formation des cellules. La précision obtenue diminue l'erreur moyenne à 0.08 %.
2. Un faible pas de temps de 0.05 s fournit une erreur relative moyenne de 6.99 %. Cependant, le temps de calcul est tellement long (plus de 15 jours) qu'un pas de temps de 0.1 s est adopté.
3. Une première confrontation avec les résultats expérimentaux montre un écart assez important. Pour améliorer la précision, l'intégration des conditions aux limites réelles s'avère indispensable. Une nette amélioration de la précision des résultats est observée avec une réduction d'erreur relative moyenne de 53.82 % à 34.45 %.
4. Un dernier test est réalisé sur l'effet de la constante de Darcy qui, finalement, influe considérablement sur la vitesse de la fusion et donc le temps de fusion de la paraffine. Pour une constante égale à $C = 10^6$, l'évolution de la fraction liquide suit bien forme expérimentale avec un retard estimé par une erreur moyenne de 22 %.
5. La fusion de la paraffine par le bas est dominée par la convection naturelle de Rayleigh-Bénard. C'est le phénomène qui rend la simulation numérique du présent travail un véritable défi.

Références bibliographiques

- [1] **I. Dincer, M. Akif Ezan**, Heat Storage A Unique Solution For Energy Systems. Vol. 1, p. 57, 2018.
- [2] **B. Kamkari, H.J. Amlashi**, Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 88, pp. 211-219, 2017.
- [3] **N. Maahfoudi**, Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide, Mémoire de doctorat : Energétique, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.
- [4] **S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran**, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications. Vol. 1, p. 65, 2014.
- [5] **A.M. Vaz Sá**, Sustentabilidade na construção: comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase. Ph.D. Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto—FEUP, 2013.
- [6] **I. Marouf, S.Belkadi**, Etude expérimentale et numérique de la fusion de paraffine dans une cavité chauffée par le bas, Mémoire de Master: Energétique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2020.
- [7] **S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran**, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications. Vol. 1, pp. 65-66, 2014.
- [8] **H. Mehling, L.F. Cabeza**, Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Vol. 1, p. 1, 2008.
- [9] **J.M.P.Q. Delgado, J.C. Martinho, A. Vaz Sá, A.S. Guimarães, V. Abrantes**, Thermal Energy Storage with Phase Change Materials A Literature Review of Applications for Buildings Materials, Vol. 8, p. 6, 2019.
- [10] **A. Shukla, A. Sharma, P.H. Biwolé**, Latent Heat-Based Thermal Energy Storage Systems Materials, Applications, and the Energy Market, Vol. 1, p. 7, 2020.

- [11] **S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran**, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications. Vol. 1, pp. 61-62, 2014.
- [12] **S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran**, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications. Vol. 1, p. 127, 2014.
- [13] **J.M.P.Q. Delgado, J.C. Martinho, A. Vaz Sá, A.S. Guimarães, V. Abrantes**, Thermal Energy Storage with Phase Change Materials A Literature Review of Applications for Buildings Materials, Vol. 8, p. 17, 2019.
- [14] **D. Verdier-Gorcias**, Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé, Mémoire de Doctorat: Energétique et Génie des Procédés, Université de Perpignan, 2016.
- [15] **J. Borderon**, Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique, Mémoire de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon, 2012.
- [16] **A. Soupert-Caron**, Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase, Mémoire de Doctorat: énergétique et procédés, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [17] **Amy S. Fleischer**, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. Vol. 10, p. 39, 2015.
- [18] **Amy S. Fleischer**, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. Vol. 10, p. 41, 2015.
- [19] **A. Abhat**, Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, Solar energy, Vol. 30, pp. 312-332, 2018.
- [20] **J. Borderon**, Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique, Mémoire de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon, 2012.
- [21] **L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche**, A. de Gracia, Fernández, A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. Renew. Sustain. Energy Rev, Vol. 15, pp.1675–1695, 2011.

- [22] **D.Zhoua, C.Y. Zhaob, Y. Tian**, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl. Energy* 2012, Vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [23] **J. Gasia, A. Gutierrez, G. Peiro, L. Miro, M. Grageda, S. Ushak, L. F. Cabeza**, Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 826-833, 2015.
- [24] **Amy S. Fleischer**, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*. Vol. 10, p. 44, 2015.
- [25] **B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling**, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Appl Therm Eng*, Vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [26] **S.D. Sharma, K. Sagara**, Latent heat storage materials and systems: a review. *Int J Green Energy*, Vol. 2, pp. 1–56, 2005.
- [27] **Manish K. Rathod J. Banerjee**, Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 18, pp. 246-256, 2013.
- [28] **S.A. Memon**, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 31, pp. 870-906, 2014.
- [29] **K. Pielichowska, K. Pielichowski**, Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 67-123, 2014.
- [30] **K.E. N'Tsoukpoe, Hui Liu, N. Le Pierrès, L. Luo**, A review on long-term sorption solar energy storage. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 13, pp. 2385-2396, 2009.
- [31] **A.K. Ray, D. Rakshit, K.R. Kumar, H. Gurgenci**, Silicon as high-temperature phase change medium for latent heat storage: A thermo-hydraulic study, *Sust. Ener. Tech. and Asses.*, Vol. 46, 101249, 2021.
- [32] **L. Liang, Y.H. Diao, Y.H. Zhao, Z.Y. Wang, F.W. Bai**, Numerical and experimental investigations of latent thermal energy storage device based on a flat micro-heat pipe array metal foam composite structure, *Renewable Energy*, Vol. 161, pp.1195-1208, 2020.

- [33] **M.S. Mahdi, H.B. Mahood, A.A. Khadom**, A.N. Campbell, Numerical simulations and experimental verification of the thermal performance of phase change materials in a tube-bundle latent heat thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 194, 117079, 2021.
- [34] **A. Marušić, D. Lončar**, Experimental validation of high-temperature latent heat storage model using melting front propagation data, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, 114520, 2020.
- [35] **L. Tian, X. Liu, S. Chen, Z. Shen**, Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167, 114764, 2020.
- [36] **S. Kaba, K. Achoubir, A. Cheddadi**, An enhanced numerical approach for convection phase change problems: A solution of tin melting problem, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 18, 100585, 2020.
- [37] **Y. Wang, J. Dai, D. An**, Numerical Investigations on Melting Behavior of Phase Change Material in a Rectangular Cavity at Different Inclination Angles, *Applied Sciences*, Vol. 8, p. 1627, 2018.
- [38] **T. Bouhal et al.**, Numerical analysis of PCM melting filling a rectangular cavity with horizontal partial fins, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 307, 01011, 2020.
- [39] **C. Pan et al.**, Experimental, numerical and analytic study of unconstrained melting in a vertical cylinder with a focus on mushy region effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 1015-1024, 2018.
- [40] **Y. Hong, W. Ye, S. Huang, J. Du**, Can the melting behaviors of solid-liquid phase change be improved by inverting the partially thermal-active rectangular cavity?, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 571-578, 2018.
- [41] **Vikas, A. Yadav, S.K. Soni**, Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent), *IRJET*, Vol. 04, pp. 3289-3294, 2018.
- [42] **R. Karami, B. Kamkari**, Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 146, pp. 45-60, 2019.
- [43] **S. Madruga, J. Curbelo**, Dynamic of plumes and scaling during the melting of a Phase Change Material heated from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 206-220, 2018.

- [44] **B.R. Tamuli, S. Nath, D. Bhanja**, Unveiling the melting phenomena of PCM in a latent heat thermal storage subjected to temperature fluctuating heat source, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 164, 106879, 2021.
- [45] **A.N. Korti, F.Z. Tlemsani**, Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit, *Journal of Energy Storage*, Vol. 5, pp. 177-186, 2016.
- [46] **H. Guellil, A.N. Korti, S. Abboudi**, Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 855-866, 2019.
- [47] **K. Missoum, H. Guellil, A.N Korti**, Improvement of Thermal Conductivity and Energy Stored by Paraffin with Different Metallic Additives, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 28, 2050028, 2020.
- [48] **A.N. Korti, H. Guellil**, Experimental study of the effect of inclination angle on the paraffin melting process in a square cavity, *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 101726, 2020.
- [49] **S. Madruga, N. Haruki, A. Horibe**, Experimental and numerical study of melting of the phase change material tetracosane, *International Communications in Heat and Mass Transfert*, Vol. 98, pp. 163-170, 2018.

ملخص

يركز هذا العمل على المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج ANSYS Fluent 15.0.7 لصهر مادة متغيرة الطور داخل قالب مسخن من الأسفل. من أجل التحقق من صحة النتائج، تم استخدام النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في عمل سابق. يتعلق التحقق التجريبي باختبار الشبكة، واختبار الخطوة الزمنية، إدخال شروط الحدود الحقيقية وتأثير ثابت Darcy. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر قيمة خطأ متوسطة تبلغ 22%.

الكلمات المفتاحية: مواد تغير الطور (PCM)، ANSYS Fluent، إنصهار، محاكاة رقمية.

Abstract

The present work focuses on the numerical simulation using ANSYS Fluent 15.0.7 software of the melting of a phase change material in a bottom heated cavity. In order to validate the results, the experimental results obtained previously in the previous work were used. The experimental validation covers the mesh test, the time step test, the integration of the real boundary conditions and the effect of the Darcy constant. The results obtained show an average error of 22%.

Keywords : Phase change materials (PCM), ANSYS Fluent, Melting, Numerical simulation.

Résumé

Le présent travail porte sur la simulation numérique à l'aide de logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 de la fusion d'un matériau de changement de phase dans une cavité chauffée par le bas. Afin de valider les résultats, les résultats expérimentaux obtenus précédemment dans les travaux antérieurs ont été utilisés. La validation expérimentale porte sur le test de maillage, le test de pas du temps, l'intégration des conditions aux limites réelles et l'effet de la constante de Darcy. Les résultats obtenus montrent une erreur moyenne de 22%.

Mots-clés : Matériaux à changement de phase (MCP), ANSYS Fluent, Fusion, Simulation numérique.
