

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان
تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

Belmeliani Merouane et Benmansour Abdellah Mahir

Sujet

Etude expérimentale du stockage thermique hybride sensible-latent utilisant des pierres naturelles pour améliorer le transfert de chaleur

Soutenu publiquement, le 27 / 06 /2024, devant le jury composé de :

M/SAIM RACHID	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mme/SARI HASSOUN HIND	MAA	Université de Tlemcen	Encadrante
M/GUELLIL HOCINE	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme/MISSOUM KHAOULA	Docteur	Université de Tlemcen	Co- Encadrante
Mme/KHALDI SOUHEYLA	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M/BENRAMDANE MOHAMMED	MCA	Université de Tlemcen(I2E)	Examinateur
M/BENRAHOU MOHAMMED	MCA	Socio-économique	Examinateur

Année universitaire : 2023 – 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions le BON DIEU le tout puissant de m'avoir prêté foi, courage, santé et volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Mener une recherche de thèse jusqu'à son terme est un exercice long, solitaire, rythmé d'imprévus dans son déroulement et ses résultats qui n'aurait pas été possible sans l'entourage de mon promoteur, qui m'a montré le chemin à prendre.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers nos encadrants de mémoire madame «SARI HASSOUN Hind», monsieur «Guellil Hocine» et madame «MISSOUM Khaoula» pour leur patience, disponibilité et surtout ses conseils avisés qui ont joué un rôle essentiel dans nos conversations.

Nous exprimons, notre gratitude envers les membres du jury, président de cette soutenance Mr «Saim Rachid», ainsi qu'examinatrice Madame «Khaldi Souheyla», et examinateurs Mr «BENRAMDANE MOHAMMED» et Mr «BENRAHOU MOHAMMED» qui ont accepté d'examiner notre mémoire et ont travaillé avec nous pour assurer le bon déroulement de celui-ci.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers toute l'équipe pédagogique de l'université de Tlemcen et les experts qui ont supervisé notre formation pour leur contribution théorique.

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expression de reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

*Mon paradis a la prunelle de mes yeux à la source de ma vie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin ma moitié
Maman*

*A celui qui m'a fait un homme, ma source de vie, d'amour,
d'affection,*

A mon support qui était toujours à mes cotes pour me soutenir et m'encourager, à mon Roi Papa Et mon grand-père qui m'a toujours soutenu

Mes deux frères et ma sœur ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail

A tous les membres de ma grande famille

Mes encadreur « Dr Guellil Hocine », madame « Sari hassoun Hind » et madame « Missoum Khaoula » pour la patience, sa diligence et sa réactivité lors de la préparation de ce mémoire

Sans oublier mon binôme « Mahir » pour son soutien moral sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours encouragée, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous qui m'aiment

Belmeliani Merouane

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل يتعلق بالدراسة التجريبية لصهر البارافين الموجود في تجويف حراري مسخن من الأسفل، وكذلك استخدام الأحجار الطبيعية لتحسين التخزين الحراري. يستخدم البارافين عادة كوسيلة لتخزين الحرارة الحرارية والتقاط صور لتطور جبهة الكامنة. تتيح الدراسة التجريبية قياس التطور الزمني لدرجة الحرارة باستخدام سلسلة اقتناء %الذوبان. تظهر النتائج تحسناً بنسبة 18% في قدرة التخزين الحراري مع مكاسب زمنية بنسبة 13

الكلمات المفتاحية: تخزين الحرارة المحسوسة والكامنة، المواد المتغيرة الطور، الأحجار الطبيعية، دراسة تجريبية

abstract

The main objective of this work concerns the experimental study of the fusion of paraffin contained in a thermal cavity heated from below, as well as the use of natural stones to improve thermal storage. Paraffin is commonly used as a latent heat thermal storage medium. The experimental study makes it possible to measure the temporal evolution of the temperature using an NI acquisition chain and to capture images of the evolution of the melting front. The results show an 18% improvement in thermal storage capacity with a 13% time gain.

Keywords: Sensible and latent heat storage, Phase change materials (PCM), Natural stones, Experimental study

Résumé

L'objectif principal de ce travail porte sur l'étude expérimentale de la fusion de la paraffine contenue dans une cavité thermique chauffée par le bas, ainsi que sur l'utilisation de pierres naturelles pour améliorer le stockage thermique. La paraffine est couramment utilisée comme un milieu de stockage thermique par chaleur latente. L'étude expérimentale permet de mesurer l'évolution temporelle de la température à l'aide d'une chaîne d'acquisition NI et de capturer des images de l'évolution du front de fusion. Les résultats montrent une amélioration de la capacité de stockage thermique de 18 % avec un gain du temps de 13%.

Mots-clés : Stockage par chaleur sensible et latente, Matériaux à changement de phase (MCP) Pierres naturelles, Étude expérimentale.

Table des matières

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

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction	3
I.2. Etude de l'Énergie primaire consommée à l'échelle mondiale par zone géographique :.....	4
I.3. Travaux antérieurs sur le stockage thermique :.....	6
I.4. Travaux antérieurs sur amélioration de stockage thermique :.....	11

Chapitre II : Généralité sur le stockage thermique

II.1. Introduction :	21
II.2. Etapes de stockage thermique :	21
II.3. Types de stockage thermique	21
II.3.1. Stockage de l'énergie par chaleur sensible :.....	22
II.3.2. Chaleur Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :.....	27
II.4. Matière changement de phase(MCP) :	31
II.4.1. Choix de MCP	32
II.4.2. Différents types de MCP :	33
II.4.2.1. MCP inorganiques :.....	34
II.4.2.2. MCP organique.....	35
II.4.2.3. Mcp eutectique :	40
II.4.3. Domaine d'utilisation des MCP	41
II.4.3.1. Stockage thermique solaire.....	41
II.4.3.2. Chauffage et refroidissement des bâtiments :.....	42
II.4.3.3. Applications industrielles :.....	43
II.4.3.4. Refroidissement électronique :.....	43

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.1. Introduction :	45
-----------------------------	----

III.2.	Présentation du dispositif expérimentale	45
III.3.	Matériaux à changement de phase MCP	46
III.4.	Mesure des températures	47
III.5.	Présentation de l'interface (LabVIEW)	48
III.5.1.	Face-avant.....	49
III.5.2.	Block diagramme.....	49
III.6.	Camera thermique (IR Soft Testo i875)	51
III.7.	Procédure expérimentale	54

Chapitre VI : Résultat et interprétation

VI.1.	Introduction :.....	57
VI.2.	Paraffine pure :	58
VI.2.1.	Evolution de front de fusion :	58
VI.2.2.	Evolution de la température de la paraffine pure	61
VI.2.3.	Evolution de l'énergie stockée :	62
VI.3.	Amélioration du transfert de chaleur durant le processus de la fusion.....	62
VI.3.1.	Evolution de front de fusion	63
VI.3.1.	Evolution de la température.....	65
VI.3.2.	Energie stockée :.....	67
Conclusion générale.....		68

Liste des figures

Chapitre I

Fig I.1. Homme et l' idée de stockage.....	3
Fig I.2. Énergie primaire consommée à l'échelle mondiale (1971-2018) [1]	5
Fig I.3. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour différents débits.	6
Fig I.4. Échantillons de roches granitique d'un diamètre moyenne de :(A:*1) 10.5 mm et (B:*3) 31.9 mm[4].....	7
Fig I.5. Evolution temporelle de énergie pour différent matériaux	7
Fig I. 6. Schéma de système étudiant	8
Fig I.7. Comparaison entre l'évolution de la fusion et le front de changement de phase obtenus expérimentalement et numériquement.....	9
Fig I.8. Effet du nombre de passes de conduit et l'épaisseur de conduite sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage.....	10
Fig I.9. Vue schématique du circuit de montage expérimental et sa photo	11
Fig I.10. (a) interface solide-liquide sans convection naturelle, (b) interface solide-liquide à convection naturelle	12
Fig I.11. Photographies instantanées de la fusion MCP à l'intérieur de la capsule sphérique après 0, 20, 40, 60, 80, 100 et 120 min	13
Fig I.12. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine	14
Fig I.13. Evolution de front de fusion des différents angles d'inclinaison.....	15
Fig I.14. (a) Schéma de dispositif expérimentale, (b) mélange mousse/ paraffine remplie dans le bac	16
Fig I.15. Effet de différent mousse utilisé sur la fusion du MCP	16
Fig I. 16. Effet de la densité des pores sur le temps de fusion.....	17
Fig I.17. Changement de l'état des roches avant et après 20 cycles thermiques	18
Fig I.18. Schéma de la configuration hybride de stockage d'énergie thermique	19
Fig I.19. Distribution de la température du MCP avec des différents types de pierres	20

Chapitre II

Fig II.1. Différent Types de stockage thermique.....	22
---	----

Fig II.2. Stratification thermique dans un réservoir d'eau chaude	24
Fig II.3. Evolution de la température en fonction de l'énergie stockée.....	28
Fig II.4. Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente	30
Fig II.5. Principe fonctionnement de MCP.....	31
Fig II.6. Classification des MCP [23].....	33
Fig II.7. Classification des MCP selon l'enthalpie de mélange	34
Fig II. 8. (a) Encapsulation de MCP (b):Configuration typique de capsules	37
Fig II. 9. Paraffine en huile, encapsulées ou brutes	38
Fig II.10. Configuration de stockage thermique.....	42
Fig II.12. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau	42
Fig II.13. Schéma de la récupération de chaleur dans l'industrie	43
Fig II.14. (a) Puce électronique avec un MCP , (b) Echangeur de chaleur a MCP.....	44

Chapitre III

Fig III.1. Photos des matériels utilisés dans les expériences.....	45
Fig III.2. Isolation de la cavité thermique	46
Fig III.3. Cire de paraffine utilisée	46
Fig III.4. Remplissage MCP	47
Fig III.5. Positions des thermocouples dans la cavité thermique	47
Fig III.6. Module d'acquisition NI avec les capteurs de température	48
Fig III.7. Interface Labview (face-avant)	49
Fig III.8. Boucle while	50
Fig III.9. Création du graphe	51
Fig III.10. Réation d'un fichier d'enregistrement des mesures.....	51
Fig III.11. Camera thermique (IRSoft Testo i875).....	52
Fig III.12. Interface utilisateur logiciel IRsoft	52
Fig III.13. Ruban	53
Fig III.14. Espace de travail	53
Fig III.15. Barre d'état	54
Fig III.16. Photo géographique de plage sidna youchaa	55

Fig III.17. Pierres naturelles utilisées	55
Fig III.18. (a)Immersion 5 pierres,(b)Immersion 10 pierres ,(c)Immersion 20 pierres	56

Chapitre IV

Fig IV.1. Évolution temporelle du front de fusion et champ d'image IR (à droite) de la paraffine pure chauffée par le bas.	59
Fig IV.2. Evolution temporelle de la fraction volumique.....	60
Fig IV. 3. Evolution temporelle de la température pendant la fusion de la paraffine pure.....	61
Fig IV. 4. Evolution de l'énergie stockée en fonction de temps.....	62
Fig IV. 5. Comparaison entre l'évolution du front de fusion de la paraffine pure	63
Fig IV. 6. Comparaison entre la fraction liquide de paraffine pure.....	64
Fig IV. 7. Evolution temporelle de la Température (T1,T2,T3) pour la fusion de paraffine pure et de la paraffine avec les pierres	65
Fig IV. 8. Comparaison entre l'évolution temporelle des isothermes durant la fusion	66
Fig IV. 9. Evolution de l'énergie stockée par la paraffine pendant la fusion de MCP en fonction de temps	67

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II 1. Avantages et les inconvénients d'utilisation de l'eau	25
Tableau II 2. Avantages et les inconvénients d'utilisation de l'huile.....	25
Tableau II 3. Avantages et les inconvénients d'utilisation des métaux solides	26
Tableau II 4. Propriétés de certaines substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible	27
Tableau II 5. Caractéristiques thermo physiques de certains sels	35
Tableau II 6. Caractéristiques thermo physiques de certains métaux.....	35
Tableau II 7. Exemples de quelque paraffine en fonction de nombre de carbone.....	36
Tableau II 8. Exemples des MCP paraffines	38
Tableau II 9. Exemples des MCP non- paraffines	39
Tableau II 10. Propriétés physiques des MCP eutectiques.....	40

Chapitre III

Tableau III 1 : Propriétés de la paraffine utilise.....	47
--	----

Nomenclature

Symboles :

Q : Quantité d'énergie stockée [J]

m : Masse du matériau de stockage [kg]

C_p : Chaleur spécifique du matériau de stockage [J.kg⁻¹/k]

dT : Variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge [k]

L_f : Chaleur massique de changement d'état du matériau [J/kg]

ΔL : Enthalpie de changement de phase[J.kg⁻¹]

C_p(solide) : Chaleurs spécifiques des matériaux solide[J/kg.K]

C_p(liquide) : Chaleurs spécifiques des matériaux liquide [J/kg.K]

C : Capacité thermique volumétrique [kJ/Kg °C]

E : Quantité d'énergie stockée [J]

T_{fusion} : Température de fusion [°C]

ρ : Densité [kg/m³]

p_v : Pression de vapeur [pa]

ΔH_{fus} : Enthalpie de fusion [kJ/ kg]

H_{right} : Coefficient de transfert de la paroi vertical droite

H_{left} : Coefficient de transfert de la paroi vertical gauche

T_i : Température initial [°C]

T_f : Température finale [°C]

Symboles Grègues :

λ : Conductivité thermique [W/ m.°C]

ρ : Densité [kg/m³]

Σ : Tension superficielle [N/m]

Liste des abréviations :

TES : Stockage d'énergie thermique

MCP : Matériaux à changement de phase

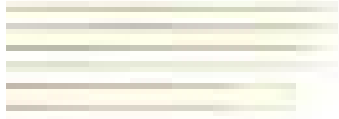
HTF : Fluide caloporteur

CSP : Centrales électriques à concentration solaire

NI : National Instruments

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

L'OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale :

L'énergie est essentielle pour toutes les activités humaines, des besoins quotidiens au développement national. La conservation de l'énergie est cruciale à chaque étape, étant donné les impacts environnementaux des combustibles fossiles et autres sources d'énergie primaire qui augmentent les émissions de gaz à effet de serre et la température moyenne de la Terre.

La recherche et le développement de nouvelles sources d'énergie visent à améliorer l'efficacité énergétique, avec un accent particulier sur les technologies de stockage d'énergie. Ces techniques incluent le stockage chimique, thermochimique, mécanique, électrique et thermique, chacune stockant une forme spécifique d'énergie.

Le stockage de l'énergie thermique est une technologie clé pour la conservation de l'énergie, avec deux principaux types de stockage thermique : les systèmes de chaleur sensible et les systèmes de chaleur latente. Chaque type utilise différents matériaux adaptés à diverses plages de température et applications.

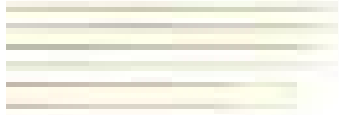
Les systèmes de stockage thermique par chaleur latente, utilisant des matériaux à changement de phase (MCP), attirent beaucoup d'attention pour leur haute densité de stockage d'énergie thermique et leur faible changement de température pendant la fusion et la solidification. En parallèle, les systèmes de chaleur sensible utilisent des matériaux naturels comme les pierres pour améliorer la capacité de stockage thermique.

Ce travail vise à étudier expérimentalement le comportement thermo-convectif de la fusion dans des systèmes de stockage thermique utilisant des matériaux à changement de phase. Ce mémoire se structure comme suit :

- Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur le stockage thermique par chaleur sensible et latente, en mettant l'accent sur les matériaux de stockage.
- Le deuxième chapitre traite des concepts généraux du stockage d'énergie, en particulier le stockage thermique par chaleur sensible et latente.
- Le troisième chapitre décrit le dispositif expérimental et les méthodes utilisées pour étudier la fusion de la paraffine dans une enceinte carrée, y compris l'intégration des pierres naturelles.
- Le quatrième chapitre expose les résultats expérimentaux concernant les mesures de température en fonction du temps, la position de l'interface solide-liquide, la fraction

volumique de liquide et la quantité d'énergie stockée par les matériaux, en comparant la paraffine pure et la paraffine avec des pierres naturelles.

Le travail se termine par une conclusion générale sur les résultats obtenus et les perspectives futures.



CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE



I.1. Introduction

Par l'habitude. L'homme stocke de l'énergie sous forme de chaleur par des gestes simples (en utilise le soleil pour chauffer les pierres et utiliser cette chaleur pour le chauffage et la cuisson).



Fig I.1. Homme et l'idée de stockage

Le stockage de l'énergie occupe une place centrale dans les défis actuels, que ce soit pour optimiser les ressources énergétiques ou pour leur accès. Il offre la possibilité de gérer la "production" et la "consommation" d'énergie en réduisant les pertes. L'énergie, conservée lorsqu'elle est plus disponible que nécessaire, peut être utilisée d'autre fois à un moment où la demande est plus élevée. Cette opération permet également de satisfaire une demande constante en raison de l'intermittence ou de la fluctuation de production de certaines énergies, comme les énergies renouvelables. Les systèmes de stockage d'énergie doivent être intégrés au captage de l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques. Parmi tous les différents systèmes de stockage d'énergie (hydro pompage, stockage d'air comprimé, volants d'inertie, stockage électrochimique, condensateurs, stockage d'hydrogène, conversion électrique, etc.), le stockage d'énergie thermique est l'un des moins chers. Utilisé dans une large gamme d'applications telles que la production d'électricité (à l'aide de centrales solaires thermiques à concentration), les applications industrielles (industrie chimique, industrie alimentaire, etc.) et les applications du bâtiment (chauffage urbain, eau chaude sanitaire).

Différentes méthodes sont employées pour le stockage d'énergie thermique, avec la méthode de stockage de chaleur sensible comme la plus courante. Toutefois, au cours des deux dernières décennies, d'autres techniques ont émergé, telles que le stockage d'énergie latente et le stockage d'énergie thermo-chimique. Ces dernières offrent une capacité de stockage de chaleur accrue et réduisent la perte de chaleur pendant la période de stockage. De nouveaux

matériaux, impliquant des changements de phase et des réactions chimiques (tels que les composés péritectiques), semblent prometteurs en raison de leur capacité de stockage de chaleur élevée

I.2. Etude de l'Énergie primaire consommée à l'échelle mondiale par zone géographique :

L'énergie est liée au développement économique, La demande énergétique mondiale continue d'augmenter en raison de l'augmentation rapide de la population et de l'élévation du niveau de vie. L'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire entre 1971 et 2018 est illustrée dans **la figure I.2.**

De 1973 à 2018, la consommation mondiale d'énergie a quasiment doublé (+ 92%). La cause de cette évolution réside dans la consommation des pays anciennement industrialisés, tels que le groupe des pays de l'OCDE (*L'Organisation de coopération et de développement économiques*)

La consommation de l'Afrique il atteinte de 50% de 1990 à 2008, mais elle est restée constant dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% du nombre de peuple mondiale)

La consommation d'énergie dans le monde en 2018 primaire a atteint 14,3 Gtep. Cette valeur est presque trois fois supérieur à celui en 1973 (5,0 Gtep), ce qui représente une augmentation annuelle moyenne de 1,8 %, avec un petit ralentissement au cours des dix dernières années (+ 1,5 %).

En Amérique latine et en Afrique une croissance plus forte La croissance a été bien plus forte avec un rythme de + 3,1 %, + 2,2 % par an respectivement

En Asie, l'augmentation moyenne a été très forte entre 1978 et 2018 (+ 3,7 %). En 2018, l'Asie compte pour 41 % de la consommation mondial tel que la Chine seule a enregistré une augmentation de 8 % à 22 %

En 2018, 38 % de la consommation mondiale d'énergie primaire est consommée en Europe, en Amérique du Nord et en Russie, contre 67 % en 1978[1].

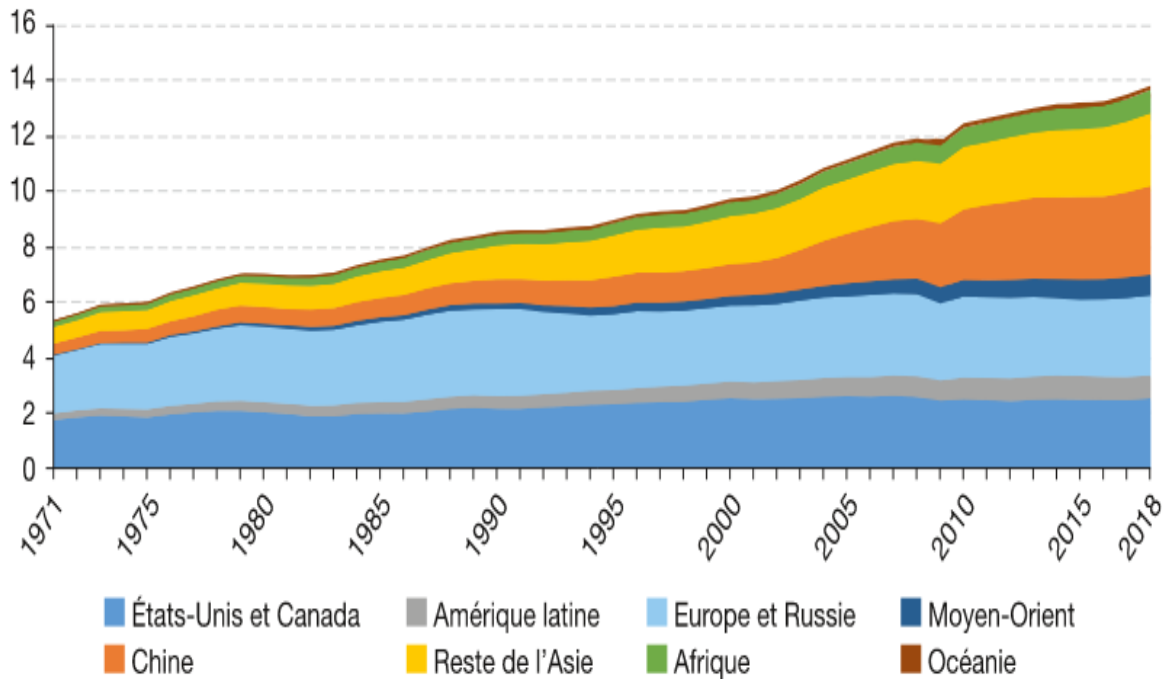


Fig I.2. Énergie primaire consommée à l'échelle mondiale (1971-2018) [1]

Les événements pétroliers de 1973 et 1979, suivis des inquiétudes croissantes concernant l'environnement, ont eu des répercussions significatives sur la politique d'approvisionnement en énergie. Donc la meilleure solution pour résoudre ce problème c'est les stockages de la chaleur générée par l'énergie solaire lorsque celle-ci est en surplus. Le stockage thermique est considéré comme une méthode facile et pratique à utiliser donne des rendements élevés, de grandes capacités de stockage et des coûts abordables, Il offre la possibilité d'atteindre l'objectif de production à 100% en utilisant l'énergie solaire et de garantir une production de chaleur constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire. En outre, il joue un rôle très important dans les centrales solaires en permettant de prolonger leur durée de fonctionnement et d'accroître leur capacité.

D'après le rapport de **Wood Mackenzie Power & Renewable, Perspectives mondiales du stockage d'énergie [2]**, les cinq dernières années on marque une explosion du marché par les États-Unis et la Chine en tête. Selon **le rapport de mardi [2]**, on anticipe une augmentation de treize fois les déploiements de stockage d'énergie au cours des 6 derniers année, passant d'un marché de 12 gigawattheures en 2018 à un marché de 158 gigawattheures en 2024.

I.3. Travaux antérieurs sur le stockage thermique :

L. ABDELMOUMENE et al. [3] ont présenté une étude expérimental dans un stockeur de chaleur pour étudier les stockage-déstockage de l'énergie thermique par la chaleur sensible en utilisant des matériaux Naturels (pierres de cailloux de mer) Les expériences consistent à étudier l'influence de la variations de débit d'air (0.00544 , 0.00780 et 0.00870)Kg/s, porosité du milieu de Stockage (0.5131 , 0.6561 et 0,7918) et la nature des pierre (trois types utilisé de galets de mer) sur le comportement thermique du stockeur. Les résultats montrent que la réduction du débit entraîne une augmentation de la quantité de chaleur stockée et une prolongation du processus de stockage. Afin d'atteindre un débit de 0.0087 Kg/s, le temps de fonctionnement est diminué de 150 min (2h 30) à 100 min (1h 40). L'augmentation de la porosité du milieu de stockage et donc la diminution de la masse de pierre permet de raccourcir le processus de stockage et diminuer la quantité de chaleur stockée. Donc, l'énergie récupérée diminue Pour une porosité de 0.8, le temps de fonctionnent est diminué de 150 min (2h 30) à 75 min (1h 15).

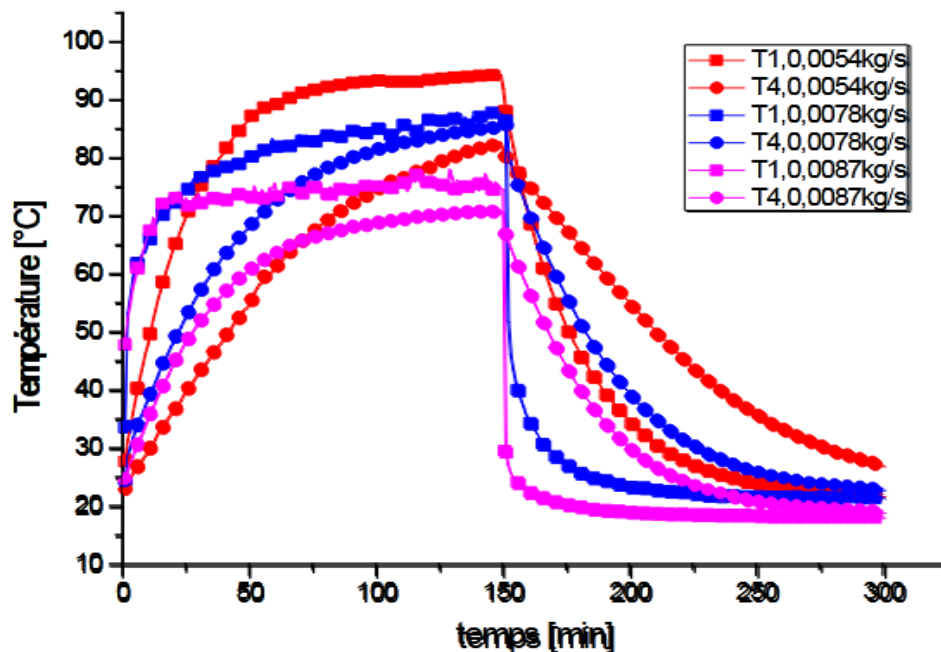


Fig I.3. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour différents débits.

Mawire et al [4] ont fait une étude expérimentale sur Trois systèmes de stockage thermique par chaleur sensible à des débits différents (4, 8 et 12 ml/s) pour évaluer la performance thermique des lits de galets emballés. L'huile de tournesol était utilisée comme fluide de transfert de chaleur dans deux systèmes de stockage, avec deux lits de galets emballés de diamètres différents (10,5 et 31,9 mm). Le troisième réservoir de stockage utilise

exclusivement de l'huile. Le système de stockage d'huile a été observé comme le plus rapide à se stocker, suivi du système de stockage rempli de petits galets, et enfin du système de stockage rempli de gros galets, en raison de la plus faible masse thermique de ces derniers. Les petits galets connaissent une augmentation de température plus rapide car ils atteignent plus facilement l'équilibre thermique, contrairement aux gros galets qui subissent généralement des baisses de température.

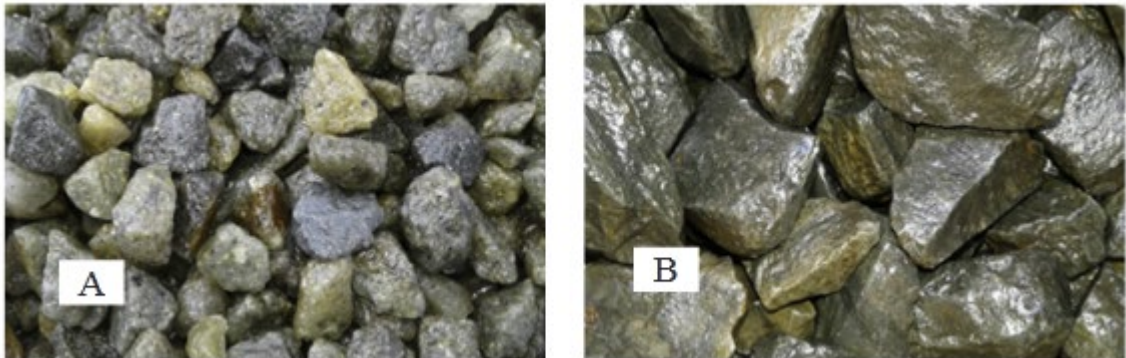


Fig I.4. Échantillons de roches granitique d'un diamètre moyenne de :(A:*1) 10.5 mm et (B:*3) 31.9 mm

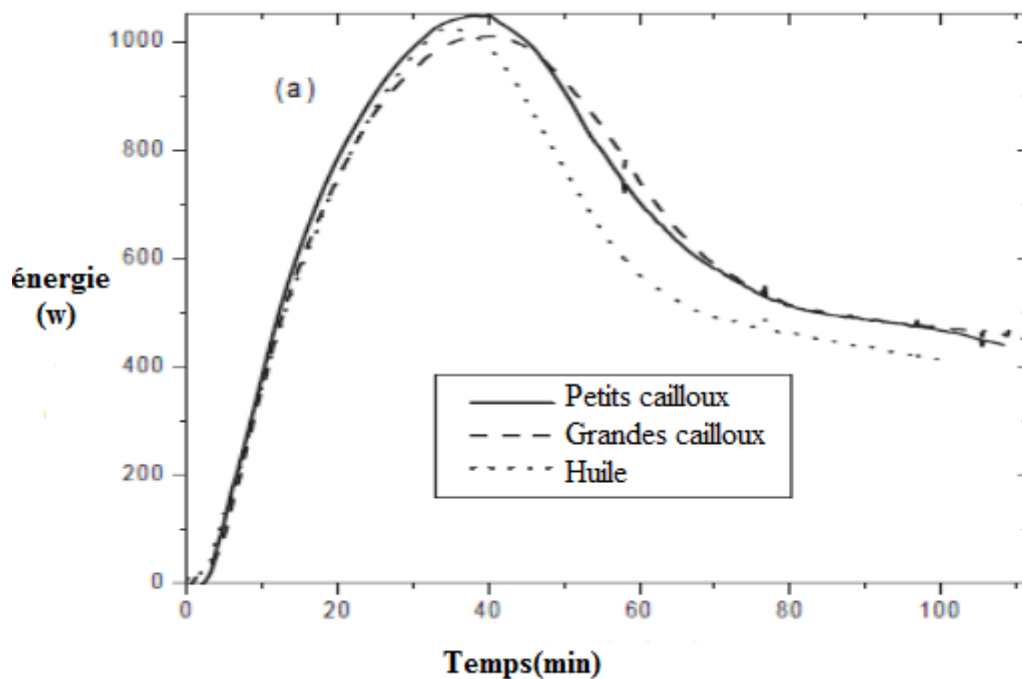


Fig I.5. Evolution temporelle de énergie pour différent matériaux

A cause de la faible porosité les résultats montrent que L'énergie de stockage par le système de petits cailloux est le plus élevée donc c'est le meilleur système de Stockage d'énergie.

Pour garantir une production d'énergie continue la conservation de l'énergie thermique à des températures élevées est une technologie essentielle. Selon la littérature, la roche naturelle est considérée comme un matériau abordable pour le stockage de l'énergie thermique dans les centrales solaires.

M.BECHIRI et al [5] ont étudié un système de stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible qui consiste de plaque parallèle et un tube cylindrique. Quatre différents matériaux du stockage thermique sont testés (le Silicium-carburé, l'Acier-inoxydable, la brique-réfractaire et l'alumine)

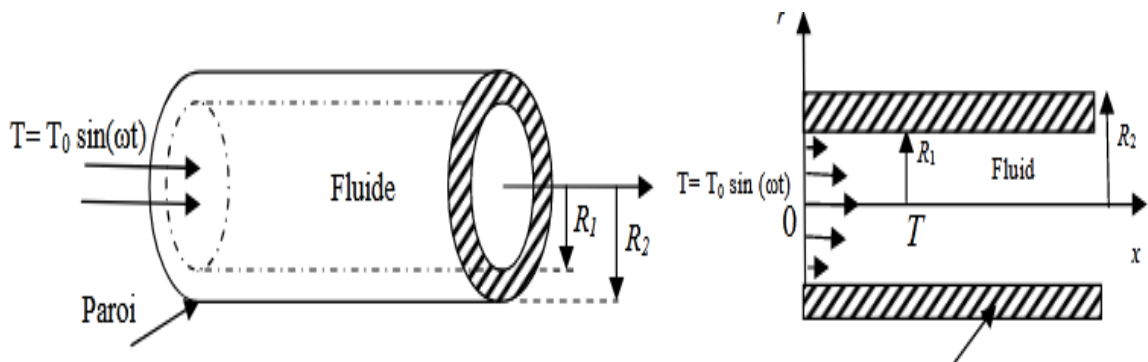


Fig I. 6. Schéma de système étudié

Ils ont constaté que :

- L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur permet d'obtenir une efficacité de stockage optimale, et l'acier-inoxydable a une meilleure efficacité de stockage que le silicium-carburé
- Les fluides qui ont une grande capacité thermique peuvent transmettre une grande quantité d'énergie stockée dans la paroi lorsque la durée d'entrée diminue. La température moyenne à la sortie augmente

M. KHERRAFI et al [6] ont présenté une étude numérique sur la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une cavité rectangulaire chauffée par le bas. Pour valider les résultats expérimentaux, ils ont intégré des conditions aux limites réelles, incluant la température de la paroi inférieure, le coefficient de transfert par convection, ainsi que les coefficients de transfert des parois verticales droite et gauche.

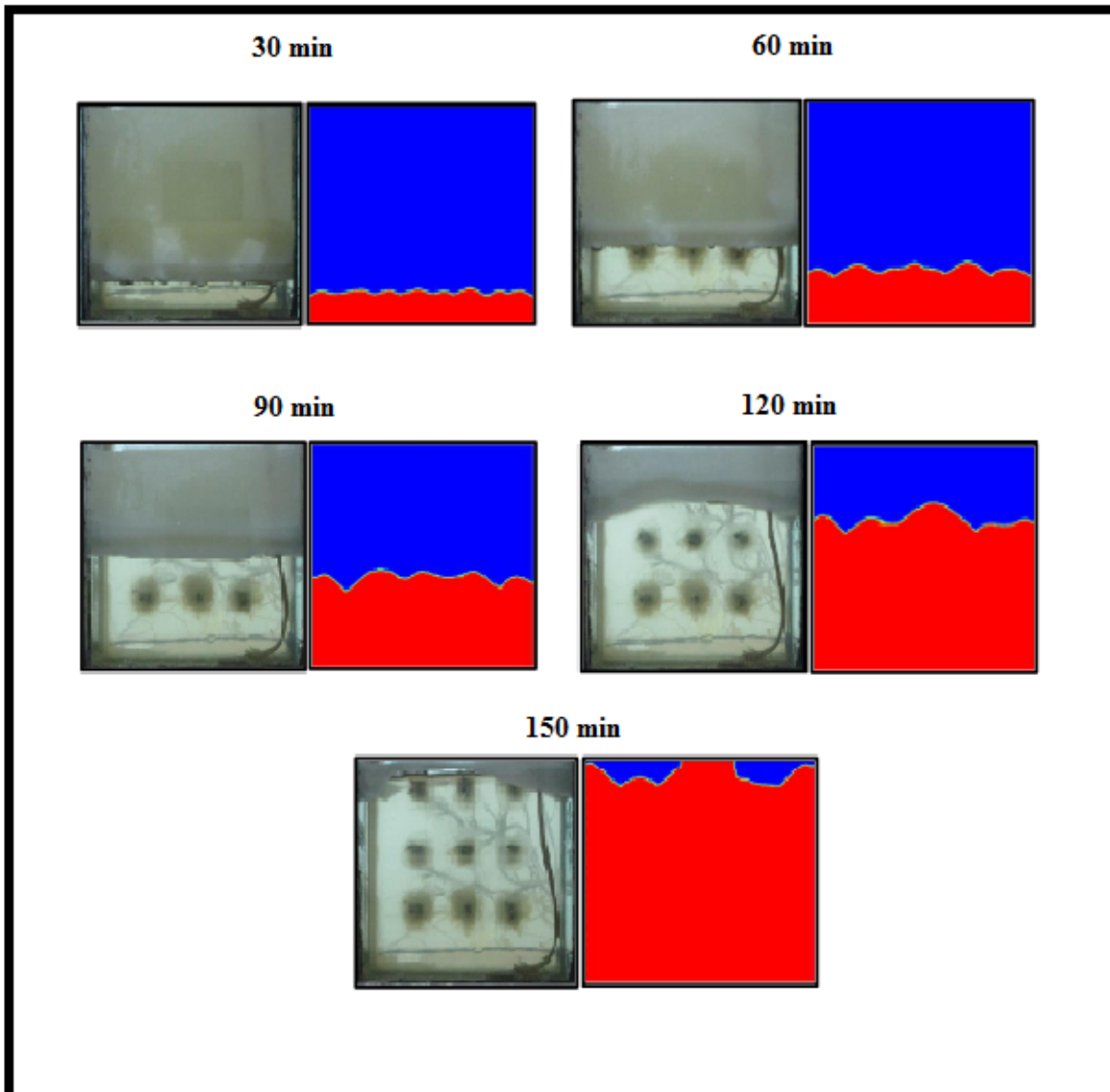


Fig I.7. Comparaison entre l'évolution de la fusion et le front de changement de phase obtenus expérimentalement et numériquement

Ils ont conclu que l'intégration des conditions aux limites réelles est indispensable pour améliorer la précision, l'erreur relative moyenne est diminuée de 53.82 % à 34.45 %.

B. Djaoued et al [7] ont présenté une étude numérique sur le processus de stockage d'énergie solaire par chaleur latente en utilisant des échangeurs cylindriques remplis par un matériau à changement de phase (MCP). L'eau circule à l'intérieur de la canalisation pour stocker la chaleur pendant les périodes ensoleillées et la récupérer pendant les périodes déficitaires. Afin de vérifier l'impact de l'épaisseur du MCP, du nombre de passes et du débit. Ils ont constaté que l'augmentation du nombre de passes et du débit provoque une accélération sur le processus de la fusion.

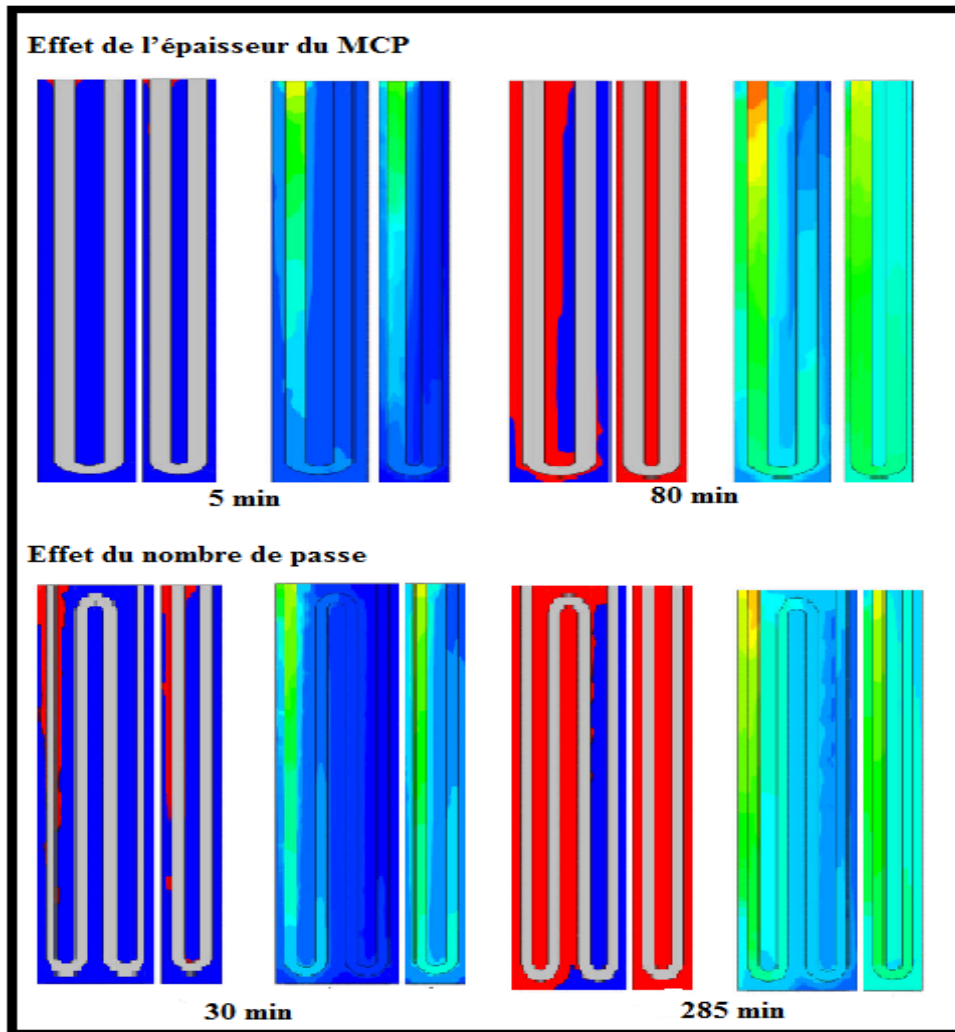


Fig I.8. Effet du nombre de passes de conduit et l'épaisseur de conduite sur l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps durant la phase de stockage

D.Djefel et al [8] : ont fait une étude expérimentale sur le processus de fusion de l'acide stéarique dans une unité de stockage de chaleur latente. Celui-ci est constitué d'une section d'essai MCP (échangeur thermique et MCP), d'un fluide caloporteur (eau) et d'un circuit hydraulique. Le circuit hydraulique à boucle est composé d'un bain-marie, d'une pompe à eau et d'un circuit hydraulique avec vanne manuelle. Dans ce processus, un matériau à changement de phase (MCP) liquide est chauffé, ce qui le fait fondre et lui permet de stocker l'énergie transmise par l'eau. En revanche, lors de la solidification, le MCP se solidifie et la

chaleur accumulée est transférée à l'eau froide qui circule à l'intérieur du tube.

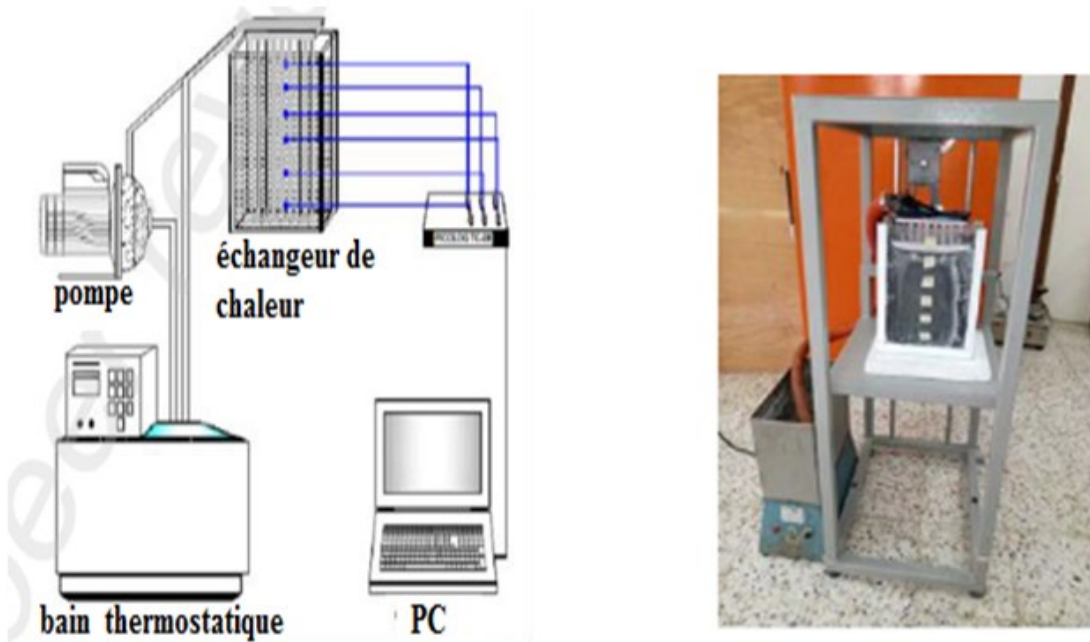


Fig I.9. Vue schématique du circuit de montage expérimental et sa photo

Les résultats expérimentaux montrent que la température moyenne calculée du MCP dépend fortement de la température d'entrée et de débit du fluide chaud, pendant le processus de stockage. Au sommet du récipient le MCP fond plus rapidement car la température y est plus élevée que celle du fond. Cela est dû à la force de flottabilité qui se manifeste lorsque l'acide stéarique fond, provoquant la montée du liquide dans le sens de la gravité. De plus, nous la convection naturelle joue un rôle important pendant la fusion du MCP. Par conséquent, le transfert de chaleur est dominé par la convection naturelle lors du changement de phase.

I.4. Travaux antérieurs sur amélioration de stockage thermique :

Dans les applications de stockage d'énergie thermique (TES) et les stratégies de gestion de l'énergie, le potentiel des matériaux à changement de phase (MCP) revêt une importance capitale. Cependant, en raison de leur faible conductivité thermique, il est nécessaire d'appliquer des techniques d'amélioration du transfert de chaleur pour optimiser leurs caractéristiques thermo physiques.

Tao et al [9] ont réalisé une analyse numérique de deux cylindres dans un environnement hautement tempéré, c'est-à-dire avec du MCP dans la coque et du MCP dans le tube, sous les

mêmes conditions d'opération. Pendant le processus de fusion, la convection naturelle a eu un impact considérable sur les performances, surtout lorsque le MCP a été intégré sur le côté du tube. Ils ont également mentionné qu'il est possible de réduire le temps de charge du MCP de 34,4 % et d'améliorer le taux de charge de 54,2 % en utilisant du MCP sur le côté du tube.

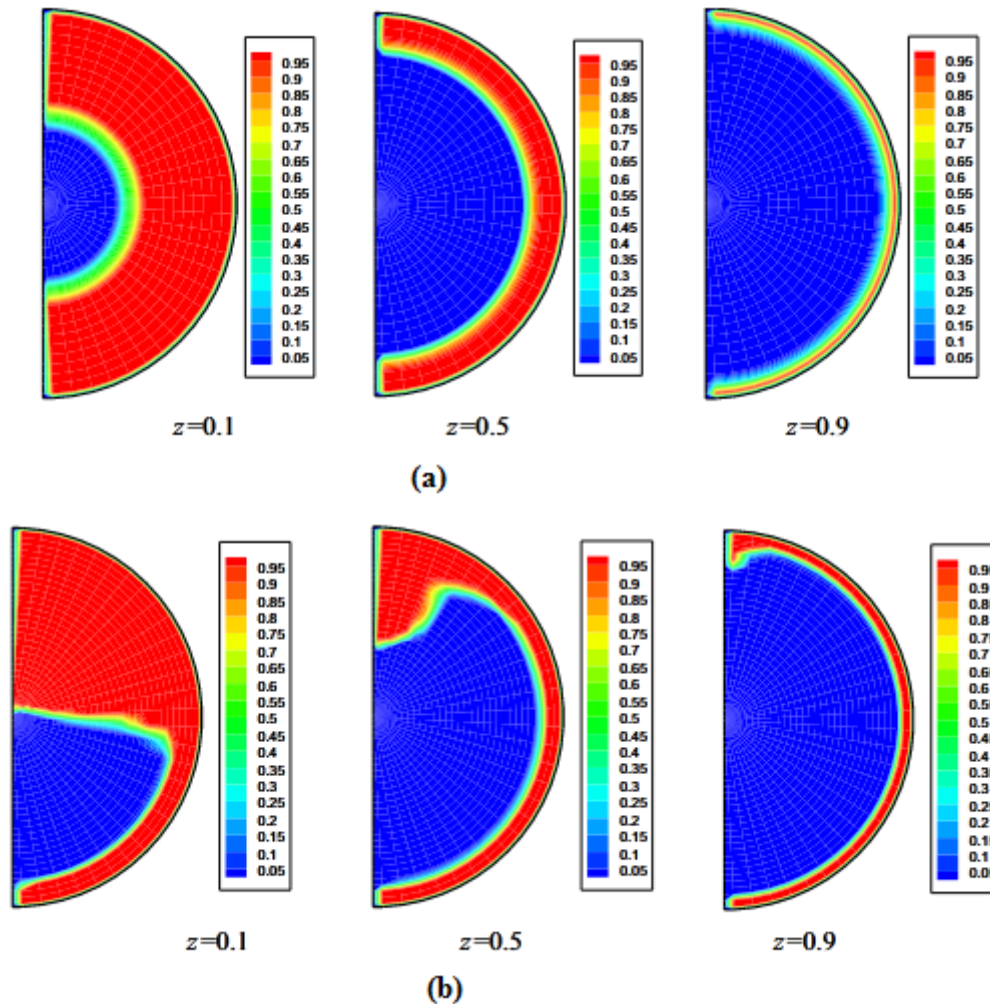


Fig I.10. (a) interface solide-liquide sans convection naturelle, (b) interface solide-liquide à convection naturelle

Tan et al [10] ont mené une étude expérimentale et numérique sur un MCP fondu dans une coque cristalline sphérique diaphane. Il a été démontré que la convection naturelle qui se produit dans une capsule sphérique entraîne une présence continue de liquide à proximité de l'axe de symétrie, à la fois stable et instable. De plus, une fusion ondulée et extravagante du MCP au fond a également été observée. Cette différence a été attribuée à la présence d'une structure de support pour soutenir la sphère, ce qui pourrait réduire le flux de chaleur vers le fond de la capsule.

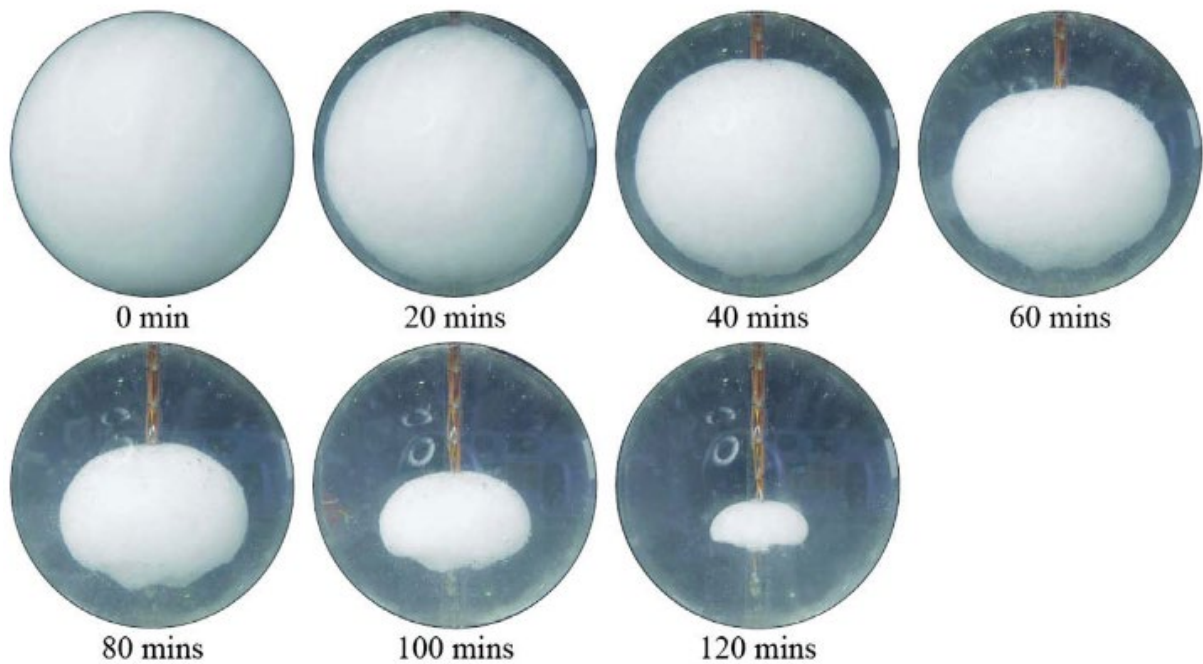


Fig I.11. Photographies instantanées de la fusion MCP à l'intérieur de la capsule sphérique après 0, 20, 40, 60, 80, 100 et 120 min

Missoum et al. [11] ont présenté une étude expérimentale sur l'effet de l'ajoute des additifs métalliques (Zamak, l'aluminium et le cuivre) sur le processus de fusion de la paraffine. Après des différentes expériences, ils ont conclu que :

- L'ajoute de zamak à la paraffine pure augmente la conductivité thermique de 0.174 W/mk et réduit de près de 13% de la conductivité thermique de la paraffine, le zamak diminue l'énergie stockée d'environ 3,5%.
- L'ajoute de l'aluminium à la paraffine pure augmente la conductivité thermique de 0. 272 W/mk et une augmentation de 36% de la conductivité thermique de la paraffine, l'aluminium donne une augmentation l'énergie stockée de 3,1%, donc L'aluminium est bénéficié d'une capacité thermique optimale et une conductivité thermique effective optimale, ce qui accélère le transfert de chaleur et augmente la quantité de chaleur stockée.
- Pour le cuivre une augmentation de la conductivité thermique de 0,798 W/mk et une grande augmentation de 300% de la conductivité thermique de la paraffine, pour l'énergie stocké global reste presque la même que pour la paraffine pure

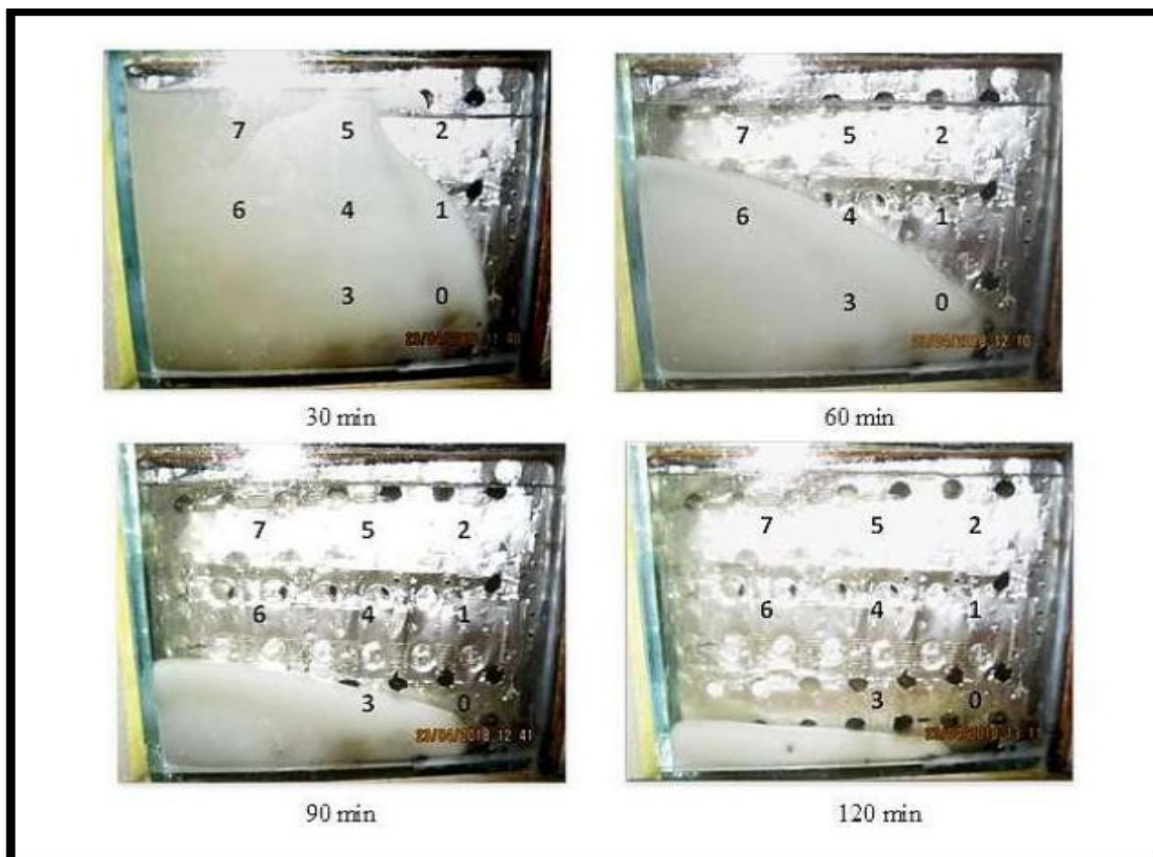


Fig I.12. Evolution temporelle de la fusion de la paraffine

B.Kamkari et al [12] ont présenté une étude expérimentale sur l'analyse de l'influence de l'angle d'inclinaison sur les caractéristiques thermique dans la fusion de MCP dans une cavité rectangulaire en circulant de l'eau chaude à la température souhaitée à travers l'échangeur de chaleur il ont réalisé trois différent d'expériences pour chaque angle d'inclinaison de 90° , 45° et 0° , en utilisant trois différentes températures de paroi de 70, 60 et 55 °C. Correspondant à des nombres de Rayleigh allant de $3,6 \cdot 10^8$ à $8,3 \cdot 10^8$. Ils ont conclu que pour tous les angles d'inclinaison pris en compte, la fusion est principalement contrôlée par les courants de convection inductifs dans le MCP liquide, ce qui indique une transmission de chaleur quasi-stable. Tandis que le taux de fusion dans la cavité horizontale reste presque constant jusqu'à la fin du processus de fusion. La vitesse de transfert de chaleur d'un MCP avec un nombre de Prandtl élevé n'est presque pas influencée par l'épaisseur de la couche liquide.

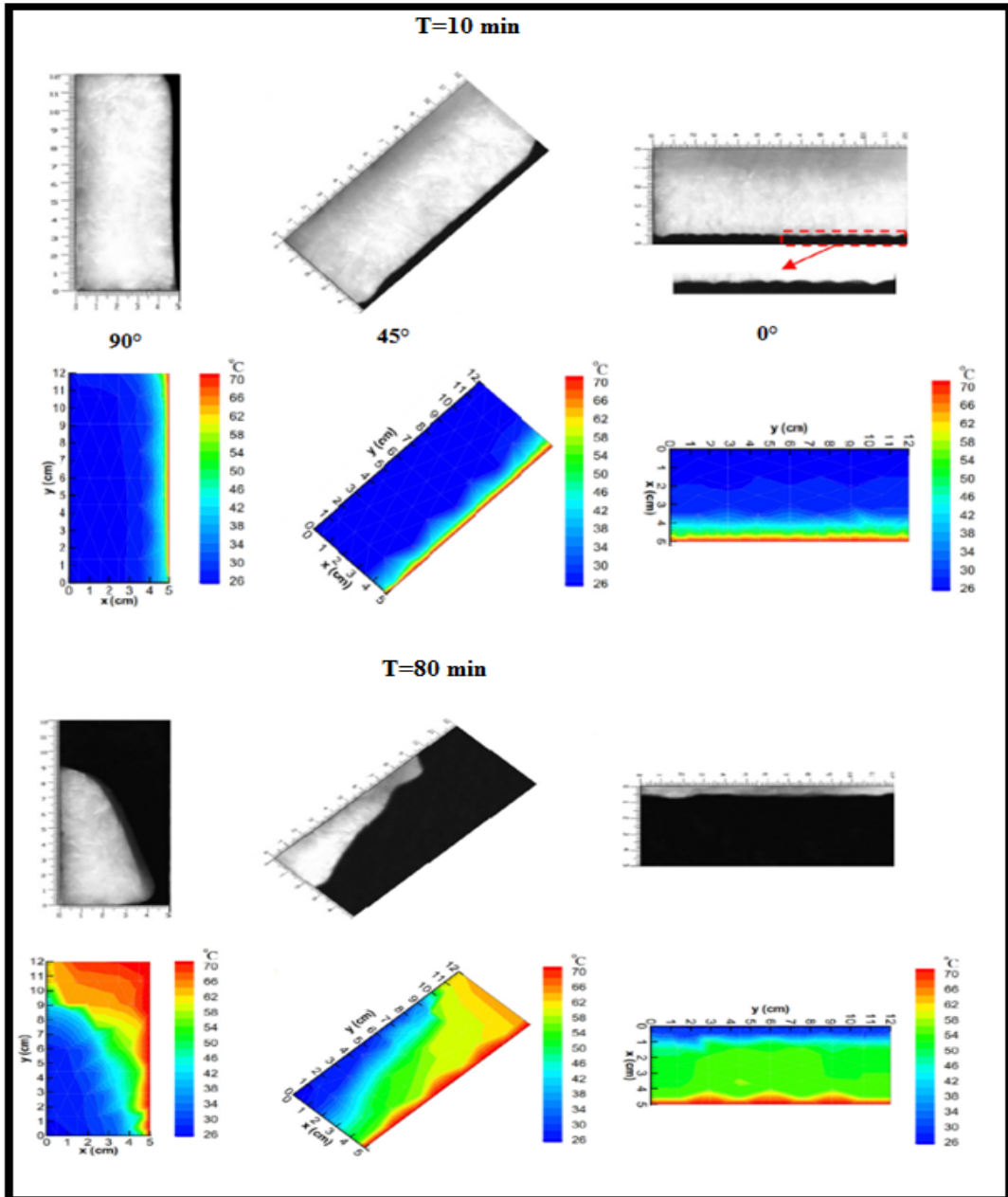


Fig I.13. Evolution de front de fusion des différents angles d'inclinaison

M. Moussa et al [13] ont fait une étude sur un dispositif expérimental destinée à l'analyse de processus de la fusion de la paraffine contenu dans une mousse métallique remplis dans un bac chauffé par le côté gauche pour voir l'effet de changement de la phase de la mousse utilisé (cuivre, Nickel, aluminium) et de la densité des pores (5,10,20,40).

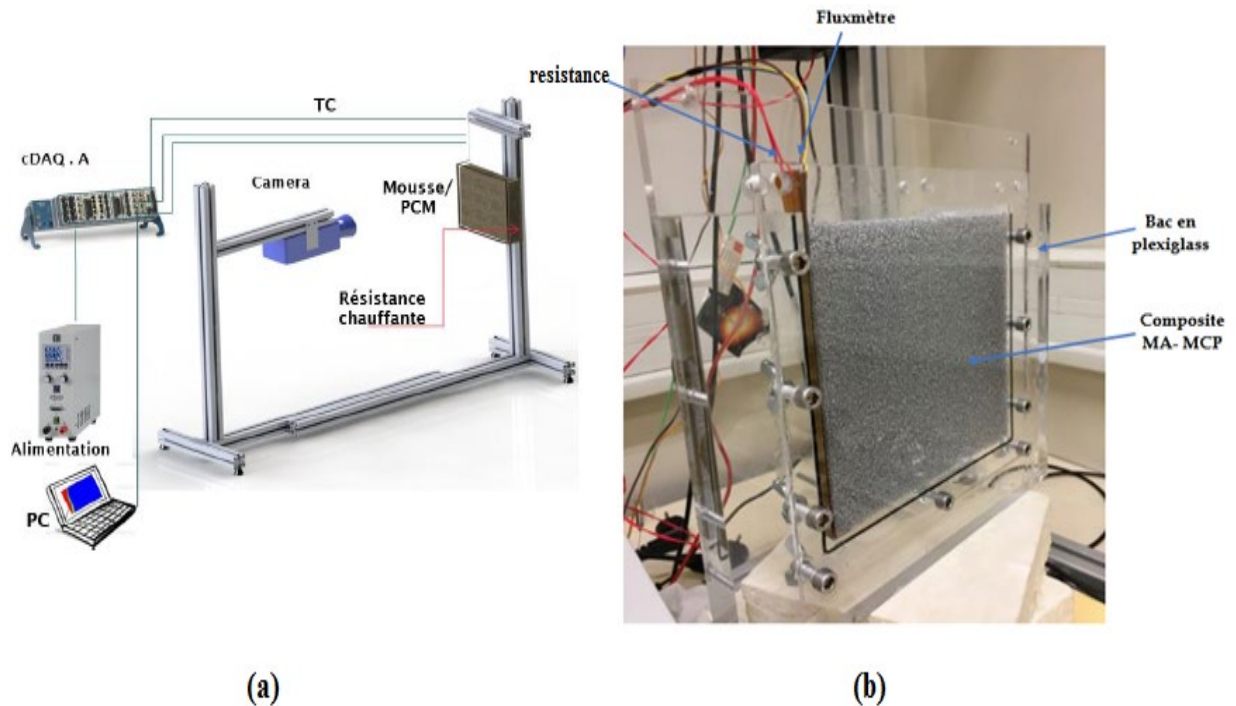


Fig I.14. (a) Schéma de dispositif expérimentale, (b) mélange mousse/ paraffine remplie dans le bac

Pour le type de mousse il est observé que le composite cuivre/MCP présente une cinétique de fusion plus rapide que le composite Nickel/MCP. Il est évident que l'ensemble du MCP présent dans la mousse de cuivre est fondu après environ 1890 secondes, tandis que seulement 60 % dans la mousse aluminium et 37 % dans la mousse de nickel.

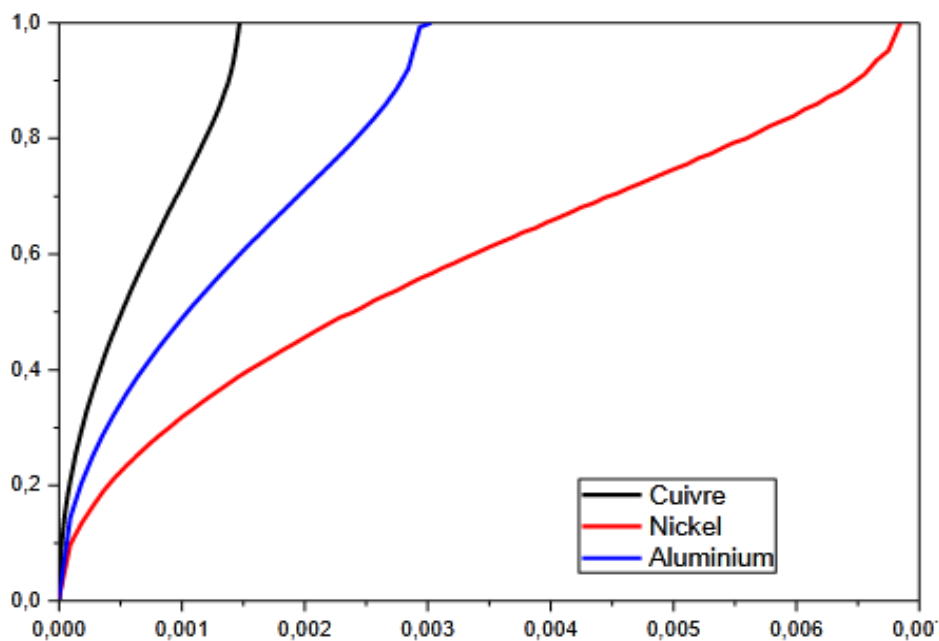


Fig I.15. Effet de différent mousse utilisé sur la fusion du MCP

D'autres parts une augmentation de la fusion du MCP en fonction de la densité des pores. Effectivement, une densité élevée des pores implique une surface de contact élevée, ce qui favorise un échange d'énergie plus efficace entre le MCP et la mousse métallique.

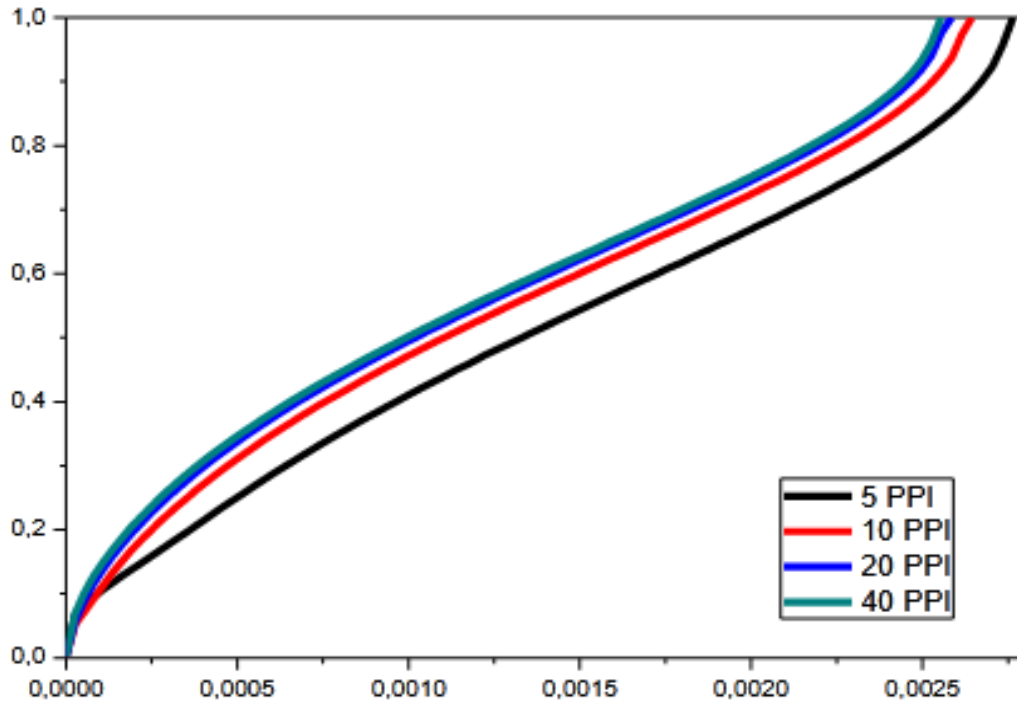


Fig I. 16. Effet de la densité des pores sur le temps de fusion

T. Motmans et al [14] ont traité le stockage d'énergie thermique de six types de roches d'origine alpine dans un lit compacté à haute température. Les roches ont été chauffées dans des fours de laboratoire à des températures allant d'environ 100 °C à 600 °C, avec une vitesse de chauffe de 2 à 6 °C/min., respectivement. Le cycle thermique a été observé comme entraînant une réduction de la capacité thermique spécifique et une augmentation de la porosité des roches. Ainsi, on considère que les roches mafiques, felsiques, la serpentinite et le conglomérat riche en quartz sont des matériaux de stockage adéquats.



Fig I.17. Changement de l'état des roches avant et après 20 cycles thermiques

Shuai et al [15] ont présenté une étude numérique sur l'impact de l'ajout des pierres naturelles sur le transfert de chaleur d'un MCP (La paraffine RT60). Dans leur étude, ils utilisent différents types de pierres (basalte, granit, gneiss, marbre, quartzite et grès). Les tailles sont de 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm et 40 mm, ainsi que les hauteurs de remplissage des pierres (46,0 mm, 62,9 mm, 82,7 mm, 97,0 mm et 112,0 mm). Dans l'unité coque-tube, les pierres sphériques sont disposées tangentiellement les unes aux autres, avec un diamètre intérieur de 40 mm et un diamètre extérieur de 120 mm.

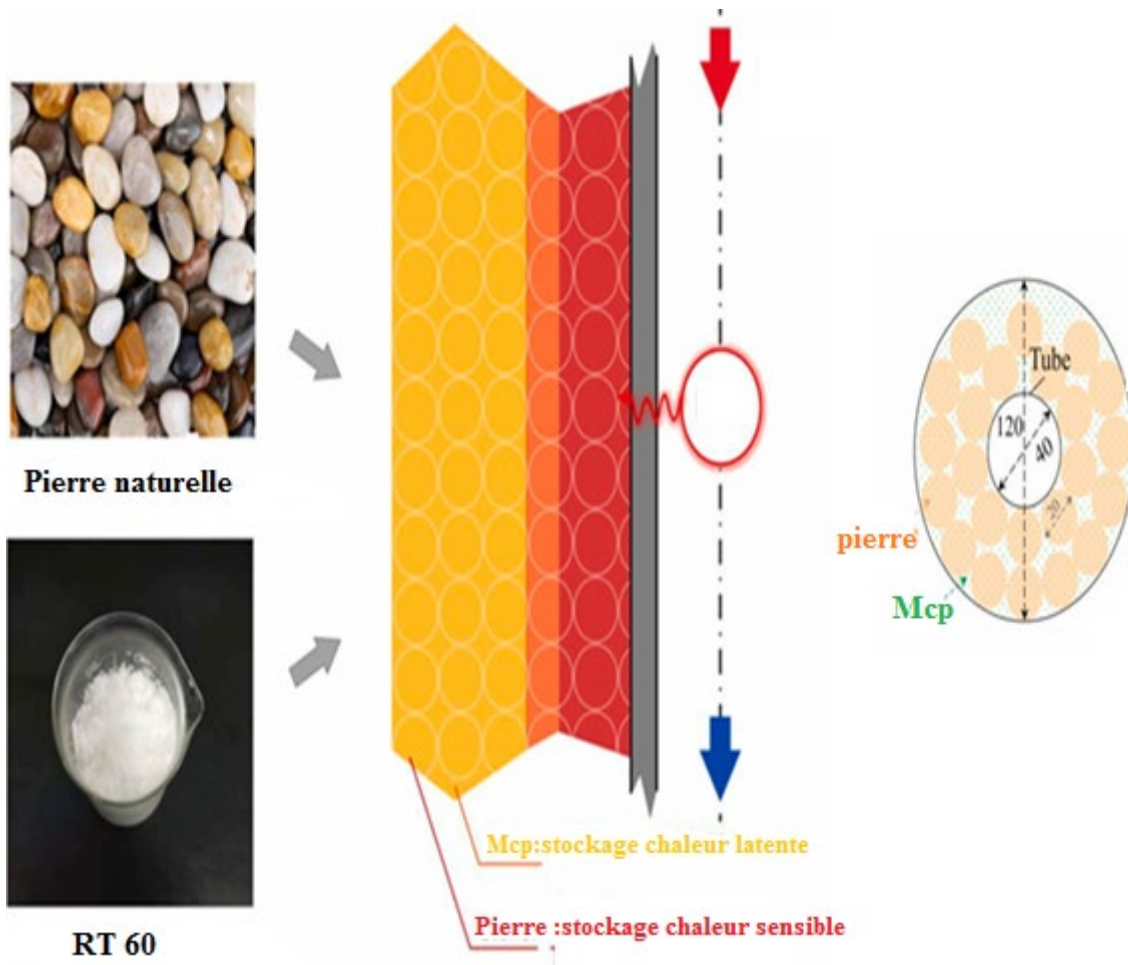


Fig I.18. Schéma de la configuration hybride de stockage d'énergie thermique

Ils ont conclu que :

- Le temps de stockage du boîtier sans pierres est réduit de 72,1 %, 73,2 %, 73,6 %, 73,9 %, 74,7 % et 75,0 % pour le basalte, le quartzite, le grès, le marbre, le gneiss et le granit. Les meilleures performances d'amélioration du transfert de chaleur sont obtenues grâce à la diffusivité thermique du granit, ce qui entraîne une augmentation du taux de fusion de 108 %. La grande capacité énergétique du basalte est due à sa chaleur spécifique élevée, ce qui améliore le taux de fusion de 87 % par rapport à la situation sans pierres.
- La hauteur de remplissage entraîne une diminution de l'énergie stockée par le MCP, tandis que celle des pierres augmente. Avec la hauteur de remplissage, l'énergie totale diminue considérablement, tandis que l'énergie varie de façon insignifiante. Il y a une augmentation de 246 % du taux de stockage énergétique avec une hauteur de remplissage de 112,0 mm.

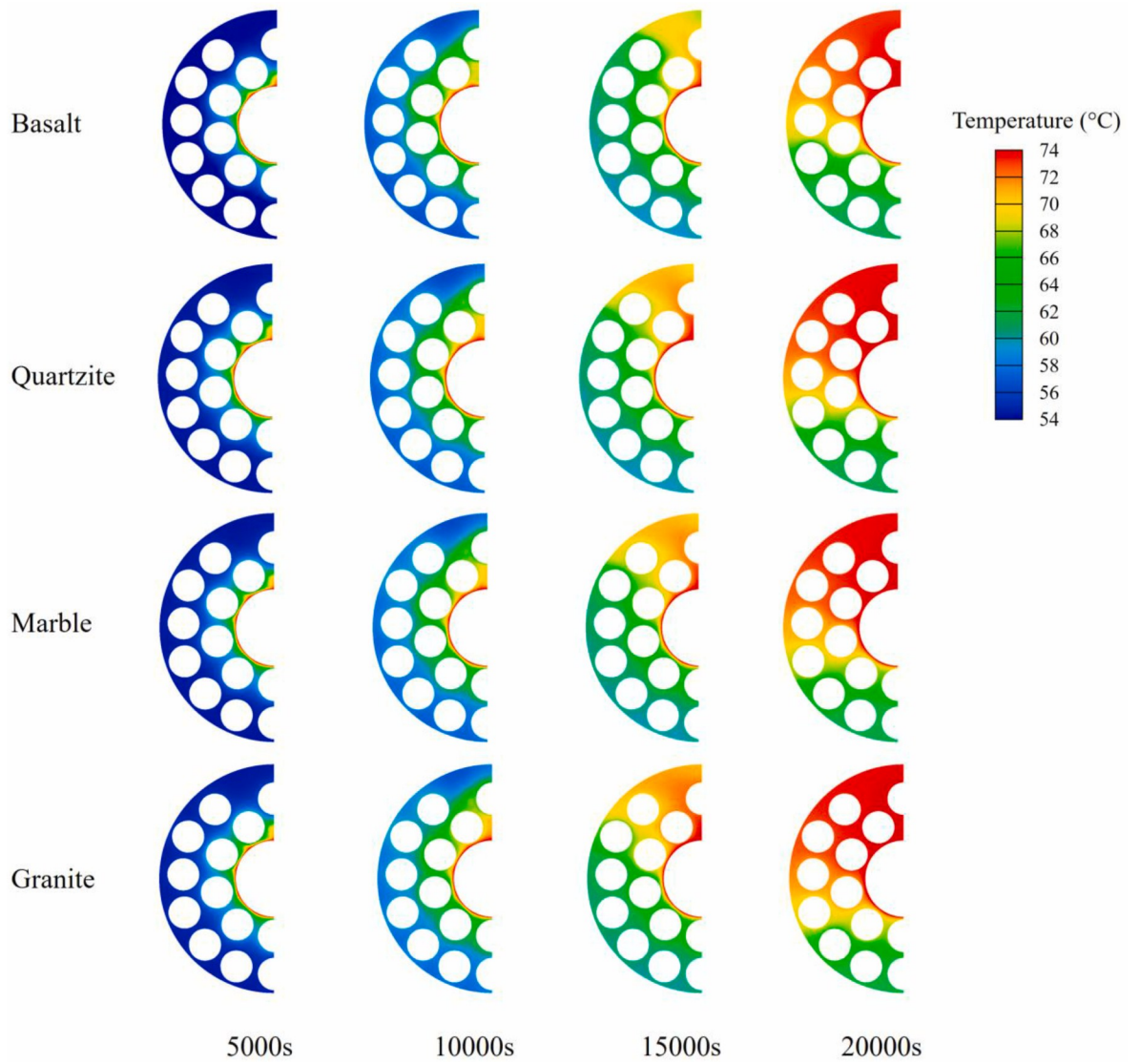
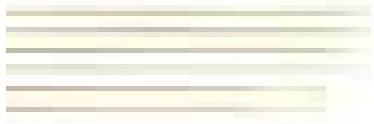


Fig I.19. Distribution de la température du MCP avec des différents types de pierres



**CHAPITRE II :
GÉNÉRALITÉ SUR
LE STOCKAGE
THERMIQUE**



II.1. Introduction :

Le stockage thermique implique la conservation de l'énergie thermique dans diverses formes en vue de son utilisation future. Ce processus vise à absorber, conserver et libérer de la chaleur de manière régulière. [16]

II.2. Etapes de stockage thermique :

- **Absorption de chaleur** : Le processus commence par capter la chaleur provenant de diverses sources d'énergie, notamment le soleil, la chaleur perdue des processus industriels et la chaleur émise par les systèmes de chauffage [16]
- **Stockage de chaleur** : Après absorption, la chaleur est stockée dans des matériaux spéciaux conçus pour le stockage de chaleur. Cette substance peut se présenter sous forme solide, liquide ou à changement de phase selon la méthode de stockage utilisée [16]
- **Conservation de chaleur** : Pendant la phase de stockage de chaleur, le matériau de stockage de chaleur retient à chaleur, donc une bonne isolation réduit les pertes de chaleur [16]
- **Libération de chaleur** : Élimine la chaleur du matériau de stockage thermique selon les besoins. Cette libération peut être obtenue en inversant le processus initial d'absorption de chaleur ou en utilisant la chaleur stockée pour chauffer un liquide (généralement de l'eau ou de l'air), puis en l'utilisant pour le chauffage ou bien d'autres applications thermiques [16]

II.3. Types de stockage thermique

L'énergie thermique représente la somme des énergies potentielles et cinétiques des atomes et des molécules constituant une substance. Cette énergie thermique se manifeste dans la substance sous forme de vibrations atomiques et moléculaires.

Par conséquent, l'énergie thermique peut être stockée en modifiant l'énergie interne d'un matériau, que ce soit sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente, ou de réactions thermochimiques

On distingue trois types de stockage d'énergie thermique [16]

Une illustration des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est présentée dans **la figure II.1**

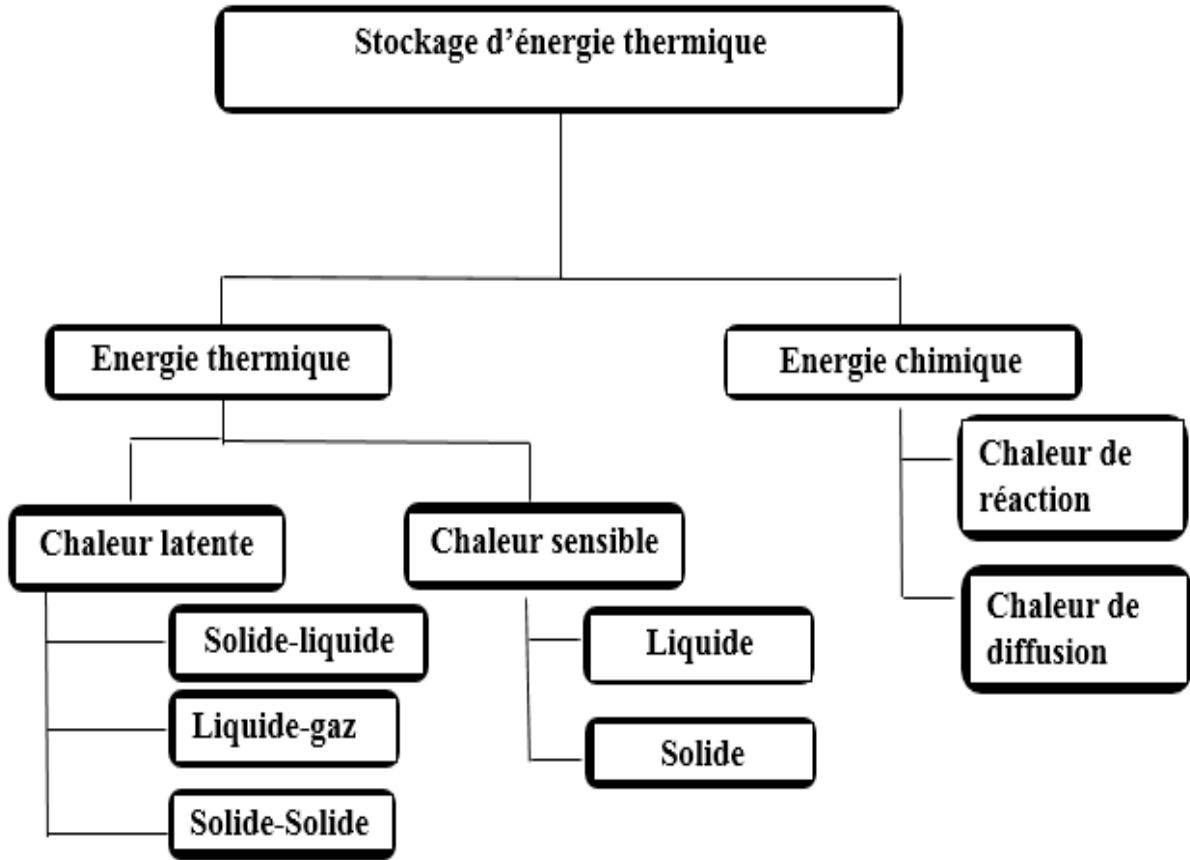


Fig II.1. Différent Types de stockage thermique

II.3.1. Stockage de l'énergie par chaleur sensible :

Le stockage par chaleur sensible repose sur la modification de l'enthalpie générée par un changement de température d'un matériau inerte, qu'il soit solide, liquide ou gazeux. Actuellement, le stockage par chaleur sensible est disponible pour des applications industrielles, des chauffe-eau résidentiels et du stockage d'eau chaude dans les réseaux de chauffage urbain. En outre, les matériaux de construction thermiquement très performants peuvent offrir un stockage d'énergie important sur une période de plusieurs mois, L'inconvénient principale du stockage thermique sensible est la faible densité énergétique et la perte d'énergie thermique à n'importe quelle température [16] ,la quantité d'énergie requise pour chauffer un matériau (un objet) de masse m à pression constante de la température $T1$ à la température $T2$ est déterminée par sa capacité calorifique massique C_p , et est exprimée par la relation suivante (II.1):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{II.1})$$

Q : la quantité d'énergie stockée (J)

m : la masse du matériau de stockage (kg)

C_p : la chaleur spécifique du matériau de stockage (J.kg⁻¹/k)

ΔT : la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (k)

Il est donc recommandé d'utiliser des matériaux ayant une forte capacité thermique pour stocker un maximum de chaleur, tout en prenant en compte la compatibilité avec le récipient de stockage et des coûts raisonnables. Le classement des types de stockage par chaleur sensible dépend principalement de l'état physique du matériau. Ainsi, on peut distinguer :

- Le stockage par fluide (tel que l'eau, l'huile ou les sels fondus)
- Le stockage par solide (incluant la pierre, les métaux, etc.)
 - Dans le stockage **solide**, le matériau de stockage est conditionné sous forme de granulés solides ou de lits matriciels, et l'échange thermique s'effectue soit par transfert de chaleur à travers un échangeur thermique, soit à travers un fluide caloporteur qui pénètre directement dans le matériau de stockage sous forme poreuse. Le stockage dans ce cas est appelé régénérateur.
 - Si le fluide caloporteur est un **gaz** et que sa capacité calorifique est très faible par rapport au matériau de stockage, sa contribution au stockage est négligeable.
 - Si le fluide caloporteur est un **liquide**, sa contribution au stockage n'est pas négligeable et le système est dit dual. Le solide le plus couramment utilisé est le béton en raison de son faible coût, de sa facilité de manipulation et de disponibilité, de ses propriétés de résistance mécanique et, surtout, de sa capacité thermique élevée. Les réservoirs de stockage de liquides profitent de la structure naturelle en couches du matériau pour permettre de stocker des liquides chauds et froids dans le même réservoir [17]
 - Le type de réservoir est appelé thermocline, avec une couche à haute température au sommet, une couche à basse température au sommet et une zone de gradient de température entre les deux. C'est précisément cette zone que l'on appelle la thermocline. Le gradient entre les couches chaude et froide dépend des propriétés du matériau de stockage et du débit du fluide caloporteur circulant au sein du système de stockage.

✚ Métaux liquide :

Les métaux liquides sont souvent utilisés dans les systèmes de transfert de chaleur sous forme sensible. Leur capacité à conduire la chaleur est particulièrement avantageuse dans les échanges thermiques. De plus, ces métaux liquides ont tendance à avoir une capacité élevée de restitution de chaleur en raison des mouvements convectifs à l'intérieur du liquide. Cependant, cette caractéristique spécifique des métaux liquides entraîne une autodécharge plus importante, ce qui peut réduire légèrement leur efficacité pour une puissance donnée. Les principaux liquides utilisés dans ce contexte sont l'eau et les huiles thermiques. Les métaux liquides, en raison de leur état fluide, permettent une meilleure intégration thermique et une vitesse de stockage de chaleur plus élevée, ce qui les rend plus efficaces pour le transfert de chaleur dans certains cas.

❖ L'eau :

L'eau est considérée comme une matière favorable pour le stockage d'énergie en raison de sa chaleur spécifique élevée (par rapport à autres supports de stockage de chaleur sensible) et taux de capacité élevé. On distingue différents types de stockage de l'eau tel que les réservoirs Les nappes aquifères naturelles en sous-sol...etc.

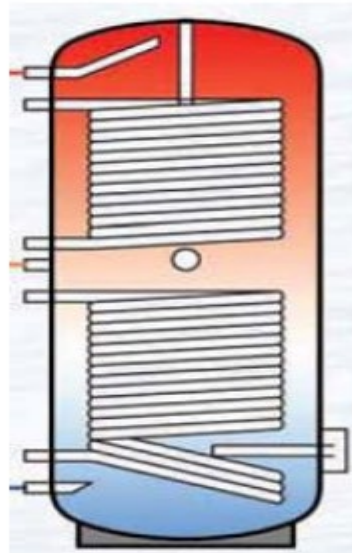


Fig II.2. Stratification thermique dans un réservoir d'eau chaude

L'expérimentation a donné des résultats concluants dans certaines situations, en raison des nombreux avantages qu'elle présente. Cependant, quelques inconvénients ont conduit à l'exploration d'autres matériaux pour être utilisés dans certains systèmes. Étant l'un des

matériaux les plus préférés pour le stockage thermique, l'eau a ses propres avantages et inconvénients, comme résumé dans le tableau ci-dessous :

Tableau II. 1 : Avantages et les inconvénients d'utilisation de l'eau

<i>avantages</i>	<i>inconvénients</i>
Haut efficacité	Autodécharge élevée
Chaleur spécifique élevée	Pression de vapeur élevée
Faible cout	Corrosif a certain contenant
La disponibilité	

❖ **Huile :**

Les matériaux liquides les plus couramment utilisés, après l'eau, pour un système de stockage thermique sous pression basse de vapeur, ont la particularité de permettre une utilisation à des températures de fonctionnement plus élevées. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le Therminol et la Caloria-HT. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40 % plus élevée que celle de l'eau. Elles présentent également d'autres avantages et inconvénients, comme résumé dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Avantages et les inconvénients d'utilisation de l'huile

<i>Avantages</i>	<i>inconvénients</i>
Chaleur spécifique élevée Très dispendieux	Très dispendieux
Non-corrosif aux contenants	Toxique pour l'environnement
Disponible	Inflammable
Faible pression de vapeur	
Température de fonctionnement élevée	

✚ Métaux solides

La fonte, le sable de fonderie et d'autres matériaux sont souvent préférés pour leurs propriétés de stockage thermique. Un autre candidat de premier choix est la forme de lit de roches, où la chaleur peut être stockée en circulant directement à travers les roches ou bien via un échangeur thermique. Ils sont souvent choisis pour leur conductivité thermique élevée, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une dissipation de chaleur à des températures très élevées. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont des exemples potentiels de tels matériaux. Leur densité énergétique est généralement plus élevée que celle de l'eau. Cependant, la fonte est souvent coûteuse, tandis que le sable de fonderie est généralement moins cher. Un autre matériau à considérer est la roche. Lorsqu'elle est utilisée sous forme de lit de pierre, elle peut stocker efficacement l'énergie thermique, permettant au fluide caloporteur de circuler entre les pierres. Les roches présentent une excellente capacité de stockage thermique et peuvent résister à des températures élevées. Leur utilisation est courante dans de nombreuses applications nécessitant une conductivité thermique élevée

Pour les Roches, béton et briques En raison de leurs caractéristiques similaires, les roches, le Béton et les briques constituent une catégorie de matériaux ayant un fort potentiel d'utilisation Dans un système de stockage thermique sous forme sensible. Le tableau suivant résume leurs Avantages et inconvénients

Tableau II. 3 : Avantages et les inconvénients d'utilisation des métaux solides

<i>avantages</i>	<i>inconvénients</i>
Excellent stabilité cyclique	Faible chaleur spécifique
Chimiquement stable	Faible conductivité thermique
Disponible	
Abordable	

Les propriétés de certaines substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 4 : Propriétés de certaines substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible

Matériaux	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	C [J/m ³ .K]
Fer	7900	452	3.57
Aluminium	2710	869	2.43
Grés	2200	712	1.57
Béton	200	880	1.76
Bois	700	2390	1.67
Briques	1800	837	1.51
Argile	1458	879	1.28
Eau	988	4182	4.17
Acier	1458	879	1.28
Verre	2710	837	2.27

II.3.2. Chaleur Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :

Le stockage de la chaleur latente implique d'élever la température d'une substance jusqu'à ce qu'elle subisse un changement de phase, c'est-à-dire passe de l'état solide à liquide, liquide à gaz, ou encore d'une transition solide-solide. Lorsque la substance atteint ce point de transition de phase, elle absorbe une quantité de chaleur nécessaire pour effectuer cette transformation, Cette quantité de chaleur est appelée chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. Cependant, lorsque le liquide ou le gaz se refroidit, il reprend sa forme solide ou liquide, et ainsi libère sa chaleur latente. [18]

Ce principe est utilisé dans divers domaines, tels que le stockage de l'énergie solaire, la régulation thermique des bâtiments, et le contrôle de la température dans les équipements électroniques et les véhicules. Les matériaux à changement de phase les plus couramment employés pour le stockage de chaleur latente comprennent la paraffine, les hydrates de sel et certains composés organiques. La quantité de chaleur stocké et libérée varie en fonction de la masse du matériau et de la chaleur latente, comme indiqué par l'équation (II.2) :

$$Q(\text{Latente}) = m \cdot L_f \quad (\text{II.2})$$

Avec :

m : masse du matériau de stockage (kg).

L_f : chaleur massique de changement d'état du matériau (J/kg).

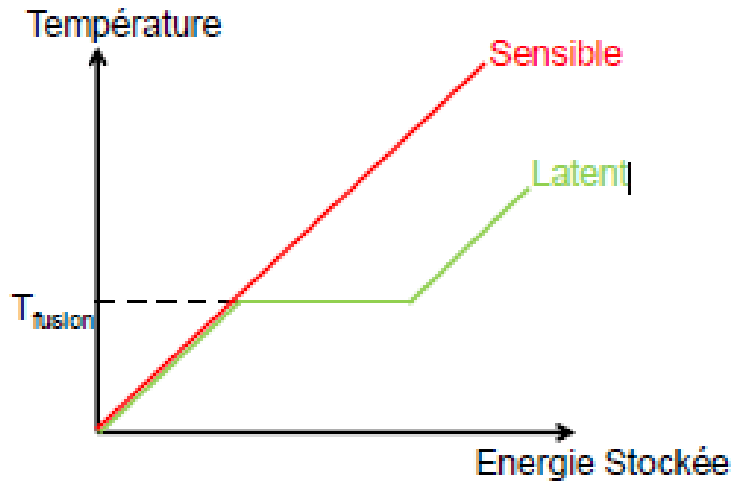


Fig II.3. Evolution de la température en fonction de l'énergie stockée
stockage latent / stockage sensible

Lorsqu'on chauffe le matériau, il commence par le stockage d'une quantité d'énergie sensible, ce qui lui permet d'atteindre d'abord la température de changement de phase. À ce moment, l'énergie fournie cesse de simplement d'augmenter sa température et plutôt utilisée pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de manière isotherme tant que le matériau reste pur et se trouve sous forme de chaleur latente. Une fois la transformation achevée, la température recommence à augmenter proportionnellement à l'énergie fournie, jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de stocker uniquement la chaleur latente, car pour atteindre le point de changement de phase, le matériau doit inévitablement subir une augmentation de température, ce qui entraîne le stockage d'une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être représentée, dans le cas de la transition solide-liquide, par l'équation (II.3) :

$$E = \int m \cdot cp_{(solide)} \cdot dT + m \cdot L_f + \int m \cdot cp_{(liquide)} \cdot dT \quad (II.3)$$

E : la quantité d'énergie stockée (J)

m : la masse du matériau de stockage (kg)

$Cp_{(solide)}$ et $Cp_{(liquide)}$: sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J/kg.K)

L_f : la chaleur latente (J.kg⁻¹).

dT : la variation de la température durant l'étape de charge (K)

Les substances employées pour le stockage thermique latent sont désignées sous le nom des Matériaux de Changement de Phase (MCP). Ces MCP peuvent être utilisés pour leurs transitions solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz.

- **Changement de phase solide-solide** : Le plus facile à gérer est celui qui présente peu ou pas d'expansion de volume, ce qui réduit les risques de fuite et de surpression. Toutefois, il y a eu peu de matériaux identifiés, parfois parce que la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible par rapport à celle de transition solide-liquide, ou parfois parce que le matériau n'est pas thermiquement stable. [19]
- **Changement de phase liquide-gaz** : La chaleur latente de ces transitions est la plus importante, cependant, le changement considérable de volume lié à l'évaporation des liquides rend le stockage complexe et souvent inutilisable. D'où à l'exclusion de cette transition des systèmes de stockage latent. [19]
- **Changement de phase solide-liquide** : La majorité des situations impliquent l'utilisation du processus de changement de phase solide-liquide en raison de la faible expansion volumétrique. Dans ce processus, la fusion est employée pour conserver la chaleur et la solidification pour la libérer. [19]

Les systèmes de stockage de chaleur latente sont affectés sur leur capacité de stockage. Par : Chaleur spécifique dans les phases solide et liquide.

- Variation entre la température initiale et la température de fusion.
- Variation entre la température de fusion et la température finale.

Pendant la transition de phase, les MCP stockent de l'énergie sous forme de chaleur sensible dans les phases solide et liquide, ainsi que de chaleur latente. On peut calculer la quantité d'énergie stockée de manière mathématique par l'équation (II. 4) :

$$E = \int_{T_1}^T m \cdot C_{ps} \cdot dT + m \cdot L_f + \int_{T_1}^T m \cdot c_{pL} dT \quad (\text{II. 4})$$

Dans l'équation précédente, on peut observer trois éléments. La première partie correspond au stockage de chaleur sensible dans la phase solide avant que la température de MCP atteigne la température de changement de phase, la deuxième partie correspond à la chaleur latente de changement de phase et la troisième partie correspond au stockage de chaleur sensible dans la phase liquide.

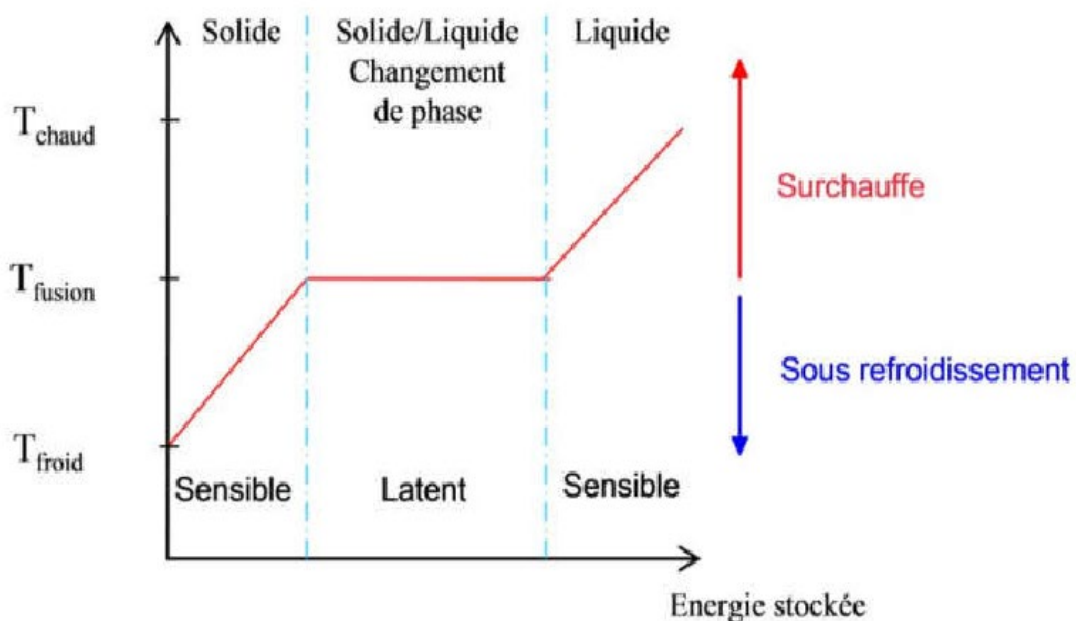


Fig II.4. Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente

➤ **Inconvénients technologiques du stockage par chaleur latente :**

- La faible conductivité thermique, qui signifie que la chaleur se déplace lentement à travers le matériau (avec $\lambda \ll 0,5 \text{ W/m.K}$), oblige à avoir de grandes surfaces d'échange et limite les vitesses aux quelles la chaleur peut être chargée ou déchargée.
- Le temps pendant lequel la chaleur peut être stockée est limité à cause des pertes thermiques.
- Il y a une limite à la température jusqu'à laquelle le matériau peut fondre.
- Le coût est relativement élevé par rapport au stockage qui dépend uniquement de la chaleur sensible

➤ **Avantages de stockage par chaleur latente :**

- Les MCP peuvent stocker entre 5 et 14 fois plus d'énergie thermique que les matériaux de stockage de chaleur sensible.

- Présente une densité énergétique supérieure par rapport au stockage sensible de chaleur.
- Maintient une température de décharge stable.
- Reste stable sur le plan chimique.
- Non nocif pour la santé.

II.4. Matière changement de phase (MCP) :

Tout matériau qui peut modifier son état physique dans une plage de température définie est désigné comme un matériau à changement de phase (MCP). On peut estimer que cette plage se situe entre 10 et 80 degrés. Dans cette plage de température, la fusion/solidification demeure le changement de phase dominant. Il est possible d'atteindre naturellement ces températures et elles sont présentes partout dans notre vie quotidienne (température ambiante de la maison, température du corps humain, eau chaude domestique, etc.).

Ces substances peuvent conserver l'énergie sous forme de chaleur latente. Il est possible d'obtenir le stockage thermique latent du MCP en modifiant la phase, qu'elle soit solide-liquide, gaz-solide ou gaz-liquide. Cependant, la seule transition de phase employée dans le MCP est la transition liquide-solide. [20]

Effectivement, il est peu pratique d'utiliser les changements de phase gaz-liquide pour le stockage thermique en raison des volumes ou des pressions requises pour stocker les matériaux en phase gazeuse. La transformation thermique des transitions gaz-liquide est supérieure à celle des transitions solide et liquide.

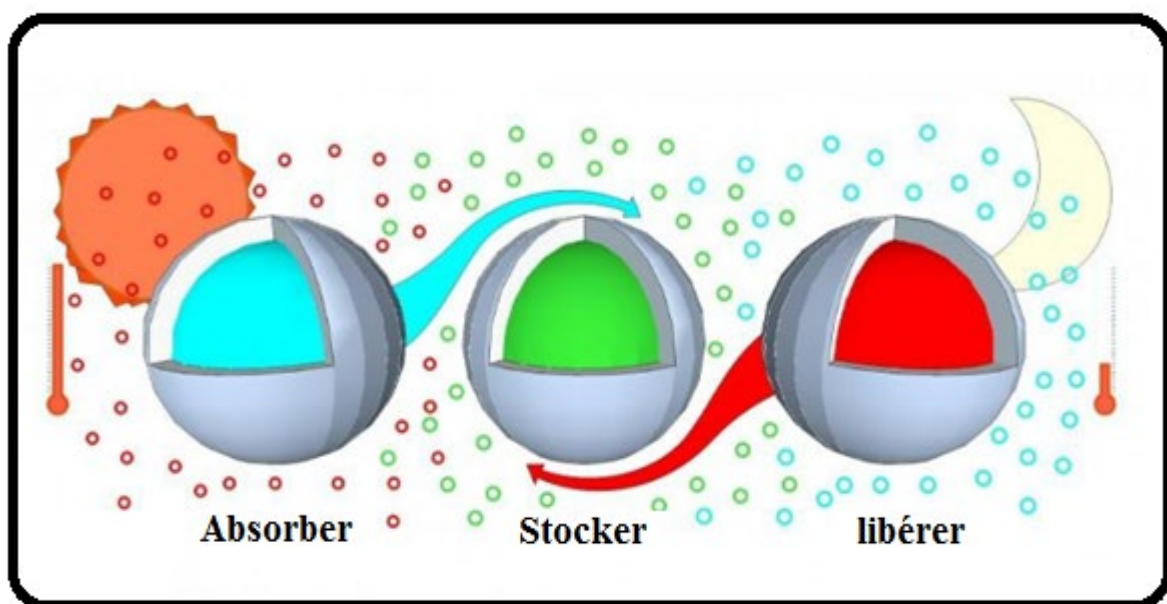


Fig II.5. Principe fonctionnement de MCP

II.4.1. Choix de MCP

Pour le choix des MCP on distingue différents critères :

✓ Critère thermique :

- La température à laquelle se produit la fusion est d'une grande importance dans la sélection d'un MCP pour une application pratique particulière.
- La chaleur latente de fusion doit être supérieure à 130 kJ / kg pour être compétitive.
- Une conductivité thermique élevée pour fournir des vitesses de charge et de décharge rapides.
- Une pression de vapeur basse pour minimiser les problèmes de pression des systèmes de stockage [21]

✓ Critères physiques

- Lors de changement d'état un faible changement de volume permet de dimensionner le stockage et de garantir sa résistance à la pression.
- Une masse volumique importante afin que le MCP puisse effectuer un stockage suffisant dans un volume minimal. [21]

✓ Critères cinétique

- Les vitesses de charge et de décharge sont rapides
- Il n'y a pas de surfusion qui entraîne une détérioration de la vitesse et perturbe la capacité de déstockage. [21]

✓ Critères chimique

- La stabilité du corps lors des variations de température et Les matériaux du réservoir de stockage doivent être en accord avec chaque phase afin d'éviter toute corrosion, réactivité chimique ou électrochimique. Il est donc nécessaire de s'assurer de la compatibilité du MCP avec les matériaux utilisés
- La stabilité chimique des corps avec le changement du temps et de température.
- Un taux de cristallisation satisfaisant, L'inflammabilité et non toxique. [21]

✓ Critères de cout et la disponibilité

- La disponibilité à grande échelle d'un MCP pour une application industrielle est cruciale. De plus, le prix est un facteur essentiel compte tenu des volumes impliqués, car il influe directement sur le temps nécessaire pour rentabiliser l'investissement, donc MCP doit être un cout raisonnable et disponible [21].

II.4.2. Différents types de MCP :

Il existe un grand nombre de substances chimiques pouvant être identifiées en fonction de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, à part celles dont le point de fusion se situe dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, la plupart ne répondent pas aux autres critères nécessaires pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur. Certains matériaux peuvent avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour être des supports de stockage thermique idéaux. Cependant, ils présentent souvent des inconvénients, comme une faible conductivité thermique des MCP ou une cristallisation excessive dans le matériel de stockage. Ces problèmes peuvent être atténués en ajoutant à MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié. [22]

Les MCP peuvent être classés selon leur nature chimique en trois grandes catégories :

- Les **composés organiques** : paraffines, corps non paraffinés, polyalcools.
- Les **composés inorganiques** : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- Les **eutectiques** : composés de corps inorganiques et/ou organiques.

Ces matériaux sont utilisés en mettant en œuvre des techniques adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été utilisées pour augmenter la conductivité thermique. La surfusion peut être évitée en ajoutant un agent de nucléation, et la fusion non congruente peut être maîtrisée en utilisant un gélifiant approprié.

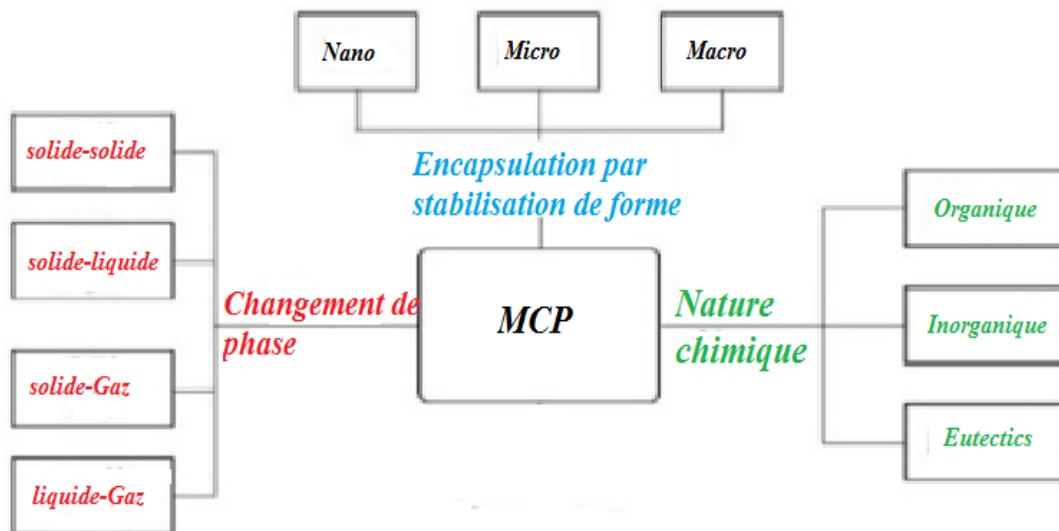


Fig II.6. Classification des MCP [23]

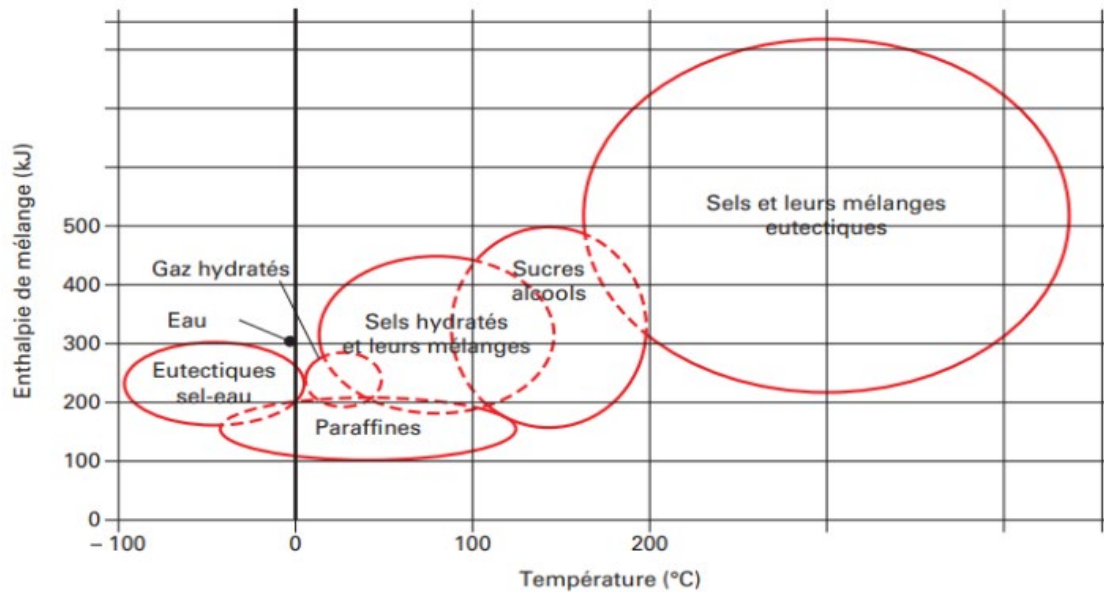


Fig II.7. Classification des MCP selon l'enthalpie de mélange

II.4.2.1. MCP inorganiques :

La plage de température des matériaux inorganiques varie entre -100 °C et +1000°C. Ils se composent principalement de sels, d'hydrates de sels et de métaux. Les premiers MCP utilisés pour stocker de l'énergie thermique par changement de phase sont les hydrates de sels. Il s'agit de sels inorganiques à base d'eau, obtenus par mélange d'un sel avec une quantité d'eau spécifique. Ils sont caractérisés par une densité énergétique élevée, environ deux fois supérieure à celle des MCP organiques, leur expansion volumique est faible lors du changement de phase et leur conductivité thermique est élevée. La fusion est nette (plage de fusion étroite) ils sont inflammables et ont un coût admissible et disponible [24]

❖ Hydrates de sels :

Sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau, avec une formule générale $AB \cdot nH_2O$. Ils sont caractérisés par les propriétés suivantes [25] :

- Haute conductivité thermique
- Enthalpie de fusion élevée

❖ Sels :

On considère les sels comme des composés ioniques neutres créés à partir de cations et d'anions. Généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon le type ont présentés par les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques. Quelques exemples de sels sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau II 5 : Caractéristiques thermo physiques de certains sels

Nom	T _{fusion} [°C]	λ [W/mK]	c _p [J/kg.K]	ρ [kg/m ³]
H105	125	0.5	1500	1 700
LiNO3	252	1.4	–	1 800
NaN03	306	0.7 – 0.3	–	1 900

❖ **Métaux :**

Les métaux comprennent principalement les métaux ayant un point de fusion bas. Ce type de MCP n'a pas encore été sérieusement envisagé pour des applications de stockage thermique en raison des contraintes de poids. Le **Tableau II. 1** présente les caractéristiques thermo physiques de certains métaux.

Tableau II 6 : Caractéristiques thermo physiques de certains métaux

	T _{fusion} [°C]	L _f [KJ/Kg]
K2HP046H2O	14	109
LiNO32H2O	30	296
CaCl22H2O	29,8	109
KFe(SO4)212H2O	33	173
CaNO34H2O	47	153

II.4.2.2. MCP organique

Les MCP organiques se divisent en deux catégories principales : les paraffines et les non-paraffines. Les paraffines sont des produits dérivés de la distillation du pétrole. Elles sont composées d'un mélange d'alcanes de C₁ à C₂₄, avec une formule chimique générale

C_nH_{2n+2} et une formule développée $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$. Les paraffines de C_5 à C_{15} sont liquides, tandis que celles au-delà sont des solides cireux.

Les paraffines adaptées au stockage thermique sont généralement solides à température ambiante et sont qualifiées de cires paraffine. Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Malgré certaines caractéristiques bénéfiques telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation, les paraffines présentent également des aspects indésirables

Diverses méthodes ont été développées pour accroître la conductivité thermique, dont l'utilisation de graphite expansé. **Zalba et al [26]** . Ont noté que les composites MCP-graphite offrent une conductivité thermique jusqu'à 100 fois supérieure à celle de la paraffine pure. **Le tableau II.7** répertorie quelques paraffines sélectionnées avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

Tableau II.7 : Exemples de quelque paraffine en fonction de nombre de carbone

Nombre d'atomes de carbone	T_{fusion} [°C]	L_f [KJ/Kg]
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	246
27	58.8	246
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.3	251

31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

En ce moment, les MCP présentent une conductivité thermique assez faible, d'environ 0,2W/(m.K) en moyenne, ce qui empêche un transfert thermique efficace. L'épaisseur de la phase (solide ou liquide) à traverser renforce ce phénomène, car lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique se produit à l'interface solide/liquide du MCP. Quand le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. À mesure que l'épaisseur de cette phase augmente, la résistance thermique qu'elle produit augmente également.

Pour améliorer la conductivité thermique, on peut introduire des particules métalliques dans les MCP organiques, utiliser des matrices métalliques, des tubes à ailettes ou encore les encapsuler dans de petites sphères



Fig II. 8. (a) Encapsulation de MCP (b): Configuration typique de capsules

❖ **Paraffines**

Les paraffines appartiennent à la famille des hydrocarbures saturés et présentent des propriétés très similaires. Les paraffines de nombre de carbones entre 5 et 15 ont considérée comme des paraffines liquides, tandis que les autres sont des solides cireux. Les matériaux polymères organiques sont Les paraffines cireuses les plus couramment employés dans le domaine du stockage de la chaleur. Elles sont essentiellement constituées d'hydrocarbures de

chaîne droite dont la température de fusion varie de 22 à 67°C. Elles proviennent de la distillation du pétrole et ne sont pas des produits purement pétroliés, mais constitués de divers hydrocarbures [27].



Fig II. 9. Paraffine en huile, encapsulées ou brutes

➤ **Avantages**

- Une valeur d’enthalpie très important entre 180 et 230 KJ/Kg par rapport des autres matériaux organiques de la valeur de 2.1KJ/Kg
- A des températures très élevée la pression de vapeur est très faible et la surfusion est presque nul donc on peut négliger
- Caractérise par la stabilité chimique mais il ne doit pas être en contact avec l’air pour éviter l’oxydation
- Les cires paraffiniques n’ont aucun impact négatif sur les plantes, l'eau ou les composés organiques. Elles sont non toxiques et sont entièrement recyclables. Aucun danger écologique ne se produit. [27]

➤ **Inconvénients :**

- La conductivité thermique des cires paraffinique est très faible (0.18-0.25 W/m. k) la moitié par rapport de hydrates salins cette diminution provoque un taux de stockage/déstockage très faible de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification
- Une expansion de volume très élevée ($\approx 15\%$)
- Densité très important ($\approx 800\text{kg/m}^3$) [27]

Tableau II 8. Exemples des MCP paraffines

	<i>Tétra- décane</i>	<i>Héxadécane</i>	<i>Octadécane</i>	<i>Eicosane</i>
Formule	C14H30	C16H34	C18H38	C20H42

$T_{\text{fusion}} [^{\circ}\text{C}]$	5.5	16.7	36.7	56/58
λ [W/ m.°C]	0.15	0.15	0.15	0.15
C [KJ/Kg °C]	2.07	2.11	2.16	2.21
μ [Kg/m ³]	825	835	814	856
ρ [Kg/m ³]	771	776	774	778
p_v [Pa]	133 à 75	133 à 105	133 à 75	133 à 100
σ [N/m]	27.4 10 – 3	3.4	27.4 10 – 3	–
ΔH_{fus} [KJ/Kg]	226	237	244	247

❖ **Non paraffiniques :**

On retrouve des alcools, esters, acides gras et glycols. Extrait a partir des huiles végétales ou des animaux, sa formule chimique générale du forme $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n \text{COOH}$ il ont considérée comme un matériaux compétent pour la construction des bâtiments [27].

➤ **Avantages :**

- Utilisé dans une grande plage de températures.
- Compatible avec les matériaux de construction classiques.
- Aucune ségrégation
- Stable chimiquement.
- Recyclable

➤ **Inconvénients**

- A l'Etat solide la conductivité thermique faible
- Inflammables

Tableau II 9. Exemples des MCP non- paraffines

Matériaux	Formule	$T_{\text{fusion}} [^{\circ}\text{C}]$	L_f (KJ/Kg)
Polyéthylène Glycol 600	$\text{H} (\text{OC}_2 \text{H}_2)_n \text{-OH}$	20-25	146

Acide Acétique	CH ₃ COOH	16.7	184
Acide Elaidique	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ - COOH	47	218
Acide Caprique	CH ₃ (CH ₂) ₈ - COOH	36	152
Acide Pentadécanoïque	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ - COOH	52.5	178
Acide L'aurique	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ - COOH	49	178
Tri Stéarine	(C ₁₇ H ₃₅ COO) ₃ C H ₅	56	191
Acide Palmitique	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ - COOH	55	163
Acide Myristique	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ - COOH	58	199
Acide Stéarique	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ - COOH	69.4	199
Acétamide	CH ₃ CONH ₂	8.1	241

II.4.2.3. MCP eutectique :

Un eutectique est une combinaison de deux substances pures ou plus (organique/organique, inorganique/inorganique et organique/inorganique) qui fond et se solidifie à une température constante, à la différence des mélanges ordinaires. Les eutectiques agissent comme des substances pures en ce qui concerne les changements de phase. Il y a peu d'utilisation de ces matériaux dans la construction de bâtiments, mais utilisable dans le stockage de l'énergie solaire [28].

Tableau II. 10 : Propriétés physiques des MCP eutectiques

<i>Eutectiques Inorganiques</i>	T _{fusion} [°C]	L _f (KJ/Kg)
49.3% Mg Cl. 6H ₂ O + 50.7 % Mg (NO ₃). 6H ₂ O	58	132.3

61.5% Mg (NO3). 6H2O + 38.5% NH4 NO3	51	131.1
Ca Cl2. 6H2O + CaBr2. H2O	14	140
58.3% Mg (NO. 6H2O3) 6H2O + 41.7% Mg Cl2	58	106
Eutectiques organiques		
Caprique – Laurique	18	120
acid Palmitique – Laurique	33	145
Acid Stéarique Laurique	34	150

II.4.3. Domaine d'utilisation des MCP

II.4.3.1. Stockage thermique solaire

c'est un source d'énergie continue et fiable fonctionne en absorbant la chaleur du soleil pendant les moments des forts ensoleillement et en la stockant pour une utilisation ultérieure,

- Les capteurs solaires captent les rayons solaires. Ils sont généralement placés sur les toits ou dans des endroits exposés au soleil, tels que les panneaux solaires ou les tubes à vide

L'absorbeur convertie de l'énergie solaire en énergie thermique

-le fluide caloporteur circule à travers le capteur pour récupérer de la chaleur générée

En utilisant des technique d'isolation pour minimiser les pertes thermiques

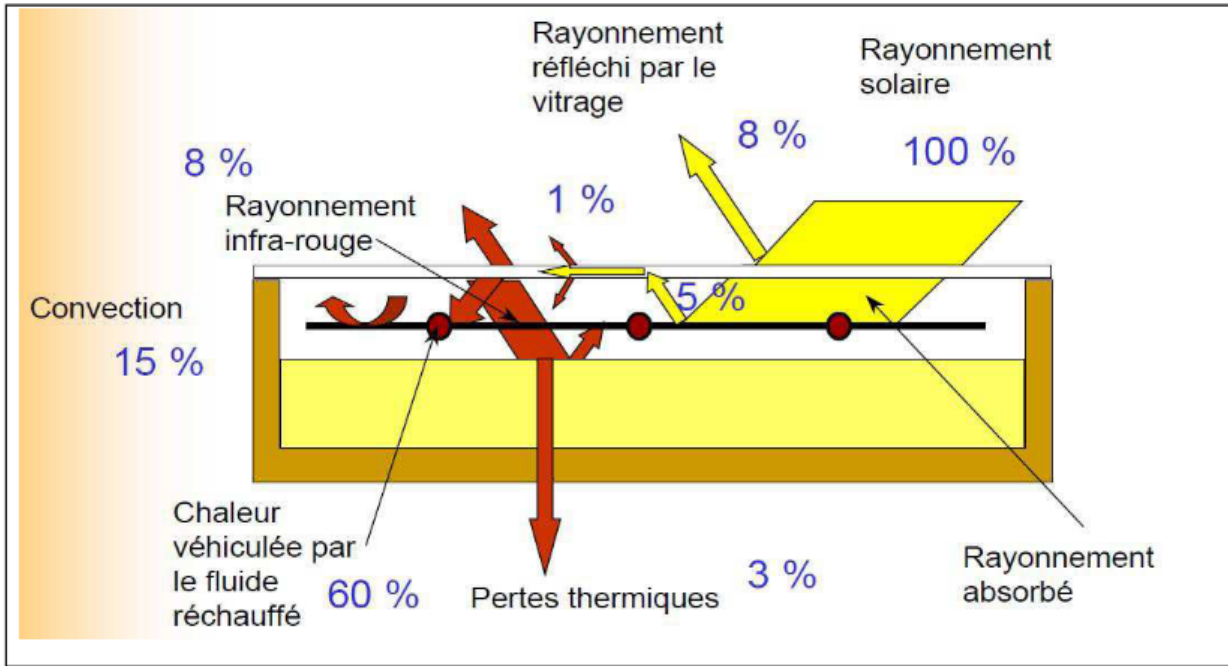


Fig II.10. Configuration de stockage thermique

II.4.3.2. Chauffage et refroidissement des bâtiments :

Les matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments sont conçus pour stocker et Réduisez les stocks d'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. [29]

Par exemple, les MCP peuvent être utilisés en les intégrant dans des boîtiers légers

Leur donnant la même inertie qu'un mur épais , la paroi réalisée par BASF contenant 2 cm de MCP a le même performance d'inertie thermique est meilleure qu'une brique ou un mur de 36 cm d'épaisseur Béton de 24 cm d'épaisseur ou de bois massif de 38 cm d'épaisseur

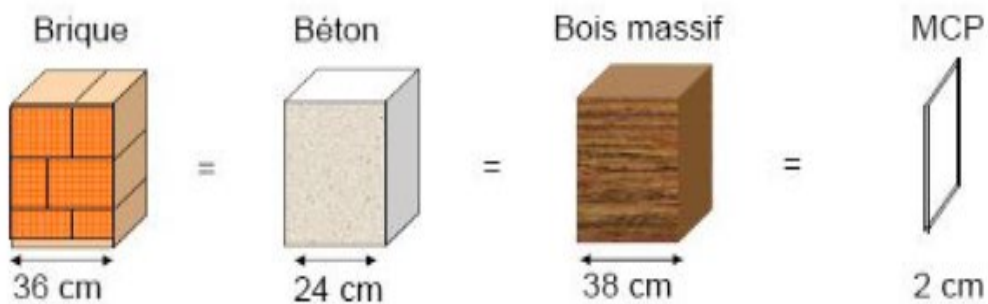


Fig II.11. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau

II.4.3.3. Applications industrielles :

Dans les processus industriels, les MCP peuvent être utilisés pour réguler précisément la température tels que la fabrication de produits chimiques la production alimentaire, ou les procédés de refroidissement. Pendant les périodes de fonctionnement à pleine capacité, les entreprises ont la possibilité de stocker la chaleur ou le froid supplémentaire afin de diminuer leurs dépenses énergétiques et d'améliorer leur efficacité interne. [30]

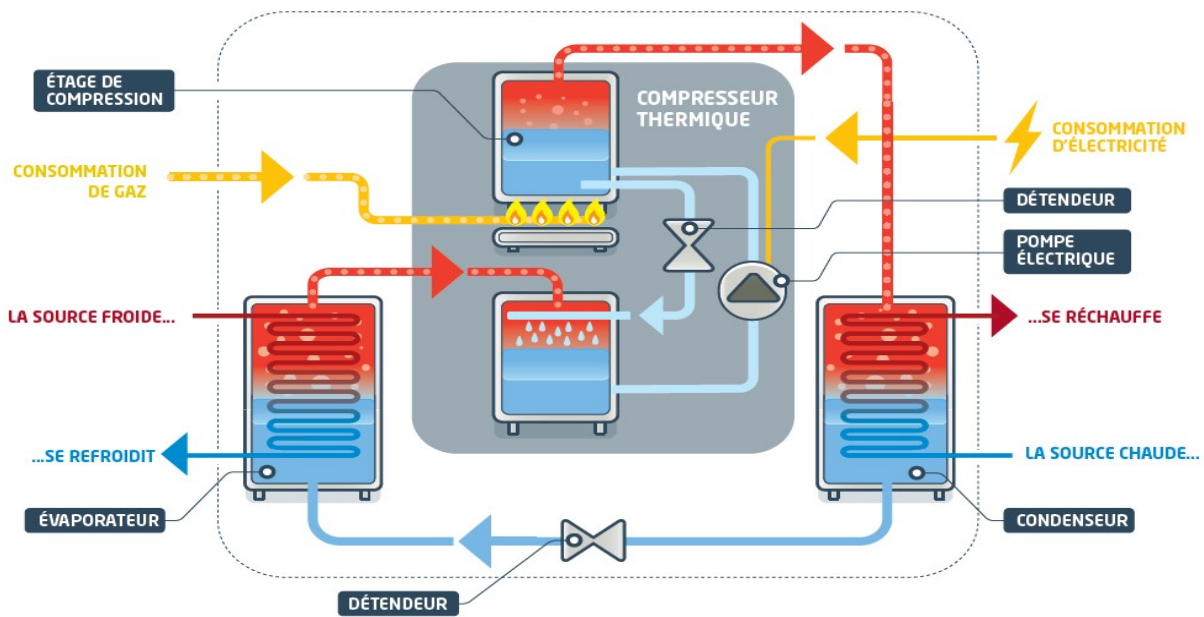


Fig II.12. schéma de la récupération de chaleur dans l'industrie

II.4.3.4. Refroidissement électronique :

Les MCP sont employés en tant que compléments des graisses thermiques.

Les matériaux composites sont utilisés tels quels ou sur un support, généralement en aluminium ou avec de la fibre de verre. Quand le matériau est chauffé, il devient liquide (généralement à une température de 51-60 °C) et deux phénomènes cruciaux se produisent :

- Le MCP « mouille » les surfaces baignées par le matériau, éliminant ainsi la résistance de contact. [31]

- Le MCP peut diminuer en fonction de la pression exercée et atteindre une valeur minimale. Étant donné que la résistance thermique est inversement liée à l'épaisseur du matériau et inversement liée à sa conductivité thermique, il est essentiel d'avoir un matériau dont l'épaisseur dépasse complètement les aspérités de l'interface et d'avoir un matériau avec la conductivité thermique la plus élevée possible.

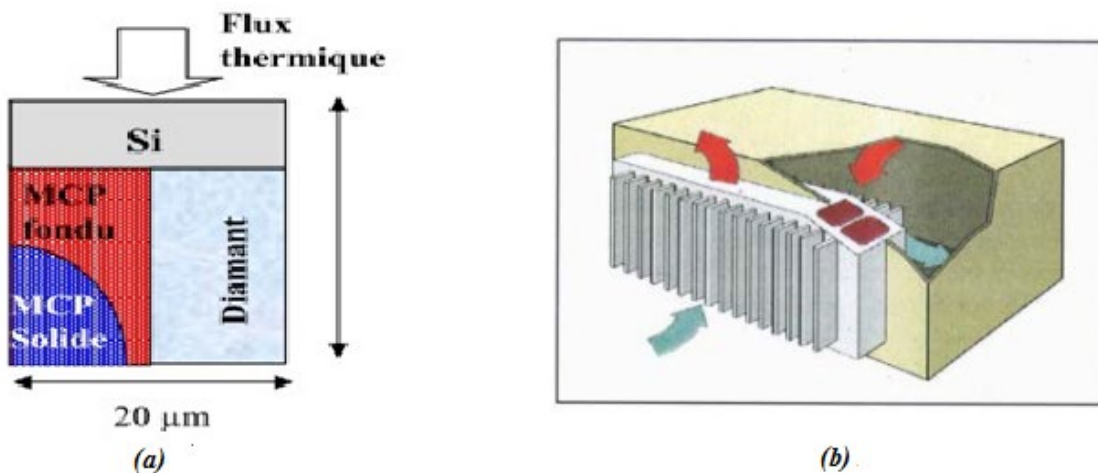
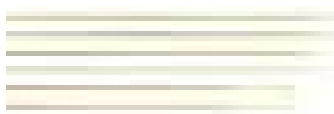


Fig II.13. (a) une puce électronique avec un MCP , (b) un échangeur de chaleur a MCP

On peut mentionner la climatisation de cabines téléphoniques ou la climatisation de pièces, de conteneurs ou de boîtiers contenant du matériel électronique dans des applications particulières. À titre d'exemple, certains systèmes à MCP conservent la chaleur de l'équipement pendant la journée et la mettent sur le toit pendant la nuit. Ils maintiennent la température de la pièce ou du conteneur légèrement supérieure à celle de l'extérieur pendant la nuit. En l'absence de pièces mobiles et de source d'énergie, un tel système est plus fiable, car il n'introduit aucun air extérieur et, contrairement à un système classique, il n'introduit aucune poussière à l'intérieur. Enfin, en maintenant la température de l'équipement légèrement supérieure à celle de l'extérieur, il permet de maintenir l'humidité dans des limites acceptables. Maintenant, ces systèmes sont étendus aux boîtiers électroniques. Dans la figure), on peut observer un échangeur qui permet de réguler la température d'un boîtier. Le MCP se trouve à l'intérieur des canaux de l'échangeur[31].



**CHAPITRE III :
PROCÉDURE
EXPÉRIMENTALE**



III.1. Introduction :

Notre travail consiste en une étude pilote de stockage d'énergie thermique utilisant une approche hybride basée sur des matériaux naturels disponibles dans la région de Tlemcen. Nous avons choisi d'utiliser des pierres de mer comme supports de stockage thermique. Ce chapitre vise à expliquer le fonctionnement du banc d'essai, les techniques employées pour effectuer les différentes manipulations et le rôle de chaque équipement utilisé. Les expériences sont menées au niveau du laboratoire de recherche énergétique et thermique appliquée ETAP de l'université de Tlemcen, faculté de technologie.

III.2. Présentation du dispositif expérimentale

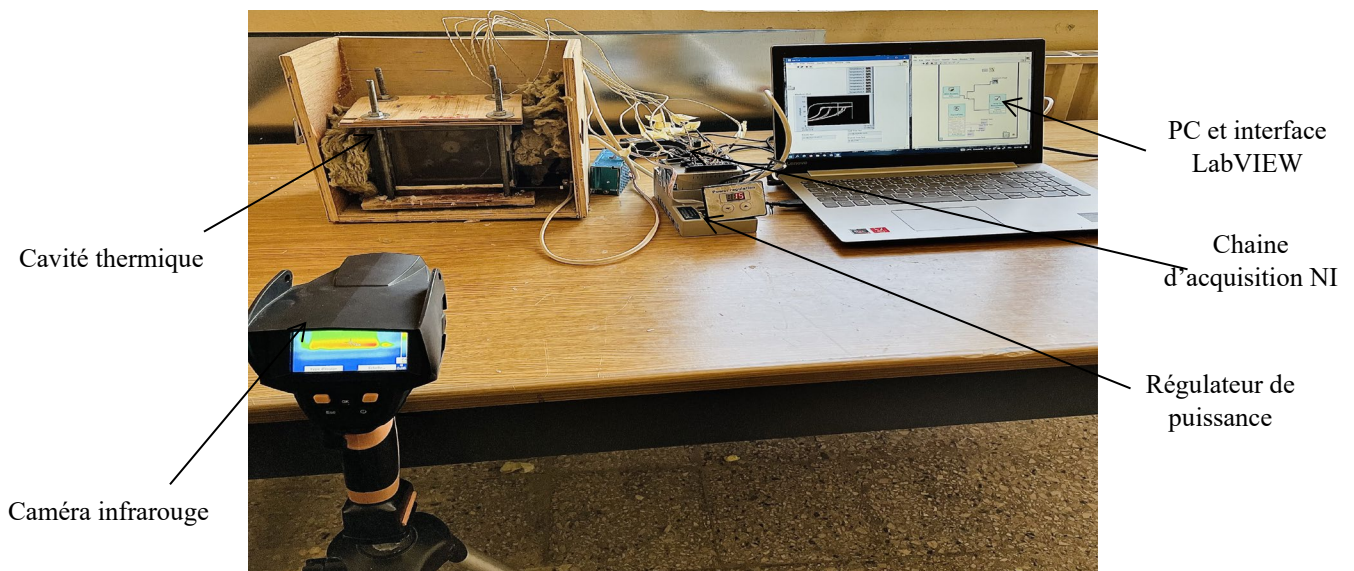


Fig III.1. Photos des matériels utilisés dans les expériences

Pour étudier le comportement thermique de la fusion de la paraffine, on a réalisé un banc d'essai expérimental. La figure III.1 présente les principaux éléments et l'explication schématique du montage expérimental. L'objectif de ce travail est d'enregistrer, au fil du temps, le comportement dynamique du front de fusion et l'évolution de la température à différents points de la paraffine. Le MCP est contenu dans une cavité carrée en verre ($12 \times 12 \times 4,5$ cm) afin de capturer le comportement dynamique et thermique de front de fusion avec une caméra numérique et une autre caméra infra-rouge placées en face. La cavité thermique est isolée thermiquement à l'aide de la laine de roche et du bois. Le MCP est chauffé par une résistance thermique qui fournit une puissance de 15W contrôlée par un régulateur de puissance.



Fig III.2. Isolation de la cavité thermique

III.3. Matériaux à changement de phase MCP

Les critères thermodynamiques essentiels pour sélectionner la cire de paraffine appropriée sont : la plage de température de fusion dans la gamme désirée, une chaleur latente élevée par unité de masse et une capacité calorifique élevée, afin que le matériau puisse ressentir une chaleur sensible importante. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser une paraffine de type Tétracosane avec une formule chimique $C_{24}H_{52}$ (Figure III.3). Les caractéristiques thermo-physiques de cette paraffine sont présentées dans le tableau III.1.



Fig III.3. Cire de paraffine utilisée

Tableau III.1 : Propriétés de la paraffine utilisée

Symbole	ρ_s (Kg/m ³)	ρ_l (Kg/ m ³)	Lf (KJ/kg)	λ (W/m. K)	Cp (KJ/kg. K)
Valeurs	912	769	183	0.2	2

Pour remplir la cavité thermique, la paraffine est d'abord fondue sur un feu doux afin d'éviter les températures élevées et de perdre les caractéristiques du MCP. Après avoir été rendue liquide, la paraffine est versée dans la cavité thermique.



Fig III.4. Remplissage MCP

III.4. Mesure des températures

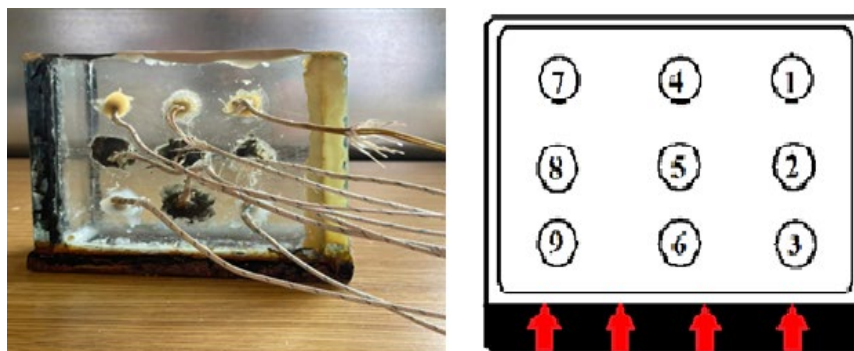


Fig III.5. Positions des thermocouples dans la cavité thermique

Neuf thermocouples ont été placés et répartis uniformément (équidistance) à l'intérieur de la cavité pour mesurer l'évolution temporelle de la température. Un autre thermocouple a été placé sur la surface chaude pour surveiller la température de source chaude pendant les expériences. La figure III. 5 montre la position des thermocouples à l'intérieur de la cavité. Tous les thermocouples ont été connectés à l'ordinateur via la chaîne d'acquisition NI (type cDAQ-9174) munis de modules de thermocouple NI (type 9211) et d'une interface graphique développée par Labview.

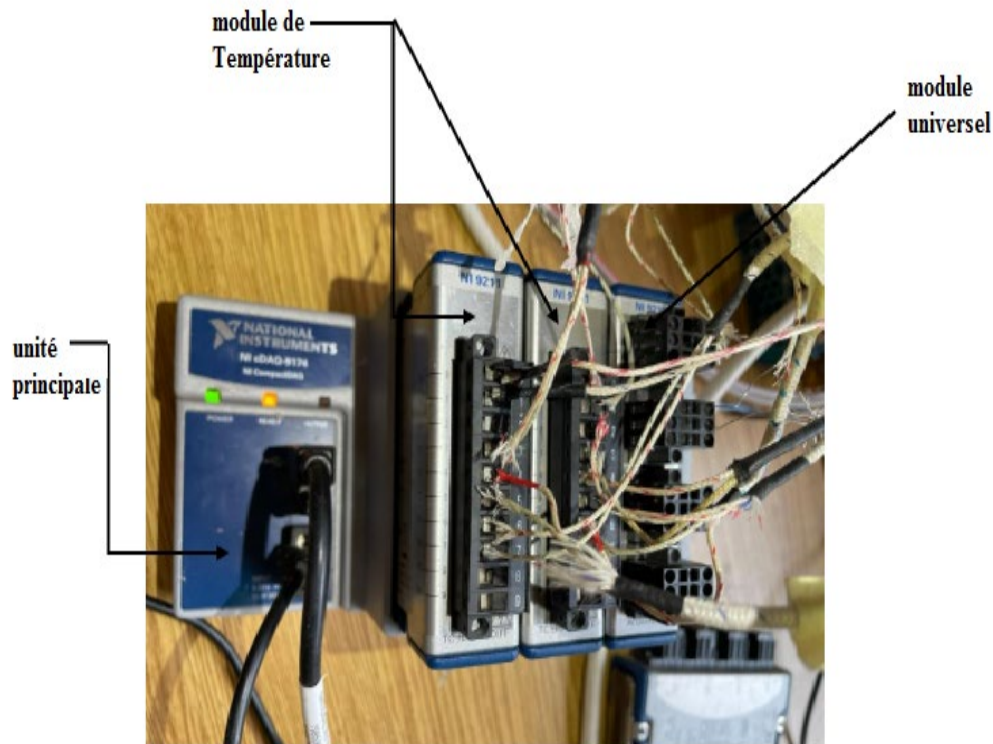


Fig III.6. Module d'acquisition NI avec les capteurs de température

III.5. Présentation de l'interface (LabVIEW)

(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un environnement de développement graphique de National Instruments. Utilisé pour créer des systèmes de test, de

mesure et de contrôle automatisés, il permet de programmer par des icônes et des fils plutôt que par du code textuel. LabVIEW intègre facilement divers matériels de mesure et d'acquisition de données, offrant des outils puissants pour le traitement des données et la création d'interfaces utilisateur. Sa flexibilité et sa facilité d'utilisation en font un choix

III.5.1. Face-avant

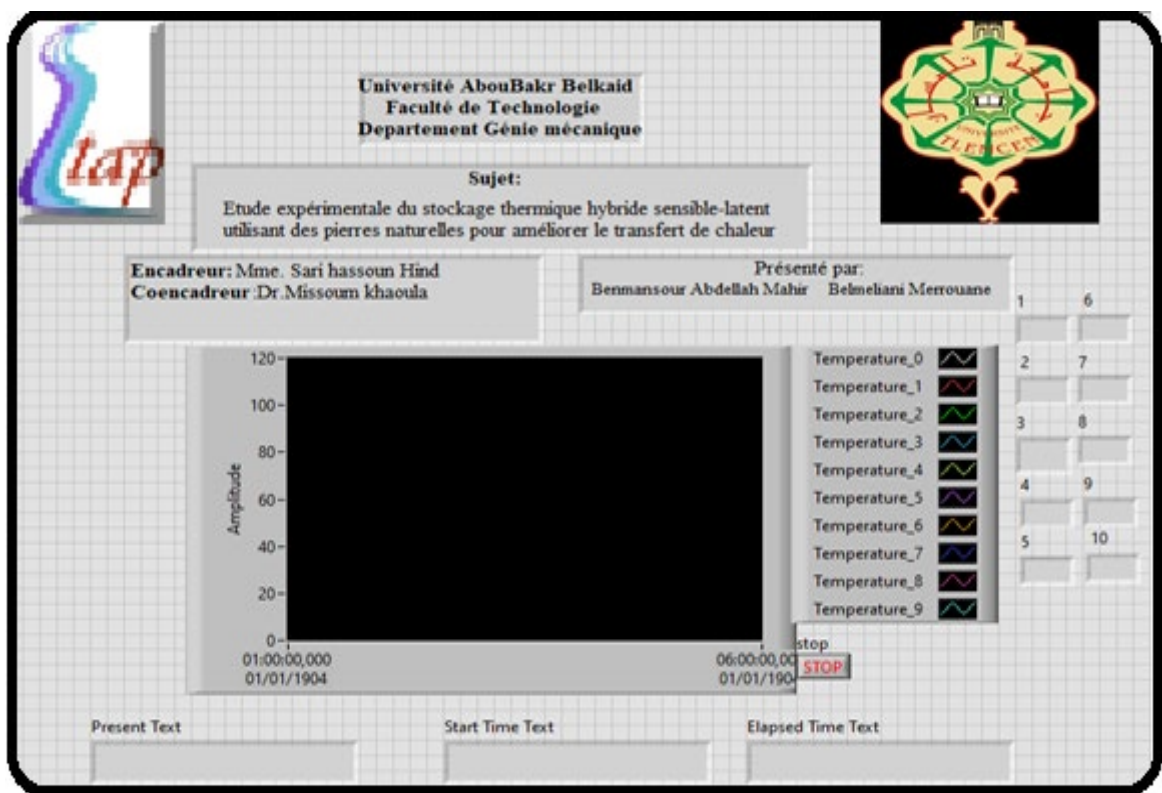



Fig III.7. Interface Labview (face-avant)

III.5.2. Block diagramme

Le diagramme contient le code source graphique des instruments virtuels. On programme le VI pour contrôler et remplir les fonctions sur les entrées et sorties créées dans la face avant. Le diagramme peut contenir des fonctions et des structures issues des bibliothèques de Vis intégrées à LabVIEW. Il peut aussi contenir des terminaux associés à des commandes et des indicateurs créés dans la face avant.

- **Boucle while**

Comme les boucles Do et les boucles Repeat-Until des langages de programmation textuels, les boucles While, représentées ci-après, exécutent un sous-diagramme jusqu'à ce qu'une condition ait lieu. La boucle While exécute le sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition, un terminal d'entrée, reçoive une valeur booléenne particulière. Par défaut, le comportement et l'apparence du terminal de condition, représenté ci-après, correspondent à **Arrêter sur condition Vraie**. 

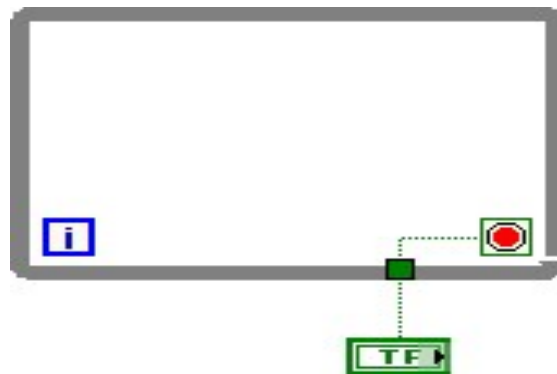


Fig III.8. Boucle while

Lorsqu'un terminal de condition est défini sur Arrêter sur condition Vraie, la boucle While exécute son sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition reçoive une valeur Vrai I.

- **DAQ ASSISTANT :**

DAQ Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) qui utilise un périphérique d'acquisition de données pour transmettre un signal électrique conditionné à un ordinateur à des fins d'analyse et d'enregistrement des données dans un fichier Excel. Cette interface comporte des indicateurs, DAQ assistant, boucle while, tableaux, et graphes.

- **Forme graphique**

LabVIEW inclut le graphique pour afficher les données généralement acquises à une vitesse constante. Le graphique accepte également plusieurs types de données, ce qui minimise la nécessité de manipuler les données avant de les afficher.

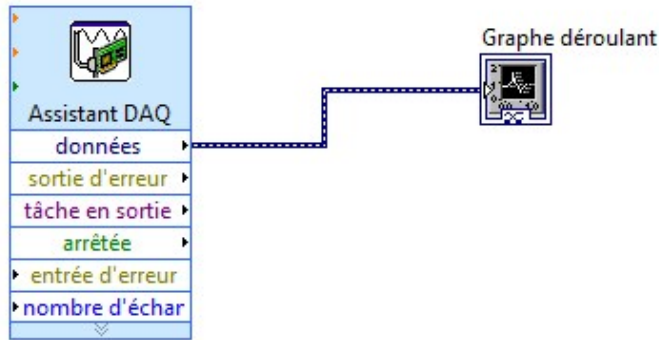


Fig III.9. Création du graphe

- **Enregistrer les données sur un fichier Excel**

Les données générées et analysées par le VI sont enregistrées dans un fichier Excel.

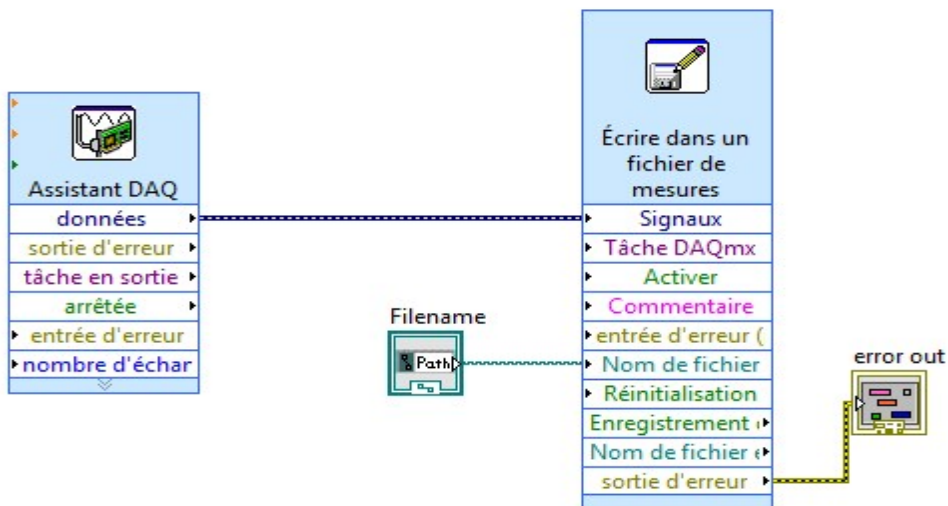


Fig III.10. création d'un fichier d'enregistrement des mesures.

III.6. Camera thermique (IR Soft Testo i875)

La caméra thermique IRSoft Testo i875 (marque Testo 875-2i, résolution IR 160 × 120 pixels, technologie Super Résolution 320 × 240 pixels) permet de tracer la thermographie des évolutions thermiques de la paraffine



Fig III.11. Camera thermique (IRSoft Testo i875)

Le logiciel IRSoft est utilisé pour analyser, traiter et archiver les images capturées par une caméra thermique Testo. Il comprend une fonction de création de rapports, permettant une présentation claire des données. La fonction de commande de l'appareil permet de configurer la caméra thermique connectée.

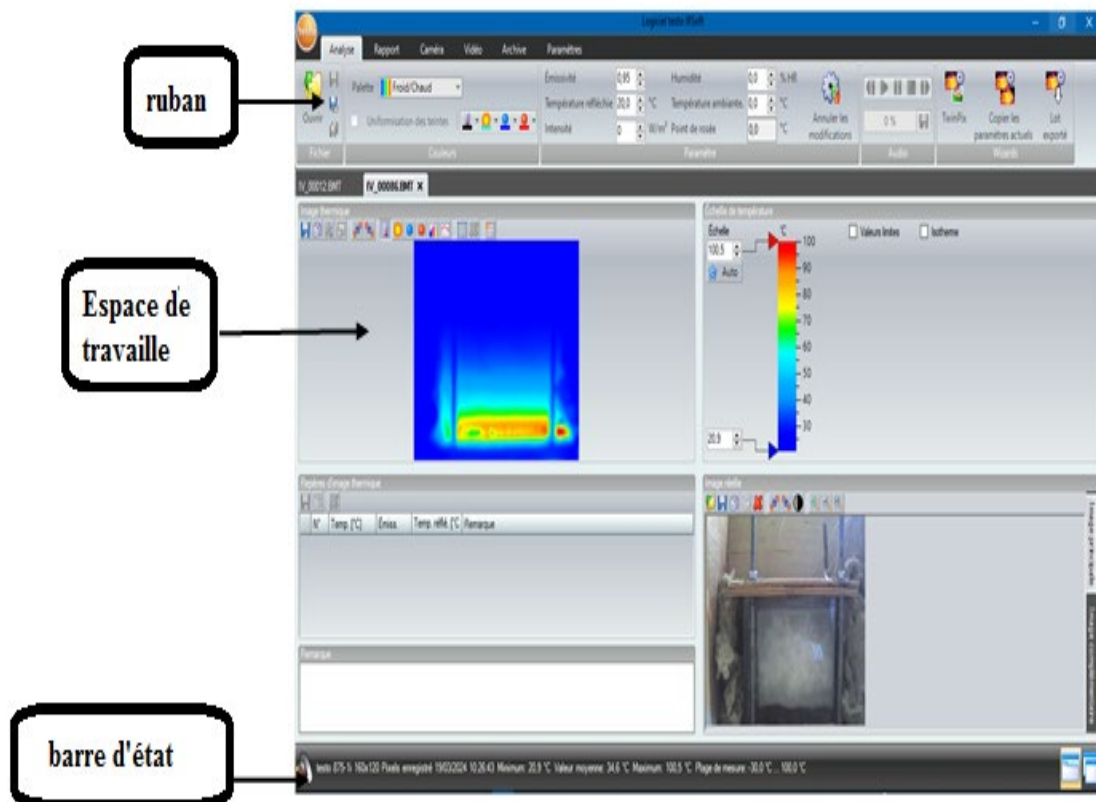


Fig III.12. Interface utilisateur logiciel IRsoft

▪ **Ruban**

Le ruban du logiciel facilite les opérations d'édition et de configuration, regroupant les fonctions et commandes en quatre onglets : Analyse, Rapport, Caméra, et Paramètres. Selon l'onglet sélectionné, les options disponibles changent.



Fig III.13. Ruban

▪ **Espace de travail**

L'espace de travail affiche les informations et permet l'édition des images. Sa présentation varie selon la mise en page choisie et il est divisé en plusieurs fenêtres.

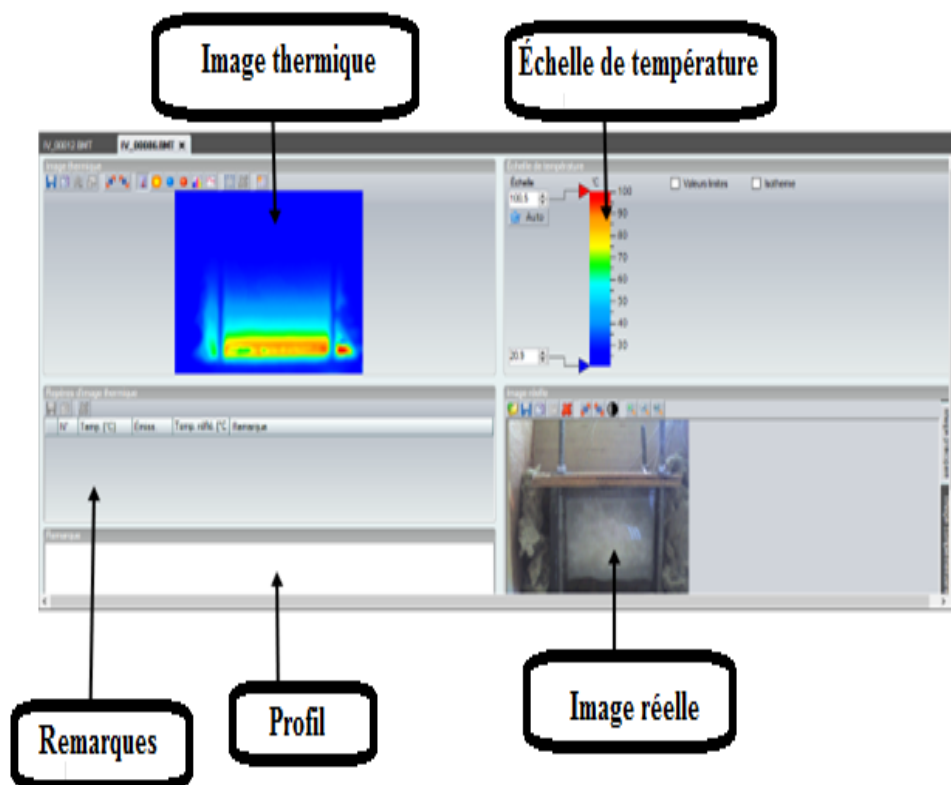


Fig III.14. Espace de travail

▪ Barre d'état

La barre d'état affiche des informations sur l'image ouverte : présence d'un fichier audio (clicable pour lecture), type de caméra, résolution, type d'image (Super Résolution ou panoramique), date d'enregistrement, et valeurs minimale, maximale, et moyenne. Vous pouvez modifier l'affichage de l'espace de travail en utilisant les onglets et les fenêtres en cascade.

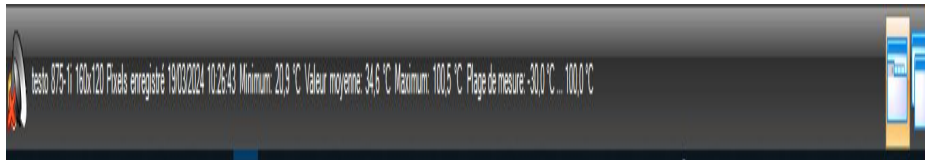


Fig III.15. Barre d'état

III.7. Procédure expérimentale

Afin d'assurer une meilleure précision des résultats, toutes les expériences ont été répétées trois fois avec une température ambiante moyenne de 21°C. Les historiques des températures du MCP ont été comparés ensuite pour prendre une moyenne arithmétique à la fin. Les expériences commencent par l'analyse du comportement dynamique et thermique lors de la fusion de la paraffine seule. Ensuite on a étudié l'effet d'intégration des pierres de mer sur la fusion de la paraffine. Les expériences sont considérées avec 5, 10 et 20 pierres. Nous avons pris les pierres de la plage de sidna youchaa, située à l'ouest de Tlemcen, à une latitude de 35,7° et une longitude de 1,46°.

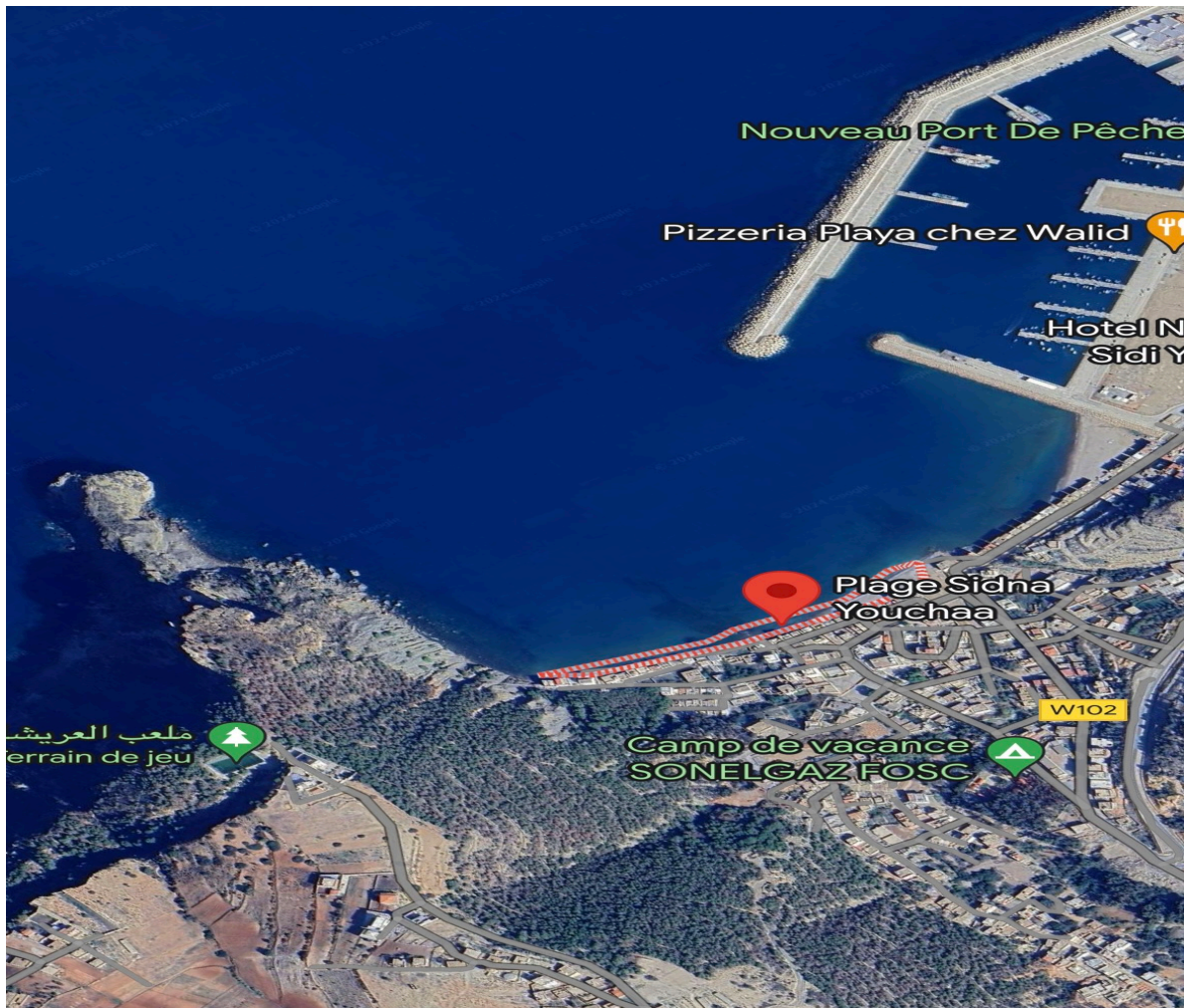


Fig III.16. Photo géographique de plage sidna youchaa



Fig III.17. Pierres naturelles utilisées

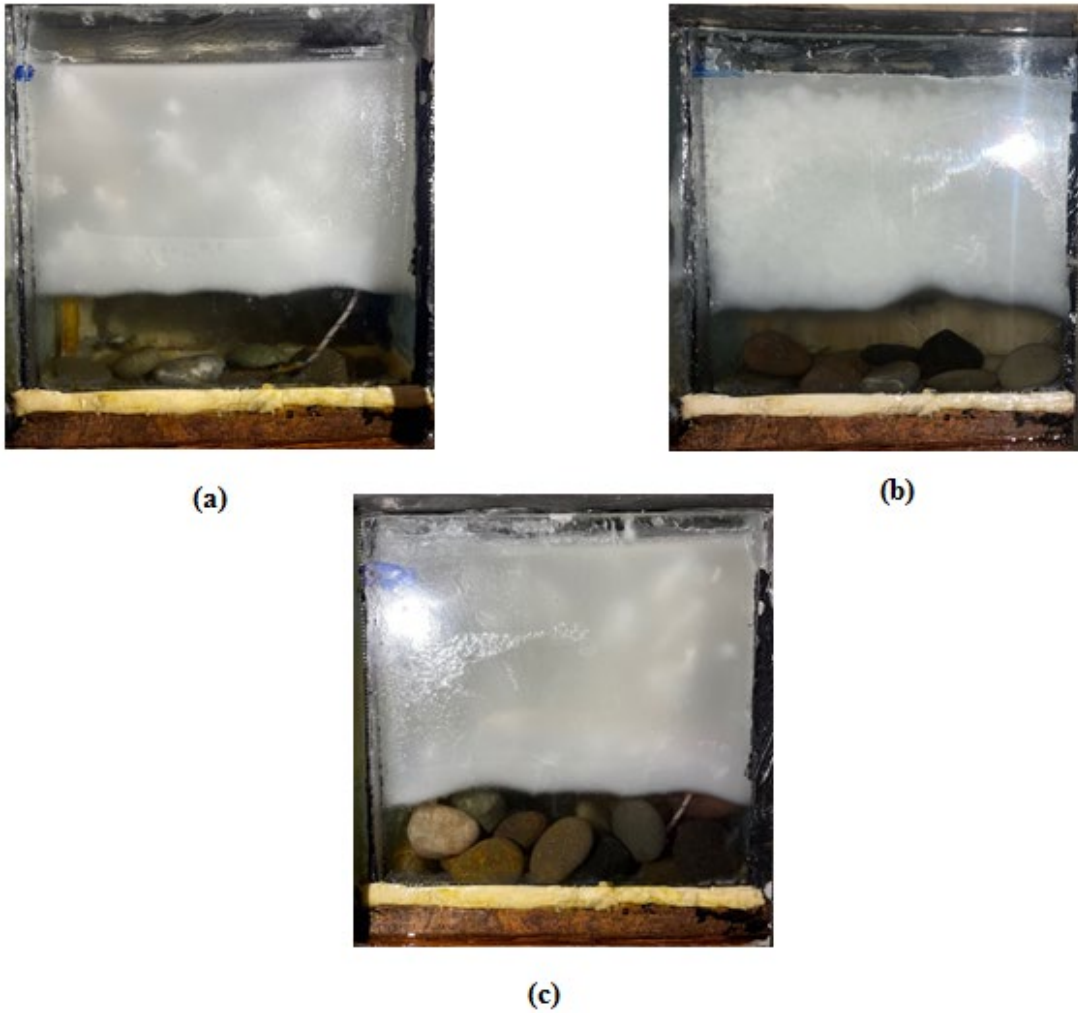
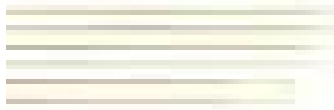


Fig III.18. (a)Immersion 5 pierres,(b)Immersion 10 pierres ,(c)Immersion 20 pierres



CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS



VI.1. Introduction :

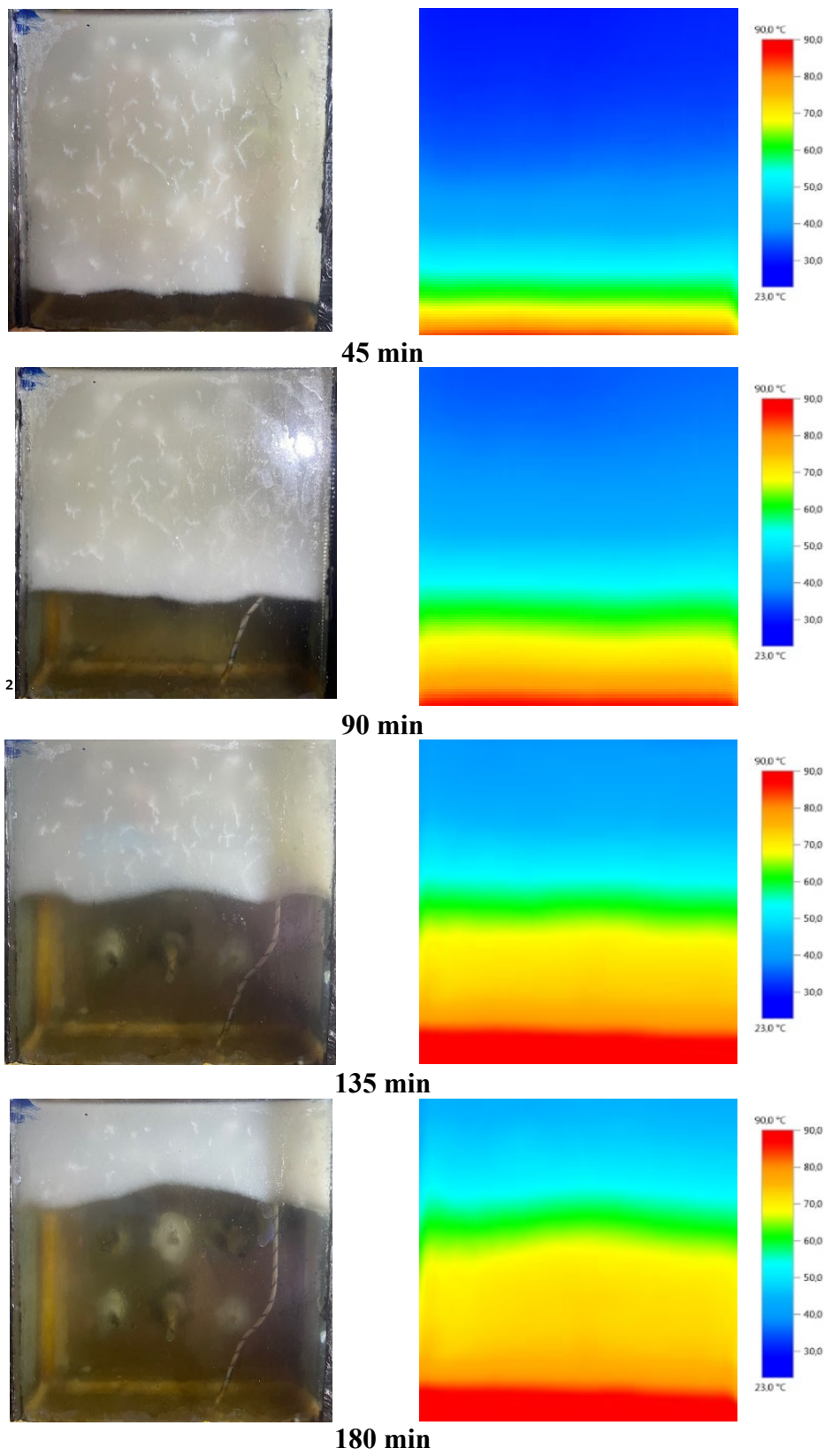
Ce chapitre porte sur une analyse expérimentale du comportement thermo-convectif de la fusion de la paraffine dans une cavité thermique contenant des pierres naturelles. La paraffine est un matériau à changement de phase (MCP) largement utilisé en raison de sa grande capacité de stockage de chaleur latente. L'ajout de pierres naturelles peut influencer la dynamique de la fusion et la distribution de la température en raison de leurs propriétés thermiques distinctes. Cette analyse expérimentale vise à comprendre comment ces interactions affectent l'efficacité du processus de stockage de chaleur en mesurant l'évolution instantanée de l'interface solide-liquide et la distribution des températures y compris celle de la paraffine, avec les pierres.

Les étapes clés de cette analyse expérimentale et les logiciels utilisés sont :

- **Observation de l'Interface Solide-Liquide** : Des techniques de visualisation, telles qu'une caméra thermique et une caméra photographique simple, sont utilisées pour suivre l'évolution de l'interface solide-liquide. Cela permet de comprendre comment la fusion de la paraffine pure et de la paraffine contenant des pierres naturelles se développe sous l'effet de la chaleur.
- **Mesure de la Distribution des Températures** : Des thermocouples, placés de manière stratégique dans la cavité, mesurent la répartition de la température dans la paraffine. Ces mesures sont essentielles pour analyser et tracer les fronts de fusion ainsi que l'énergie stockée.
- **Excel** : utilisé pour ouvrir le fichier obtenu par LabVIEW, pour tracer toutes les courbes et pour les approximer par des fonctions mathématiques.
- **Autocad** : utilisé pour approximer la fraction volumique du liquide à chaque moment de l'expérience

VI.2. Paraffine pure :

VI.2.1. Evolution de front de fusion :



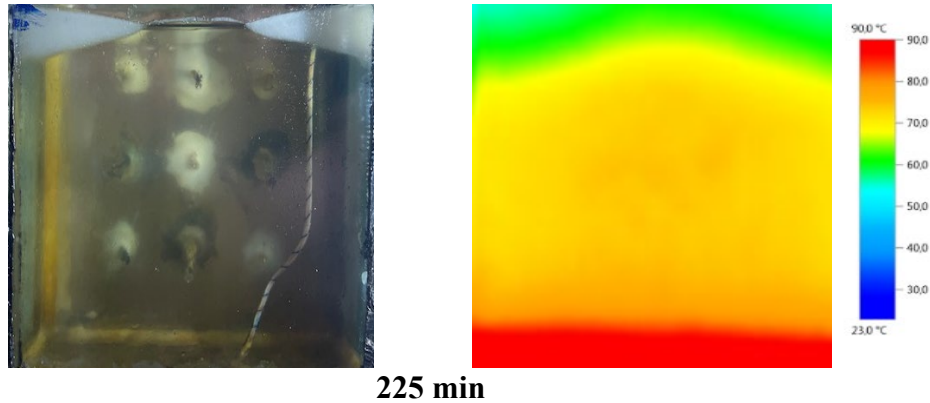


Fig IV.1. Évolution temporelle du front de fusion et champ d'image IR (à droite) de la paraffine pure chauffée par le bas.

La Fig IV.1 représente l'évolution temporelle du processus de fusion (à gauche) ainsi qu'une illustration complémentaire (à droite), montrant les images thermographiques prises par la caméra thermique de la paraffine pure chauffée par le bas.

Il est observé que la fusion commence à voisinage de la source chaude située en bas. Aux premiers stades de la fusion, où le transfert de chaleur est dominé par la conduction, une couche pâteuse apparaît par le bas, indiquant que la température de la paraffine près de la source de chaleur atteint la température de fusion (49 à 54 °C). Après 45 minutes, le front de fusion se forme à l'interface inférieure, parallèle à la source chaude, avec une forme ondulée révélant le développement de la convection multicellulaire de Rayleigh-Bénard dans la paraffine liquide. Il est notable que le nombre de cellules de convection est proportionnel à l'épaisseur de la couche fondue.

À mesure que la fusion progresse et que le front de fusion se déplace vers le haut à travers la paraffine solide, à 90, 135 et 180 minutes, les cellules de convection se fusionnent avec les cellules voisines, devenant plus grandes et réduisant ainsi les ondulations à l'interface solide-liquide. Vers la fin du processus de fusion, à 225 minutes, les cellules de convection se transforment en un unique rouleau de convection.

Les images thermographiques capturées par la caméra thermique (IR) montrent que les isothermes sont presque parallèles à la paroi chaude, indiquant que la conduction est le mode de transfert de chaleur prédominant lors de la première phase de fusion. Au fil du temps, à mesure que la fusion progresse, la chaleur se diffuse vers le haut et les isothermes commencent à se déplacer de manière irrégulière. Cela explique l'apparition d'un second

régime de transfert de chaleur, provoqué par la déstabilisation de la couche conductrice en raison des mouvements convectifs.

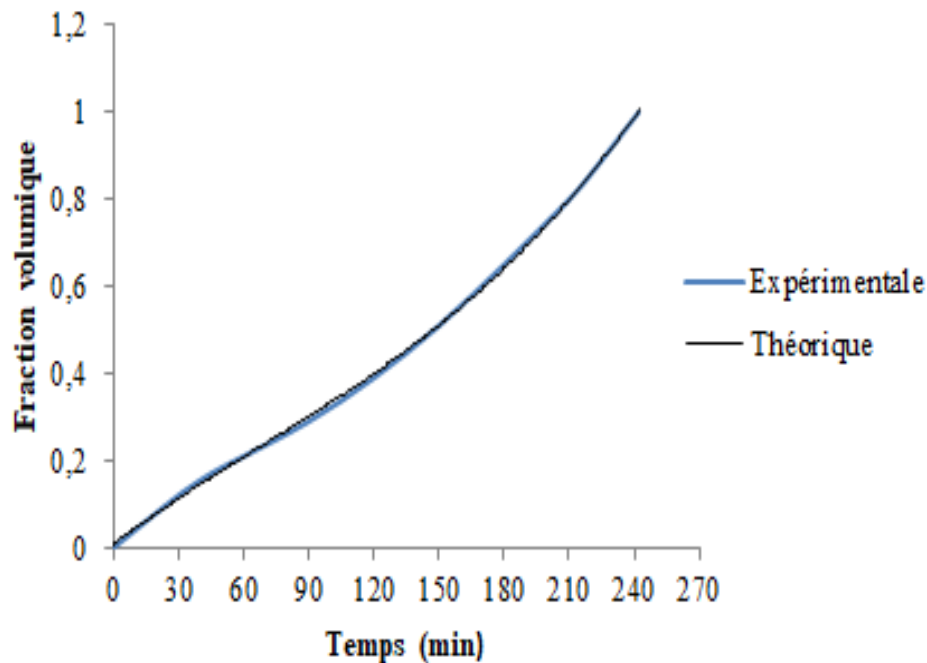


Fig IV.2. Evolution temporelle de la fraction volumique

La Fig IV.2 montre l'évolution de la fraction volumique en fonction de temps qui représente le pourcentage de la paraffine fondue dans la cavité est calculée à l'aide du logiciel (Autocad).

Il est observé que la fraction de fusion varie de manière presque linéaire avec le temps jusqu'à la fin du processus de fusion. Par conséquent, le taux de transfert de chaleur n'est pas influencé par l'épaisseur de la couche fondue durant le processus de changement de phase.

La fraction liquide peut être modélisée de manière assez précise à l'aide d'un polynôme de troisième degré en utilisant le logiciel Excel.

$$f_l = 4 \times 10^{-8} t^3 - 9 \times 10^{-6} t^2 + 0,0037 t + 0,0076 \quad (\text{IV.1})$$

VI.2.2. Evolution de la température de la paraffine pure

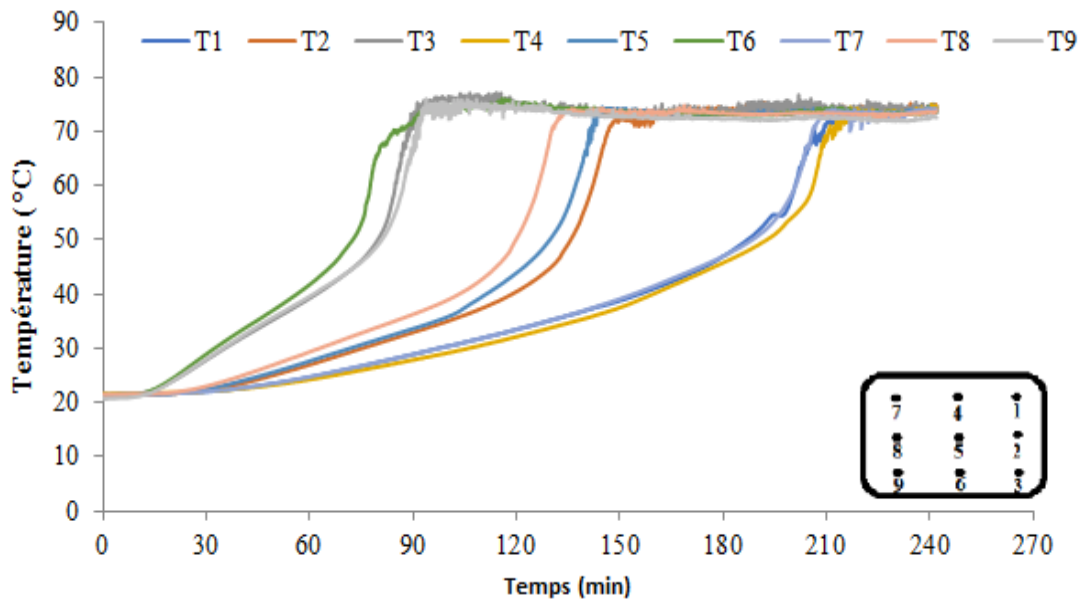


Fig IV. 3. Evolution temporelle de la température pendant la fusion de la paraffine pure

La Fig IV.3 représente l'évolution de la température pendant la fusion de paraffine pure. Les valeurs de température enregistrées à l'aide des données de température d'acquisition à un intervalle régulier de 2 s sont tracées en fonction du temps

La température des thermocouples augmente en raison de la conduction thermique dans la paraffine solide jusqu'à ce que la température de fusion soit atteinte. Cependant, la vitesse d'échauffement au niveau de (T3, T6 et T9) est plus importante. Cela s'explique par leur position au bas de la cavité, près de la source de chaleur.

Après 45 min, les températures (T3, T6 et T9) augmentent avec des fluctuations quand elles dépassent la zone de la fusion et se stabilisent autour de (74-78) °C après 90min. Ensuite, la fusion de la paraffine touche la deuxième ligne (T2, T5 et T8) des thermocouples après 110min et se stabilisent autour de 75°C après 140 min. Après 150 minutes, les températures des thermocouples situés en haut de la cavité (T1, T4 et T7) commencent à augmenter jusqu'à se stabiliser autour de 76 °C après 230 minutes, indiquant que la paraffine est complètement liquide et que la fusion est terminée.

Ce graphe indique que le chauffage initial des thermocouples situés en bas de la cavité crée un gradient thermique qui provoque la fusion progressive de la paraffine vers le haut. Le taux d'augmentation de la température des thermocouples en bas est plus élevé que celui des thermocouples situés plus haut, en raison du chauffage qui commence par eux. Ce processus

génère des conditions favorables à la convection naturelle, intensifiant le transfert de chaleur local entre la paraffine solide et liquide.

VI.2.3. Evolution de l'énergie stockée :

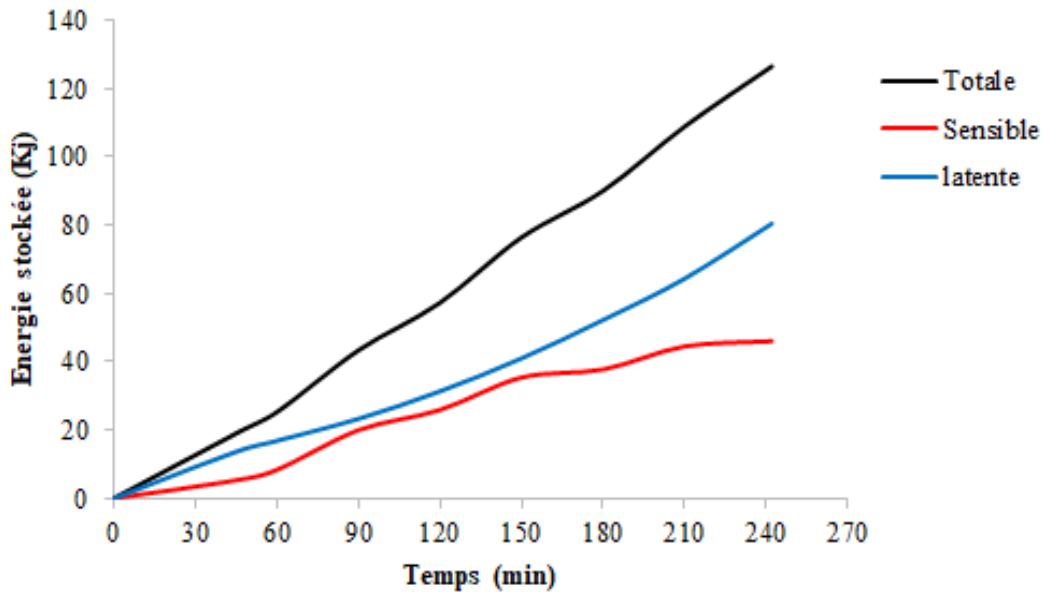


Fig IV. 4. Evolution de l'énergie stockée en fonction de temps

La Fig IV.4 montre l'évolution de l'énergie totale stockée durant le processus de fusion jusqu'à la fin. Elle représente la somme de la chaleur sensible et la chaleur latente de fusion (L_f), donnée par la formule suivante :

$$Q_{st} = \sum_{t=t_i}^{t_s} \left[M_m C_s (T^{t+\Delta t} - T^t) \right] + \sum_{t=t_s}^{t_l} \left[M_m L_f f_l \right] + \sum_{t=t_l}^t \left[M_m C_l (T^{t+\Delta t} - T^t) \right] \quad (\text{IV.1})$$

L'énergie stockée dans la paraffine augmente de manière presque linéaire avec le temps, atteignant environ 46 kJ sous forme de chaleur sensible, tandis que 80 kJ sont stockés sous forme de chaleur latente. On observe que l'énergie stockée sous forme de chaleur latente est plus importante que celle stockée sous forme de chaleur sensible, contribuant ainsi à augmenter considérablement l'énergie totale stockée par la paraffine pure, pour atteindre 126kJ.

VI.3. Amélioration du transfert de chaleur durant le processus de la fusion

Pour améliorer le transfert thermique lors de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas, nous avons ajouté des pierres naturelles (cailloux de mer) à la paraffine à différents

dosages (7 %, 17 %, 37 %). Les pierres naturelles et le MCP (paraffine) remplissent la cavité thermique, formant ainsi une configuration hybride de stockage de chaleur sensible et latente.

VI.3.1. Evolution de front de fusion

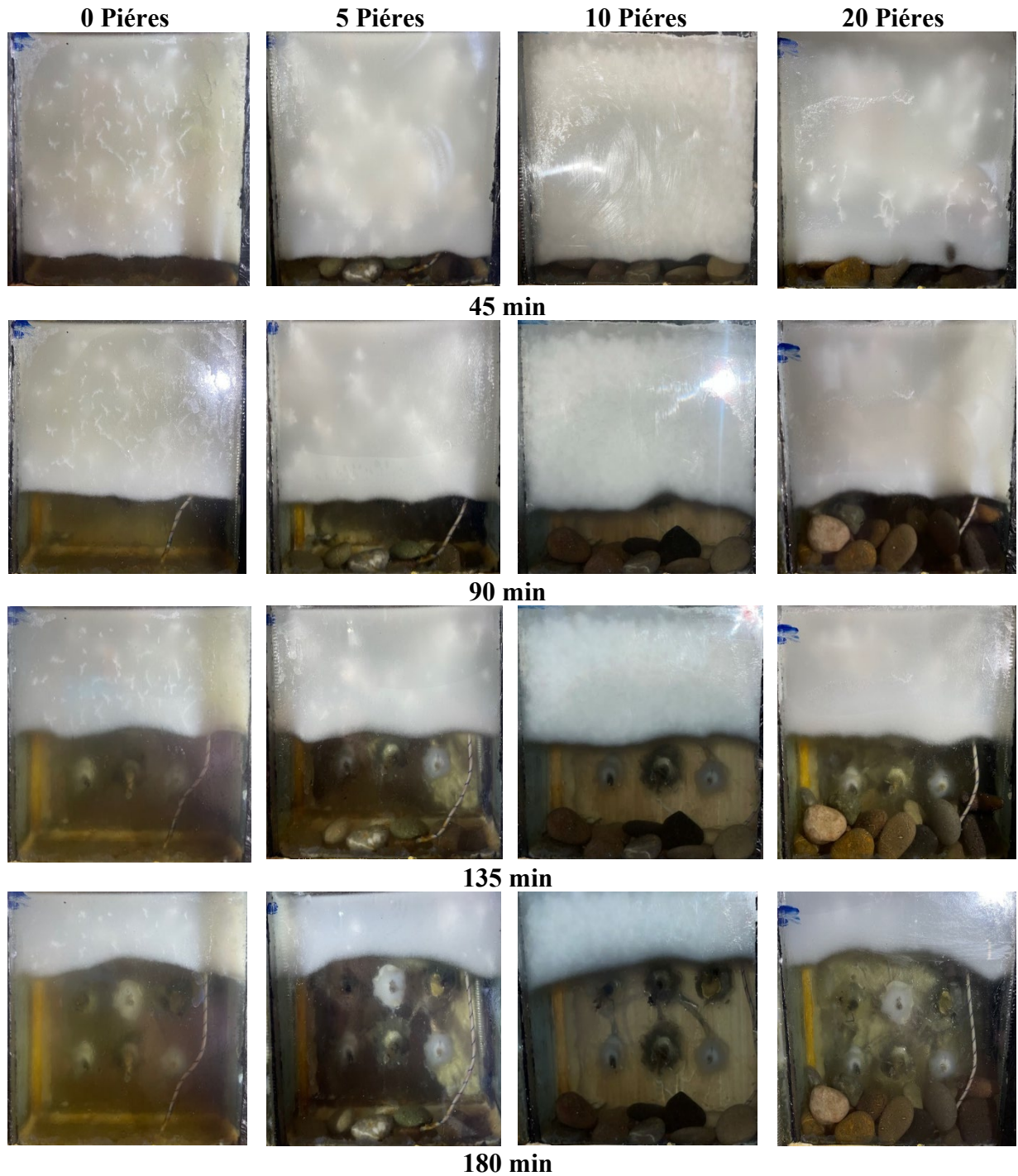


Fig IV. 5. Comparaison entre l'évolution du front de fusion de la paraffine pure

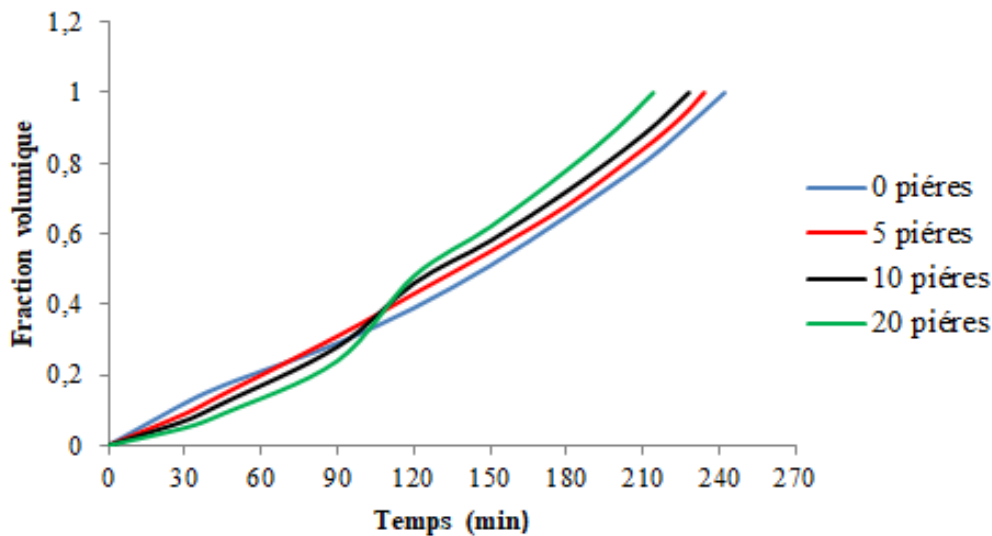


Fig IV. 6. Comparaison entre la fraction liquide de paraffine pure et paraffine avec les pierres

Les Fig IV. 5 et Fig IV. 6 présentent une comparaison entre l'évolution temporelle de la fraction volumique et le front de fusion de la paraffine pure et celle de la paraffine avec l'ajout des 5, 10 et 20 pierres.

Initialement, il est observé que la paraffine pure commence à fondre avant celle contenant les pierres ajoutées. Les pierres stockent la chaleur transférée par la source thermique en raison de leur position à la surface inférieure de la cavité, ce qui entraîne un retard dans le processus de fusion de la paraffine par rapport à la paraffine pure.

Il est également observé que plus le nombre de pierres est élevé (c'est-à-dire une masse de pierres plus importante), plus le retard dans le processus de fusion est significatif.

Après 90 minutes, la fusion de la paraffine avec les pierres commence à s'accélérer, atteignant respectivement 16 %, 18 % et 20 % pour 5, 10 et 20 pierres, tandis que la paraffine pure atteint seulement 10 %.

La paraffine pure fond complètement en 242 minutes, tandis que les échantillons contenant 5, 10 et 20 pierres fondent en 234, 228 et 214 minutes, respectivement.

Ainsi, l'ajout de 5 pierres, 10 pierres et 20 pierres augmente respectivement la vitesse de fusion de la paraffine de 3 %, 6 % et 13 %, respectivement.

VI.3.1. Evolution de la température

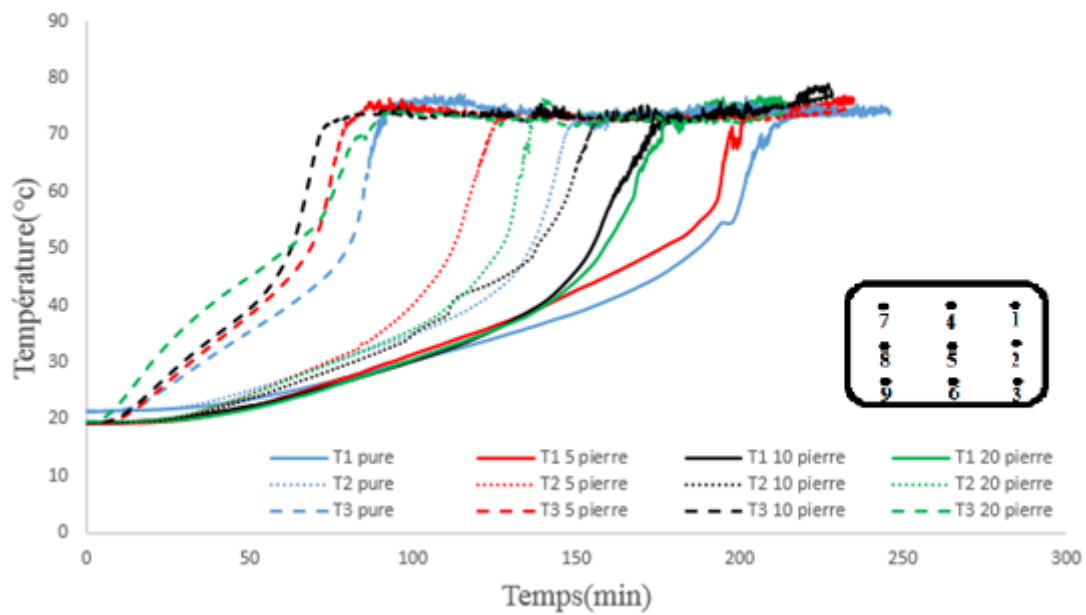
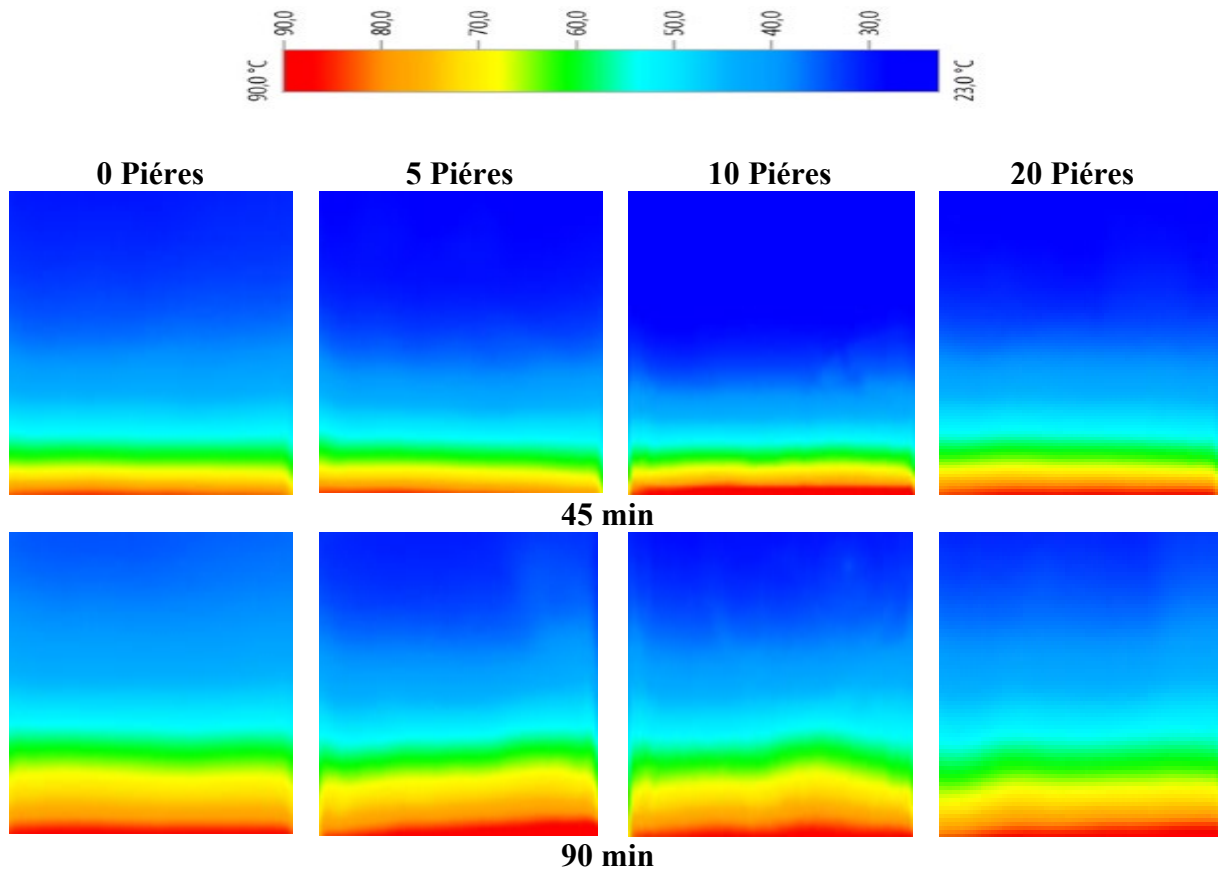


Fig IV. 7. Evolution temporelle de la Température (T1,T2,T3) pour la fusion de paraffine pure et de la paraffine avec les pierres



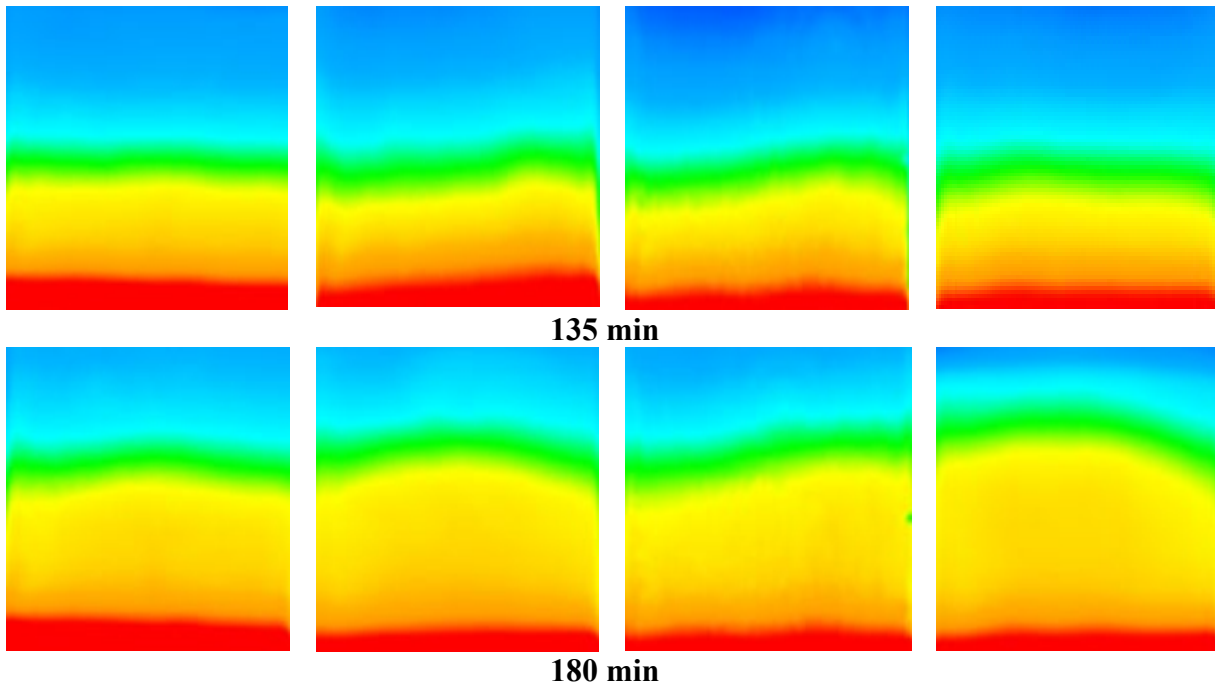


Fig IV. 8. Comparaison entre l'évolution temporelle des isothermes durant la fusion

La **Fig IV. 7** présente une comparaison entre l'évolution des isothermes durant la fusion de la paraffine pure et la paraffine avec les 5, 10 et 20 pierres

Il est évident que des températures plus élevées sont observées pour la paraffine en présence des pierres aux trois positions T1, T2 et T3.

Les incertitudes de mesure présentes dans les isothermes sont provoquées par la présence de bulles d'air situées dans la paraffine solide.

Le champ de température est illustré dans la **Fig IV.8** pour les quatre cas (paraffine pure, avec la paraffine avec les 5, 10 et 20 pierres).

La surface inférieure de la cavité présente la température la plus élevée (90°C). Au fil du temps, la chaleur monte, entraînant une augmentation de la température qui dépasse le point de fusion. En conséquence, la force de flottabilité commence à agir, et La densité de la paraffine chaude est faible, donc il s'écoule vers le haut sous l'effet de la force de flottabilité. La température dans la région supérieure augmente remarquablement ce qui est attribué à la convection naturelle. À mesure que la fusion progresse, le champ de température global s'améliore, et la température de la paraffine dans la moitié supérieure est plus significativement élevée. Le champ de température dans la moitié inférieure est uniforme, probablement parce que les pierres améliorent le transfert de chaleur au bas de l'unité de stockage de chaleur et augmentent la température du PCM au fond. Comme pour le front de fusion, la différence dans le champ de température entre les quatre cas devient significative.

VI.3.2. Energie stockée :

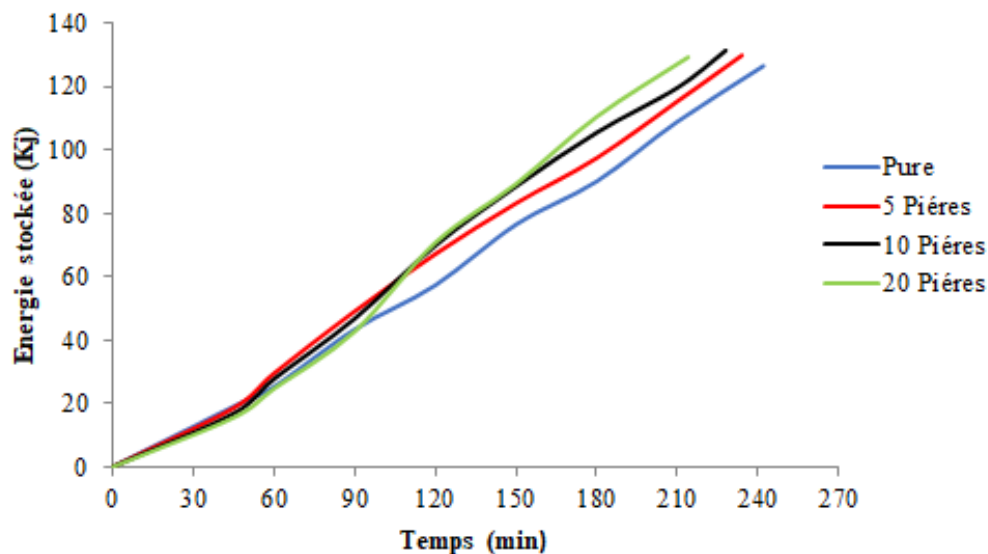


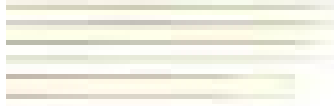
Fig IV. 9. Evolution de l'énergie stockée par la paraffine pendant la fusion de la paraffine en fonction de temps

La **Fig IV.9** présente l'évolution de l'énergie totale stockée par la paraffine au cours du processus de la fusion de la paraffine, avec et sans ajout de pierres.

Initialement, l'énergie stockée dans la paraffine pour les quatre cas, avec et sans ajout de pierres, augmente presque linéairement et de manière identique, car les pierres jouent le rôle de récepteurs de chaleur. Après 60 minutes, on observe une légère différence entre les courbes.

A 210 minutes, la différence devienne plus significative où l'énergie stockée par la paraffine avec 20 pierres est la plus élevée 129 kJ, suivie par celle avec 10 pierres 119 kJ, puis 5 pierres 117 kJ et la dernière de la paraffine pure sans pierre 109 kJ.

Donc l'ajout de 5 pierres permet d'améliorer le stockage thermique de 7 %, l'ajoute de 10 pierres améliore de 9 % et de 20 pierres améliorées de 18 %. Cela implique que l'ajout des pierres améliore la capacité de stockage d'énergie de la paraffine.



CONCLUSION GÉNÉRALE



Conclusion générale :

Les pierres naturelles ont été utilisées comme un matériau de stockage dans les systèmes de stockage par la chaleur sensible. Dans cette étude, elles sont utilisées pour améliorer le transfert de chaleur du MCP (paraffine) dans le stockage de chaleur latente. Les pierres naturelles et la paraffine remplissent la cavité thermique chauffée par le bas, formant une configuration hybride de stockage de chaleur sensible et latente. Les pierres jouent non seulement un rôle d'un stockage par la chaleur sensible, mais elles contribuent également au transfert de chaleur dans la paraffine.

L'objectif principal était de comprendre comment ces pierres influencent le comportement thermo-convectif de la paraffine ainsi que le stockage thermique.

Les principales conclusions sont les suivantes :

1. Amélioration de la Distribution Thermique :

L'ajout de pierres naturelles dans la paraffine a considérablement amélioré la distribution de la chaleur. Les pierres agissent comme des conducteurs thermiques, facilitant une propagation plus rapide et plus uniforme de la chaleur. Cela a conduit à une fusion plus rapide de la paraffine comparée à la paraffine pure.

2. Réduction du Temps de Fusion :

L'intégration de pierres a accéléré le processus de fusion. Concrètement, le temps nécessaire pour que la paraffine atteigne une fusion complète est passée de 242 minutes sans pierres à 214 minutes avec leur intégration. Cette réduction de temps est significative pour les applications où le temps de réponse est crucial.

3. Efficacité de Stockage Thermique :

Les résultats expérimentaux ont montré que l'énergie stockée dans la paraffine augmentait de manière linéaire avec le temps dans tous les cas, mais de manière plus rapide et efficace avec l'ajout de pierres. Les pierres ont permis une augmentation de la capacité de stockage thermique de la paraffine, avec une amélioration pouvant atteindre jusqu'à 18 % par rapport à la paraffine pure.

4. Amélioration des Fractions Volumiques :

L'incorporation de pierres a notablement amélioré l'évolution de la fraction volumique de liquide. La paraffine avec une plus grande quantité de pierres (jusqu'à 20) a atteint des fractions volumiques plus élevées plus rapidement, ce qui témoigne d'une fusion plus efficace et d'une répartition thermique améliorée, avec une amélioration allant jusqu'à 13 %.

5. Montée en Température Uniforme :

Les mesures de température effectuées à différents points de la cavité ont démontré que l'ajout de pierres permet une montée en température plus uniforme. Les thermocouples ont montré que la température de stabilisation était atteinte plus rapidement avec un nombre croissant de pierres, optimisant ainsi le processus de fusion.

En conclusion, cette étude démontre que l'utilisation de pierres naturelles en tant qu'éléments conducteurs thermiques dans un système de stockage thermique par chaleur latente offre des avantages significatifs. Ces pierres améliorent non seulement la distribution et la montée en température, mais augmentent également la capacité de stockage thermique et réduisent le temps nécessaire pour la fusion complète de la paraffine. De plus, elles sont largement accessibles, peu coûteuses et respectueuses de l'environnement, ce qui les rend prometteuses pour les applications de stockage d'énergie thermique à chaleur latente.

Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles applications et optimisations des systèmes de stockage thermique utilisant des matériaux à changement de phase, particulièrement dans les domaines nécessitant une gestion efficace et rapide de la chaleur.



Annexes

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen

Business Model Canvas

BMC

Date de dépôt :

N° de projet : Etude expérimentale du stockage thermique hybride sensible-latent utilisant des pierres naturelles pour améliorer le transfert de chaleur

Faculté/Institut : Faculté de technologie Abou Bakr Belkaid Tlemcen

Département : Génie mécanique

Nom du projet : Etude expérimentale du stockage thermique hybride sensible-latent utilisant des pierres naturelles pour améliorer le transfert de chaleur

Encadrant 1 : Mme. SARI Hassoun hind

Encadrant 2 : Dr. Guelil Hocine

Co-encadrant 1 : Dr. Missoum Khaoula

Etudiants : - BENMANSOUR Abdellah Mahir
- Belmeliani Merouane

-
Année universitaire : 2023/2024

1- Proposition de valeur (Value Proposition) القيمة المقترحة

a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

ما هي المشاكل التي نحلها لعملائنا ?

Notre projet résout un problème majeur pour nos clients en améliorant le stockage thermique grâce à l'utilisation de pierres naturelles comme les cailloux de mer. En augmentant l'efficacité énergétique et réduisant le temps nécessaire pour stocker et libérer la chaleur, notre solution améliore la performance globale du système de stockage thermique. De plus, l'utilisation de pierres naturelles, qui sont peu coûteuses et facilement disponibles, réduit les coûts des matériaux et offre une alternative plus écologique et durable. En outre, notre système est plus fiable et simple à intégrer et à maintenir, répondant ainsi aux besoins de nos clients de manière efficace et durable.

b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?

ما هي الاحتياجات التي يلببها منتجاتنا أو خدماتنا لعملائنا؟

Notre projet satisfait plusieurs besoins essentiels de nos clients : il offre une solution de stockage thermique plus rapide et efficace, réduisant ainsi les délais et améliorant la performance énergétique. En utilisant des pierres naturelles, nous répondons également à la demande de solutions de stockage thermique économiques et écologiques. De plus, notre système fiable et simple à maintenir répond aux besoins de durabilité et de facilité d'intégration dans les infrastructures existantes, offrant ainsi une alternative pratique et efficace aux solutions conventionnelles.

c. En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?

في ماذا تختلف عروضنا عن تلك التي يقدمها منافسوننا؟

Notre offre se distingue de celle de nos concurrents par l'intégration innovante de matériaux à changement de phase (MCP) avec des pierres naturelles pour améliorer la capacité de stockage thermique. Contrairement aux solutions concurrentes qui se limitent souvent à l'utilisation de MCP seuls, notre approche hybride permet une propagation plus rapide et plus uniforme de la chaleur, augmentant ainsi l'efficacité et la performance du stockage thermique. Cette combinaison unique optimise la distribution thermique et réduit le temps nécessaire pour atteindre des niveaux de fusion comparables, offrant une solution plus efficace et fiable pour les applications de stockage d'énergie thermique

d. Quelles est notre proposition unique de valeur ?



ما هو العرض الفريد للقيمة لدينا؟

Notre proposition unique de valeur réside dans l'utilisation innovante d'une combinaison de matériaux à changement de phase (MCP) et de pierres naturelles pour le stockage thermique. Cette approche hybride maximise l'efficacité de stockage en permettant une distribution plus rapide et homogène de la chaleur, réduisant ainsi le temps de fusion et augmentant la capacité de stockage d'énergie. En offrant une solution qui combine les avantages des MCP avec l'amélioration thermique des pierres naturelles, nous fournissons un système de stockage thermique plus performant, fiable et adapté à diverses applications, notamment dans les secteurs des énergies renouvelables et du bâtiment.

2- Segments de clients (Customer Segment) أنواع العملاء :

a. Quels sont nos clients principaux ?

من هم العملاء او الزبائن الرئيسيون؟

Nos principaux clients sont susceptibles d'être des entreprises ou des organisations impliquées dans divers secteurs nécessitant des solutions de stockage thermique améliorées. Cela pourrait inclure des entreprises du secteur de la construction et de l'immobilier, des entreprises de production et de distribution d'énergie, des industries manufacturières nécessitant un contrôle thermique précis, ainsi que des institutions publiques ou privées cherchant des solutions durables pour leurs besoins énergétiques. En outre, les clients individuels intéressés par des solutions de chauffage domestique plus efficaces pourraient également constituer une part de notre marché cible.

b. Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?

ما هي الفئات المختلفة من العملاء التي تستهدفها؟

1. Les entreprises du secteur de la construction et de l'immobilier, cherchant des solutions de chauffage et de climatisation efficaces et durables pour leurs projets de construction ou de rénovation.
2. Les entreprises de production et de distribution d'énergie, recherchant des moyens d'optimiser le stockage et la distribution de l'énergie thermique.
3. Les industries manufacturières nécessitant un contrôle précis de la température pour leurs processus de production.
4. Les institutions publiques ou privées cherchant des solutions écoénergétiques pour leurs besoins de chauffage et de refroidissement.
5. Les particuliers souhaitant des solutions de chauffage domestique plus efficaces et respectueuses de l'environnement.



En ciblant ces segments diversifiés, nous pouvons maximiser notre portée et notre impact sur le marché du stockage thermique amélioré.

c. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?

ما هي الاحتياجات الخاصة لكل فئة من العملاء؟

Les besoins spécifiques de chaque segment de clients peuvent varier en fonction de leurs industries et de leurs contextes particuliers. Voici quelques exemples de besoins spécifiques pour chaque segment de clients :

1. Entreprises du secteur de la construction et de l'immobilier :

- Besoin de solutions de chauffage et de climatisation efficaces pour les bâtiments commerciaux et résidentiels.
- Recherche de solutions durables et respectueuses de l'environnement pour répondre aux normes de construction écologique.
- Besoin de solutions flexibles et adaptables pour différents types de structures et de designs architecturaux.

2. Entreprises de production et de distribution d'énergie :

- Besoin de systèmes de stockage thermique efficaces pour optimiser la gestion de l'énergie thermique produite.
- Recherche de solutions rentables pour augmenter l'efficacité de la distribution de l'énergie thermique.
- Besoin de systèmes fiables et robustes pour assurer une alimentation continue en énergie thermique.

3. Industries manufacturières :

- Besoin de contrôle précis de la température pour des processus de production spécifiques.
- Recherche de solutions de stockage thermique personnalisées pour répondre aux besoins spécifiques de leurs opérations.
- Besoin de systèmes de stockage thermique efficaces pour réduire les coûts opérationnels et améliorer la productivité.

4. Institutions publiques ou privées :



- Besoin de solutions écoénergétiques pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone.
- Recherche de solutions de chauffage et de refroidissement durables pour les bâtiments publics, les écoles, les hôpitaux, etc.
- Besoin de systèmes de stockage thermique fiables et simples à entretenir pour garantir un fonctionnement sans faille.

5. Particuliers :

- Besoin de solutions de chauffage domestique efficaces pour réduire les coûts énergétiques et améliorer le confort à domicile.
- Recherche de solutions durables et respectueuses de l'environnement pour les maisons et les appartements.
- Besoin de systèmes de stockage thermique simples à utiliser et à entretenir pour une utilisation quotidienne.
- En répondant à ces besoins spécifiques de chaque segment de clients, nous pouvons développer des solutions sur mesure et adaptées à leurs exigences uniques.

d. Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts ?

كيف يمكن تصنيف عملائنا الى مجموعات مختلفة؟

Nous pouvons catégoriser nos clients en groupes distincts en utilisant plusieurs critères tels que l'industrie, la taille de l'entreprise, les besoins en termes de stockage thermique, la localisation géographique et le comportement d'achat. Voici quelques façons de catégoriser nos clients :

- **Industrie** : Regrouper les clients selon les secteurs d'activité tels que la construction, l'énergie, la fabrication, etc.
- **Taille de l'entreprise** : Distinction entre les petites, moyennes et grandes entreprises en fonction de leur capacité financière et de leurs besoins en stockage thermique.
- **Besoins spécifiques** : Catégorisation en fonction des besoins particuliers en termes de stockage thermique, tels que l'efficacité énergétique, la durabilité, la flexibilité, etc.
- **Localisation géographique** : Regrouper les clients en fonction de leur emplacement géographique pour mieux comprendre les différences régionales en termes de besoins et de réglementations.



- **Comportement d'achat** : Segmenter les clients en fonction de leur comportement d'achat, tels que les premiers adoptants de nouvelles technologies, les clients réguliers, les clients sensibles au prix, etc.

En utilisant ces critères de segmentation, nous pouvons mieux comprendre les différents besoins et préférences de nos clients, ce qui nous permettra de développer des stratégies de marketing et de vente plus efficaces pour chaque groupe.

3- Relation avec les clients (Consumer Relationships) علاقة مع العملاء :

a. Quel type de relation chaque segment de clients attend il de nous ?

اي نوع من العلاقة يتوقعه كل فئة من العملاء منا؟

Chaque segment de clients peut avoir des attentes différentes en ce qui concerne le type de relation qu'il attend de nous. Voici quelques exemples de types de relations que différents segments de clients pourraient attendre :

1. Entreprises du secteur de la construction et de l'immobilier :

- Ils peuvent attendre une relation de partenariat à long terme pour collaborer sur des projets de construction ou de rénovation.
- Ils peuvent avoir besoin d'un support technique continu pour l'installation et la maintenance des systèmes de stockage thermique.

2. Entreprises de production et de distribution d'énergie :

Ils peuvent rechercher une relation de fournisseur fiable pour l'approvisionnement en équipements de stockage thermique.

Ils peuvent attendre un support technique rapide en cas de problèmes ou de pannes dans leurs systèmes de stockage thermique.

3. Industries manufacturières :

Ils peuvent attendre une relation de collaboration pour développer des solutions de stockage thermique personnalisées répondant à leurs besoins spécifiques.

Ils peuvent avoir besoin d'un support continu pour optimiser l'efficacité énergétique de leurs processus de production.

4. Institutions publiques ou privées :

Elles peuvent attendre une relation de conseil pour choisir les meilleures solutions de stockage thermique pour leurs bâtiments et leurs installations.



Elles peuvent avoir besoin d'un support régulier pour suivre les normes de sécurité et de durabilité en matière de stockage thermique.

5. Particuliers :

Ils peuvent attendre une relation de confiance pour obtenir des conseils sur les solutions de chauffage domestique les plus adaptées à leurs besoins.

Ils peuvent avoir besoin d'un support technique pour installer et entretenir les systèmes de stockage thermique dans leurs maisons.

En comprenant les attentes spécifiques de chaque segment de clients, nous pouvons développer des stratégies de relation client adaptées pour offrir une expérience positive et satisfaisante à nos clients.

b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?

كيف نحافظ حالياً على العلاقات مع عملائنا؟

Actuellement, nous entretenons les relations avec nos clients à travers plusieurs canaux et méthodes :

- Service client : Nous offrons un service clientèle réactif et disponible pour répondre aux questions, fournir un support technique et résoudre les problèmes rencontrés par nos clients.
- Visites sur site : Nous effectuons des visites sur site pour évaluer les besoins spécifiques de nos clients, fournir des recommandations personnalisées et garantir une installation correcte des systèmes de stockage thermique.
- Formation : Nous proposons des sessions de formation pour nos clients afin de les aider à comprendre et à utiliser efficacement nos produits et solutions de stockage thermique.
- Communications régulières : Nous entretenons des communications régulières avec nos clients par le biais de newsletters, de bulletins d'information ou de mises à jour sur les nouveaux produits et services.
- Programmes de fidélisation : Nous mettons en place des programmes de fidélisation pour récompenser la fidélité de nos clients et les inciter à continuer à travailler avec nous à long terme.
- Écoute client : Nous recueillons régulièrement les commentaires de nos clients pour comprendre leurs besoins, leurs préoccupations et leurs suggestions d'amélioration, ce qui nous permet d'ajuster nos produits et nos services en conséquence.



En combinant ces différentes approches, nous nous efforçons de maintenir des relations solides et durables avec nos clients, en répondant à leurs besoins et en leur offrant une valeur ajoutée tout au long de leur parcours client.

c. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?

كيف يمكننا تحسين أو تخصيص تفاعلاتنا مع عملائنا؟

Nous pouvons améliorer et personnaliser nos interactions avec nos clients de plusieurs façons

- Segmentation des clients : En segmentant nos clients en fonction de leurs besoins, de leurs préférences et de leur comportement d'achat, nous pouvons personnaliser nos interactions pour mieux répondre à leurs attentes spécifiques.
- Communication proactive : Plutôt que d'attendre que les clients viennent à nous avec des questions ou des problèmes, nous pouvons prendre l'initiative de communiquer proactivement avec eux pour leur fournir des informations utiles, des conseils et des mises à jour sur nos produits et services.
- Personnalisation des offres : En utilisant les données client disponibles, nous pouvons personnaliser nos offres pour répondre aux besoins et aux intérêts spécifiques de chaque client, ce qui peut inclure des recommandations de produits, des promotions ou des services supplémentaires pertinents.
- Suivi après-vente : Nous pouvons mettre en place un processus de suivi après-vente pour recueillir les commentaires des clients sur leur expérience avec nos produits et services, et pour résoudre rapidement tout problème ou préoccupation qu'ils pourraient avoir.
- Formation continue : En offrant des opportunités de formation continue à nos clients, nous pouvons les aider à maximiser l'utilisation de nos produits et services, ce qui peut contribuer à renforcer leur satisfaction et leur fidélité.
- Utilisation de la technologie : En exploitant les outils technologiques tels que les logiciels de gestion de la relation client (CRM) et les plateformes de communication numérique, nous pouvons automatiser et personnaliser nos interactions avec les clients de manière plus efficace et efficiente.



En mettant en œuvre ces stratégies, nous pouvons améliorer l'expérience client et renforcer les relations avec nos clients, ce qui peut conduire à une fidélisation accrue et à une croissance à long terme de notre entreprise.

4-Canaux de distribution (Channels) قنوات التوزيع :

a- Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?

من خلال أي قنوات يفضل عملاؤنا أن يتم التواصل معهم؟

Les canaux par lesquels nos clients souhaitent être atteints peuvent varier en fonction de leurs préférences et de leurs segments spécifiques.

Entreprises de construction et d'immobilier

- Visites sur site : Consultations et évaluations directes.
- Email : Communication régulière et envoi de rapports détaillés.
- Webinaires et conférences : Présentation de nouvelles technologies et solutions.
- Réseaux professionnels : Plateformes comme LinkedIn pour les mises à jour et les connexions.

Producteurs et distributeurs d'énergie :

- Visites sur site et démonstrations : Présentation pratique des solutions.
- Téléphone et support technique : Assistance rapide et personnalisée.
- Publications spécialisées : Articles et études de cas dans des revues industrielles.
- Forums et groupes de discussion : Partage d'expériences et conseils.

Industries manufacturières :

- Consultations directes : Rencontres pour discuter des besoins spécifiques.
- Support en ligne et chat : Assistance technique en temps réel.
- Manuels et guides détaillés : Documentation pour l'installation et l'utilisation.
- Formations en entreprise : Sessions de formation personnalisées sur place.

Institutions publiques et privées :

- Appels d'offres et propositions formelles : Réponse à des besoins spécifiques par des propositions détaillées.



- Réunions et présentations : Sessions pour expliquer les avantages des solutions.
- Support téléphonique et par email : Assistance continue.
- Webinaires éducatifs : Formation sur les avantages écologiques et économiques.

Particuliers :

- Sites web et e-commerce : Information sur les produits et achats en ligne.
- Médias sociaux : Mises à jour et conseils via Facebook, Instagram, etc.
- Service client téléphonique : Assistance pour l'installation et la maintenance.
- Vidéos et tutoriels en ligne : Guides pratiques pour l'utilisation des systèmes..

b- Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?

ما هي القنوات الأكثر فعالية للوصول إلى كل فئة من العملاء؟

Pour chaque segment, les canaux les plus efficaces sont :

Entreprises de construction et d'immobilier : Visites sur site, email, webinaires, LinkedIn.

Producteurs et distributeurs d'énergie : Visites sur site, téléphone, publications spécialisées, forums.

Industries manufacturières : Consultations directes, support en ligne, manuels, formations en entreprise.

Institutions publiques et privées : Appels d'offres, réunions, support téléphonique/email, webinaires.

Particuliers : Sites web/e-commerce, médias sociaux, service client téléphonique, vidéos/tutoriels.

En utilisant ces canaux de manière ciblée, nous pouvons atteindre chaque segment de clients de manière efficace et répondre à leurs besoins spécifiques.

c- Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?

كيف يمكننا دمج مختلف القنوات لتحسين تجربة العملاء؟



Intégrer différents canaux de manière cohérente et stratégique peut grandement améliorer l'expérience client. Voici quelques méthodes pour y parvenir :

1. Multicanal cohérent :

Centralisation des données clients : Utiliser un système de gestion de la relation client (CRM) pour centraliser toutes les interactions client à travers différents canaux. Cela permet de maintenir une vue complète et à jour de chaque client.

Synchronisation des communications : Assurer que les informations et messages envoyés par email, téléphone, médias sociaux et site web sont cohérents et alignés.

2. Automatisation et personnalisation :

Automatisation des tâches répétitives : Utiliser des outils d'automatisation pour envoyer des réponses rapides et personnaliser les communications en fonction des interactions passées du client.

Personnalisation des interactions : Adapter les messages en fonction des segments de clients et de leurs comportements passés, tout en utilisant les données CRM pour personnaliser les offres et les conseils.

3. Support omnicanal :

Canaux interconnectés : Offrir un support client qui peut passer facilement d'un canal à un autre sans perte d'information. Par exemple, commencer une conversation sur le chat en ligne et la continuer par téléphone ou email.

Accessibilité 24/7 : Fournir des options de support accessibles à tout moment, telles que les FAQ en ligne, les tutoriels vidéo, et les chatbots pour les questions simples.

4. Feedback et amélioration continue :

Collecte de feedback : Utiliser des sondages post-interaction pour recueillir des avis clients après des échanges sur différents canaux (email, téléphone, chat en ligne).

Analyse des données : Analyser les données de feedback pour identifier les points faibles et les opportunités d'amélioration dans l'expérience client.

5. Intégration des canaux digitaux et physiques :



Webinaires et événements en ligne : Organiser des webinaires et des sessions de formation en ligne pour éduquer les clients sur les produits et solutions.

Démonstrations sur site et consultations virtuelles : Proposer des démonstrations et des consultations à la fois en personne et virtuellement, pour toucher une audience plus large.

6. Contenus informatifs et éducatifs :

Bibliothèque de ressources en ligne : Créer une section de ressources sur le site web avec des guides, des tutoriels vidéo, des FAQ et des études de cas pour aider les clients à trouver rapidement des réponses.

Campagnes de newsletters : Envoyer régulièrement des newsletters avec des informations utiles, des mises à jour de produits et des conseils pratiques.

Exemple de parcours client intégré :

- Découverte : Le client découvre notre solution via une publication sur les réseaux sociaux.
- Information : Il visite notre site web pour en savoir plus, télécharge un guide détaillé et regarde un tutoriel vidéo.
- Consultation : Il s'inscrit à un webinaire pour poser des questions spécifiques et recevoir des recommandations.
- Essai et achat : Il bénéficie d'une démonstration sur site ou virtuelle, puis achète le produit en ligne.
- Support : Après l'achat, il utilise le support en ligne pour l'installation, et peut contacter le service client par téléphone pour des questions spécifiques.
- Suivi : Il reçoit des emails de suivi et des newsletters avec des astuces d'optimisation et des mises à jour sur les produits.

En intégrant ces canaux de manière stratégique, nous pouvons offrir une expérience client fluide, personnalisée et engageante, tout en répondant aux besoins spécifiques de chaque segment de clientèle.

5-Partenaires clés (Key Partnerships) : الشراكة الرئيسية :

a. Qui sont nos partenaires clés ?

من هم شركاؤنا الرئيسيون؟



Nos partenaires clés sont les parties prenantes essentielles qui contribuent à la réussite de notre projet de stockage thermique amélioré par des pierres naturelles. Voici une liste des partenaires clés :

Fournisseurs de matières premières :

- Fournisseurs de pierres naturelles (cailloux de mer) : Ils fournissent les pierres naturelles nécessaires à la conception de notre solution de stockage thermique.
- Fournisseurs de matériel complémentaire : Entreprises qui fournissent les équipements et les matériaux supplémentaires nécessaires à l'installation et à l'optimisation des systèmes de stockage thermique.

Partenaires technologiques :

- Développeurs de technologies de stockage thermique : Collaborateurs qui aident à concevoir, tester et améliorer les technologies de stockage thermique.
- Fournisseurs de logiciels de gestion énergétique : Entreprises qui offrent des solutions logicielles pour la gestion et l'optimisation de l'énergie thermique stockée.

Institutions de recherche et universités :

- Laboratoires de recherche en énergie : Institutions qui mènent des recherches avancées sur l'efficacité des solutions de stockage thermique et les innovations possibles.
- Universités et centres académiques : Partenariats pour mener des études, des tests et des validations de nos solutions en conditions réelles.

Partenaires financiers :

- Investisseurs et bailleurs de fonds : Fournisseurs de capital pour la recherche, le développement et la mise en œuvre de nos solutions.
- Institutions financières : Banques et autres entités financières qui soutiennent nos projets par des prêts et des financements.

Partenaires de distribution et de vente :

- Distributeurs et revendeurs : Réseaux qui aident à commercialiser et à distribuer nos solutions de stockage thermique.



- Installateurs et entrepreneurs : Professionnels qui installent nos systèmes chez les clients et assurent leur maintenance.

Partenaires de réglementation et de certification :

- Organismes de certification : Entités qui certifient que nos solutions répondent aux normes de qualité et de sécurité.
- Autorités de régulation : Institutions qui veillent à ce que nos produits respectent les réglementations locales et internationales.

Clients stratégiques :

- Clients pilotes : Clients prêts à tester nos solutions en avant-première et à fournir des retours détaillés pour les améliorations futures.

b. Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?

ما هي الشراكات التي تساعدنا على خفض التكاليف أو الوصول إلى موارد جديدة أو تحسين قيمتنا المقترحة؟

Les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur sont essentiels pour la réussite de notre projet. Voici comment différents types de partenariats contribuent à ces objectifs :

Réduction des coûts

1. Fournisseurs de matières premières :

- Fournisseurs de pierres naturelles (cailloux de mer) : Des accords à long terme avec de fournisseurs fiables peuvent garantir des prix compétitifs et des approvisionnements stables.
- Fournisseurs de matériel complémentaire : Collaborer avec des fournisseurs pour obtenir des réductions sur les volumes d'achat importants ou des tarifs préférentiels.

2. Partenaires de fabrication et de logistique :



- Fabricants : Externaliser certaines étapes de la production à des fabricants spécialisés peut réduire les coûts de fabrication.
- Logisticiens : Partenariats avec des entreprises de logistique pour optimiser la chaîne d'approvisionnement et réduire les frais de transport et de stockage.

Accès à de nouvelles ressources

1. Institutions de recherche et universités :

- Laboratoires de recherche en énergie : Accès à des installations de pointe et à des chercheurs spécialisés pour tester et améliorer nos technologies.
- Universités : Collaboration pour des projets de recherche communs et des essais pilotes, bénéficiant des ressources académiques et des subventions de recherche.

2. Partenaires technologiques :

- Développeurs de technologies de stockage thermique : Partage de technologies et de savoir-faire pour développer des solutions plus efficaces.
- Fournisseurs de logiciels de gestion énergétique : Intégration de logiciels avancés pour optimiser l'efficacité énergétique de nos solutions.

Amélioration de la proposition de valeur

1. Partenaires de distribution et de vente :

- Distributeurs et revendeurs : Accès à des marchés plus larges et augmentation de la visibilité de nos produits.
- Installateurs et entrepreneurs : Services d'installation et de maintenance de haute qualité, assurant la satisfaction des clients et la performance optimale des systèmes.

2. Partenaires financiers :

- Investisseurs et bailleurs de fonds : Fournir le capital nécessaire pour la recherche et le développement, ainsi que pour les campagnes de commercialisation.
- Institutions financières : Accès à des financements à des conditions favorables pour soutenir la croissance et l'expansion.

3. Organismes de certification et de réglementation :



- Organismes de certification : Certification de nos produits pour garantir la conformité aux normes de qualité et de sécurité, augmentant ainsi la confiance des clients.
- Autorités de régulation : Assurer que nos produits respectent les réglementations locales et internationales, facilitant l'entrée sur de nouveaux marchés.

c. Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?

كيف يمكننا مزامنة مصالحنا مع تلك لشركائنا؟

Aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires est crucial pour bâtir des relations mutuellement bénéfiques et durables. Voici quelques stratégies pour y parvenir :

1. Établir des objectifs communs

- Définir des buts partagés : Identifier et clarifier les objectifs communs dès le début de la collaboration, comme la réduction des coûts, l'innovation technologique, l'expansion de marché ou l'amélioration de la qualité des produits.
- Créer des indicateurs de performance clés (KPI) communs : Développer des KPI pour mesurer le succès de la collaboration, permettant à chaque partie de suivre les progrès et de rester alignée sur les objectifs.

2. Communication ouverte et transparente

- Échanges réguliers : Organiser des réunions régulières pour discuter des progrès, des défis et des opportunités, tout en maintenant une communication ouverte pour éviter les malentendus.
- Transparence financière : Partager les informations financières pertinentes pour assurer une compréhension mutuelle des coûts et des bénéfices.

3. Partage des risques et des récompenses

- Contrats de partage des risques : Établir des accords qui répartissent équitablement les risques associés à la collaboration, comme les investissements en R&D ou les fluctuations des marchés.
- Répartition des bénéfices : Mettre en place des structures de répartition des bénéfices qui reflètent équitablement les contributions de chaque partenaire.

4. Co-développement et innovation

- Projets de R&D communs : Lancer des projets de recherche et développement conjointement pour encourager l'innovation et partager les coûts et les ressources.

- Ateliers et brainstorming : Organiser des sessions collaboratives pour générer des idées novatrices et résoudre des problèmes ensemble.

5. Flexibilité et adaptabilité

- Contrats flexibles : Rédiger des accords qui permettent des ajustements en fonction des évolutions du marché ou des changements dans les objectifs des partenaires.
- Adaptation aux besoins : Être prêt à ajuster les stratégies et les plans en fonction des feedbacks et des nouvelles circonstances.

6. Reconnaissance et valorisation

- Reconnaissance des contributions : Valoriser et reconnaître publiquement les contributions de chaque partenaire, renforçant ainsi la motivation et l'engagement.
- Célébration des réussites : Célébrer ensemble les réussites et les jalons importants pour renforcer les liens et la satisfaction mutuelle.

7. Accords de coopération à long terme

- Engagements à long terme : Établir des partenariats sur le long terme pour garantir une stabilité et une continuité dans la collaboration.
- Planification stratégique commune : Développer des plans stratégiques à long terme ensemble, alignant les visions et les objectifs futurs.

6-Activités clés (Key Activities): الأنشطة الرئيسية:

a. Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?

ما هي الأنشطة الرئيسية التي يجب علينا القيام بها لتقديم قيمتنا المقترحة؟

Pour livrer notre proposition de valeur, qui consiste à améliorer le stockage thermique en utilisant des pierres naturelles, nous devons entreprendre plusieurs actions clés. Voici un plan détaillé :

1. Recherche et Développement (R&D)

- Études préliminaires : Mener des recherches approfondies pour comprendre les propriétés thermiques des pierres naturelles et comment elles peuvent améliorer le stockage thermique.
- Prototypage : Développer des prototypes de systèmes de stockage thermique utilisant des pierres naturelles pour tester leur efficacité.
- Tests et validation : Effectuer des tests en conditions réelles pour valider les performances des systèmes et apporter les ajustements nécessaires.



2. Conception et Ingénierie

- Conception de systèmes : Concevoir des systèmes de stockage thermique optimisés pour intégrer les pierres naturelles de manière efficace.
- Optimisation des matériaux : Travailler sur l'optimisation des propriétés des pierres pour maximiser leur capacité de stockage thermique.

3. Partenariats stratégiques

- Établir des partenariats : Collaborer avec des fournisseurs de pierres naturelles, des laboratoires de recherche et des institutions académiques pour bénéficier de leur expertise et de leurs ressources.
- Négociations de fourniture : Établir des accords de fourniture à long terme avec des fournisseurs pour garantir la disponibilité et la qualité des matériaux.

4. Production et Logistique

- Mise en place de la production : Installer les lignes de production nécessaires pour fabriquer les systèmes de stockage thermique à grande échelle.
- Gestion de la chaîne d'approvisionnement : Optimiser la chaîne d'approvisionnement pour assurer une livraison efficace des matériaux et des produits finis.

5. Marketing et Vente

- Campagnes de marketing : Développer des campagnes de marketing pour sensibiliser les clients potentiels aux avantages de notre solution de stockage thermique.
- Réseautage et promotion : Participer à des salons professionnels, conférences et autres événements pour promouvoir notre solution et établir des contacts avec des clients potentiels.

6. Service Client et Support Technique

- Formation et éducation : Offrir des formations et des supports éducatifs aux clients pour leur permettre de tirer le meilleur parti de nos systèmes de stockage thermique.
- Support après-vente : Mettre en place un service client réactif pour répondre aux questions et résoudre les problèmes des clients.

7. Suivi et Amélioration Continue

- Collecte de feedback : Recueillir les retours des clients pour identifier les points forts et les aspects à améliorer.
- Innovation continue : Investir en continu dans la recherche et le développement pour améliorer nos solutions et rester à la pointe de la technologie.

8. Conformité et Certification



Respect des normes : Assurer que nos systèmes de stockage thermique respectent toutes les normes de sécurité et de performance applicables.

Certification : Obtenir les certifications nécessaires pour garantir la qualité et la fiabilité de nos produits.

b. Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?

ما هي العمليات الأساسية لشركتنا؟

Pour assurer le bon fonctionnement et le succès de notre entreprise spécialisée dans le stockage thermique amélioré avec des pierres naturelles, nous devons nous concentrer sur plusieurs opérations essentielles. Ces opérations couvrent l'ensemble du processus, de la recherche initiale à la vente et au support client. Voici une vue d'ensemble des opérations essentielles :

1. Recherche et Développement (R&D)

- Innovation produit : Développement continu de nouvelles techniques pour améliorer l'efficacité du stockage thermique avec des pierres naturelles.
- Tests et validation : Conduite de tests rigoureux pour valider les performances des systèmes dans différentes conditions.

2. Conception et Ingénierie

- Design de systèmes : Conception de systèmes de stockage thermique optimisés pour intégrer efficacement les pierres naturelles.
- Prototypage : Création de prototypes pour tester les concepts et ajuster les designs avant la production en série.

3. Approvisionnement et Gestion des Matériaux

- Sourcing : Identification et sélection de fournisseurs fiables de pierres naturelles et autres matériaux nécessaires.
- Logistique : Gestion de la chaîne d'approvisionnement pour assurer une livraison ponctuelle et la disponibilité des matériaux.

4. Production et Fabrication

- Fabrication : Production des systèmes de stockage thermique selon les spécifications de conception.
- Contrôle de qualité : Mise en place de processus de contrôle de qualité rigoureux pour garantir la fiabilité et l'efficacité des produits finis.

5. Marketing et Vente



- Stratégie de marketing : Développement et mise en œuvre de stratégies de marketing pour promouvoir nos solutions de stockage thermique.

- Vente : Gestion des ventes directes et indirectes, y compris la formation et le support des équipes de vente et des distributeurs.

6. Service Client et Support Technique

- Support après-vente : Fournir un support technique réactif pour aider les clients à utiliser et entretenir nos systèmes.
- Formation client : Offrir des sessions de formation pour éduquer les clients sur les meilleures pratiques d'utilisation de nos produits.

7. Gestion Financière

- Planification budgétaire : Gestion des finances de l'entreprise, y compris la budgétisation, la prévision et le suivi des dépenses.
- Levée de fonds : Identification et sécurisation des sources de financement pour soutenir la croissance et l'innovation.

8. Conformité et Certification

- Respect des normes : Assurer que nos produits sont conformes aux normes de sécurité et de performance applicables.
- Certification produit : Obtenir et maintenir les certifications nécessaires pour garantir la qualité et la fiabilité de nos produits.

9. Partenariats Stratégiques

- Collaboration : Établir et maintenir des partenariats avec des fournisseurs, des institutions de recherche et des distributeurs pour renforcer notre position sur le marché.
- Négociation : Négocier des termes avantageux avec les partenaires pour maximiser les bénéfices mutuels.

10. Suivi et Amélioration Continue

- Feedback client : Recueillir et analyser les retours des clients pour identifier les domaines d'amélioration.
- Innovation continue : Investir dans l'amélioration continue des produits et des processus pour rester compétitif.

c. Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?

ما هي الأنشطة التي تخلق أكبر قيمة لعملائنا؟



Pour déterminer quelles activités créent le plus de valeur pour nos clients dans notre entreprise de stockage thermique amélioré avec des pierres naturelles, nous devons comprendre les besoins et les priorités de nos clients. Voici quelques activités qui sont susceptibles de créer une valeur significative pour nos clients :

1. Recherche et Développement (R&D) Axée sur les Besoins Clients

- Innovation Produit : Développer des solutions de stockage thermique qui répondent directement aux besoins et aux défis spécifiques de nos clients, tels que l'efficacité énergétique, la fiabilité et la durabilité.
- Personnalisation : Offrir des options personnalisées permettant aux clients de choisir des systèmes adaptés à leurs exigences spécifiques en termes de capacité de stockage, d'espace disponible, etc.

2. Conception de Systèmes Optimaux

- Design Ergonomique : Concevoir des systèmes de stockage thermique qui sont faciles à installer, à utiliser et à entretenir, offrant ainsi une expérience utilisateur optimale.
- Optimisation de l'Espace : Concevoir des solutions compactes et efficaces pour maximiser l'utilisation de l'espace disponible chez les clients.

3. Qualité des Matériaux et Fabrication

- Sélection de Matériaux de Qualité : Utiliser des pierres naturelles de haute qualité et d'autres matériaux qui garantissent une performance optimale et une longue durée de vie des systèmes.
- Contrôle de Qualité Rigoureux : Assurer une fabrication de qualité supérieure avec des normes strictes de contrôle qualité pour garantir la fiabilité et la durabilité des produits.

4. Support Client et Service Après-Vente

- Formation et Support Technique : Fournir une assistance technique et des formations approfondies pour aider les clients à installer, utiliser et entretenir efficacement leurs systèmes de stockage thermique.
- Réactivité et Disponibilité : Offrir un service client réactif et disponible pour répondre rapidement aux questions et aux préoccupations des clients.

5. Conformité aux Normes et Certification



- Fiabilité et Sécurité : Garantir que nos produits respectent toutes les normes de sécurité et de performance applicables, offrant ainsi une tranquillité d'esprit aux clients.
- Certifications : Obtenir des certifications reconnues pour prouver la conformité de nos produits et renforcer la confiance des clients.

6. Innovation Continue et Amélioration

- Investissement dans la Recherche : Continuer à investir dans la recherche et le développement pour innover et proposer des solutions toujours plus performantes et adaptées aux besoins évolutifs des clients.
- Feedback Client : Recueillir et prendre en compte les commentaires des clients pour améliorer constamment nos produits et services.

7. Durabilité et Respect de l'Environnement

- Solutions Écologiques : Développer des systèmes de stockage thermique respectueux de l'environnement qui réduisent l'empreinte carbone et contribuent à la durabilité globale de nos clients.
- Gestion Responsable des Ressources : S'engager dans des pratiques de fabrication durables et éthiques, démontrant ainsi notre engagement envers la responsabilité sociale et environnementale.

En mettant l'accent sur ces activités, nous pouvons créer une valeur significative pour nos clients, en leur offrant des solutions de stockage thermique efficaces, fiables, durables et adaptées à leurs besoins spécifiques, tout en contribuant à leur succès et à leur satisfaction à long terme.

7- Ressources clés (Key resources): الموارد الرئيسية:

a. Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?

ما هي الأصول المادية وغير المادية والبشرية الأساسية لدينا؟

Actifs Matériels :

1. Équipements de Production : Machines et outils nécessaires à la fabrication des systèmes de stockage thermique.
2. Stock de Matériaux : Approvisionnement en pierres naturelles de haute qualité et autres matériaux nécessaires à la production.
3. Installations Physiques : Installations de production, entrepôts de stockage et bureaux administratifs.

Actifs Immatériels :



1. Propriété Intellectuelle : Brevets, droits d'auteur et autres actifs intellectuels liés aux technologies de stockage thermique développées par l'entreprise.
2. Marque et Réputation : Réputation de l'entreprise et de ses produits sur le marché, ainsi que la valeur de sa marque.
3. Relations Clientèle : Base de données client, historique des interactions et relations établies avec les clients.

Actifs Humains :

1. Équipe de Recherche et Développement : Ingénieurs et chercheurs chargés de développer de nouvelles technologies et d'améliorer les produits existants.
2. Équipe de Production : Personnel chargé de la fabrication et de l'assemblage des systèmes de stockage thermique.
3. Équipe de Vente et de Marketing : Professionnels du marketing et des ventes chargés de promouvoir les produits et de conclure des ventes.
4. Service Client et Support Technique : Personnel fournissant un support technique et un service client de qualité.
5. Direction et Gestion : Cadres et gestionnaires chargés de superviser les opérations quotidiennes et de prendre des décisions stratégiques.

Importance des Actifs :

- Les actifs matériels sont essentiels pour la fabrication des produits et la gestion des opérations de l'entreprise.
- Les actifs immatériels, tels que la propriété intellectuelle et la réputation de la marque, contribuent à la valeur et à la différenciation de l'entreprise sur le marché.
- Les actifs humains sont cruciaux pour l'innovation, la production, la vente et le service client, jouant un rôle clé dans le succès global de l'entreprise.

En tirant parti de ces actifs essentiels et en les gérant de manière efficace, nous pouvons renforcer notre position concurrentielle, offrir une proposition de valeur unique à nos clients et assurer la croissance et la pérennité de notre entreprise.

b. Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?

ما هي الأدوات والتكنولوجيا أو الشراكات التي نحتاجها لتحقيق النجاح؟

Outils et Technologies :



- Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) : Pour concevoir et modéliser les systèmes de stockage thermique.
- Systèmes de Contrôle de Qualité : Pour surveiller et garantir la qualité des produits tout au long du processus de fabrication.
- Systèmes de Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement : Pour optimiser la gestion des approvisionnements en matériaux et la logistique.
- Technologies de Fabrication Avancées : Comme l'impression 3D, pour accélérer et améliorer le processus de fabrication.
- Logiciels de Simulation Thermique : Pour simuler et optimiser les performances des systèmes de stockage thermique dans différentes conditions.

Partenariats Stratégiques :

- Fournisseurs de Matériaux : Pour garantir un approvisionnement fiable en pierres naturelles de haute qualité.
- Institutions de Recherche : Pour collaborer à des projets de recherche et développement visant à améliorer les performances des systèmes.
- Partenaires Technologiques : Pour accéder à des technologies complémentaires et à des expertises spécialisées.
- Distributeurs et Revendeurs : Pour élargir notre portée sur le marché et accéder à de nouveaux clients.
- Partenaires de Production : Pour externaliser certaines étapes de la fabrication ou accéder à des capacités de production supplémentaires si nécessaire.

Technologies Émergentes :

- Stockage d'Énergie Renouvelable : Intégration de technologies de stockage d'énergie renouvelable pour des solutions plus durables et autonomes.
- Intelligence Artificielle (IA) et Internet des Objets (IoT) : Pour optimiser les performances des systèmes de stockage thermique et offrir des fonctionnalités intelligentes.
- Blockchain : Pour garantir la traçabilité et la transparence tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Formation et Développement du Personnel :

- Formation Technique : Pour assurer que notre équipe possède les compétences nécessaires pour concevoir, fabriquer et installer nos produits.



- Formation Commerciale : Pour développer les compétences de vente et de marketing nécessaires pour promouvoir nos solutions et conclure des ventes réussies.
- Formation Continue : Pour rester à jour avec les dernières technologies et pratiques de l'industrie.

En investissant dans ces outils, technologies et partenariats, nous pouvons renforcer notre capacité à innover, à produire des produits de haute qualité et à offrir une valeur ajoutée à nos clients. Cela nous aidera à rester compétitifs sur le marché et à assurer le succès à long terme de notre entreprise.

c. Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?

ما هي المزايا التنافسية الرئيسية لمواردنا؟

1. Expertise Technique et Innovation :

- Équipe R&D Talentueuse : Nous disposons d'une équipe de recherche et développement hautement qualifiée et expérimentée, capable d'innover continuellement et de développer des solutions de stockage thermique de pointe.
- Capacité d'Innovation : Notre entreprise est reconnue pour son esprit d'innovation et sa capacité à concevoir des systèmes de stockage thermique efficaces et fiables, adaptés aux besoins évolutifs du marché.

2. Qualité des Produits et Fiabilité :

- Matériaux de Haute Qualité : Nous utilisons des pierres naturelles de haute qualité et d'autres matériaux premium qui garantissent la durabilité et la fiabilité de nos systèmes.
- Contrôle de Qualité Rigoureux : Nous avons mis en place des processus de contrôle qualité stricts tout au long de la production pour garantir des normes élevées de qualité et de performance.

3. Service Client Exceptionnel :

- Support Technique Réactif : Notre équipe de service client est hautement réactive et dévouée à fournir une assistance technique et un support de qualité supérieure à nos clients.
- Formation et Éducation : Nous offrons des programmes de formation et d'éducation approfondis pour aider nos clients à tirer le meilleur parti de nos systèmes de stockage thermique.

4. Flexibilité et Personnalisation :



- Solutions sur Mesure : Nous sommes capables de personnaliser nos systèmes de stockage thermique pour répondre aux besoins spécifiques de nos clients en termes de capacité, d'espace disponible et de performances requises.
- Réactivité aux Demandes Clients : Notre entreprise est flexible et réactive, capable de s'adapter rapidement aux demandes changeantes du marché et des clients.

5. Engagement envers la Durabilité :

- Produits Respectueux de l'Environnement : Nous nous engageons à développer des solutions de stockage thermique respectueuses de l'environnement qui contribuent à la durabilité globale de nos clients.
- Pratiques de Fabrication Durables : Nous adoptons des pratiques de fabrication durables et éthiques, démontrant ainsi notre engagement envers la responsabilité sociale et environnementale.

6. Collaboration Stratégique :

- Partenariats Clés : Nous avons établi des partenariats stratégiques avec des fournisseurs de matériaux de confiance, des institutions de recherche et des distributeurs, renforçant ainsi notre capacité à innover et à livrer des solutions de haute qualité à nos clients.
- Réseautage et Collaboration : Nous entretenons des relations solides avec d'autres acteurs de l'industrie et participons activement à des collaborations et à des initiatives sectorielles.

7. Marque et Réputation :

- Réputation de Qualité : Notre entreprise jouit d'une excellente réputation sur le marché pour la qualité et la fiabilité de ses produits, renforçant ainsi la confiance des clients.
- Différenciation : Notre marque est différenciée par notre engagement envers l'innovation, la qualité, le service client et la durabilité, nous positionnant comme un leader dans notre domaine.

En capitalisant sur ces avantages concurrentiels, nous sommes bien positionnés pour continuer à fournir une valeur ajoutée à nos clients, à accroître notre part de marché et à assurer la croissance et la pérennité de notre entreprise dans un environnement concurrentiel.

8- Charges et coûts (Coste structure) : التكاليف

a. Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?

ما هي التكاليف الثابتة والمتغيرة المرتبطة بنموذجنا الاقتصادي؟



Coûts Fixes :

1. Équipements de Production : Les machines et les outils nécessaires à la fabrication des systèmes de stockage thermique constituent un investissement initial important et sont considérés comme des coûts fixes.
2. Installations Physiques : Les coûts liés à l'acquisition ou à la location d'installations de production, d'entrepôts de stockage et de bureaux administratifs sont des coûts fixes.
3. Développement de Produits : Les coûts associés à la recherche et au développement de nouvelles technologies et de nouveaux produits sont généralement fixes, bien que ces coûts puissent varier selon le niveau d'innovation.
4. Salaires et Frais Généraux : Les salaires du personnel administratif et de gestion, ainsi que les frais généraux tels que les services publics, l'assurance et les frais de bureau, sont des coûts fixes.

Coûts Variables :

1. Matériaux : Les pierres naturelles et autres matériaux utilisés dans la fabrication des systèmes de stockage thermique sont des coûts variables, car ils augmentent proportionnellement à la quantité de produits fabriqués.
2. Main-d'œuvre de Production : Les coûts de main-d'œuvre associés à la production des systèmes de stockage thermique, tels que les salaires des ouvriers et des techniciens, sont des coûts variables.
3. Frais de Logistique : Les coûts de transport et de manutention des matériaux et des produits finis peuvent varier en fonction du volume de production et de la distance parcourue.
4. Marketing et Vente : Les dépenses liées aux efforts de marketing et de vente, tels que la publicité, les salaires des représentants commerciaux et les frais de promotion, peuvent être considérés comme des coûts variables, car ils peuvent être ajustés en fonction des objectifs de vente.
5. Service Client : Les coûts associés au service client, tels que les salaires des représentants du service client et les frais de communication, peuvent également varier en fonction du volume d'activité et des besoins des clients.

Mixte Fixe/Variable :

Certains coûts peuvent être à la fois fixes et variables en fonction de la manière dont ils sont engagés :

- Dépenses de Recherche et Développement (R&D) : Une partie des dépenses de R&D peut être considérée comme fixe, notamment les salaires des chercheurs et les frais de laboratoire. Cependant, les coûts de développement de produits spécifiques peuvent être considérés comme variables, car ils dépendent des projets spécifiques en cours.
- Dépenses d'Entretien et de Réparation : Bien que certaines dépenses d'entretien, telles que les contrats de maintenance préventive, puissent être considérées comme fixes, les coûts de réparation peuvent être variables, car ils dépendent de l'état des équipements et des installations.

En comprenant ces coûts fixes et variables, nous pouvons mieux gérer nos finances, optimiser nos processus et prendre des décisions éclairées pour assurer la rentabilité et la viabilité à long terme de notre entreprise.

b. Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?

ما هي التكاليف الأكثر أهمية لشركتنا؟

1. Coûts de Matériaux :

- Les matériaux utilisés dans la fabrication des systèmes de stockage thermique, en particulier les pierres naturelles et autres matériaux de haute qualité, peuvent représenter l'un des plus grands postes de dépenses pour notre entreprise, surtout si nous avons une demande importante ou si les prix des matériaux fluctuent.

2. Coûts de Main-d'Œuvre :

- Les salaires et les avantages sociaux du personnel de production, de l'équipe de recherche et développement, ainsi que du personnel administratif, peuvent constituer une part importante de nos coûts d'exploitation. La gestion efficace de ces coûts tout en assurant la qualité du travail est essentielle.

3. Coûts de Recherche et Développement :

- Les investissements dans la recherche et le développement de nouvelles technologies et de nouveaux produits sont essentiels pour rester compétitif et innovant sur le marché. Cependant, ces activités peuvent également représenter des coûts importants, en particulier dans les premières étapes de développement.

4. Coûts Marketing et Vente :

- La promotion de nos produits, les efforts de vente et les activités de marketing peuvent nécessiter des investissements significatifs pour attirer et conserver les clients. Les dépenses liées à la publicité, au marketing en ligne, aux salaires des représentants commerciaux et aux commissions de vente peuvent être importantes.



5. Coûts d'Infrastructure et d'Équipement :

- L'acquisition, la maintenance et la mise à niveau des équipements de production, ainsi que les coûts associés aux installations physiques telles que les locaux de production et les entrepôts de stockage, peuvent représenter des dépenses considérables pour notre entreprise.

6. Coûts Logistiques :

- Les coûts de transport, de manutention et de distribution des matériaux et des produits finis peuvent également être significatifs, en particulier si nous avons des opérations de distribution étendues ou si les produits doivent être expédiés sur de longues distances.

7. Coûts de Service Client :

- Assurer un service client de qualité peut également entraîner des coûts importants, y compris les salaires du personnel de support client, les frais de communication et les investissements dans les systèmes et les outils de gestion de la relation client (CRM).

En comprenant et en gérant efficacement ces coûts, nous pouvons optimiser nos opérations, maximiser notre rentabilité et maintenir notre compétitivité sur le marché du stockage thermique amélioré avec des pierres naturelles.

c. Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?

كيف يمكننا خفض التكاليف أو تحسين كفاءة عملياتنا؟

1. Optimisation des Processus de Production:

- Analyse des Processus : Examiner et identifier les inefficacités dans nos processus de production afin de les optimiser et d'éliminer les gaspillages.
- Automatisation : Investir dans des technologies d'automatisation pour accélérer les tâches répétitives et réduire les erreurs humaines.
- Planification de la Production : Mettre en place une planification de production efficace pour maximiser l'utilisation des ressources et réduire les temps d'arrêt.

2. Gestion de la Chaîne d'Approvisionnement:

- Relations avec les Fournisseurs : Négocier des contrats avantageux avec nos fournisseurs pour obtenir des prix compétitifs sur les matériaux et réduire les coûts d'approvisionnement.



- Gestion des Stocks : Optimiser nos niveaux de stock pour éviter les surplus et les pénuries, réduisant ainsi les coûts de stockage et de gestion des stocks.
- 3. Investissements dans la Technologie:**
- Logiciels de Gestion : Utiliser des logiciels de gestion de la chaîne d'approvisionnement, de la production et des ventes pour optimiser les opérations et réduire les inefficacités.
 - Technologies de Fabrication Avancées : Investir dans des technologies de fabrication avancées telles que l'impression 3D pour réduire les coûts de production et accélérer les délais de fabrication.
- 4. Formation du Personnel:**
- Développement des Compétences : Offrir une formation continue à notre personnel pour améliorer leurs compétences et leur efficacité dans leurs fonctions respectives.
 - Culture de l'Amélioration Continue : Encourager une culture d'amélioration continue où les employés sont encouragés à proposer des idées d'amélioration et à participer à des initiatives d'optimisation des processus.
- 5. Réduction des Déchets et de la Consommation d'Énergie:**
- Éco-conception : Concevoir nos produits et nos processus de production de manière à minimiser les déchets et à réduire la consommation d'énergie.
 - Utilisation de Matériaux Durables : Opter pour des matériaux durables et recyclables pour réduire les coûts de remplacement et les déchets.
- 6. Amélioration de la Qualité et de la Satisfaction Client:**
- Réduction des Retours et des Réclamations : Investir dans la qualité des produits pour réduire les retours et les réclamations des clients, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.
 - Service Client de Qualité : Offrir un service client exceptionnel pour fidéliser les clients existants et attirer de nouveaux clients par le bouche-à-oreille positif.

9- Revenus (Revenue): مصادر الدخل

a. Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?

ما هي المنتجات أو الخدمات التي يكون عملاؤنا على استعداد لدفع ثمنها؟

1. Systèmes de Stockage Thermique Amélioré :

- Nos clients sont prêts à payer pour des systèmes de stockage thermique qui utilisent des pierres naturelles pour améliorer l'efficacité du stockage et de la libération de la



chaleur. Ces systèmes doivent offrir une performance fiable et une durabilité à long terme.

2. Personnalisation et Adaptabilité :

- Les clients apprécient la possibilité de personnaliser les systèmes de stockage thermique en fonction de leurs besoins spécifiques en termes de capacité, d'espace disponible et de performances requises. Ils sont prêts à payer pour des solutions adaptées à leurs exigences uniques.

3. Installation et Maintenance :

- Nos clients sont disposés à payer pour des services d'installation professionnels qui garantissent une installation correcte et sécurisée des systèmes de stockage thermique. De plus, ils peuvent être prêts à souscrire à des contrats de maintenance pour assurer le bon fonctionnement continu de leurs équipements.

4. Support Technique et Service Client :

- Un support technique réactif et de qualité est essentiel pour nos clients. Ils sont prêts à payer pour un service client exceptionnel qui répond rapidement à leurs questions, résout les problèmes et fournit une assistance technique lorsque nécessaire.

5. Formation et Éducation :

- Nos clients peuvent être prêts à payer pour des programmes de formation et d'éducation qui leur permettent de mieux comprendre l'utilisation et l'entretien des systèmes de stockage thermique, maximisant ainsi leur efficacité et leur durabilité.

6. Innovation Continue :

- Les clients apprécient l'innovation et sont prêts à payer pour des produits et des services qui intègrent les dernières avancées technologiques et offrent des fonctionnalités améliorées par rapport aux solutions existantes sur le marché.

b. Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?

ما هي الطرق المختلفة التي يمكننا من خلالها تحقيق الدخل؟

1. Vente de Systèmes de Stockage Thermique :

- La vente directe de nos systèmes de stockage thermique amélioré constitue le principal canal de génération de revenus. Nous proposons une gamme de systèmes adaptés aux besoins de nos clients, avec différentes capacités et fonctionnalités, et nous générons des revenus grâce à la vente de ces produits.

2. Services d'Installation et de Maintenance :



- En plus de la vente de nos systèmes, nous pouvons proposer des services d'installation professionnelle pour garantir une mise en service correcte et sécurisée de nos produits. De plus, nous pouvons offrir des contrats de maintenance pour assurer le bon fonctionnement continu des équipements, ce qui génère des revenus récurrents.

3. Formation et Éducation :

- Nous pouvons proposer des programmes de formation et d'éducation pour nos clients, couvrant l'utilisation, l'entretien et les meilleures pratiques pour maximiser l'efficacité de nos systèmes de stockage thermique. Ces services peuvent être facturés et générer des revenus supplémentaires.

4. Personnalisation et Options Supplémentaires :

- Nous pouvons proposer des options de personnalisation pour nos systèmes de stockage thermique, telles que des capacités supplémentaires, des fonctionnalités avancées ou des finitions esthétiques spéciales, moyennant des frais supplémentaires.

5. Licences et Partenariats :

- Nous pouvons envisager de concéder des licences pour notre technologie de stockage thermique amélioré à d'autres entreprises ou partenaires, ce qui nous permet de générer des revenus grâce aux redevances et aux droits de licence.

6. Ventes Croisées et Upselling :

- Nous pouvons proposer des produits complémentaires, tels que des accessoires, des équipements de contrôle ou des services supplémentaires, pour augmenter la valeur de nos offres et générer des revenus supplémentaires par vente croisée ou upselling.

7. Publicité et Marketing :

- La publicité et le marketing peuvent également être des sources de revenus indirectes, par le biais de partenariats de publicité, de commandites d'événements ou de programmes d'affiliation, où nous générons des revenus grâce à des activités de marketing promues par des tiers.

c. Quel est notre modèle de tarification ?

ما هو نموذج التسعير لدينا؟

1. Tarification Basée sur les Produits :

- Prix par Unité : Nous fixons un prix pour chaque unité de nos systèmes de stockage thermique, en fonction de la capacité, des fonctionnalités et de la qualité du produit.



- Options de Personnalisation : Nous proposons des options de personnalisation pour nos produits, avec des tarifs supplémentaires pour des fonctionnalités ou des capacités spécifiques.

2. Tarification Basée sur les Services :

- Prix par Service : Nous facturons des frais pour les services supplémentaires tels que l'installation, la maintenance ou la formation, en fonction de la portée et de la durée des services fournis.
- Contrats de Maintenance : Nous proposons des contrats de maintenance annuels avec des tarifs fixes ou basés sur le volume d'utilisation des équipements.

3. Tarification Mixte Produits-Services :

- Forfaits Complets : Nous proposons des forfaits complets comprenant à la fois des produits et des services, avec des tarifs combinés avantageux pour nos clients.
- Options de Bundle : Nous offrons des options de bundle où les clients peuvent choisir différents produits et services combinés à des tarifs préférentiels.

4. Tarification Basée sur l'Utilisation :

- Prix à l'Utilisation : Nous facturons les clients en fonction de leur utilisation réelle de nos systèmes de stockage thermique, avec des tarifs basés sur des métriques telles que le temps d'utilisation ou la capacité utilisée.
- Modèles de Location : Nous proposons des options de location de nos équipements avec des frais mensuels ou annuels, permettant aux clients de payer pour l'utilisation plutôt que pour la propriété.

5. Tarification Premium :

- Tarification de Marque : Nous positionnons nos produits et services comme des solutions haut de gamme offrant une valeur ajoutée significative, ce qui nous permet de fixer des tarifs premium par rapport à nos concurrents.
- Options de Financement : Nous proposons des options de financement flexibles telles que des paiements échelonnés ou des plans de crédit-bail pour permettre aux clients d'accéder à nos solutions premium.

6. Tarification Dynamique :

Tarifs Variables : Nous ajustons nos tarifs en fonction de la demande du marché, des conditions économiques ou des fluctuations des coûts des matériaux et de la main-d'œuvre.

Offres Promotionnelles : Nous proposons des offres promotionnelles temporaires ou des remises pour stimuler les ventes ou fidéliser les clients existants.



جامعة أبو بكر بلقايد

ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⴰⵎⴰⵏⵜ

UNIVERSITY OF TLEMCEM

Business Model Canevas : BMC

Partenaires clés Key Partnerships

الشراكة الرئيسية

- Fournisseurs de pierres naturelles (cailloux de mer).
- Compagnies d'énergie ou organisations d'énergie verte.
- Institutions de recherche ou universités spécialisées en technologies de stockage thermique.
- Prestataires de services d'installation et de maintenance.

Activités clés Key Activities

النشطة الرئيسية

- Services d'installation, d'intégration et de maintenance.
- Support client et formation.

Ressources clés Key resources

الموارد الرئيسية

- Pierres naturelles (cailloux de mer).
- Équipe et installations de R&D.
- Réseau de distribution.
- Ressources financières.

Proposition de valeur Value Proposition

القيمة المقترحة

- Réduction du temps nécessaire pour stocker et libérer la chaleur.
- Solution plus écologique et durable en utilisant des matériaux peu coûteux et facilement disponibles.
- Système plus fiable et facile à intégrer et à maintenir.

Relation clients Consumer Relationship

علاقة مع العملاء

- Support client personnalisé.
- Formation et assistance technique.
- Services après-vente et

Segment client Customer Segment

انواع العملاء

- Industriels ayant besoin de stockage thermique.
- Compagnies d'énergie recherchant des solutions de stockage thermique durables.
- Entreprises et institutions souhaitant améliorer leur efficacité énergétique.
- Secteur résidentiel pour le chauffage domestique écologique.

Coûts Coste structure

التكاليف

- Coûts de R&D et innovation.
- Coûts d'approvisionnement et traitement des pierres naturelles.
- Coûts de fabrication et d'assemblage.
- Frais de marketing et vente.
- Coûts de distribution et logistique.

Canaux de distribution Channels

قنوات التوزيع

- Ventes directes via des représentants commerciaux.
 - Partenariats avec des distributeurs d'énergie.
 - Plateformes en ligne et site web de l'entreprise.
 - Participation à des foires et salons industriels.
- Publications spécialisées et marketing digita

Bibliographie

- [1] **Le service des données étude des statiques (SDES)**, Chiffres clés de l'énergie, septembre 2021, [<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/pdf/chiffres-cles-de-l-energie-edition-2021.pdf>], (avril 2024)
- [2] **DS Nouvelle Énergie, le stockage mondiale d'énergie atteindra 158 gigawattheures d'ici 2024, sous la direction des état unis et de la chine, janvier 2024**
[[Hhttps://www.dsnsolar.com/info/global-energy-storage-to-hit-158-gigawatt-hour-91203257.html](https://www.dsnsolar.com/info/global-energy-storage-to-hit-158-gigawatt-hour-91203257.html)], mai 2024
- [3] **ABDELMOUMENE Lahcene et BENDJEBBOUR Amine** Réalisation et étude expérimentale d'un stockeur à chaleur sensible en utilisant des matériaux naturels (galets de cailloux de mer) mémoire de master Energétique, Université Abou Bekr Belakaid Tlemcen (2019)
- [4] **A. Mawir . Lentswe . Okello Nyeinga** Thermal performance comparison of three sensible heat thermal energy storage systems during charging cycles .sustainable energy technologies and assessments 30 (2018) 37-51
- [5] **Mohammed BECHIRI et Kacem MANSOURI** Stockage d'Énergie par Chaleur Sensible dans les Conduites Planes et Cylindriques avec Convection Forcée Laminaire 16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013
- [6] **M. KHERRAFI ,M. KHELLADI** Simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas, mémoire de master Energétique , Université Abou BekrBelakaid Tlemcen ,2021
- [7] **B.Djaoued et B. Ismail** Simulation numérique du stockage De l'énergie solaire par chaleur latente, mémoire de master Energétique , Université Abou BekrBelakaid Tlemcen ,2014
- [8] **D.Djefel et S.MAKHLOUF1** Experimental Study on Melting Process of Stearic Acid in Latent Heat Storage UnitMSE Labotery, Mouloud Mammeri University, Po Box 17 RP 15000, Tizi Ouzou, Algeria CERTES-IUT Laboratory, Paris Est Creteil University, 61 Av. Général de Gaulle,94010,Paris,Créteil,France.(2023)

- [9] **Tao, Y. B., Y. K. Liu, and Ya-Ling He.** "Effects of PCM arrangement and natural convection on charging and discharging performance of shell-and-tube LHS unit." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 115 (2017): 99-107.
- [10] **Tan, F. L., et al.** "Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.15-16 (2009): 3464-3472
- [11] **Khaoula Missoum Hocine Guellil and Abdel Illah Nabil Korti,** «Additives, Improvement of Thermal Conductivity and Energy Stored by Paraffin with Different Metallic, » *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2020
- [12] **Kamkari, Babak, Hossein Shokouhmand,** and Frank Bruno. "Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 72 (2014): 186-200
- [13] **El Idi, Mohamed Moussa.** Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide dans les milieux poreux. Diss. University Paris-Est, 2021.
- [14] **Becattini, Viola, et al.** "Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage." *Applied Energy* 203 (2017): 373-389.
- [15] **Zhang, Shuai, Ying Li, and Yuying Yan.** "Hybrid sensible-latent heat thermal energy storage using natural stones to enhance heat transfer: Energy, exergy, and economic analysis." *Energy* 286 (2024): 129530.
- [16] **Liu, Ming, Wasim Saman,** and Frank Bruno. "Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.4 (2012): 2118-2132.
- [17] **Pelay, Ugo, et al.** "Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017): 82-100.
- [18] **Akrouche, Amina.** Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. Diss. 2011.
- [19] **Regin, A. Felix, S. C. Solanki, and J. S. Saini.** "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12.9 (2008): 2438-2458.

- [20] **Zhang, Huili, et al.** "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects." *Progress in Energy and Combustion Science* 53 (2016): 1-40.
- [21] **Xu, Jing, R. Z. Wang, and Yong Li.** "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage." *Solar energy* 103 (2014): 610-638.
- [22] **Ben hamza Abderrahmane,** « Simulation Numérique d'un capteur solaire plan utilisant des Matériaux à changement de phase », Université KASDI Merbah d' Ouargla, Belkhir, Soutenu Publiquement , 31/05/2016, p. 5-21
- [23] **Elias, Charalambos N., and Vassilis N. Stathopoulos.** "A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage." *Energy Procedia* 161 (2019): 385-394.
- [24] **Fallahi, Ali, et al.** "Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties." *Applied Thermal Engineering* 127 (2017): 1427-1441.
- [25] **Li, T. X., et al.** "Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 115 (2017): 148-157.
- [26] **Zalba, Belen, et al.** "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications." *Applied thermal engineering* 23.3 (2003): 251-283.
- [27] **Gulfam, Raza, Peng Zhang, and Zhaonan Meng.** "Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials—A review." *Applied Energy* 238 (2019): 582-611.
- [28] **Baran, Gülseren, and Ahmet Sari.** "Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system." *Energy Conversion and Management* 44.20 (2003): 3227-3246.
- [29] **Osterman, Eneja, Vincenc Butala, and Uroš Stritih.** "PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings." *Energy and buildings* 106 (2015): 125-133.
- [30] **Huang, Feng, et al.** "Heat recovery potentials and technologies in industrial zones." *Journal of the Energy Institute* 90.6 (2017): 951-961.
- [31] **Weng, Ying-Che, et al.** "Heat pipe with PCM for electronic cooling." *Applied energy* 88.5 (2011): 1825-1833.

الهدف الرئيسي من هذا العمل يتعلق بالدراسة التجريبية لصهر البارافين الموجود في تجويف حراري مسخن من الأسفل، وكذلك استخدام الأحجار الطبيعية لتحسين التخزين الحراري. يستخدم البارافين عادة كوسيلة لتخزين الحرارة الحرارية والنقاط صور لتطور جبهة الكامنة. تتيح الدراسة التجريبية قياس التطور الزمني لدرجة الحرارة باستخدام سلسلة اقتناء الذوبان. هذه النتائج تجعل من الممكن تقدير الطاقة المخزنة بواسطة البارافين وكذلك مدى فعالية الحجارة الطبيعية في تحسين القدرة التخزينية الحرارية.

الكلمات المفتاحية: تخزين الحرارة المحسوسة والكامنة، المواد المتغيرة الطور، الأحجار الطبيعية، دراسة تجريبية

abstract

The main objective of this work concerns the experimental study of the fusion of paraffin contained in a thermal cavity heated from below, as well as the use of natural stones to improve thermal storage. Paraffin is commonly used as a latent heat thermal storage medium. The experimental study makes it possible to measure the temporal evolution of the temperature using an NI acquisition chain and to capture images of the evolution of the melting front. These results make it possible to estimate the energy stored by paraffin as well as the effectiveness of natural stones in improving thermal storage capacity.

Keywords: Sensible and latent heat storage, Phase change materials (PCM), Natural stones, Experimental study

Résumé

L'objectif principal de ce travail porte sur l'étude expérimentale de la fusion de la paraffine contenue dans une cavité thermique chauffée par le bas, ainsi que sur l'utilisation de pierres naturelles pour améliorer le stockage thermique. La paraffine est couramment utilisée comme un milieu de stockage thermique par chaleur latente. L'étude expérimentale permet de mesurer l'évolution temporelle de la température à l'aide d'une chaîne d'acquisition NI et de capturer des images de l'évolution du front de fusion. Ces résultats permettent d'estimer l'énergie stockée par la paraffine ainsi que l'efficacité des pierres naturelles pour améliorer la capacité de stockage thermique.

Mots-clés : Stockage par chaleur sensible et latente, Matériaux à changement de phase (MCP) Pierres naturelles, Étude expérimentale.