

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



MEMOIRE

PRESENTE AU

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, FACULTE DES TECHNOLOGIES

DE L'UNIVERSITE DE BLIDA

Département de Génie mécanique

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

EN GENIE MECANIQUE

OPTION : LES ENERGIES RENOUVELABLES

PREPARE AU DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THEME

Etude d'un stockage thermique mixte (chaleur sensible et chaleur latente)

Proposé par : **Dr : HAMID**

Dirigé par : **Mr : Lafri Djamel**

Présenté par : **M^r GROUNE M^{ed} AMINE**

Année Universitaire

2013/2014



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère maman qui m'a accompagné durant tout ce parcours laborieux,

*A mon cher papa Tayeb à qui je souhaite une longue vie, et qui a fait de moi un
homme*

à mes sœurs et à mes cousins et cousines.

Sans oublier mes oncles et à tous mes tantes,

*ainsi tous mes collègues et ce qui a partagé avec moi cette période de la réalisation
et ont créé la joie et la bonne Entente*

et tous mais amies sans exception.

Groune med amine

Remerciement

Je tiens à remercier louange à ALLAH qui m'a donnée le courage, la patience et la capacité de mener ce travail à terme.

J'exprime mes vifs remerciements à mon promoteur Mr Djamel-Lafri et mon co-promoteur Dr HAMID, pour m'avoir encadré durant mon travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui m'ont aidé le long de mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur le chef département De Génie Mécanique Mr BRAHIMI et tous les employé de la scolarité.

Mes vifs remerciements vont également à tous mes collègues, à linda qui m'a aidé à réaliser ce projet, et à mes chers parents pour leur soutien et leur éducation.



Sommaire

1^{er} Partie

Introduction	1
<hr/>	
Chapitre I Etude bibliographique	
<hr/>	
1.1 Introduction	3
1.2 Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique par changement de phase	4
1.3 Conclusion	13
<hr/>	
Chapitre II Théorie générale sur le stockage thermique et les MCP	
<hr/>	
2.1 Introduction	15
2.2 Le stockage d'énergie	15
2.3 Intérêt de stockage d'énergie	15
2.4 Les différentes techniques de stockage thermique	15
2.4.1 <i>Le stockage thermochimique</i>	<i>16</i>
2.4.2 <i>Le stockage par chaleur sensible</i>	<i>16</i>
2.4.3 <i>Le stockage par chaleur latente</i>	<i>20</i>
2.5 Les matériaux à changement de phase	21
2.6 Le choix des matériaux à changement de phase	22
2.6.1 <i>Critères thermodynamiques</i>	<i>21</i>
2.6.2 <i>Critères Cinétiques</i>	<i>22</i>
2.6.3 <i>Critères chimiques</i>	<i>22</i>
2.6.4 <i>Critères économique</i>	<i>22</i>
2.7 Classification des matériaux à changement de phase	22
2.7.1 <i>Les composés organiques</i>	<i>23</i>
2.7.2 <i>Les composés inorganiques</i>	<i>27</i>
2.7.3 <i>Eutectique</i>	<i>31</i>
2.8 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage	32



2.9 Conclusion	34
-----------------------	-----------

Chapitre III Réalisation et étude expérimental du model

3.1 Introduction	35
3.2 Les équipements de module expérimental	36
3.2.1 <i>Le choix de MCP</i>	36
3.2.3 <i>Le fluide stockeur par chaleur sensible</i>	36
3.2.4 <i>Le module de stockage thermique</i>	36
3.2.5 <i>L'échangeur de chaleur</i>	37
3.2.6 <i>Isolation thermique</i>	37
3.2.7 <i>Mesure de température</i>	38
3.2.8 <i>Mesure du débit</i>	39
3.2.9 <i>Acquisition des données</i>	39
3.2.10 <i>Le circuit hydraulique</i>	39
3.3 La réalisation du model	40
3.4 Instrumentation du système	45
3.5. Procédure de l'expérimentation	49
3.6. Conclusion	49

Chapitre IV Résultats et interprétation

5.1 Introduction	50
5.3 Résultats de la phase de stockage	51
5.4 Résultats de la phase de relaxation	60
5.6 Conclusion	68

Conclusion générale	69
----------------------------	-----------

Référence bibliographique	70
----------------------------------	-----------

Annexes	74
----------------	-----------

Introduction

L'étude des phénomènes de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase solide-liquide a suscité depuis déjà plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques et plus particulièrement dans les applications en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur ou de froid développés pour l'agroalimentaire ou pour le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel ainsi que la dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques.

La récupération de chaleur rejetée par des procédés industriels, le stockage d'énergie solaire durant la jour et stockage d'énergie électrique pour délester la problème de point en utilisant des systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase représentent des moyens efficaces pour économiser de l'énergie.

Plus récemment un intérêt particulier a été porté à l'étude et développement d'accumulateur d'énergie par chaleur latente en vue de gérer la demande et consommation. En effet l'énergie sous forme thermique se caractérisé souvent par son inadéquation entre les besoins et les ressources sur le plan temporel d'une part, en puissance et en température d'autre part.

Le stockage de chaleur est le moyen le plus évident pour atténuer ces inadéquations, mais son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent antagonistes tel que :

- ☐ La densité énergétique (capacité de stockage par unité de volume ou de masse),
- ☐ La puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée,
- ☐ La simplicité du procédé,
- ☐ L'efficacité énergétique (absence des pertes), ...etc.

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

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

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

Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température de travail (souhaitable) permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

Cependant, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui se déroulent en leur sein.

Des études théoriques et expérimentales sont actuellement en cours au sein de multiples groupes de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes, et ce dans le but ultime de concevoir un accumulateur de chaleur de ce type qui puisse être utilisé dans le secteur industriel.

Plusieurs options d'un tel accumulateur sont en cours d'étude :

- ▣ Accumulateur de forme parallélépipédique à une ou plusieurs couches de MCP.
- ▣ Accumulateurs cylindrique (cylindres concentriques ou échangeurs de chaleur à tube et calandre)

Plusieurs dispositions possibles sont également étudiées : verticale, horizontale, intégrer dans les murs...

Cette étude s'inscrit dans ce cadre et consiste à apporter une contribution à l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur qui se déroulent dans le processus de stockage de chaleur mixte où le MCP est injecté entre deux parois cylindriques la première de la cuve et la deuxième a été réalisée d'une tôle galvanisée d'une épaisseur de 0.2 mm et l'épaisseur entre les deux parois est 2cm.

La cuve de stockage d'eau chaude d'une géométrie cylindrique de 36cm de diamètre et de 53cm de hauteur.

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé le travail en cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués depuis des années 80 à ce jour. Pour ce faire une littérature riche portant sur plusieurs références bibliographiques a été consultée et exploitée.

Le second chapitre porte sur des généralités sur les différentes techniques de stockage thermique et les matériaux à changement de phase.

Le troisième chapitre porte sur la réalisation du modèle qui consiste à réaliser un module de stockage et d'effectuer plusieurs cycles de stockage et déstockage de chaleur et de recueillir les variations de température en fonction du temps pour interpréter les phénomènes qui s'y déroulent. En fin.

un quatrième chapitre est consacré à l'interprétation et la comparaison des résultats expérimentaux avec une conclusion générale.

Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Introduction :

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine des recherches qui n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80.

Au cours des dernières années, le souci d'économie d'énergie a été l'une des préoccupations dans la recherche sur l'énergie. Bien que la recherche sur le stockage de chaleur latente pour les systèmes de chauffage solaire continue de susciter l'intérêt de beaucoup de recherches, on le considère de plus en plus pour la récupération et le stockage de la chaleur résiduelle des équipements industriels. Le principe d'utiliser un accumulateur thermique pour stocker l'énergie latente générée par un procédé n'est pas récent. Son intérêt réside dans l'ajustement des pics de la demande d'énergie. La chaleur ou le froid généré par les équipements est récupéré et stocké dans une batterie thermique et peut par la suite être utilisé lorsque nécessaire, par exemple lors des moments où la demande est à son maximum. La technique permet à la fois de diminuer les appels de puissance et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement en le faisant à un régime optimal.

Des études théoriques et expérimentales sont actuellement en cours au sein de multiple groupes de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes, et ce dans le but ultime de concevoir un accumulateur de chaleur de ce type qui puisse être utilisé dans le secteur industriel.

Plusieurs options d'un tel accumulateur sont en cours d'étude :

- Accumulateur de forme parallélépipédique à une ou plusieurs couches de MCP.
- Accumulateurs cylindriques (cylindres concentriques ou échangeurs de chaleur à tubes et calandre).

Des études comparatives (performances, compacité, etc,...) avec d'autres types d'accumulateurs sont aussi abordées.

Dans ce qui suit, on présentera quelques travaux théorique et expérimentale qui sont liés aux objectifs de la présente étude, et qui concernent les systèmes de stockage périodiques d'énergie thermique par chaleur latent.

I.2. Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique par changement de phase :**1- Stockage périodique par chaleur latente :**

Par : Bransier (1979).[1]

A étudié analytiquement la solidification et la fusion cyclique d'un MCP. Un modèle conductif unidimensionnel et utilisé. Le MCP est mis dans deux configurations, à savoir :

- Un élément plan ou le fluide caloporteur circule de part et d'autre de ces deux surfaces (courant parallèles).
- Un élément composé de deux cylindres concentriques ou le fluide caloporteur circule à l'intérieur du cylindre alors que le MCP se trouve dans l'espace annulaire entre les cylindres, la surface extérieure du cylindre étant isolée.

La température de fluide caloporteur est supposée une fonction sinusoïdale du temps variant autour de la température de fusion. Le coefficient de transfert convectif est supposé constant.

Dans la modélisation il s'adopté la méthode de capacité thermique apparente et un schéma aux différences finies implicite à trois niveaux de temps. Il a rapporté qu'il y a une épaisseur optimale pour l'élément plan pour laquelle l'énergie stockée ou déstockée est maximale. Ainsi l'élément cylindrique est plus défavorable pour le stockage que l'élément plan. Ses résultats n'ont pas été validés expérimentalement.

2- Thermal performance of a heat storage module using PCM's with Different Melting Temperatures:

Par: Farid et Kanzawa (1989). [2]

Ils ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément de stockage d'énergie par chaleur latente constitué de plusieurs capsules cylindriques montées verticalement et fixés dans un tube isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents MCP.

Pendant la charge, de l'air chaud passe à travers les capsules de façon à ce que les températures de fusion des trois MCP décroissent dans la direction de l'écoulement. Cependant, pendant la décharge, la direction de l'écoulement d'air est inversée. Les autres rapportent que le taux de transfert de chaleur est amélioré pendant la charge et la décharge, et leur modèle numérique est en accord raisonnable avec l'expérience.

3- An analysis of heat transfer using equivalent thermal conductivity of the liquid phase during melting inside an Isothedy heated Horizontal cylinder:

Par:Hirata et Nishida (1989).[3]

Ils ont considéré la fusion dans un échangeur de chaleur à coquille. Le MCP est contenu à l'intérieur du tube alors que l'espace annulaire entre les deux tubes est divisé en trois compartiments ou le fluide caloporteur circule pour assurer une température uniforme sur la surface de contact. Ils ont analysé la fusion du MCP par un modèle analytique basé sur la

conductivité thermique équivalente. Ainsi, ils ont discuté et proposé une corrélation de la conductivité thermique équivalente.

4- Heat Exchanger performance for latent heat thermal Energy storage system:

Par: Fath (1991). [4]

À examiner les performances d'un échangeur de chaleur à coquille horizontal dans lequel le MCP se trouve du côté coquille et le fluide caloporteur circule à l'intérieur de tube. Il a utilisé un MCP dont la température de fusion est de 50°C. Un modèle analytique basé sur l'approximation quasi stationnaire est développé pour prédire les performances au système.

L'auteur rapporte que l'augmentation du débit massique, la température initiale du fluide et de la longueur de l'échangeur augmentent le transfert de chaleur et l'énergie accumulée dans le MCP. Ainsi, un seul échangeur est thermiquement plus efficace que deux échangeurs parallèles ayant chacun la moitié de longueur et la même capacité thermique.

5- Thermal performance of a planar latent heat energy storage unit with electric heat sources:

Par : Laouadi, Lacroix et Galanis (1994). [5]

Ils ont développée et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnel pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan qui consiste en une couche de MCP de deux centimètres d'épaisseur isolée thermiquement d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placées dans le MCP juste au-dessus de l'isolant. Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection. Cette étude a montré que cette unité peut être chargé et déchargé deux fois par jours et pourrait donc servir pour déplacer les pics dus aux appels de puissance en période de pointe vers les heurs creux de la journée.

Autres résultats de cette étude :

- Lorsque la puissance électrique de chauffage augmente la température de l'élément augmente tandis que le temps de stockage diminue et que le temps de déstockage augmente.
- Les pertes de chaleurs augmentent aussi avec la puissance de chauffage et atteignent une valeur maximale à la fin de la période de stockage.
- La performance de l'unité dépend fortement de la puissance électrique de chauffage et du coefficient de transfert de chaleur vers l'environnement.

6- Thèse : Etude expérimental de la fusion et la solidification de la paraffine N-Octadécane :

Par : Pierre UZABAKILIHU (1995).[6]

A étudié expérimentalement la fusion-solidification de la paraffine dans une enceinte rectangulaire avec l'analyse des phénomènes de convection et de conduction a été effectuée,

ainsi que les études sur les dimensions du contenant, l'utilisation des ailettes et leurs impacts sur la fusion et la solidification des MCP avec les effets de la dilatation de la paraffine.

7- Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe des sphères contenant un Matériau à Changement de Phase :

Par : BenmansouretM.A Hamdan(2001). [7]

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

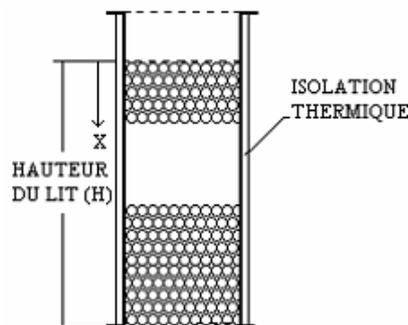


Figure I.1: Schéma du lit de stockage. Benmansour (2001). [7]

8- Analyse de transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau :

Par : Hamid El QARNIA (2005).[8]

Fait un modèle mathématique basé sur les équations de conservation de l'énergie a été développé pour prédire le comportement thermique ainsi que la performance d'une unité de stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase (MCP). L'unité de stockage est constituée d'une série de tubes placés dans le MCP. Durant le mode de charge, un fluide caloporteur (l'eau) provenant du capteur solaire, circule dans les tubes et transfère l'énergie solaire collectée au niveau du capteur solaire au matériau à changement de phase.

9- Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : Application au refroidissement d'une composante électronique :

Par : Mustapha FARAJI, Hamid El Qarania (2007).[9]

Ils ont été optimisé la performance thermique d'un modèle de refroidissement d'une composante électronique. Un modèle mathématique régissant le comportement thermique des différentes composantes du système est développé. Les paramètres clés du modèle ont été définis et les équations du modèle sont ensuite discrétisées, transformées en nu système d'équations algébriques et résolues itérativement. Plusieurs expériences de simulation ont été effectuées en vue d'optimiser les dimensions optimales du refroidissement proposé.

10- Réponse dynamique d'un lit fixe pour le stockage de l'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase :

Par : Benmansour (2009).[10]

A été étudié expérimentalement et numériquement les performances transitoires d'un lit fixe rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un MCP. Un modèle théorique bidimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Considérant à la fois la dispersion thermique axiale et radiale, ce modèle est résolu par une méthode implicite aux différences finies. Il a permis de prédire la distribution de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit dans les deux modèles de stockage et récupération de la chaleur et pour un large domaine de nombre de Reynolds.

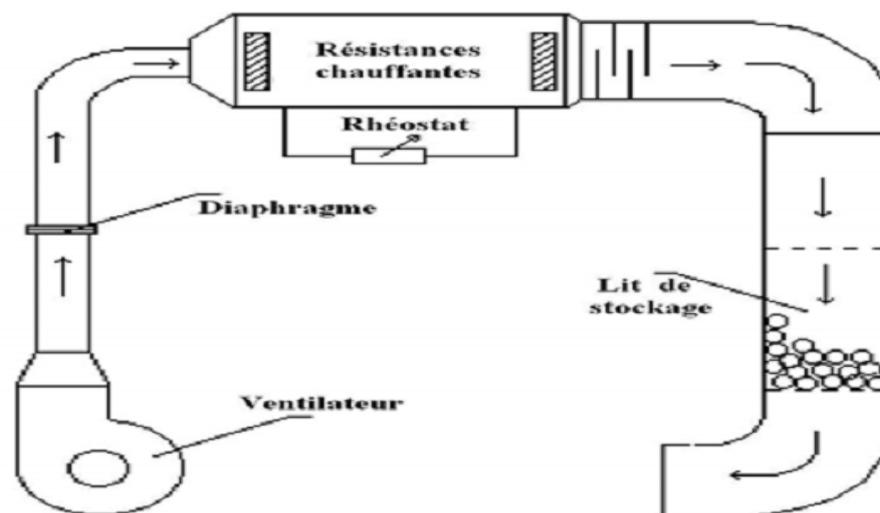


Figure I.2 : Le montage expérimental. Benmansour (2009). [10]

1- Détermination du front de fusion d'une plaque de paraffine soumise à l'ensoleillement :

Par : D. Seck et al (2009).[11]

Ils ont étudié l'évolution du front de fusion d'une plaque de paraffine (52-54) soumise à l'ensoleillement a été menée sur un capteur stockeur parallélépipédique fabriqué au laboratoire d'énergétique appliquée. La plaque est un carré de côté égal à un mètre et de quatre centimètres d'épaisseur. La complexité du problème visé par cette étude a nécessité l'emploi d'une méthode enthalpique à une dimension. Les résultats montrent un front surestimé par la solution analytique de Newman, mais sous-estimé par le modèle.

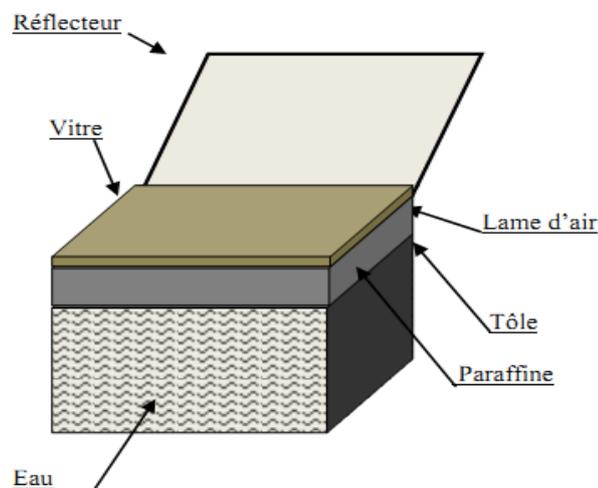


Figure I.3 : Schéma de principe de dispositif. D. Seck et al (2009).[11]

2- Analyse Numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffé par une paroi latérale :

Par : ZohirYounsi et coll. (2009). [12]

Ils ont étudié expérimentalement le comportement thermique d'un matériau à changement de phase (sels hydratés) par l'intégration des éléments dans des parois de murs solaires passifs. La formulation enthalpique est utilisée pour les simulations numériques effectuées en 1D et 2D. Il s'agira à terme d'introduire ce modèle dans un outil global de simulation de composants solaires.

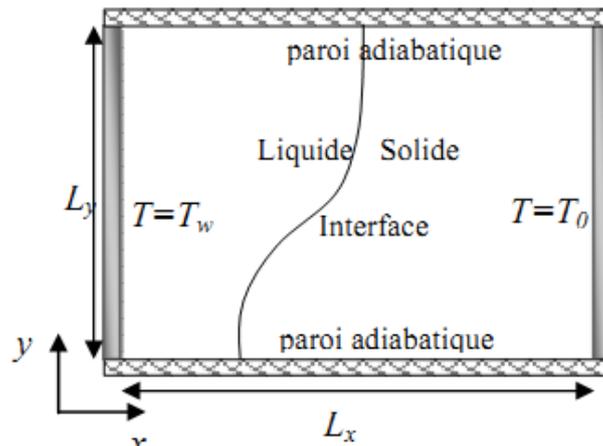


Figure I.4 : Schéma du problème. Zohir Younsi et coll. (2009).[12]

1- Etude des effets de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase :

Par : Housseynatou BAH (2010).[13]

Fait une étude sur les effets de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase pour produire de l'eau chaude sanitaire. Formé de deux sections contiguës dont l'une est remplie de paraffine (52°C-54°C) et l'autre d'eau, ce type de capteur utilise le stockage combiné de chaleur sensible et de chaleur latente et peut être une alternative au chauffe-eau traditionnel. Les résultats expérimentaux montrent que pour un ensoleillement moyen de 600 W/m² et une épaisseur de 2 cm de paraffine nous obtenons une température maximale de 48 °C vers 17 h et 40 °C le lendemain à 6 h. Le rendement obtenu pour cette épaisseur avoisine les 60 % et les pertes thermiques moyennes nocturnes sont aux environs de 4,44 W/K.

2- Analysis of Heat Storage Devices with Fins:

Par:Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010). [14]

Ils ont fait une étude expérimentale de deux modèles de stockage d'énergie thermique par changement de phase. Ces modèles d'une configuration cylindrique l'un constitue d'un échangeur de chaleur à coquille de 280mm de long. Le tube intérieur un diamètre de 8mm et d'épaisseur de 2mm avec des ailettes radiales de diamètre de 43mm et d'épaisseur de 3mm et de 33mm espace entre eux et le tube extérieur de 50mm de diamètre et 3mm d'épaisseur (Figure I.6). Le deuxième modèle consiste aussi échangeur de chaleur à coquille de même géométrie sauf le tube intérieur avec des ailettes longitudinale de 180mm de long et le MCP remplie 96% (Eicosane C20 H42) d'une température de fusion de 36.7°C dans l'espace annulaire entre les deux tubes(Figure I.7). Donc la charge (Stockage) de l'énergie thermique se fait par le flux imposé par l'eau chaud qui passe dans le tube intérieur et la décharge (déstockage) se fait en vice-versa de stockage.

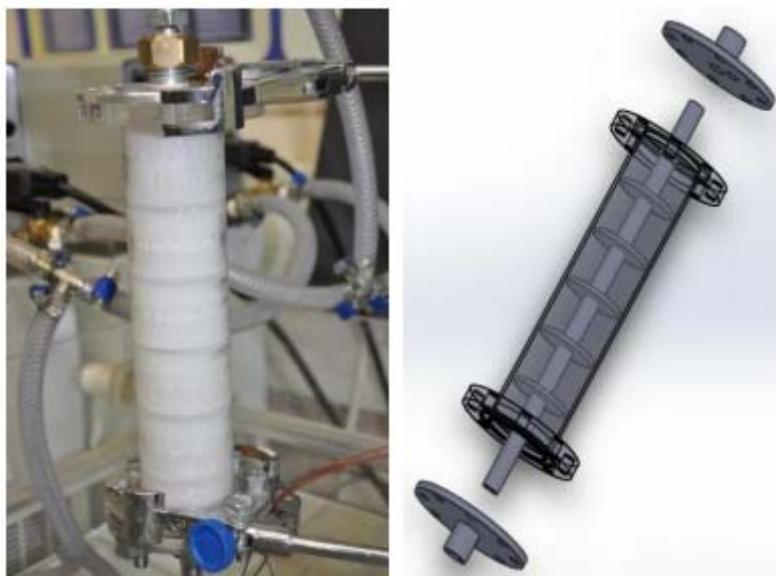


Figure 1.5 : Le modèle de stockage avec ailettes radiales. **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).** [14]

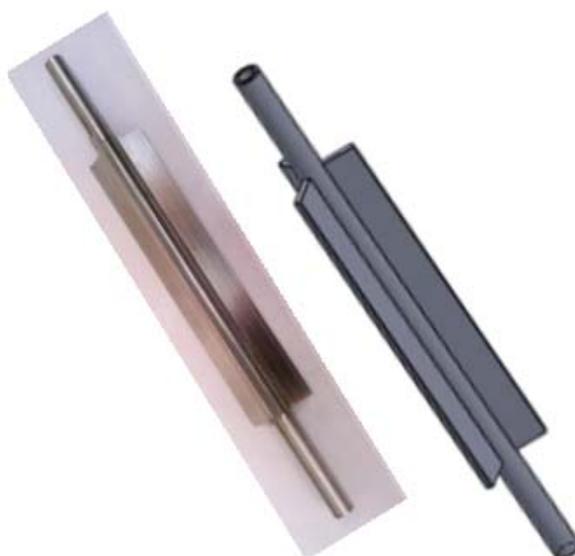


Figure 1.6 : Le model de stockage avec ailette longitudinal. **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).**[14]

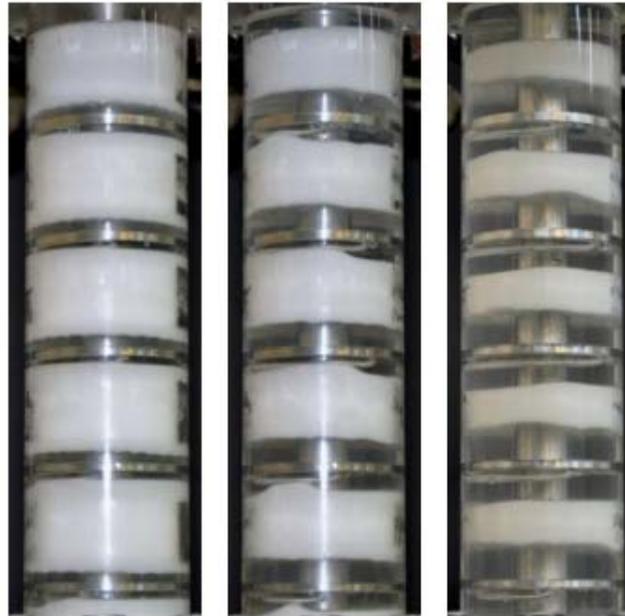


Figure I.7: Le déroulement de fusion de l'unité de stockage avec ailettes radiales. **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).**[14]

1- Study of storage thermal energy of latent heat application to the solar collector

Par: S. Bouadila et coll. (2011). [15]

Le travail effectué comprend une étude numérique des problèmes de la fusion et de la solidification des MCP, complétée par une application expérimentale qui consiste à la réalisation d'un capteur solaire stockeur.

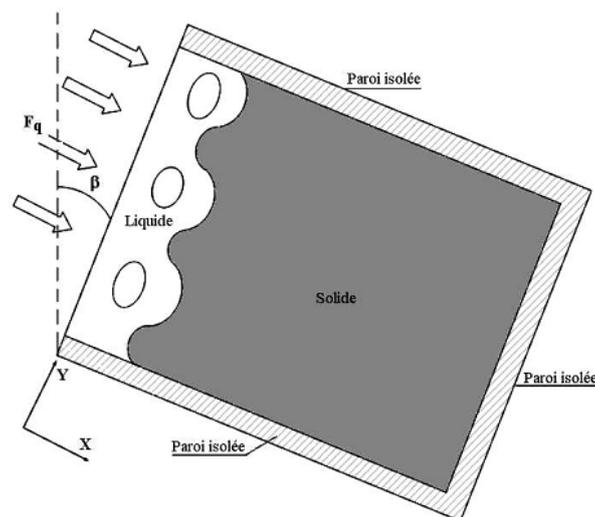


Figure I.8: Représentation du domaine. **S. Bouadila et coll. (2011).** [15]

1- Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux : Analyse des performances et comparaison :

Par : Walid FOU DHIL et coll. (2012).[16]

Ils ont étudié analytiquement les performances d'un système de stockage d'énergie thermique dans un canal poreux vertical en de mode de stockage : sensible et latente. Le canal poreux, qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constant alors que l'autre est supposée adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brink man sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Les résultats indiquent que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82% lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40°C.

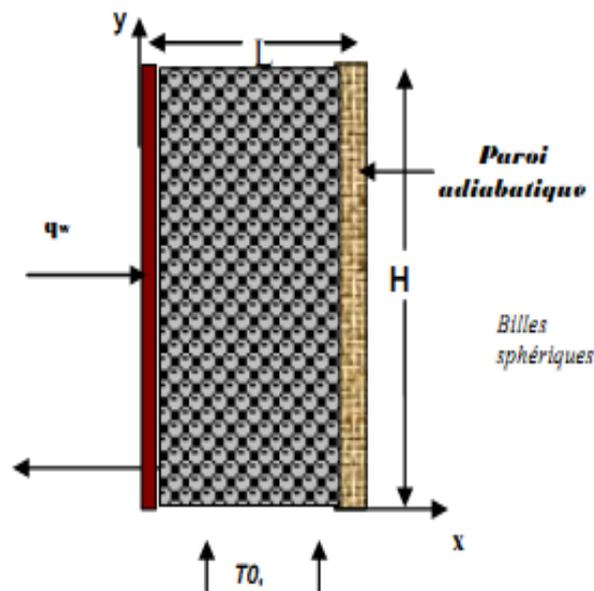


Figure I.9: Géométries de problème. Walid FOU DHIL et coll. (2012). [16]

2- Experimental Study of Thermal Energy Storage in Solar System Using PCM:

Par: B.Kanimozhi, B.R.Ramesh (2012).[17]

Ils ont étudié expérimentalement les caractéristiques et les performances de stockage d'énergie thermique dans un système solaire de chauffage d'eau par la réalisation d'une cuve de stockage avec matériau à changement de phase d'une capacité de 45 litres d'eau d'une configuration cylindrique contenant plusieurs tubes, chaque tube contient un MCP différent de l'autre.



Figure I.10: L'unité de stockage fabriqué. B.Kanimozhi, B.R.Ramesh (2012).[17]

1- Experimental Studies on Phase Change Material-Based Thermal Energy Storage System for Solar Water Heating Applications:

Par:R.Meenakshi et coll. (2012). [18]

Ils ont étudié expérimentalement les performances d'un système de stockage d'eau chaud sanitaire à basse température par un flux variable (Source d'énergie c'est de Soleil) par l'intégration des matériaux à changement de phase (paraffine et les esters d'acide) d'une configuration sphérique et de différents diamètre (38, 58, 68 mm) dans le réservoir de stockage.



Figure I.11 : Aperçue sur le banc d'essai. R.Meenakshi et coll. (2012). [18]

I.3. Conclusion :

A partir des états d'art précédentes on a vu qu'il existe plusieurs méthodes et techniques d'accumulation de l'énergie thermique par changement de phase qui ont déjà été traitées et amenant des conclusions différentes. L'intégration de MCP à la cuve a un effet direct sur l'amélioration ou l'augmentation de la capacité de stockage d'énergie thermique. Donc le couplage avec un système actif permet une utilisation plus effective de la chaleur latente. Et pour améliorer les capacités de stockage et permettre une utilisation effective des quantités de chaleur stockées et l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui se généralise aujourd'hui dans les laboratoires grâce à ces caractéristiques thermiques qui peuvent trouver dans des applications de divers domaines. Donc dans le cadre de l'étude des systèmes de stockage d'énergie thermique par changement de phase on va étudier un modèle réduit d'un système de stockage d'eau **Mr Dj. Lafri (2001)[19]** avec l'intégration de MCP dans la cuve de stockage et suivre son comportement thermique.

Chapitre II

Généralité sur le stockage thermique et les MCP

II.1.Introduction :

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans l'industrie, il peut contribuer efficacement à améliorer la capacité de l'énergie stocké. Pour mieux comprendre le contexte dans lequel le stockage de chaleur (Thermique), nous allons exposer dans la section suivante les différents techniques de stockage d'énergie thermique.

II.2. Le stockage de l'énergie :[20]

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie est souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie.

II.3. Intérêt de stockage de l'énergie :[20]

Le stockage d'énergie est un enjeu à la hauteur de la consommation d'énergie primordial.

Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, une énergie disponible à la demande, sans coupure inopinée, est un confort et une commodité pour la production.

Même pour la production d'énergie, le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement production d'énergie n'est pas physiquement, de la production, mais de la transformation d'un stock d'énergie (thermique.....) en énergie directement utilisable pour un travail (électricité....).

II.4.Les différentes techniques de stockage thermique :

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. A la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance.

Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que peut être sensible, chaleur latente et thermo-chimique, ou en combinaison de ces derniers.

Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à la figure II.1.

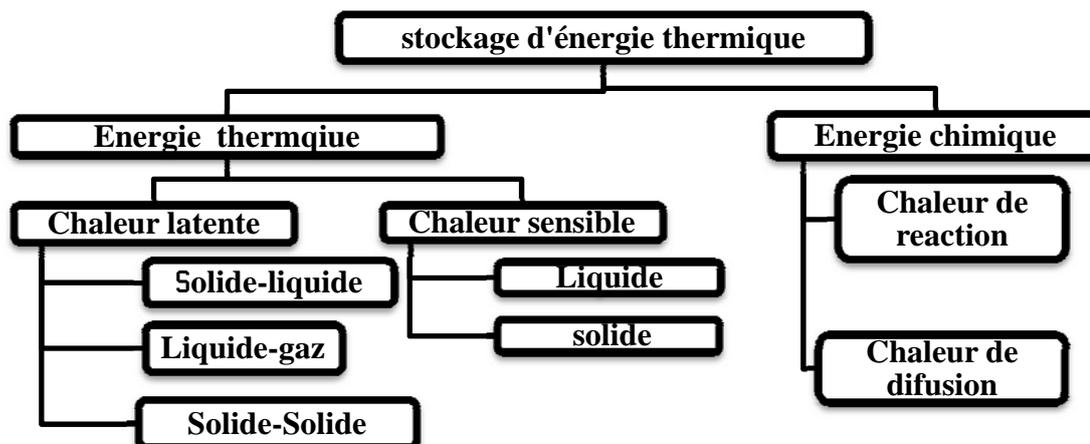


Figure II.1: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique. [21]

II.4.1. Le stockage thermochimique :

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles ([22]; [23]; [24]). Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [23]. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.

Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs ([25]; [23]).

II.4.2. Le stockage par chaleur sensible :[26]

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (Figure II.2, zone sensible). Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à état final noté avec l'indice f est :

$$m(h_f - h_i) \quad [\text{J}] \quad (\text{II.1})$$

m : est la masse du matériau [kg],

h_i : est l'enthalpie massique initiale [J/Kg],

h_f : est l'enthalpie massique finale [J/Kg].

c_p (ou chaleur spécifique massique, J/Kg K) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire :

$$Q = m c_p (T_f - T_i) \quad [\text{J}] \quad (\text{II.2})$$

T_i : est la température initiale [K],

T_f : est la température finale [K].

Il est donc utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des cycles thermiques, la compatibilité avec le récipient de stockage et également un cout raisonnable.

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi :

- Le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus).
- Le stockage par un solide (pierre, métaux,...).

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau suivant n°1.

Tableau II.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C. [27]

Matériaux	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/Kg K)	Capacité thermique volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	200	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

II.4.2.1 Métaux liquides : [28]

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

II.4.2.1.1 L'eau :[28]

Etant un des matériaux les plus accessibles et abondant au monde, l'eau a vite été considéré pour une utilisation de stockage thermique sous forme sensible. L'essai a été concluant pour certaines situations, car son utilisation comporte de nombreux avantages. Par contre, certains inconvénients font que d'autres matériaux peuvent y être préférés dans certains systèmes.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible.

Tableau II.2: Avantages et inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur.[28]

Avantages	Inconvénient
Haute efficacité	Autodécharge élevée
Chaleur spécifique élevée	Pression de vapeur élevée
Faible cout	Corrosif à certains contenants
Très disponible	
Très documenté	
Aucune détérioration	

II.4.2.1.2 Huiles :[28]

Les plus communs des matériaux liquides, après l'eau, pour un système de stockage thermique sous forme sensible. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40% plus élevée que celle de l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de les utiliser à une température de fonctionnement plus élevée. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le therminol et la caloria-HT. Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des huiles.

Tableau II.3: Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur.[28]

Avantage	Inconvénient
Chaleur spécifique élevée	Très dispendieux
Non-corrosif aux contenants	Toxique pour l'environnement
Disponible	Inflammable
Faible pression de vapeur	
Température de fonctionnement élevée	

II.4.2.2 Métaux solides :[28]

Les métaux solides sont de bons candidats pour une application de stockage thermique. On note notamment la roche, le conglomerat, le sable, les briques, les métaux, etc. L'énergie est emmagasinée à basse température. De plus, aucune fuite en cas de bris du contenant ne peut arriver et ils n'ont aucun problème du à la pression de vapeur comme c'est le cas avec l'eau. Le meilleur candidat de matériaux solide pour le stockage thermique est la

fonte, sa densité d'énergie est plus élevée que l'eau. Cependant, la fonte est très dispendieuse et d'autres matériaux sont généralement préférés pour leur coût inférieur. Un autre candidat de premier choix est la roche. Utilisée sous forme de lit de pierre, l'énergie peut y être emmagasinée en laissant le fluide caloporteur circuler directement entre les pierres ou par le biais d'un échangeur thermique. Un dernier type de matériaux à considérer est les métaux. Ils ont d'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique et peuvent résister à de très hautes températures. Leur utilisation est considérée généralement dans des applications nécessitant une conductivité thermique élevée. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont de bons exemples de métaux potentiels

II.4.2.2.1 Roches, béton et briques : [28]

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

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients des roches, béton et briques.[28]

Avantages	Inconvénients
Excellente stabilité cyclique	Faible chaleur spécifique
Chimiquement stable	Faible conductivité thermique
Disponible	
Abordable	

II.4.2.2.2 Métaux : [28]

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

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur.[28]

Avantages	Inconvénients
Conductivité thermique élevée	Très dispendieux
Chimiquement stable	
Disponible	
Recyclable	

II.4.3. Le stockage par chaleur latente : [29]

Pour réduire considérablement les volumes de stockage et s'affranchir des fluctuations de température liées au stockage par chaleur sensible, on peut choisir l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière.

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'états de la matière.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation.

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

$$\Delta h_f \quad [\text{J}] \quad (\text{II.3})$$

Ou Δh_f : l'enthalpie spécifique de fusion (J/Kg).

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

$$\Delta h_f[\text{J}] \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure II.2. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

$$C_s(T) \times \Delta T + L + C_l(T) \times \Delta T \quad [\text{J}] \quad (\text{II.5})$$

$C_s(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état solide. [J.Kg⁻¹ K⁻¹]

$C_l(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide. [J.Kg⁻¹ K⁻¹]

L : Chaleur latente de changement de phase. [J.K⁻¹]

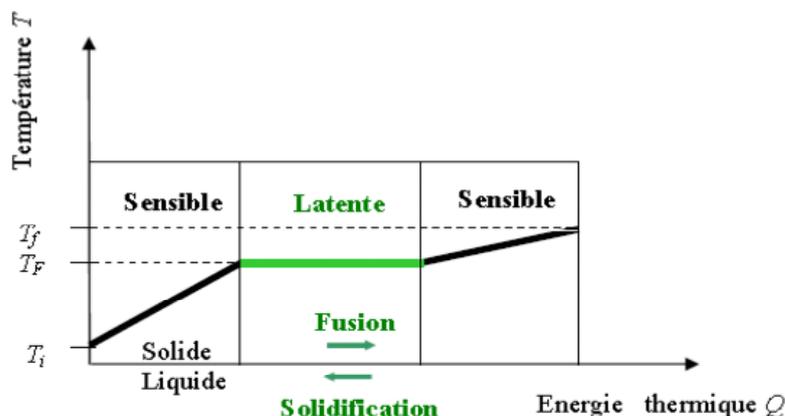


Figure II.2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

[26]

II.4.3.1. Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente : [26]

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- ☐ Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.
- ☐ Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.
- ☐ Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- ☐ Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

II.4.3.2. Les avantages du stockage par chaleur latente : [26]

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi :

- ☐ Les MCP peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- ☐ Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que la température de l'environnement.

II.5. les matériaux à changement de phase : [30]

Les matériaux à changement de phase MCP (ou PCM : Phase Change Matériel) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et la restituent lorsque la température diminue. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande, plus les propriétés de stockage (et de restitution) de la chaleur seront intéressantes.

II.6. Le choix du matériau à changement de phase : [26]

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économique. Ces critères vont donc être définis pour faciliter le bon choix de MCP pour une application donnée :

II.6.1. Critères thermodynamiques :

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- ☐ Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée

- ▣ Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).
- ▣ Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- ▣ Une fusion congruente.
- ▣ Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.
- ▣ Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- ▣ Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

II.6.2. Critères cinétiques :

- ▣ Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion.
- ▣ Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.
- ▣ Des cinétiques de charge et de décharge rapides.

II.6.3. Critères chimiques :

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- ▣ Une stabilité chimique.
- ▣ Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- ▣ Aucune corrosion avec les matériaux de constructions.
- ▣ Un bon taux de cristallisation.

Aussi le matériau ne doit pas être empoisonnant ; il doit être non inflammable et non explosif.

II.6.4. Critères économiques :

Le matériau à changement de phase doit être :

- ▣ Disponible en grande quantité.
- ▣ A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : ORGANIQUE, INORGANIQUE et ETEUCTIQUE.

II.7. Classification des matériaux à changement de phase :

Il y a grand nombre de substance chimiques qui peuvent être identifiés comme MCP du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion.

Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur.

En effets, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermiques idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriés adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié.

On peut classer les MCP selon leur nature chimique en trois grandes catégories :

- ★ -Les composés organiques : Paraffines, corps non-paraffiniques, Polyalcools.
- ★ -Les composés inorganiques : Hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- ★ -Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

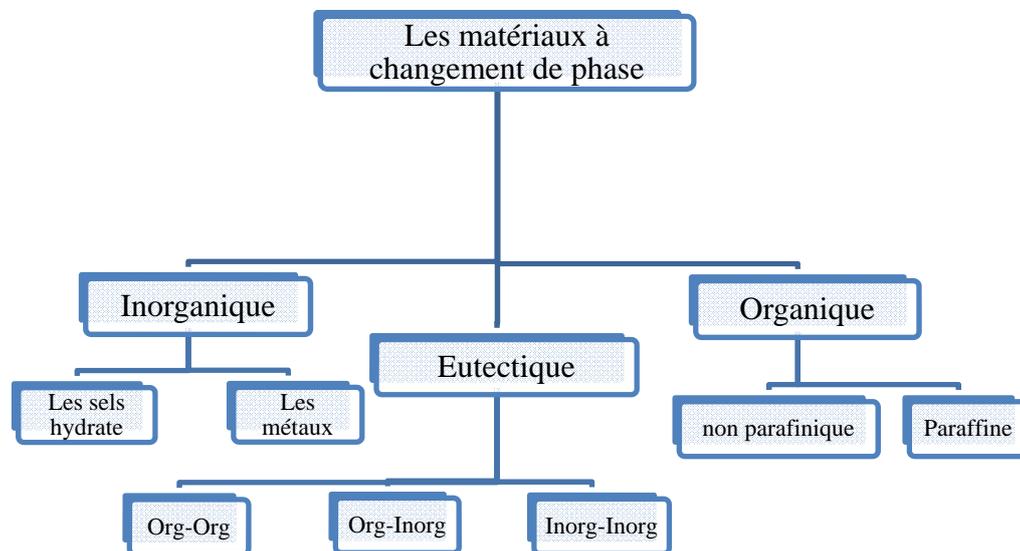


Figure II.3 : Classification de MCP. [31]

II.7.1. Les composés organiques : [29]

Les MCP organiques sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} .

Ils sont soit extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure.

Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisées par leur point de fusion.

Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion.

Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de {cires paraffiniques}.

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonne propriétés de nucléation elles montrent cependant certaines propriétés indésirables tels que :

- -Faible conductivité thermique.
- -Sont incompatibles avec les récipients en plastiques.
- -Sont modérément inflammables.

Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage.

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé (Sari, 2004. [32];Zhang et Fang, 2006. [33]) MEHLING et al. (2000) [34]ont signalé que le matériau composite MCP-graphite a une conductivité thermique 100 fois élevée que la paraffine pure.

Certaines paraffines sélectionnées sont indiquées dans le tableau II.6 avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

Tableau II.6 : Propriétés thermo physiques des paraffines. [35]

Nombre d'atomes carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (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

II.7.1.1.-Avantages et inconvénients des paraffines [26]:

- * -L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 KJ/Kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2.1 KJ/Kg. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- * -La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- * -Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- * -Il n'y a pas de ségrégation de phase.
- * -Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certaine plastique ou le cuivre). Il y a donc peu de problème de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).
- * -Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100% recyclables.
- * -Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire.
- * - La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 Kg/m³, et celle de la phase solide est de 800 à 900 Kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- * -Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Les deux principaux inconvénients sont les suivants :

- * -Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0.18-0.25 W/m k), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.
- * -Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

II.7.1.2- Différentes cires paraffiniques : [31]

Dans ce paragraphe sont donnés quelques exemples de cires paraffiniques soit pures soit en mélange :

- * ***n-octadecane (C18H38)*** : Cette cire fond à T=36.7°C et a une chaleur de fusion 244KJ/Kg.
- * ***n-eicosane (C20H42)*** : Sa fusion est congruente à T=56/58°C, la chaleur de fusion est de 247 KJ/Kg.

Le n-eicosane et le n-octadécane sont très inflammables quand ils sont exposés à une flamme. Ils s'oxydent fortement. Ils ne sont ni toxiques, ni corrosifs. Ils ont relativement une bonne conductivité thermique. Pures, ces composés sont très chers.

★ **112/118 white scale cires** : ces cires paraffiniques sont issues du raffinage du pétrole brut {Pennsylvania-Grade}. Elles font apparaître deux transitions de phase solides avant leur domaine de fusion (42-48°C). Ces cires ont été soumises à un cyclage thermique (jusqu'à 1743 pour un échantillon) sans changement ni de la température de la transition, ni du profil de la transition.

★ **P116** : cette cire a une chaleur latente de 210 KJ/Kg et sa solidification se produit à T=45-48°C. En forme des capsules sphériques, elle a subi 2600 cycles thermiques sans se détériorer.

Le tableau II.7 permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

Tableau II.7: Exemples de propriétés physiques de paraffines. [29]

Formule	Paraffines			
	Tétradécane C14H30	Héxadécane C16H34	Octadécane C18H38	Eicosane C20H42
Température de fusion [°C]	5.5	16.7	36.7	56/58
Enthalpie de fusion [KJ/Kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [W/ m. °C]	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique [KJ/Kg °C]	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide [Kg/m ³]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [Kg/m ³]	771	776	774	778
Retard a la solidification [°C]	aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à 75°C	133 à 105°C	133 à 75°C	133 à 100°C
Tension superficielle [N/m]	27.4 10 ⁻³	3.4	27.4 10 ⁻³	-
Viscosité [Cp]	2.1	-	3.4	-

II.7.1.3- Conditionnement des paraffines : [29]

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP leur faible conductivité thermique pénalise la cinétique de charge/ décharge de l'énergie thermique.

Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés :

- ☐ Les nodules,
- ☐ Les cylindriques avec ailettes ou non,
- ☐ La micro-encapsulation

II.7.1.4- Les composés organiques non-paraffiniques :

Les composés organiques non-paraffiniques incluent plusieurs matériaux organiques comme les acides gras, les esters, les alcools et les glycols.

II.7.1.4.1- Acides gras : [36]

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Les acides gras ont la formule chimique générale suivante : $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Comme il est facile de les imprégner ou de les incorporer dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme bon candidats pour les applications concernant la structure de bâtiment.

Certaines des caractéristiques des acides gras sont les suivantes :[29]

- Forte chaleur de fusion.
- Inflammable.
- Faible conductivité thermique.
- Faible point d'éclair.
- Niveau variable de toxicité.
- Instabilité à haute température.
- corrosifs

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage thermique à basse température sont représentés avec leurs propriétés thermophysiques dans le tableau II.8. [35] Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines. Les acides gras montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion. [37]

Tableau II.8 : Propriétés thermophysiques des acides gras. [35]

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (KJ/Kg)
Acide acétique	CH_3COOH	16.7	184
Polyéthylène glycol 600	$\text{H}(\text{OC}_2\text{H}_2)_n\text{-OH}$	20-25	146
Acide caprique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{-COOH}$	36	152
Acide elaidique	$\text{C}_8\text{H}_7\text{C}_9\text{H}_{16}\text{-COOH}$	47	218
Acide laurique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{-COOH}$	49	178
Acide pentadécanoïque	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{-COOH}$	52.5	178
Tristéarine	$(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})\text{C}_3\text{H}_5$	56	191
Acide myristique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{-COOH}$	58	199
Acide palmitique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{-COOH}$	55	163
Acide stéarique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{-COOH}$	69.4	199
Acétamide	CH_3CONH_2	8.1	241
Fumarate de méthyle	$(\text{CHCO}_2\text{CNH}_3)$	102	242

II.7.1.4.2- Les esters d'acides gras : [36] ; [31]

Ces matériaux sont produits par une estérification directe des acides gras séparés des huiles végétales.

Les esters d'acides gras comme le stéarate du butyle, le stéarate de vinyle et le méthyl-12 hydroxystéarate peuvent être utilisés pour le stockage passif de la chaleur. Le palmitate d'isopropyle ainsi que l'isopropyle stéarate peuvent être utilisés dans les pays chauds comme matériaux de stockage.

Les esters d'acides gras dans leur phase liquide ont une tension superficielle et ils ont une grande chaleur latente et une grande chaleur spécifique pour absorber la chaleur sensible. Le changement de volume est négligeable. Ils sont stable chimiquement, non corrosifs et non toxiques.

Ils ont d'excellentes caractéristiques de fusion/solidification sans sous-refroidissement. Ce dernier point leur donne un avantage important en tant que MCP. Leurs points de fusion les rendent aptes aux applications de chauffage.

Tableau II.9 : Propriétés thermophysiques des matières organiques non-paraffiniques. [35]

Matériaux	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (KJ/Kg)
Acide formique	7.8	247
Acide caprylique	16.3	149
Glycérine	17.9	198.7
Acide D-lactic	26	184
Méthyle palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasylbromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadécane	41	201
1-Cyclohexylo octadécane	41	218
4-Heptadécane	41	197

II.7-2. Inorganique : [29]

Les MCP inorganiques (sels hydratés, sels, métaux, alliages.) ont une chaleur latente volumétrique importante, le point de fusion est net, la conductivité thermique est importante, ils sont non-inflammable, facilement disponible et peu cher. En revanche, le phénomène surfusion est important.

II.7.2.1. Les sels hydratés :

Ce sont des composés obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau en principe parfaitement définie. Un des plus connus est celui obtenu par mélange de chlorure de sodium et d'eau et qui forme l'hydrate $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ils représentent un groupe important de MCP et sans doute le plus étudié. [26]

Ils ont les caractéristiques suivantes : [29]

- Une grande chaleur de fusion par unité de volume,

- ▣ Une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organique),
- ▣ Une faible variation de volume pendant le changement de phase,
- ▣ Une bonne compatibilité avec le plastique,
- ▣ Une certaine toxicité,
- ▣ Une certaine corrosivité,
- ▣ Trois comportements lors de la fusion : congruente, semi-congruente, non-congruente.
- ▣ Un cout variable.

Pour ce dernier point, une règle générale est que les hydrates à fusion congruente qui ont une grande chaleur de fusion et des points de fusion convenant aux applications du stockage thermique ont des couts élevés contrairement aux hydrates à fusion non-congruente.

Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont : [31]

1. **La surfusion (ou sous-refroidissement)** : On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.
2. **La ségrégation de phase** : Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants ou de dispositifs de stockages tournants. Comme agent épaississants ont utilisé de la cellulose, de la fécule, de la sciure, de gel de silice, de la silice, etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces.
3. **La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique.** Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.
4. **Leur caractère corrosif**, ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux utilisés.

Ce problème a reçu un débit de solution en encapsulation les MCP dans des capsules métalliques ou de matières plastiques. On distingue la macro-encapsulation et la micro-encapsulation.

La macroencapsulé de MCP :

- ▣ Evitent une séparation de phase trop importante,
- ▣ Améliorent le transfert de la chaleur,
- ▣ Fournissent une structure autoporteuse pour les MCP.

II.7.2.2. Différents hydrates salins :

Les quelques exemples d'hydrates salins donnés dans ce paragraphe sont la plupart tirés de l'article [31].

a. Sulfate de sodium déca hydrate (sel de Glauber $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) :

Cet hydrate n'est pas cher et facile à obtenir. La fusion de la phase solide stable est non congruente à $T=32,4^\circ\text{C}$. Ce point de fusion permet de l'utiliser dans de nombreuses applications. Il possède une grande chaleur de fusion $\Delta h= 252 \text{ KJ/Kg}$. Par comparaison, pour une même quantité d'énergie stockée, il nécessite un volume égal à 1/3 de celui de la pierre et 2/5 de celui de l'eau.

Parmi ses inconvénients, on peut citer son caractère très corrosif vis-à-vis de nombreux matériaux de structure et sa faible conductivité thermique qui posent le problème du conditionnement. D'autre part, il subit un sous-refroidissement d'environ $15\text{-}30^\circ\text{C}$ en dessous de sa température théorique de changement d'état. Pour y remédier, on rajoute du tétra borate de sodium déca hydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) pour provoquer le changement de phase à sa température théorique.

A la température de fusion du sel de Glauber, 15% du sulfate de sodium reste sous une forme de sel anhydre insoluble. Etant deux fois plus dense que la solution saturée la partie anhydre décanté et ne participera pas à la recristallisation sous forme de composé défini lorsque la chaleur sera retirée.

Pour prévenir cet effet, un agent d'épaississement est utilisé pour garder l'hydrate en suspension jusqu'à ce qu'il puisse se reformer avec sa structure cristalline de composé défini quand la chaleur est enlevée.

b. Chlorure de calcium de hexa hydrate ($\text{Ca Cl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) :

Le chlorure de calcium hexa hydrate ($\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a souvent été considéré pour le chauffage solaire passif. Son point de fusion est de l'ordre de $27\text{-}29,7^\circ\text{C}$ et sa chaleur de fusion est 170 KJ/kg son principale inconvénient est la formation de chlorure de calcium tétra hydrate ($\text{Ca Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). L'hexa hydrate a une fusion non- congruente que l'on peut rendre congruente en ajoutant du $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

c. Acétate de sodium tri hydrate ($\text{Na CH}_3 \text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) :

La fusion de cet hydrate est à $T=58^\circ\text{C}$ et la chaleur de fusion est 170 à 264 KJ/Kg . Il est adapté au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude.

d. Hydroxyde de Baryum octa hydrate ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$) :

Il a une fusion congruente à $T=78^\circ\text{C}$ avec une grande chaleur latente de 301KJ/Kg , mais il est fortement alcalin et toxique. Il absorbe le CO_2 de l'air et devient donc insoluble dans l'eau. Il réagit fortement avec l'aluminium.

En laboratoire, la cristallisation se produit en blocs compacts mais quand on ajoute de l'eau supplémentaire (plus 6% en poids) la cristallisation se produit en petits cristaux.

e. Chlorure de Magnésium hexa hydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et Nitrate de Magnésium hexa hydrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) :

Ces deux sels, avec additifs pour éviter la surfusion ont été testés après encapsulation. Les tests ont montré que ces capsules étaient détruites après quelques centaines de cycles thermiques. Des boîtes en acier doux un enduit sont recommandées pour leur

conditionnement. Leur utilisation est adaptée au côté chaud d'un système de climatisation à absorption de vapeur.

Sur le tableau suivant [Tableau II.10] on donne un récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques.

Tableau II.10 : Différents hydrate salins. [31]

Hydrates salins	Température de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
Sel de Glauber ($\text{Na}_2 \text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$)	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate ($\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate ($\text{Na CH}_3 \text{COOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	58	170 à 264
Hydroxyde de Bariumocta hydrate ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)	78	301
$\text{NH}_4 \cdot \text{Al} (\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate ($\text{Na}_3 \cdot \text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (Calotherm 70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate ($\text{Na}_2 \text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40-43	140

II.7.3.Eutectique : [29]

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente.

Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Sur le tableau II.11, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Tableau II.11 : Liste de quelques Eutectiques. [38]

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
49.3% Mg Cl. 6H2O + 50.7 % Mg (NO3). 6H2O	58	132.3
61.5% Mg (NO3). 6H2O+ 38.5% NH4 NO3	51	131.1
58.3% Mg (NO3) 6H2O+ 41.7% Mg Cl2. 6H2O	58	106
Ca Cl2. 6H2O+ CaBr2.H2O	14	140
Eutectiques organiques		
Acide Caprique-Laurique	18	120
Acide Palmitique-Laurique	33	145
Acide Stéarique Laurique	34	150

II.8-Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :

Rappelons quelques principes pour le conditionnement des MCP :

- ☐ Le matériau du réservoir de stockage doit être compatible avec le MCP.
- ☐ Quand le MCP devient liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fluide est fortement augmenté et le réservoir de stockage doit assurer l'étanchéité.
- ☐ Le changement de phase produit un changement de volume ; ce changement peut casser le conteneur si ce conteneur ne peut pas absorber le changement de volume.

Il existe de nombreuses techniques pour conditionner le MCP : [37] ;[39]

a) Les macro-capsules : [39]

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles de plastiques, de capsules de différentes formes géométriques et dimensions etc.

Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules. Ces nodules sont manufacturés dans trois diamètre (77-78 et 98mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3 à -15°C), aux températures intermédiaires (-3 à 15°C) et à la température de stockage de la glace (0°C). Certains nodules spéciaux ont des températures de changement s'état de 27°C et plus.

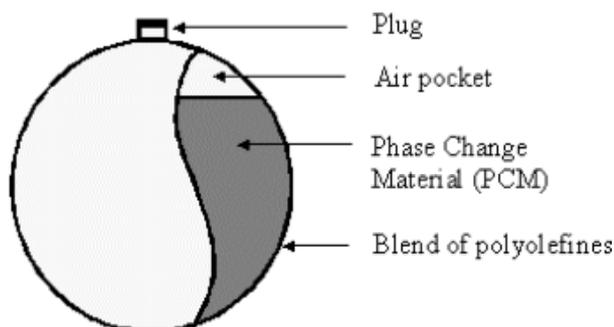


Figure II.4: Conditionnement de MCP en nodules. [39]

b) La micro-encapsule :

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet l'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides dans une coquilles solide de 1 à 1000 μm de diamètre. Les procédés physiques sont le séchage de sprays, la centrifugation ou l'utilisation de lits fluidisés ou des procédés de revêtement divers. Les procédés chimiques consistent en des encapsulations in-situ comme les polycondensations interfaciales qui conduisent à des polyamides ou des polyuréthanes comme coquilles, des précipitations dues à la polycondensation de résines aminées etc...

Hawlder et al.[40]ont développé des expériences et des simulations pour éviter les caractéristiques et les performances de paraffines encapsulées dans un agent liant (HCHO) en termes de ration d'encapsulation (rapport cœur sur revêtement) et de capacité de stockage énergétique. Ils sont également effectués des tests de cyclage thermique et ont montré que les capsules gardaient leur profil géométrique et leur capacité de stockage après 1000 cycles.

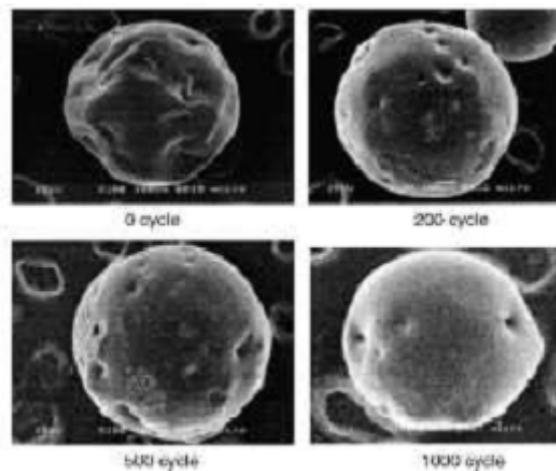


Figure II.5 : Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines. [40]

c) Des briquettes de polyéthylène à haute densité (PEHD) :

Des briquettes de polyéthylène à haute densité est un hydrocarbure alkyle de haut poids moléculaire avec une température de fusion et de solidification de 125 à 135°C.

Ce dernier correspond à un stockage thermique latent de 190 à 210 KJ/Kg. Le PEHD est alors irradié pour éviter l'écoulement lorsqu'il est sous forme liquide. Ces briquettes des caractéristiques de stockage au moins 1000 cycles thermiques sans changement des caractéristiques de stockage thermique. Des plaques, des barres, des tubes et d'autres formes géométriques de polyéthylène peuvent être obtenues suivant leur usage.

d) Des briquettes de polyéthylène de haute densité réticulé :

Peuvent être imprégnées avec un MCP de température de fusion plus faible. La température de fusion et le stockage thermique ne varient pas après répétition de nombreux cycles thermiques. Ces briquettes imprégnées peuvent être incorporées dans les matériaux de construction (plâtre et béton) en les ajoutant au mélange humide du processus.

e) Un Substrat poreux :

Comme le plâtre, le béton et la mousse, absorbant un MCP liquide hydrocarbure alkyl. Le processus d'absorption peut être effectué en 10 minutes, la durée d'absorption contrôlant la quantité de MCP absorbée.

Les hydrocarbures alkyl d'une chaîne de carbone plus ou moins longue peuvent être absorbés par le plâtre et le béton.

D'autres MCP comme les acides gras et les esters peuvent aussi être absorbés par les matériaux poreux.

f) Le stockage de MCP par absorption ou adsorption dans des poudres sèches de silice :

C'est la méthode la plus récente et la plus universelle pour conditionner les MCP. La silice peut mécaniquement se mélanger avec les MCP. Les hydrocarbures, l'eau et les autres MCP peuvent être absorbés et adsorbés dans la silice finement divisée.

II.9. Conclusion :

Le principe du stockage de la chaleur repose sur trois voies : la chaleur latente, la chaleur sensible et la réaction chimique. Le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que de la durée du stockage désirée. Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état.

Chapitre III**Réalisation et étude expérimental du model****III.1. Introduction**

Pour étudier expérimentalement et analyser les transferts de chaleur dans un système de stockage de chaleur mixte (chaleur sensible et latente), nous avons réalisé un dispositif au département de génie mécanique qui est un système de stockage thermique et nous avons adopté les équipements suivant :

- Choisir un MCP pour un stockage thermique latent à basse température.
- Choisir un conditionnement pour le MCP pour être incorporé dans la cuve de stockage.
- Le fluide stockeur par chaleur sensible.
- Définir les dimensions appropriées au module de stockage thermique.
- Choisir une configuration appropriée d'un échangeur de chaleur pour le stockage de chaleur.
- Instrumenter l'élément de stockage du nombre adéquat de thermocouple afin de permettre une étude partielle des phénomènes de transfert thermique et d'évaluation des quantités de chaleur stockée et libérée, et un débit mètre pour mesurer le débit massique d'eau chaud.
- Une isolation thermique efficace du système de sorte que les pertes bien qu'elles existent puissent être considéré comme négligeables.

III.2. Les équipements de module expérimental :**III.2.1. Le choix de MCP :**

Le choix du MCP pour le stockage de chaleur à basse température dépend en premier lieu de l'application à laquelle est destiné le système de stockage et essentiellement de sa température de fonctionnement et de la stabilité du MCP au cycle de stockage et déstockage.

Pour notre étude il est prévu initialement de recourir au choix de la paraffine dont l'utilisation dans de multiples travaux de recherche et thèses concernant des systèmes de stockage.

Cependant, pour la réalisation de la partie expérimentale de notre étude il ne nous a pas été possible de se procurer cette paraffine étant disponible sur le marché national.

Tableau 5.1 : Les propriétés thermo physiques de MCP choisi.[29]

Paraffine	Eicosane
Formule	C20H42
Température de fusion [°C]	56/58
Enthalpie de fusion [KJ/Kg]	247
Conductivité thermique [W/ m. °C]	0.15
Capacité thermique massique [KJ/Kg °C]	2.21
Masse volumique solide [Kg/m ³]	856
Masse volumique liquide [Kg/m ³]	778
Retard à la solidification [°C]	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à 100°C
Tension superficielle [N/m]	-
Viscosité [Cp]	-



Figure III .1 : La paraffine.

III.2.2. Le fluide stockeur par chaleur sensible :

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible se fait par l'eau. Le volume maximal de réservoir de stockage est de 50 litres d'eau.

L'eau est choisie comme caloporteur, car sa chaleur spécifique moyenne est grande ($C_p=4.18$ KJ/kg. K dans les conditions normales), et sa température de fonctionnement est bien désiré car nos systèmes de stockage fonctionne à basse température (0-100°C).

III.2.3. Le module de stockage thermique :

Le module de stockage est une cuve de stockage utilisé dans les systèmes de stockage thermique conçue dans la forme cylindrique de dimension donnée comme les suivants :

Diamètre intérieur : 36cm avec 6mm d'épaisseur

Hauteur : 53cm



Figure III .2 : le module de stockage thermique

III.2.4. L'échangeur de chaleur :

On a réalisé un échangeur de chaleur d'une géométrie spirale en cuivre pour assurer un bon transfert de l'énergie sur toute la surface d'échange, dont les dimensions sont données comme les suivantes :

- **Diamètre intérieur/extérieur** : 10/12mm
- **Diamètre de la spire**: 20cm
- **Nombre de spire** : 13
- **Hauteur de l'échangeur** : 17cm



Figure III .3 : l'échangeur de chaleur

III.2.5. L'isolant thermique :

Pour l'isolation thermique on a utilisé deux isolant, pour diminuer le maximum des pertes thermiques vers de milieu extérieur.

Le premier : est la laine de roche de 5 cm d'épaisseur

Le deuxième : est ISOFLEX de 2 cm d'épaisseur



Figure III .4 : isolant la laine de roche

III.2.6. Mesure de température :

L'étude expérimentale est destinée à une meilleure connaissance du champ de température à l'intérieur de la cuve de stockage en cours de chauffage. Pour cela on a effectué les mesures de températures suivant :

- Dans la cuve de stockage (fluide et MCP).
- A l'entrée et à la sortie de l'échangeur et dans le bain d'alimentation de l'eau chaud.

Il existe de nombreux procédés de mesure de température. Les thermocouples comptent parmi ceux qui sont les plus souvent utilisés lors d'études effectuées dans des conditions similaires à celles que nous avons consultées.

Plusieurs impératifs sont à considérer :

La gamme de température à mesurer varie de 0 à 100°C. Pour cela nous avons choisi des thermocouples Nickel Chrome / Nickel Aluminium en raison de leur disponibilité, leur bonne sensibilité et leur temps de réponse rapide associés à une courbe de réponse quasi linéaire dans le domaine des températures envisagé.



Figure III .5: Thermocouple type K.

III.2.7. Mesure du débit :

Pour mesurer le débit du fluide à la sortie de l'échangeur de chaleur on a suivi deux méthodes :

La première : méthode artisanale à l'aide d'un chronomètre.

La méthode est basée sur le calcul du temps nécessaire pour remplir un réservoir de 0.75L.

On suppose que 1L d'eau est équivalent à 1Kg, le débit de sortie est calculer en Kg/s.

La deuxième : on a utilisé un débit mètre a ultrason.

on a comparé les deux méthode et on a trouvé les même résultats.

III.2.8. Acquisition des données :

L'ensemble des capteurs de mesure sont reliés à une chaine d'acquisition de données de marque FLUK. Cette dernière est connectée à un ordinateur dans lequel sont stockés les résultats mesurés (figure III .6).



Figure III .6 : Chaine d'acquisition et micro-ordinateur.

III.2.9.le circuit hydraulique :

Il se compose d'un circulateur qui devra supporter une température de 100 °C et leur rôle est facilité la circulation du fluide caloporteur avec trois vitesse et deux tuyaux en cuivre isolé sera relié à l'entrée et la sortie de l'échangeur et au bassin d'eau qui contient une résistance avec régulateur pour contrôlé la température et un thermostat.



Figure III .7 : le circuit hydraulique.

III.3. la réalisation du model :

La réalisation du système de stockage de chaleur a été réalisé suivant les étapes :

La première étape : a consisté a coupé la cuve pour faciliter le montage de l'échangeur de chaleur à l'intérieur avec un pressage de deux trous pour mettre une sortie et une entrée au échangeur de chaleur et aussi de placé une deuxième paroi.

La première étape : est de réalisé la deuxième paroi.

- **Une taule galvanisée** d'épaisseur de 0.2 mm
- **Diamètre** : 32 cim
- **Hauteur** : 40 cim



Figure III.8: la deuxième paroi.

Les anneaux : deux anneaux de la même taule de la deuxième paroi, placée entre les deux parois, le premier en haut et le deuxième en bas.



Figure III. 9 : la réalisation d'anneau.

Après on a perses l'anneau de la partie haute 4 trous et fixé 4 tuyaux de cuivre de 14 mm de diamètre dans ces trous et ça pour injecté la paraffine entre les deux parois et

après on a soudé les anneaux avec les deux parois avec une distance de 2cm entre les deux.



Figure III. 10: l'emplacement des deux parois

Et après c'est le tour de l'emplacement de l'échangeur



Figure III.11 : l'emplacement de l'échangeur

Suivant l'emplacement de l'échangeur on a perses le milieu de la partie base de la cuve pour placé un robinet pour le vidange de la cuve.



Figure III. 12 : l'emplacement du robinet.

La deuxième étape: l'injection de la paraffine.

On a choisi quatre points d'injection autour de la cuve pour un remplissage uniforme.

Premièrement il faut fondu la paraffine.



Figure III. 13 : le fondement de la paraffine.

Deuxièmement remplir la cuve de stockage avec l'eau chaude pour éviter la solidification de paraffine au temps du remplissage.



Figure III. 14 : le remplissage de la cuve avec l'eau chaud.

Troisièmement l'injection de la paraffine.

On a injecté la paraffine dans les quatre points en même temps pour garder l'uniformité.



Figure III. 15 : l'injection de la paraffine.

La troisième étape : après l'injection de la paraffine on a soudé la partie haute de la cuve du stockage, et tout le soudage de ce système est fait avec le cuivre pour éviter tout type de fuite.



Figure III. 16 : le soudage de la partie haute de la cuve.

La quatrième étape : c'est l'isolation

Comme on a disons, on a utilisé deux type d'isolons.

Pour la laine de roche elle nécessite d'utilisé la colle et l'adhésif.

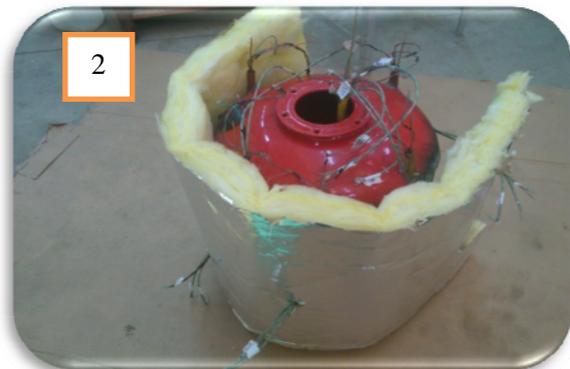


Figure III. 17 : l'isolation avec la laine de roche.

Pour l'autre isolant ISOFLEX, il ne nécessite pas ni de la colle ni de l'adhésif parce il est autocollant.



Figure III. 18 : l'isolation avec isoflex.

La cinquième étape : après l'isolation notre cuve de stockage est prête pour le montage avec le circuit hydraulique.



Figure III. 19 : Aperçus sur la cinquième étape du montage.

La sixième étape : a consisté à relier notre système à la table d'acquisition.

Le Figure ci-dessous montre le montage réalisé :

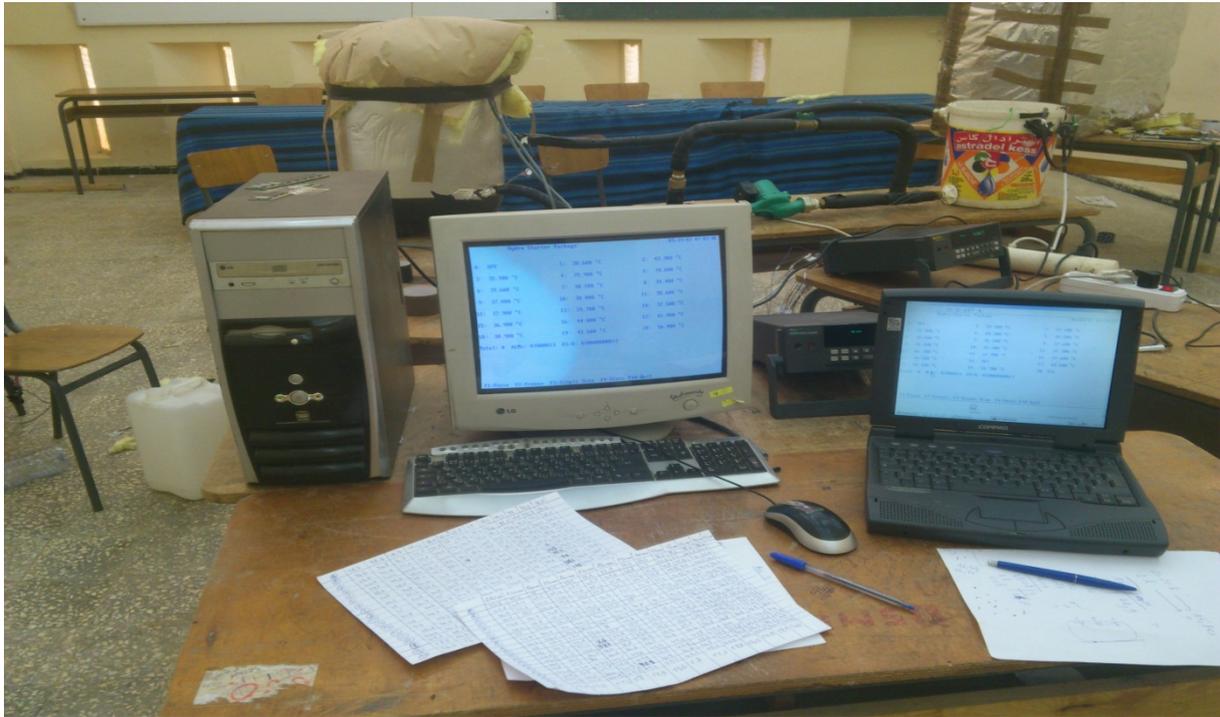


Figure III. 20 : Aperçue sur le montage expérimental.

III.4.l'instrumentation du système :

Pour l'instrumentation on a deux instruments placés dans le système :

Le premier : est le débit mètre a ultrason pour le mesure de débit, a été placer sur le tuyau du circuit hydraulique.



Figure III. 21 : le débit mètre à ultrason

Le deuxième : est les thermocouples pour la mesure de température.

Ils sont placés avant l'injection de MCP et avant le soudage de la partie haute de la cuve et aussi avant l'isolation.

Nous avons deux zones d'emplacement du thermocouple dans la cuve de stockage, la première dans la zone où se trouve la paraffine et la deuxième la zone d'eau.

Pour la zone de la paraffine en a aussi deux emplacements :

- Le premier suivant la hauteur : après les mesures en a trouvé que la hauteur de la paroi cylindrique est 40 cm donc en a placé 4 thermocouples chaque 10 cm pour les 4 point, et les thermocouples sont placés sur une tige de cuivre.



Figure III. 22 : l'emplacement du TC suivant la hauteur.

- Le deuxième suivant l'épaisseur : on a choisi trois points d'emplacement la première en bas de la paroi la deuxième au milieu et la troisième en haut et en chaque point en a placé trois thermocouples donc en a fait le maximum pour suivre la température dans tout la zone de la paraffine.



Figure III. 23 : l'emplacement du TC suivant l'épaisseur

L'emplacement dans la zone d'eau :

On a placé 11 thermocouples dans la zone d'eau ou se trouve l'échangeur, le schéma suivant montre cet emplacement :

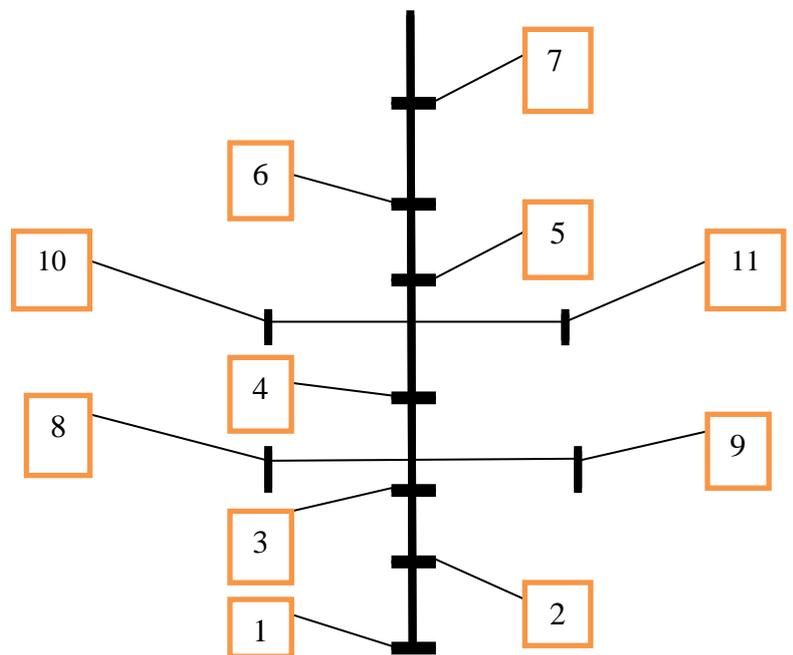


Figure III. 24 : l'emplacement du TC dans la zone d'eau.

On a aussi deux thermocouples sont placé à l'entrée et la sortie de l'échangeur :

Le numéro 18 pour l'entrée.

Le numéro 19 pour la sortie.

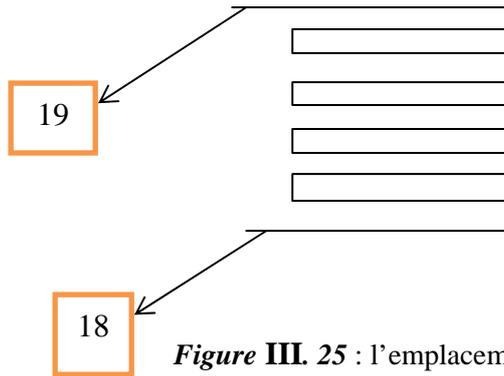


Figure III. 25 : l'emplacement du TC à l'entrée et la sortie de l'échangeur

On numéroté les thermocouples avant les placés :

1-Pour la zone de la paraffine :

– Suivant la hauteur on a quatre voies :

A la première voie ;

P_1^1 = numéro 1

P_1^2 = numéro 2

P_1^3 = numéro 3

P_1^4 = numéro 4

A la deuxième voie ;

P_2^1 = numéro 5

P_2^2 = numéro 6

P_2^3 = numéro 7

P_2^4 = numéro 8

A la troisième voie ;

P_3^1 = numéro 9

P_3^2 = numéro 10

P_3^3 = numéro 11

P_3^4 = numéro 12

A la quatrième voie ;

P_4^1 = numéro 13

P_4^2 = numéro 14

P_4^3 = numéro 15

P_4^4 = numéro 16

– Suivant l'épaisseur on a trois points :

A la première point été en bas ;

C_1^1 = numéro 17

C_1^2 = numéro 18

C_1^3 = numéro 19

A la deuxième point été au milieu ;

C_2^1 = numéro 1

C_2^2 = numéro 2

C_2^3 = numéro 3

A la troisième point été en haut ;

C_3^1 = numéro 4

C_3^2 = numéro 5

C_3^3 = numéro 6

Au total on a 39 thermocouples c'est pour ça on a utilisé deux acquisition.

III.5. Procédure de l'expérimentation :

Initialement la cuve est thermiquement stable (la température constante). On injecte par un circulateur des quantités d'eau à température constante chauffée par une source électrique (résistance thermostaté) avec différents débits massique dans l'échangeur de chaleur pour le transmettre son énergie calorifique à la cuve et on laisse le système en état de la charge de l'énergie thermique.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a décrit la conception, la réalisation et l'instrumentation de système de stockage choisi qui est d'une cuve d'une géométrie cylindrique avec une intégration de MCP ainsi l'acquisition des données. L'instrumentation permet de mesurer les températures intérieures de la cuve ainsi que les températures de fluide caloporteur à l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur. L'acquisition des données est de type FLUK de 20 voies.

Chapitre IV Résultats et interprétation

IV.1. Introduction :

Les résultats présents dans ce chapitre sont relatifs aux deux phases de fonctionnement : la phase de stockage et celle de relaxation. Plusieurs mesures ont été effectuées sur l'installation de stockage de l'énergie thermique. Ces mesures ont pris pour chaque 10 minute.

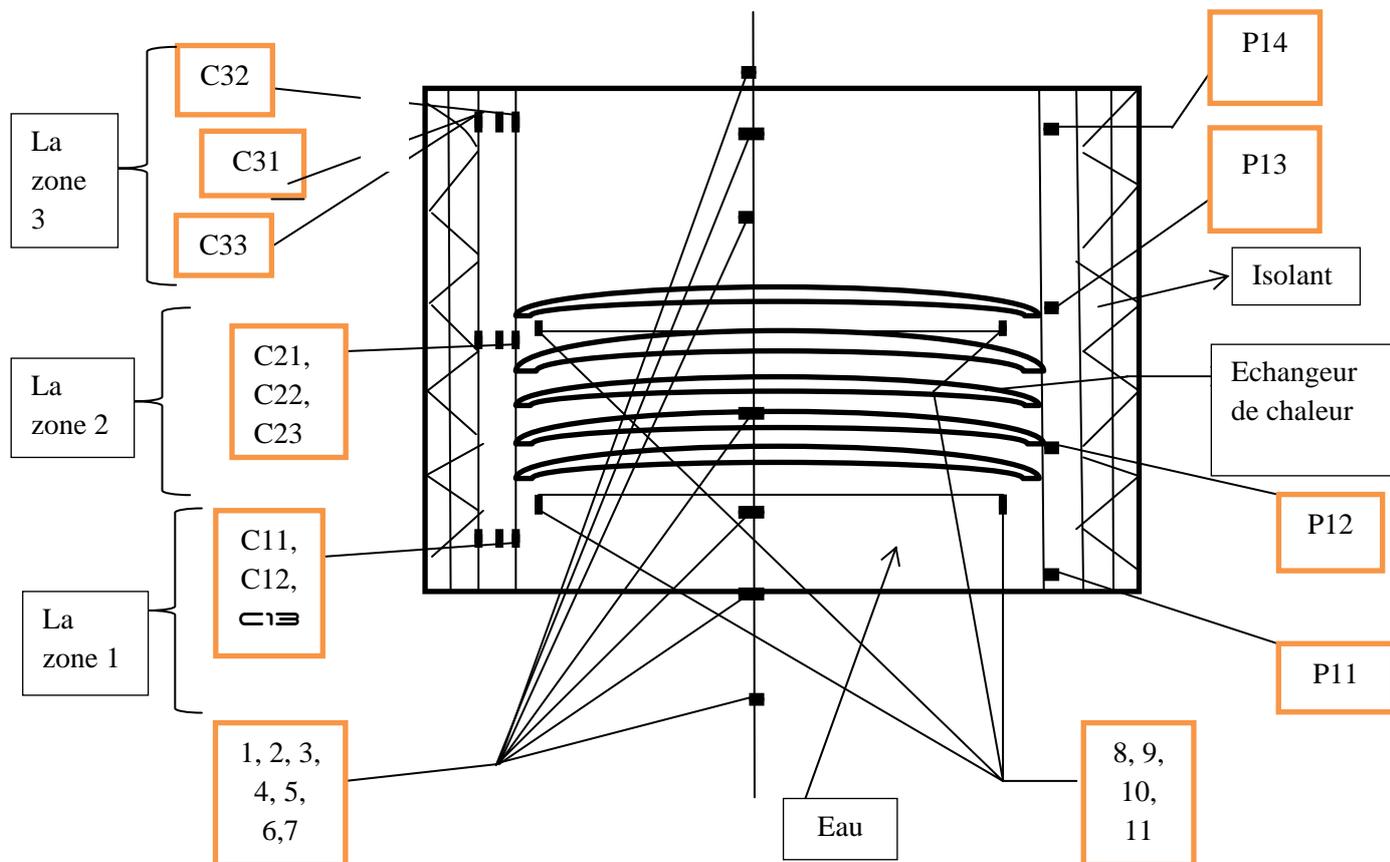


Figure 4.1 : l'emplacement du thermocouple dans les différentes zones de la cuve

IV.2. Résultats:

Les résultats expérimentaux sont présentés sur les figures, Sur les axes des abscisses on a représenté le temps en (minute) et sur l'axe des Y on a représenté la température de l'eau et la paraffine en [°C].

IV.2.1. Résultats de la phase de stockage :

- $T_{res} = T_F = 56-60^{\circ}\text{C}$
- Le débit = 0.03125L/S
- La durée de l'essai = 6h et 20 minute
- Le pas du temps = 10 minute

IV.2.1.1. Les résultats de l'évolution de la paraffine suivant l'épaisseur :

- La zone 1 : C11, C12, C13 (figure4.1)
- La zone 2 : C21, C22, C23 (figure4.2)
- La zone 3 : C31, C32, C33 (figure4.3)

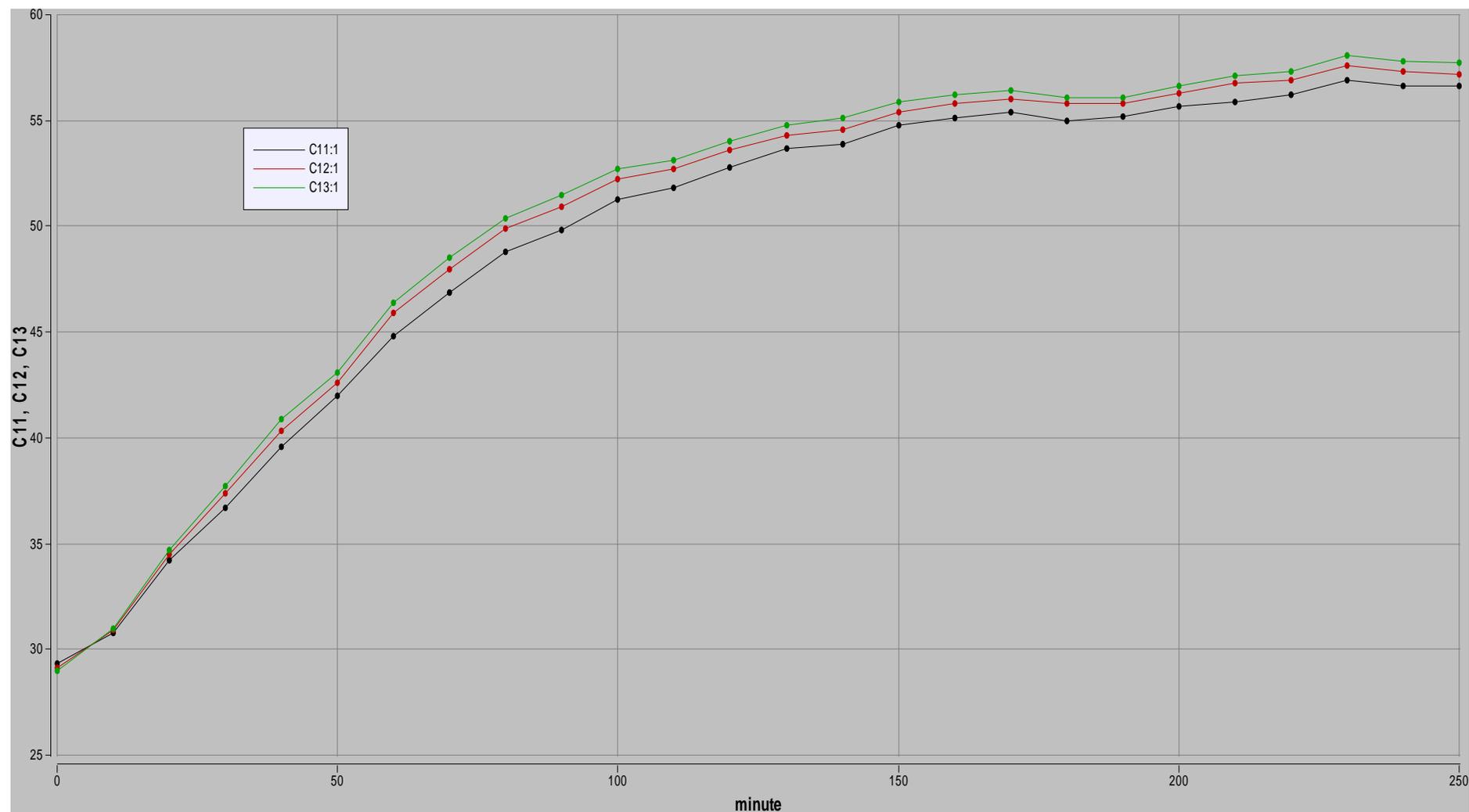


Figure 4.2 :L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 1 au cours de stockage.

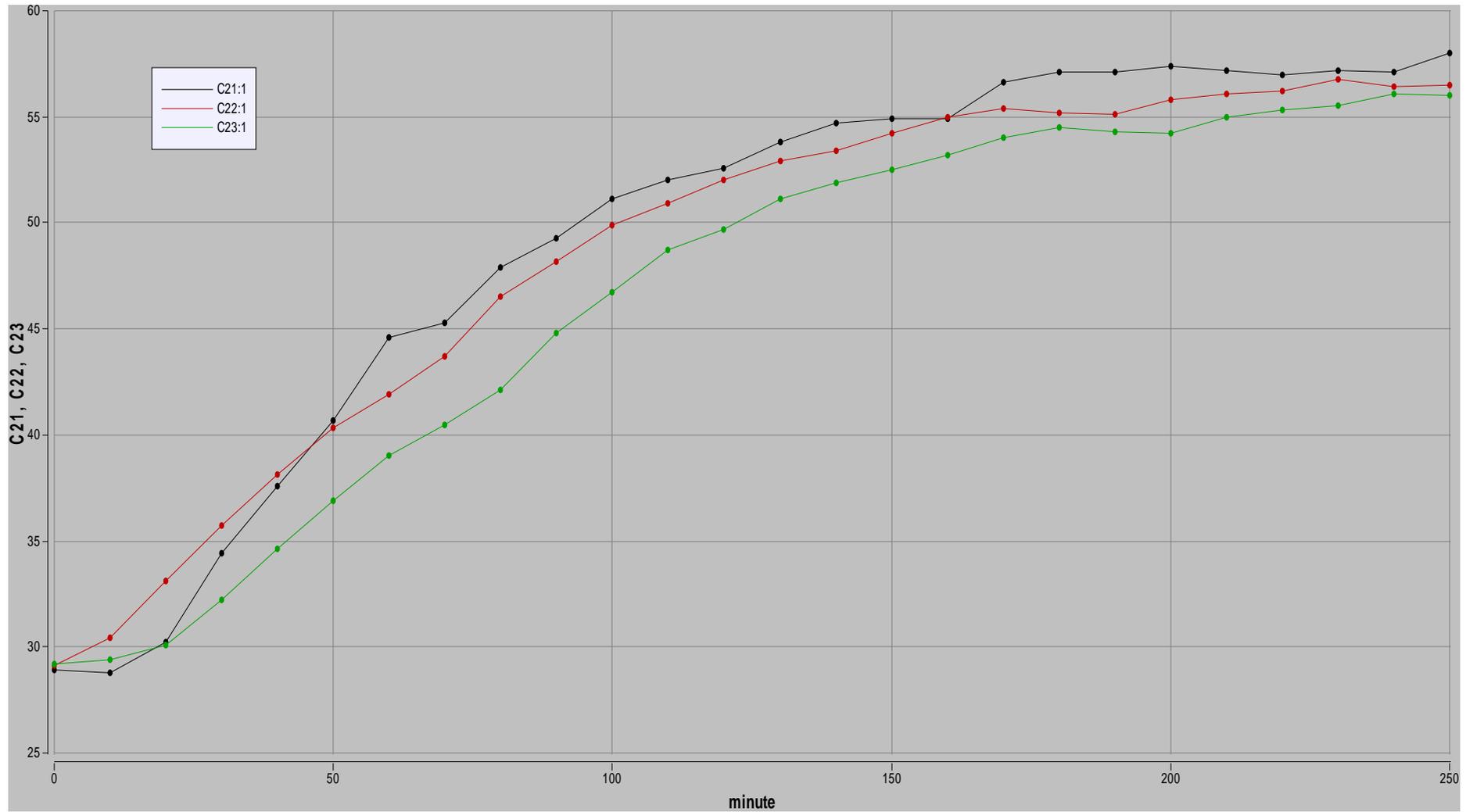


Figure 4.3 : L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 2 au cours de stockage.

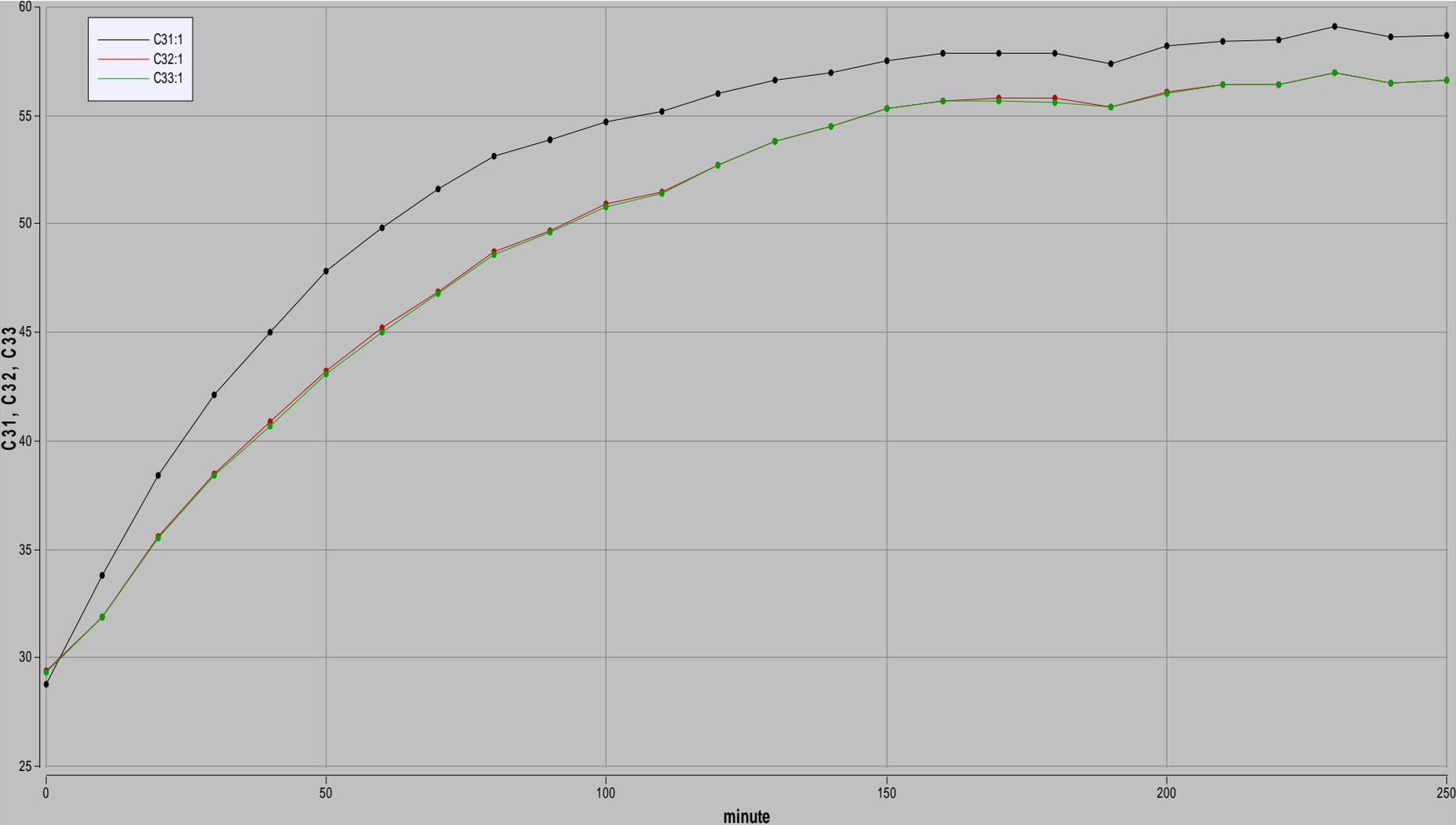


Figure 4.4 :L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 3 au cours de stockage.

Les résultats expérimentaux de les figures 4.2 a 4.4 montrent l'évolution de la température de la paraffine (MCP) en fonction du temps suivant l'épaisseur dans la cuve au cours de stockage.

La zone 1 :

On remarque que les courbes C11, C12 et C13 ont la même allure forme d'une droite avec une pente moyenne. Autrement dit ; après une durée relativement moyenne (2heures et 30minute), les températures sont passées de 29°C à 55-56°C approximativement. Ce qui explique le temps de transfert thermique de l'eau vers la paraffine. Et deviennent en suit horizontale (stabiliser) avant de passer à la relaxation.

La zone 2 :

Cette zone est au milieu de la cuve. Les courbes C11, C12 et C13 ont la même allure forme d'une droite avec une pente moyenne. Après une durée relativement moyenne (3heures et 30 minute), les températures sont passées de 29°C à 55-56°C approximativement.

La zone 3 :

Cette zone est au haut de la cuve On voit que le C31 a une évolution plus rapide et le C32 et C33 ont la même évolution. Après une durée relativement moyenne (2heures et 20 minute), les températures sont passées de 29°C à 55-56°C approximativement.

⊖ la zone 3 a la plus grande évolution para port au zone 1 et 2 qu'ils ont presque la même évolution donc la distribution de la température est mieux vers haut que le bas.

IV.2.1.2.Les résultats de l'évolution de l'eau et la paraffine suivant la hauteur :

- La zone 1 : P11, T2 (figure4.4)
- La zone 2 : P12, T4 (figure4.5)
- La zone 3 : P14, T6 (figure4.6)

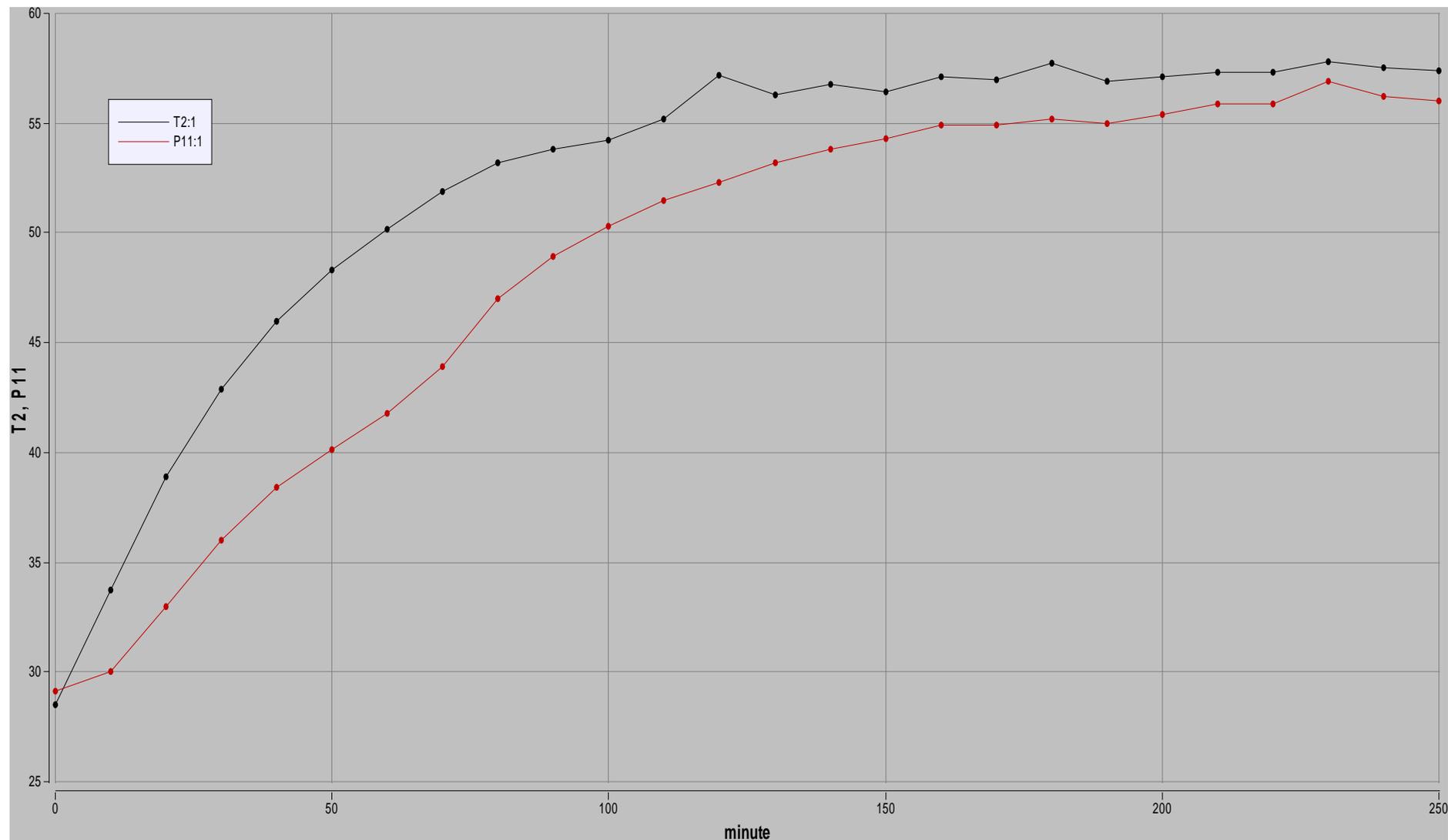


Figure 4.5 :L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 1 au cours de stockage.

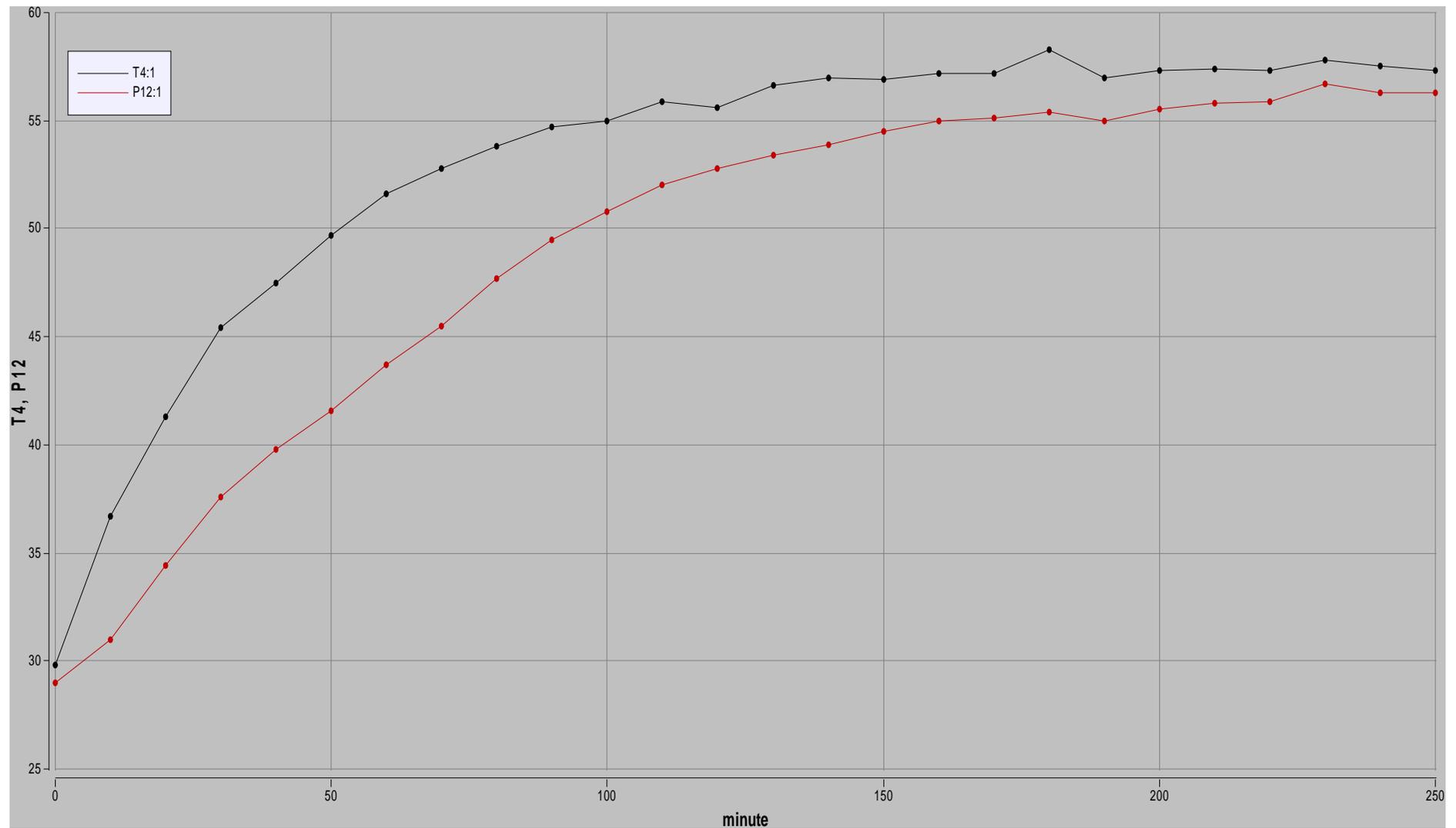


Figure 4.6 :L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 2 au cours de stockage.

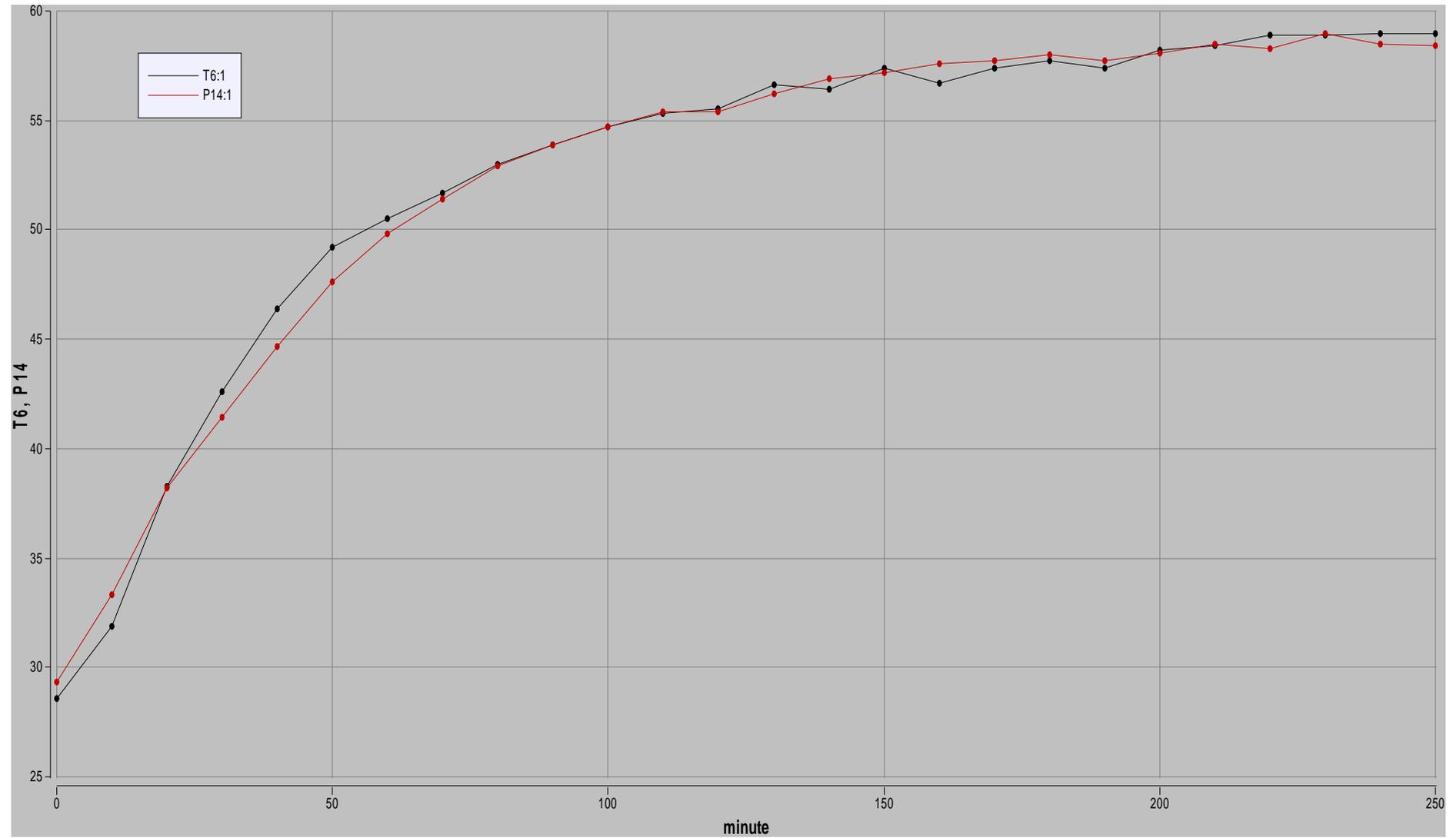


Figure 4.7 :L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 3 au cours de stockage.

Les zones 1, 2:

Les résultats expérimentaux présentés aux figures 4.5 et 4.6 montrent l'évolution des températures de l'eau et la paraffine dans les différentes zones de la cuve suivant la hauteur au cours de stockage. On remarque que les températures de l'eau dans toutes les zones sont supérieures à celles de la paraffine ce qui implique que le transfert de la chaleur se fait dans un seul sens de l'eau vers la paraffine.

La zone 3 :

A la figure 4.7 On remarque que la température de l'eau et la paraffine ont presque la même évolution parce que la paraffine reçoit sa chaleur par l'eau et aussi par les couches de la paraffine au-dessus.

- ⊖ On remarque que la zone 3 a la grande évolution à cause de sa rapidité à la fusion, en (1h et 40 minutes) la température de la paraffine elle est passée de 29°C à 56°C.
- ⊖ Dans la zone 1 et 2 en (2h et 40 minutes) les températures sont passées de 29 °C à 56 °C.

IV.3. Résultats de la phase de relaxation :

Durant toute la phase de relaxation, les mesures de température sont effectuées à un intervalle de temps constant de 10minutes.

IV.3.1. Les résultats de la paraffine a la phase de relaxation suivant l'épaisseur :

- La zone 1 : C11, C12, C13 (figure4.8)
- La zone 2 : C21, C22, C23 (figure4.9)
- La zone 3 : C31, C32, C33 (figure4.10)

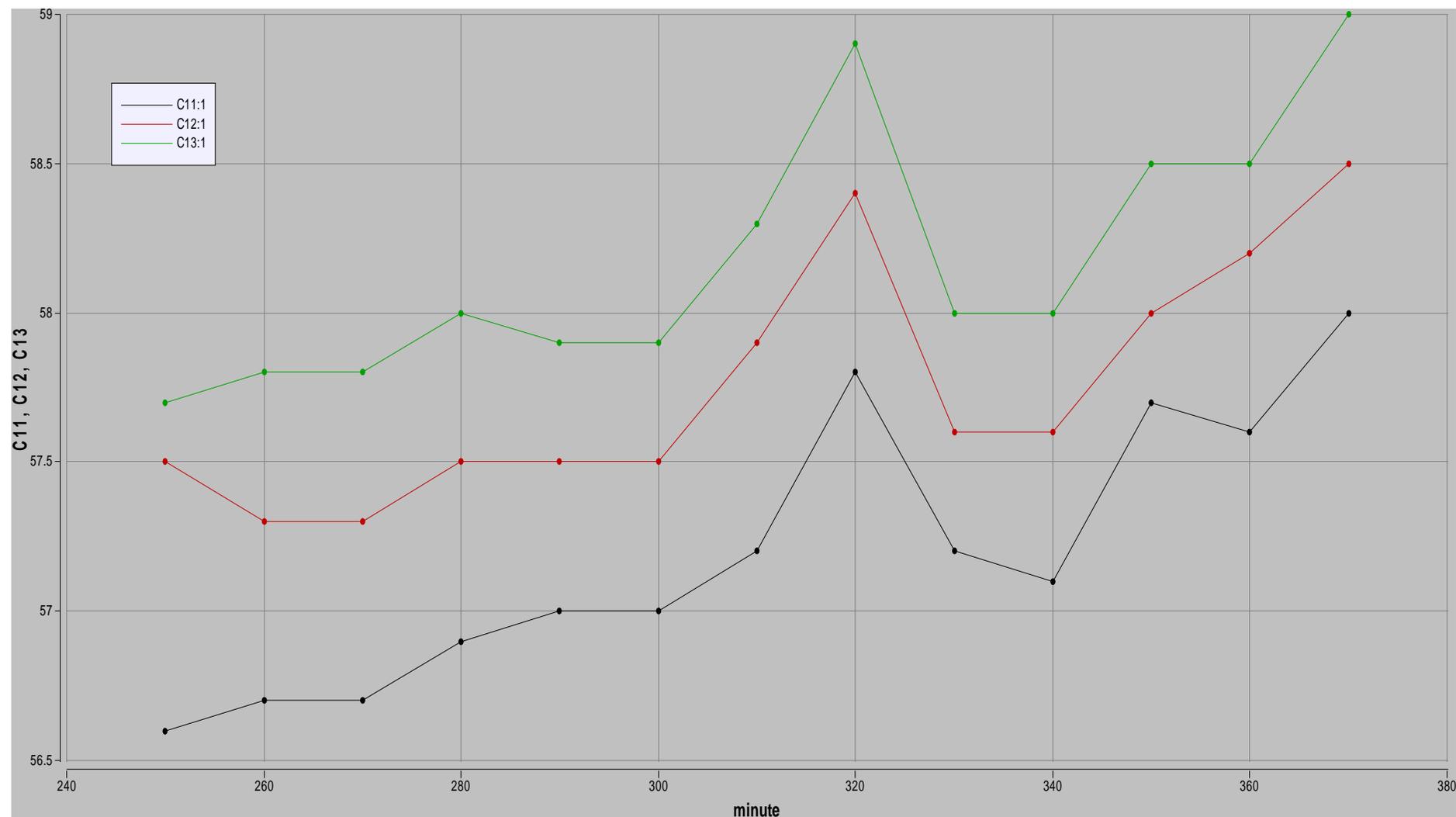


Figure 4.8 :L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 1 au cours de relaxation.

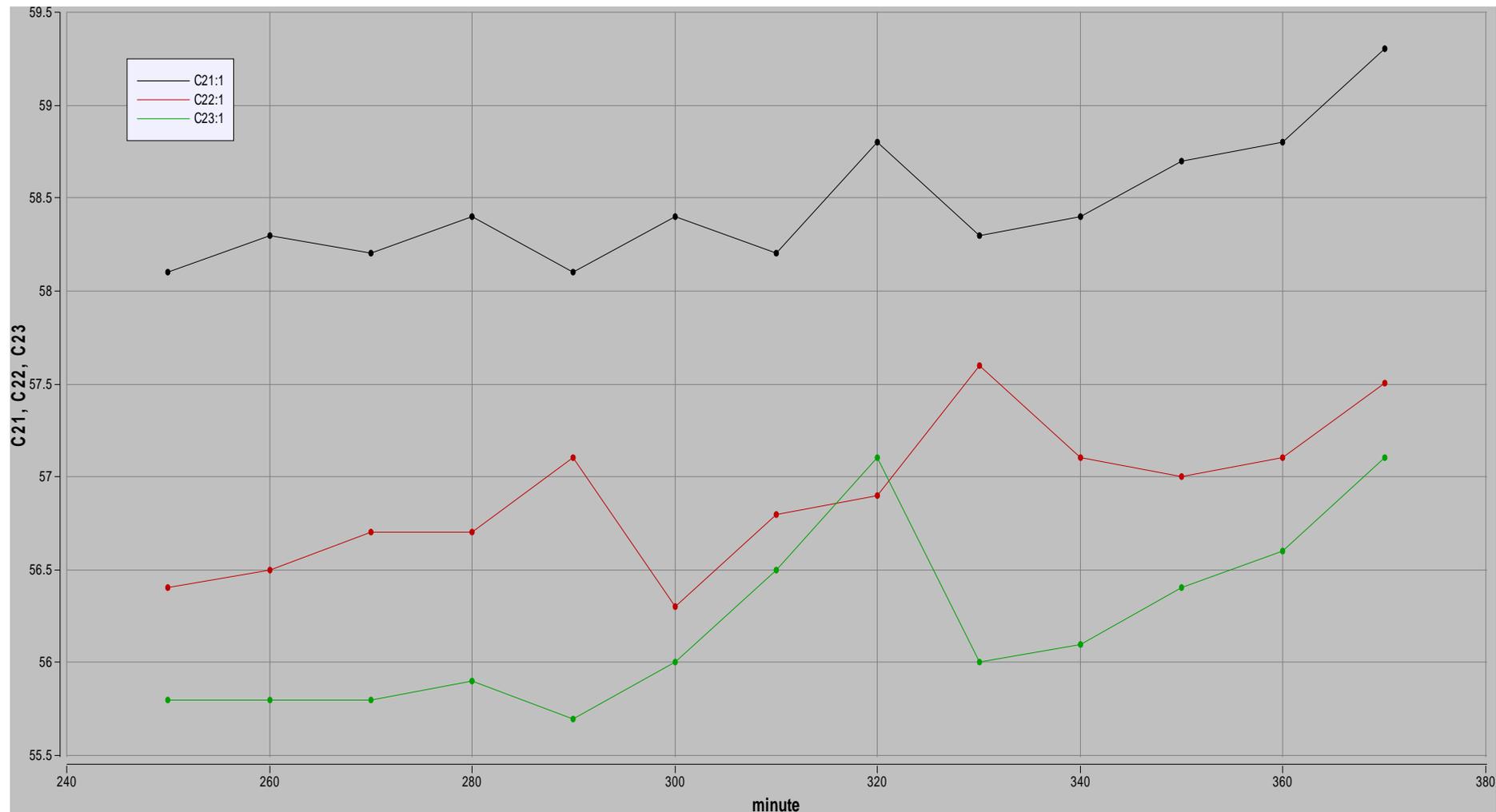


Figure 4.9 :L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 2 au cours de relaxation.

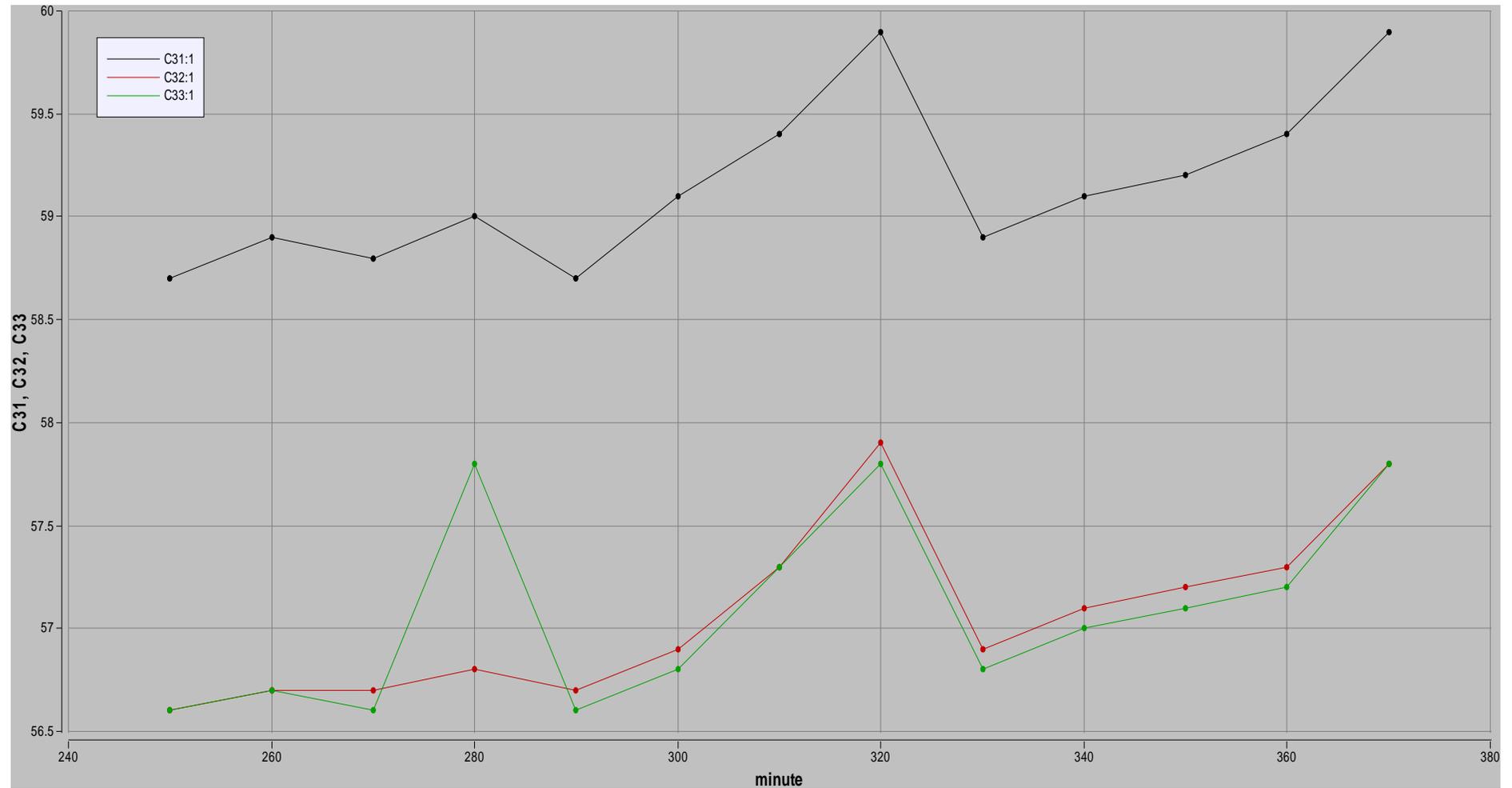


Figure 4.10 :L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 3 au cours de relaxation.

Les figures 4.8 à 4.10 représentent l'évolution de la température de MCP (paraffine) en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve suivant l'épaisseur au cours de relaxation.

Les zones 1 et 2 et 3 :

On voit que les trois courbes ont la même forme, qu'une augmentation de température. Et cela à cause de la continuation du transfert de chaleur de l'eau vers la paraffine et notre système cherche une stabilisation thermique.

⊖ Donc on conclue que pour la zone 1 la distribution de chaleur est de l'extérieur vers l'intérieur et pour la zone deux est de l'intérieur vers l'extérieur et a la zone 3 la couche 1 et 2 ont une fusion en même temps.

⊖ **IV.3.1. Les résultats de la paraffine et l'eau a la phase de relaxation suivant la hauteur :**

- La zone 1 : P11, T2 (figure4.11)
- La zone 2 : P12, T4 (figure4.12)
- La zone 3 : P14, T6 (figure4.13)

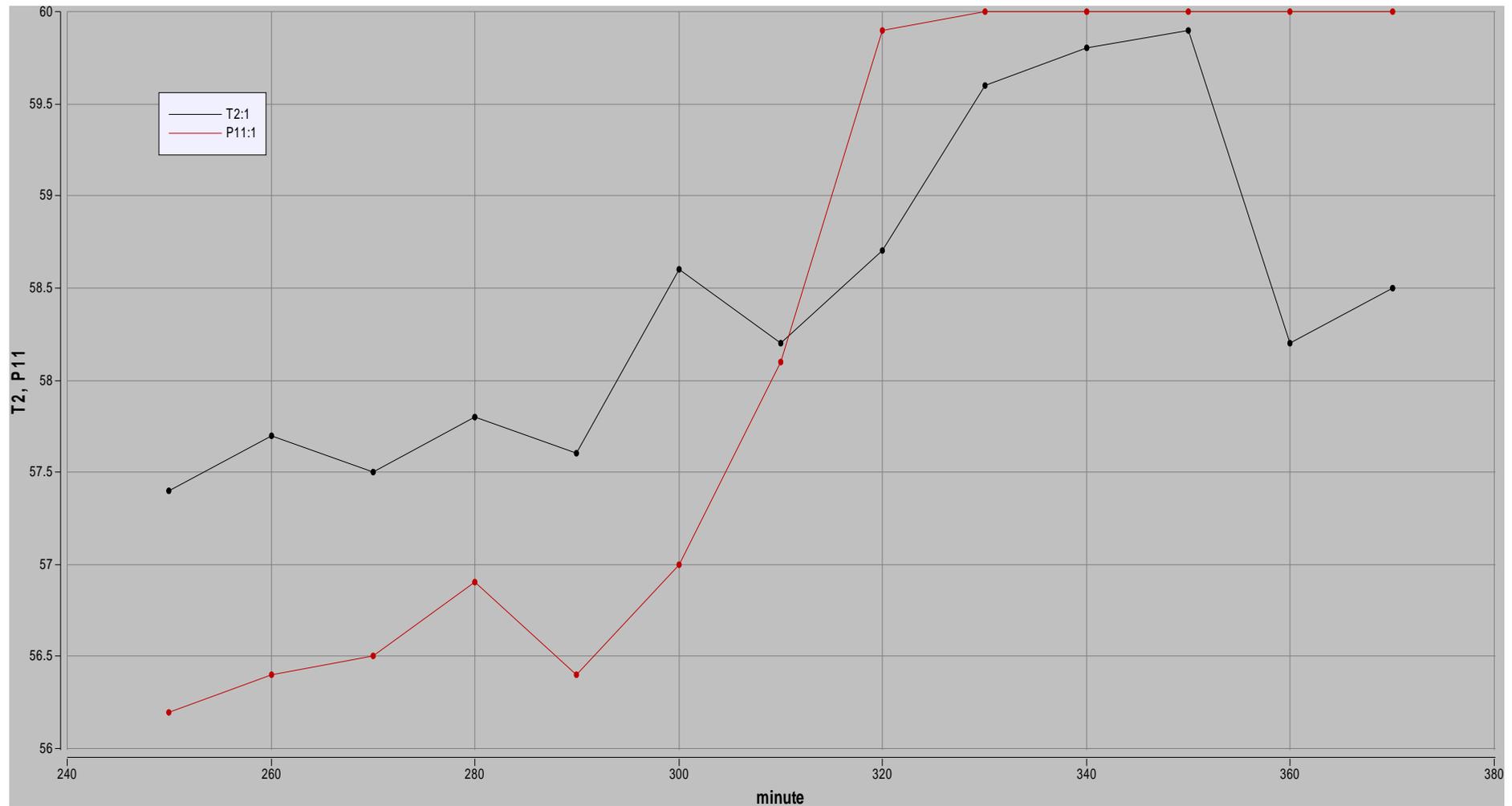


Figure 4.11 : L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 1 au cours de relaxation.

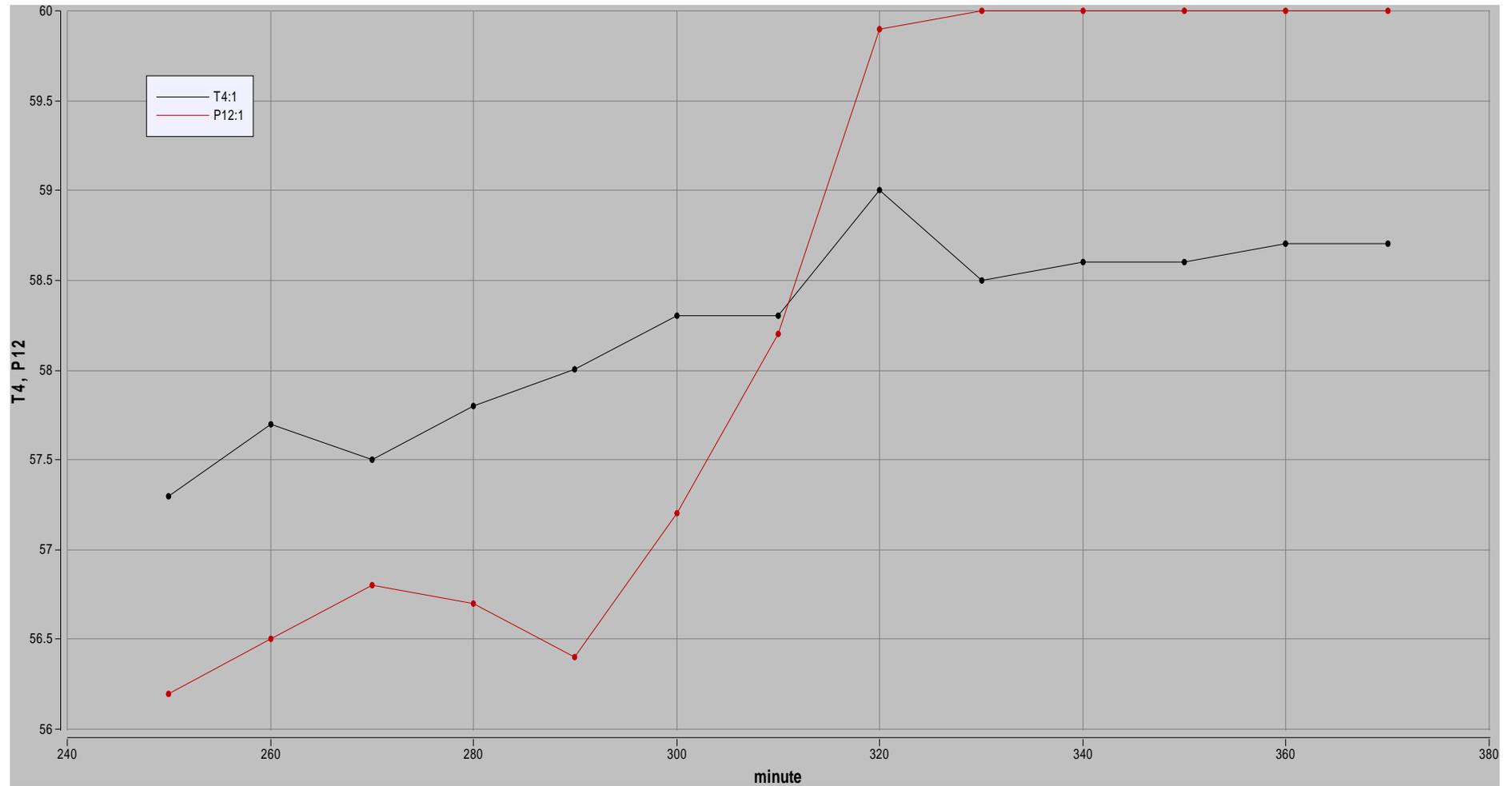


Figure 4.12 :L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 2 au cours de relaxation

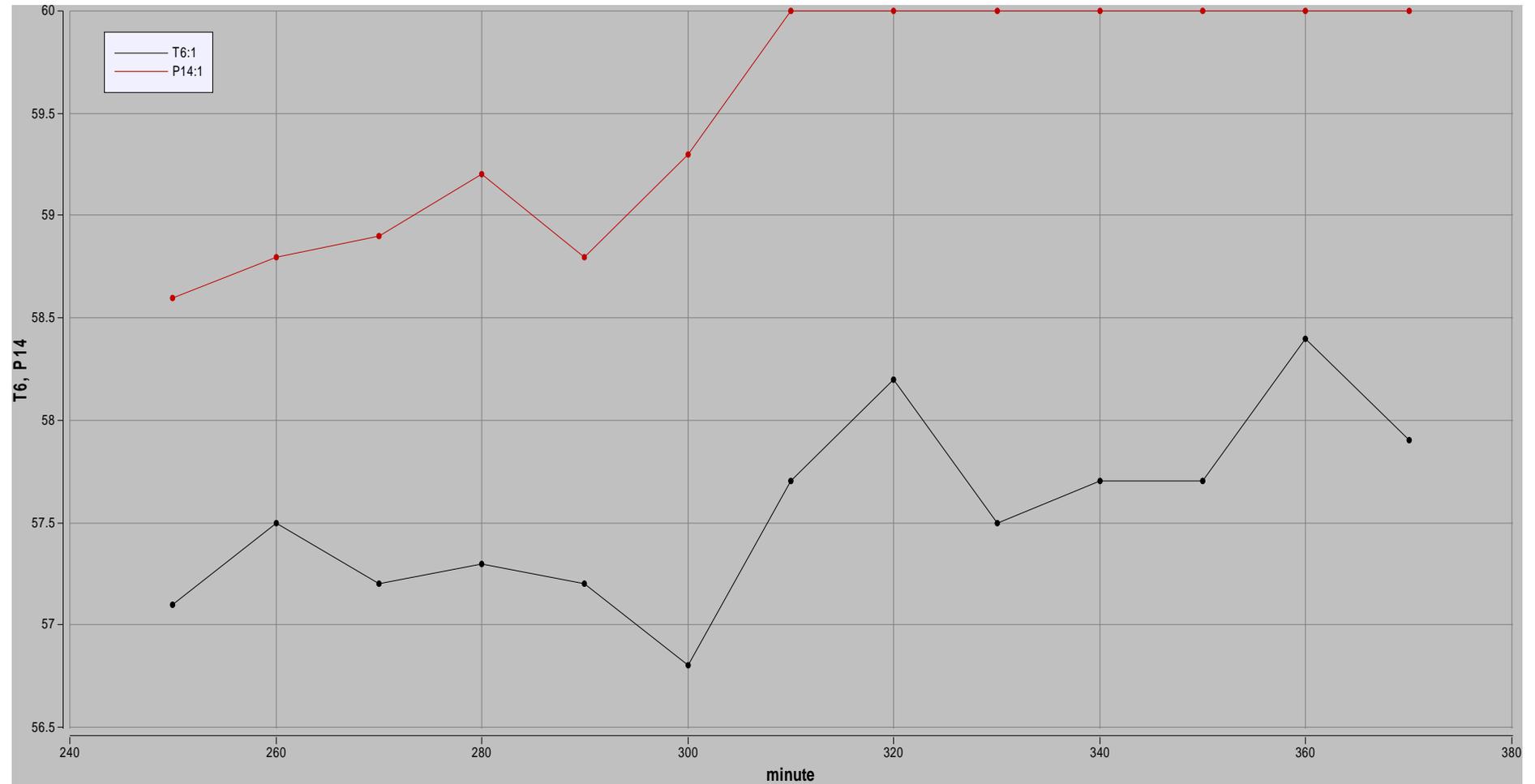


Figure 4.13 : L'évolution de la température de la paraffine et l'eau en fonction de temps suivant la hauteur dans la zone 3 au cours de relaxation

Les figures de 4.11 à 4.13 montrent l'évolution de la température de la paraffine et de l'eau au cours de la relaxation et on voit une augmentation de la température de la paraffine dans les trois zones et après une stabilisation et ça pour va à la phase de déstockage, et dans cette phase le transfert de chaleur sera du paraffine vers l'eau.

IV.4. Conclusion :

Dans le présent chapitre on a présenté les résultats expérimentaux obtenus qui s'expriment le comportement thermique de chaque élément de système de stockage (fluide, paraffine) au cours de l'expérience (stockage, relaxation).

- L'augmentation de débit massique influe sur la capacité d'énergie thermique stockée dans la paraffine (MCP). Donc quand augmente le débit volumique on voit que la capacité d'énergie thermique stockée dans la paraffine (MCP) augmente.
- L'intégration de la paraffine (MCP) dans le système de stockage joue un rôle très important sur l'énergie thermique stockée à partir de la comparaison entre le stockage mixte et le stockage par chaleur sensible dans des expériences qui sont déjà faites.
- A mon avis la paraffine c'est un bon isolant car la conservation de la chaleur de l'eau pendant 6 heures.

Conclusion générale

Cette étude expérimentale a apporté à l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur à l'intérieur de l'élément de stockage (fluide, paraffine) au cours de stockage de la chaleur pendant une durée d'environ de 6 heures et 40 minutes de stockage sans viser une application précise qui aurait nécessité en plus d'une étude des performances du système.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que le processus de transfert de chaleur dans le système de stockage se fait principalement par conduction pure. Et que l'augmentation de la température de fluide caloporteur influe sur le temps de fusion de matériau à changement de phase.

En perspective, on remarque que le temps est insuffisant pour montrer bien l'importance de l'intégration des matériaux à changement de phase dans les systèmes de stockage thermique par chaleur sensible.

Nous souhaitons que dans l'avenir, l'étude sera faite avec une source de chaleur variable (capteur solaire plan) et une quantité de matériau à changement de phase bien déterminée dans le système ainsi avec des différents matériaux à changement de phase et avec un temps suffisant pour le stockage et la relaxation pour tenir compte de l'effet de stockage thermique et l'intégration de matériau à changement de phase dans les systèmes solaires.

ANNEXE A

Les méthodes de détermination des propriétés thermophysiques des MCP :

La stabilité thermique et les propriétés thermophysiques des MCP doivent être déterminées par des méthodes d'analyse thermique. Parmi les méthodes conventionnelles on trouve la thermogravimétrie (TG), l'analyse thermique différentielle (DTA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) qui sont utilisées pour mesurer les propriétés thermophysiques des MCP. Une nouvelle méthode appelée « méthode T-history » est développée par Jinping et al. (1999). [41]

A.1. Thermogravimétrie (TG) :

Thermogravimétrie (TG) est la méthode qui mesure les changements de masse de matière en fonction de la température en vertu d'un programme de température contrôlée. Le dispositif expérimental de thermogravimétrie se compose d'une balance de précision, un four et un système d'enregistrement de la masse et de la température.

Pour la thermogravimétrie Akrouch Amina (2011) [29] a utilisé cette méthode pour déterminer les caractéristiques thermophysiques de leur matériau à changement de phase par la procédure d'utilisé un échantillon d'une masse d'environ 3mg est calciné à 500°C sous air puis activé à 420°C sous vide dynamique de l'ordre de 10^{-3} Pa pendant quatre heures. La montée en température est fixée à 5°C/min. L'échantillon a amorcé une décomposition à 170°C. Avant cette température qui se site bien au-delà du domaine de leur étude et ne constate aucune variation de masse.

Le schéma de principe du montage thermogravimétrie est donné sur la figure suivante :

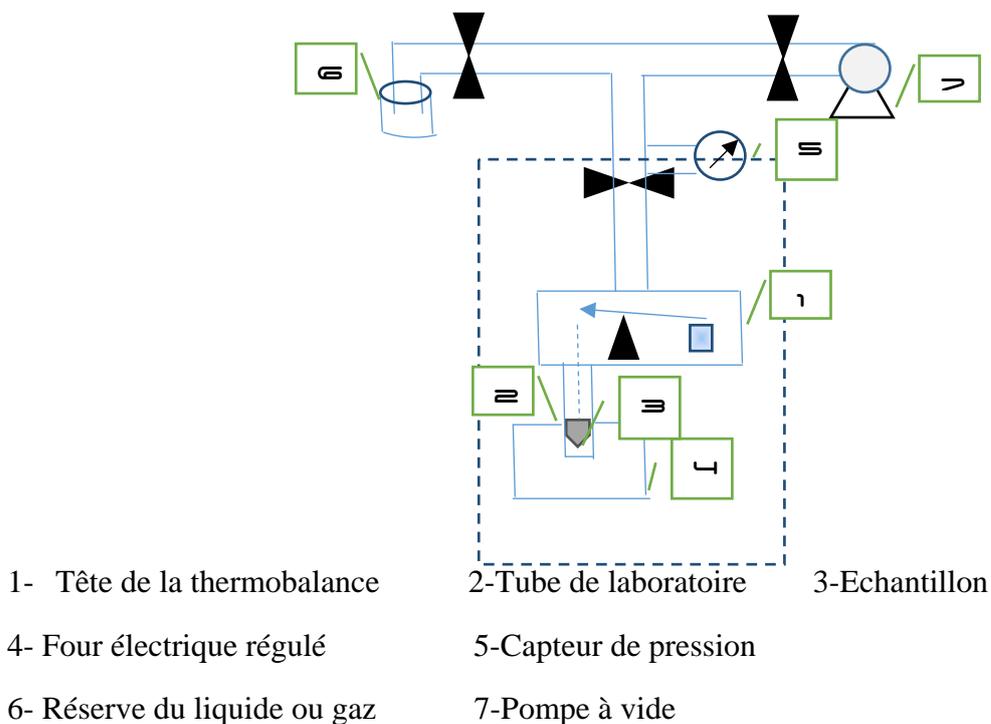


Figure A.1 : Montage thermogravimétrie employé. [42]

A.2. Analyse Thermique Différentielle (DTA) :

Analyse thermique différentielle (DTA) est le dispositif le plus utilisée pour mesurer les températures de fusion et l'ébullition des matériaux organiques et inorganiques. Cette méthode est basée sur la mesure de la différence de température entre l'échantillon et la référence.

C'est une technique dans laquelle la différence de température entre l'échantillon et la référence est mesurée en fonction de temps ou de la température lorsque la température de cet ensemble est programmée dans une atmosphère contrôlée.

A.3. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) :

La calorimétrie différentielle (DSC) mesure la différence de vitesse de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence sous le même programme de température.

Il existe deux types de DSC :

- DSC à flux de chaleur.
- DSC à compensation de puissance.

Dans la DSC à flux thermique l'échantillon et la référence sont soumis à la même source de chaleur. On détermine la différence dans le flux de chaleur entre l'ambient et l'échantillon et entre l'ambient et la référence.

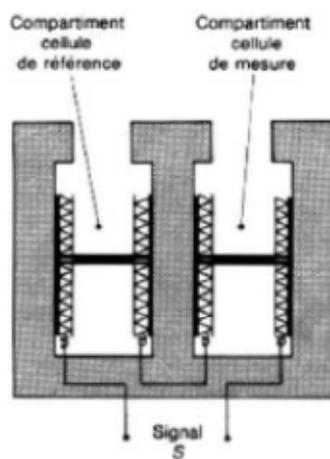


Figure A.2 : Principe de montage DSC a flux de chaleur. [42]

En compensation de puissance les températures de l'échantillon et de la référence sont indépendamment contrôlées par des sources de chaleur identiques et distinctes.

Les courbes DTA ou DSC en fonction de la température de chauffage contiennent des séries de pics orientés négativement (vers de bas) ou positivement (vers le haut) de l'axe de flux de chaleur. Les positions des pics sur l'axe de température et leur nombre permettent d'identification qualitative du matériau analysé. Quant aux aires de pics ; elles permettent les calculs des chaleurs de réactions ; de transition ; de fusion ; ou cristallisation. Parfois ; des informations sur les cinétiques de réactions peuvent être obtenues à partir des courbes DTA/DSC.

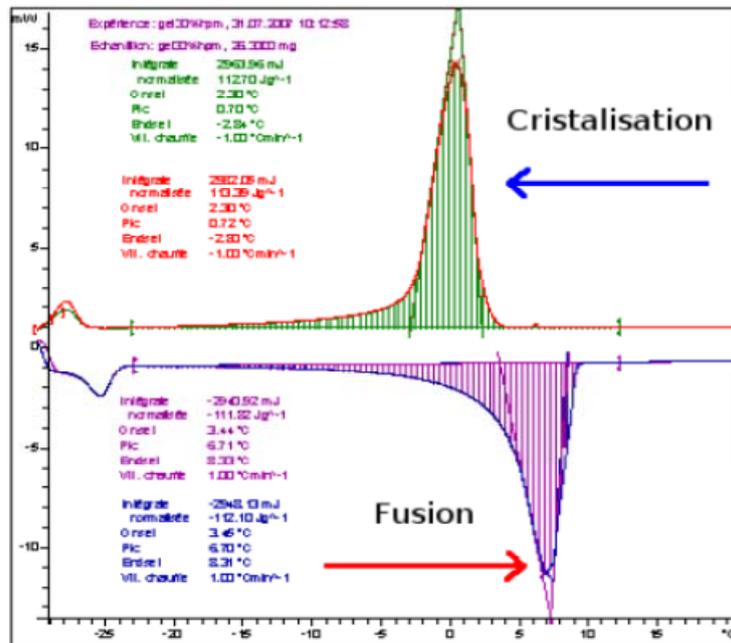


Figure A. 3 : Thermo gramme de la fusion et la cristallisation d'un MCP. [42]

Pour le type de DSC à compensation en puissance Akrouch Amina (2011) [29] a utilisé cette méthode pour déterminer les caractéristiques thermophysiques de leur matériau à changement de phase par la procédure d'utilisé un appareillage qui constitué de deux fours dans la même enceinte calorifique, dans le premier récipient on met une quantité de masse m de leur échantillon « mélange de paraffines », tandis que le récipient de référence reste vide. Ces deux récipient sont soumis aux même conditions ou environnement thermique, le four chauffe les deux récipients à une vitesse de chauffe de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 70°C . On enchaîne par refroidissement avec la même vitesse de chauffe jusqu'à -30°C afin de balayer les fractions de paraffine qui sont en dessous de la température ambiante, et enfin un second chauffage jusqu'à 70°C .

A.4. Méthode « T-history » :

En 1999, Yinping et Yi[41] ont proposé une nouvelle technique expérimentale, appelée la méthode T-history, destinée à la détermination simultanée des propriétés thermophysiques de produits soumis au changement de phase (solidification et/ou fusion). Elle a reçu ce nom car elle est basée sur l'analyse de la courbe transitoire de la température d'un produit lors de son changement de phase. Le dispositif expérimental est composé de deux tubes de mêmes dimensions en verre, un contenant l'échantillon et l'autre rempli d'eau, qui sont initialement mis dans un premier bain d'eau (bain-1) à température homogène $T_{\text{eau}1}$ est supérieure à la température de changement de phase T_f du produit en étude.

Les deux tubes sont laissés dans ce bain jusqu'à ce que la température d'échantillon et celle de l'eau deviennent égale à T_0 ($T_0 = T_{\text{eau}}$). A l'instant $t=0$, les deux tubes sont retirés du premier bain et mis dans un deuxième bain d'eau (bain-2) à température $T_{\text{eau}2}$ légèrement inférieur à la température de changement de phase du produit. Un thermocouple placé dans chaque tube mesure l'évolution temporelle de la température du produit et de l'eau.

ANNEXE B

L'étalonnage des instruments de mesure

B.1. Etalonnage des thermocouples :

Afin de mesurer les valeurs correctes de température, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage préalable des thermocouples (TC) que l'on va utiliser. Dans notre cas, il s'agit des thermocouples de type K.

Pour réaliser cet étalonnage, on dispose de l'appareillage suivant : (Figure B.1)

- Un bain thermo régulé,
- Une résistance branchée sur un multimètre donnant la température standard= sonde étalon,
- La centrale d'acquisition qui sera utilisée pour les futures expériences.

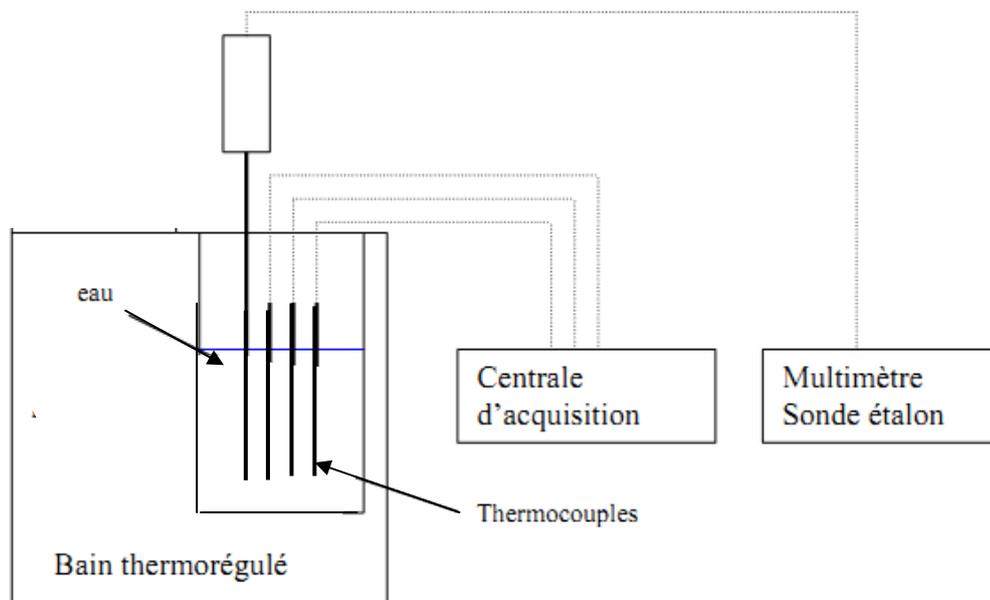
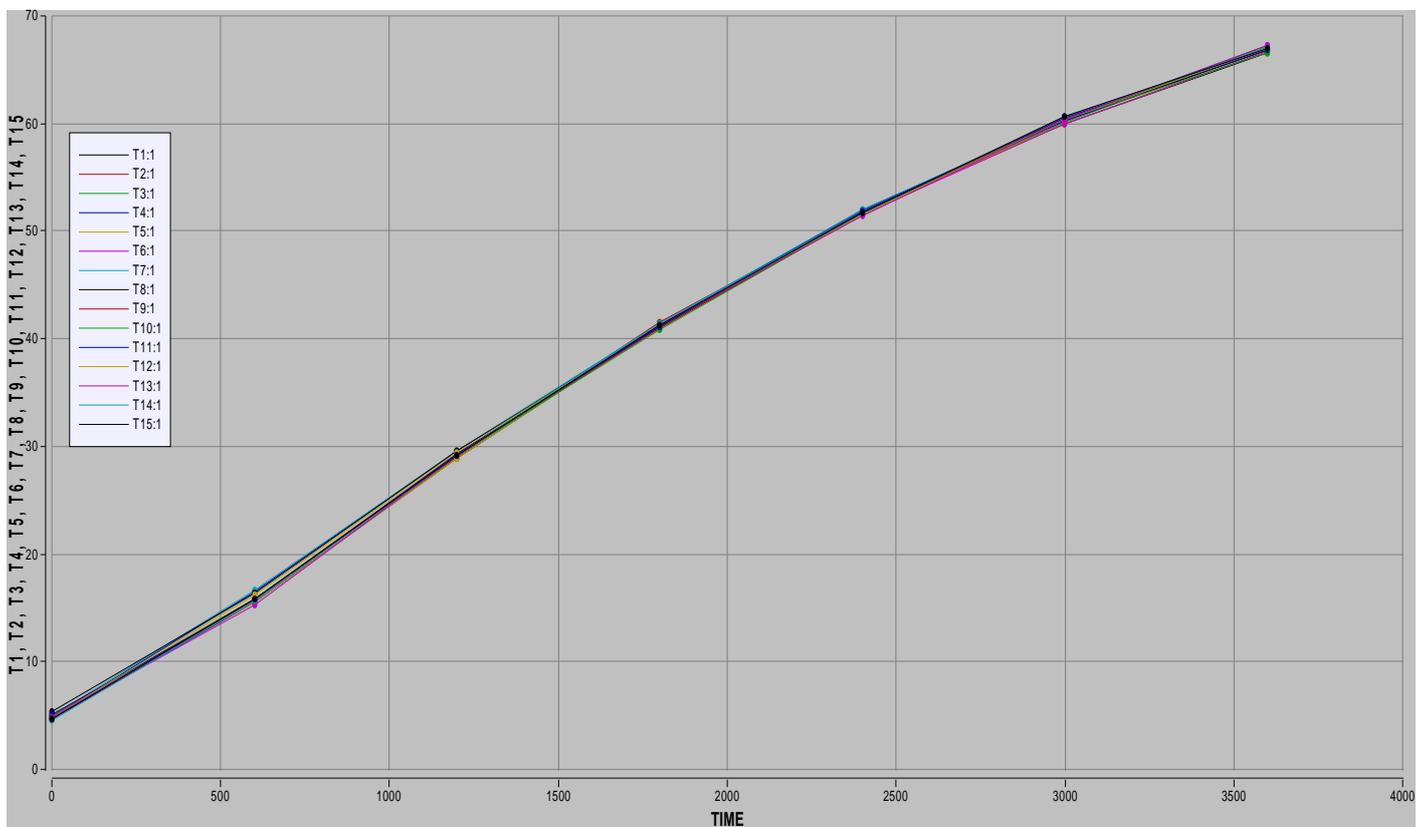


Figure B.1 : Schéma du dispositif d'étalonnage des TC.

Les résultats obtenus partir l'expérience de l'étalonnage des thermocouples sont comme les suivants :

Colonne1	t=0(min)	t=10	t=20	t=30	t=40	t=50	t=60
T1(°c)	4,7	15,5	28,9	41,1	51,8	60	66,8
T2	4,9	15,8	29	41,5	51,7	60,2	67,2
T3	5	15,7	29,2	41,2	51,8	60,1	67,1
T4	4,8	16,5	29,6	41,3	52	60,3	66,8
T5	5,1	15,6	28,9	41,1	51,3	60	66,7
T6	4,8	15,3	29,2	41	51,6	60	66,7
T7	4,9	16,6	29,6	41,4	52	60,4	67,2
T8	5,3	16,3	29,5	41,1	51,7	60,4	66,8
T9	4,9	15,8	29,3	41	51,6	60,5	66,9
T10	4,9	15,8	29,2	40,9	51,6	60,4	66,6
T11	5,1	15,7	29,3	41,1	51,9	60,5	66,9
T12	4,8	16,2	29,4	41,3	51,6	60,4	67
T13	4,8	15,7	29,1	41,3	51,5	60,4	67,2
T14	4,6	15,7	29,2	41,4	51,7	60,6	67
T15	4,7	15,8	29,2	41,3	51,7	60,6	67
T16	4,8	15,4	29	41,5	51,6	60,3	67,2

Les résultats en graphe :



Les températures des thermocouples en fonction du temps

15600	35.9	50.7	44.8	35.2	48.2	62
16200	37	50.8	44.8	35	41.5	61.4
16800	37.9	50.8	44.9	34.9	45.2	60.9
17400	37.9	50.8	44.9	34.9	43.3	60.9
18000	37.9	50.9	45.3	35	42.5	61
18600	37.9	50.9	45.8	34.7	44.4	60.7
19200	37.9	60	45.8	34.9	44.7	60.9
19800	38.1	60.1	45.9	35	40.5	60.8
20400	38.2	60.2	46.1	35.1	38.4	60.8
21000	38.5	60.3	46.2	34.7	42	60.9
21600	38.5	60.3	46.8	34.8	44	60.8
22200	38.7	60.4	46.9	35.1	41.2	60.8
22800	38.8	60.4	47.5	35.1	46.5	61
23400	39	60.5	47.9	35.2	44.2	61
24000	39.1	60.5	48.5	34.9	45	60.9

ANNEXE C

Résultats pour un autre jour au cour de stockage

C.1.pour la paraffine :

Suivant l'épaisseur :

Toutes les températures sont en °C

Le temps est en second avec un pas de 10 minute

temps	c11	c12	c13	c21	c22	c23	c31	c32	c33
0	25.0	26.2	25.5	25	25.5	25.7	23.8	24.7	24.2
600	28.6	27	27.1	28.5	26.5	26.9	28.9	26.9	28
1200	30.8	27.7	28.6	30.8	27	27.6	34.4	29.9	32.4
1800	33.0	28.5	30.4	33	28.5	28.1	37.5	32.2	34.9
2400	34.8	29.1	31.7	34.8	29.3	28.9	39.4	33.6	36.4
3000	37.0	29.7	33.1	37	29.9	29.8	41.1	35.1	37.9
3600	39.0	30.2	34.5	39	30.8	30.3	44	37.1	39.9
4200	40.2	30.6	35.5	40.2	31.7	30.9	46.4	38.7	42.3
4800	41.0	31	36.3	41	32.9	31.3	48.4	39.7	44
5400	41.9	31.3	37.3	41.9	34.2	31.8	49.8	41.1	46.1
6000	42.8	31.8	38.7	42.8	34.9	32.2	49.7	41.4	45.3
6600	43.4	32	39.6	43.4	35.2	32.4	49.9	42.2	44.8
7200	43.6	32.2	41.2	43	35.5	32.5	51.4	43.5	45.6
7800	43.8	32.3	42.5	43.1	35.8	32.6	52.3	45.3	47.2
8400	44.1	32.3	42.5	44.1	36.6	32.6	52.8	46.2	48.4
9000	44.7	32.4	42	44.7	39	32.7	52.8	47	48.7
9600	45.3	32.4	42.2	46.3	42.4	32.7	52.1	47.4	48.7
10200	46	32.7	42.4	47	45.1	32.9	52.1	47.8	48.7
10800	46.2	33	42.7	48.1	46.2	33	52.1	47.9	48.7
11400	46.4	32.9	42.9	48.5	47.1	33	52.2	48	48.7
12000	46.9	33	43.3	49.1	47.8	33.1	52.3	48.1	48.8
12600	47.5	33	43.4	49.1	47.9	33.1	52.1	48.1	48.8
13200	48.1	33.1	43.7	49.1	48.1	32.2	52.3	48.5	48.9
13800	49.0	33.2	43.9	49.4	48	33.4	52.3	48.6	48.9
14400	49.5	33.4	43.9	49.3	48.1	33.2	52.1	48.6	48.9
15000	49.9	33.5	44.2	49.5	48.2	33.5	52.2	48.6	49
15600	50.0	33.6	44.4	49.6	48.2	33.5	52.3	48.7	49
16200	50.0	33.6	44.5	49.7	48.3	33.5	52.2	48.7	49.1
16800	50.0	33.6	44.5	49.8	48.3	33.5	52.1	49	49.3
17400	50.2	33.7	44.6	49.9	48.9	33.8	52.3	49	49.4
18000	50.5	34	44.7	50.1	48.9	33.9	52.4	49.1	49.5
18600	50.9	34.1	44.8	50.2	49.1	34.3	52.4	49.2	49.6
19200	50.9	34.2	44.9	50.4	49.2	34.7	52.3	49.2	49.6

19800	51.2	34.2	45.0	50.4	49.2	34.9	52.4	49.1	49.6
20400	51.3	34.7	45.2	50.4	49.2	35.3	52.5	49.2	49.6
21000	51.3	34.7	45.4	50.4	49.3	35.3	52.5	49.3	49.5
21600	51.3	34.7	45.5	50.5	49.5	35.8	52.4	49.3	49.7
22200	51.3	34.8	45.5	50.6	49.6	36.4	52.5	49.5	49.9
22800	51.4	34.9	45.5	50.8	49.8	36.7	52.5	49.5	49.9
23400	51.4	34.9	45.5	50.9	49.9	37	52.6	49.6	49.9
24000	51.5	35	45.5	51	50	37	52.5	49.9	49.9

C.2. pour la paraffine avec l'eau suivant la hauteur :

Toutes les températures sont en °C

Le temps est en second avec un pas de 10 minute

P est pour la température de la paraffine

E est pour la température de l'eau

temps	p11	p12	p14	E2	E4	E6
0	26.1	25.1	24.3	24.2	23.3	21.9
600	26.9	26	29.4	30.2	30.7	30.4
1200	27.5	27.1	33.2	32.8	35.3	36.6
1800	28.2	27.9	34.4	33.2	36.9	40.8
2400	28.7	28.7	35.5	33.4	39	44
3000	29.1	29	36.5	33.9	41.4	46.8
3600	29.6	29	37.3	33.9	42.4	49.5
4200	29.7	29.7	38	34.1	43.5	51.8
4800	30.1	29.8	38	34.4	42.6	53.9
5400	30.5	30.5	38.8	35	41.6	55.7
6000	30.7	32.3	39.8	35.1	46.6	57.7
6600	30.9	33.4	39.8	35.3	41.5	58.9
7200	31.1	33.8	40.7	35.2	41.3	59.9
7800	31.4	33.9	41.6	35.3	41.6	60.8
8400	31.4	33.9	42.6	34.9	47.7	61.3
9000	31.5	33.9	43	34.9	45.4	61.7
9600	31.5	34.5	43.3	34.6	46.9	62
10200	32.2	44.4	43.5	35	37.5	62.2
10800	33	47.5	43.8	34.9	41.9	62.4
11400	33.6	49	43.9	34.9	40.1	62.8
12000	33.7	49.6	44.4	35.3	42.5	63.4
12600	33.7	50	44.6	35.2	34.7	63.7
13200	33.9	50.3	44.8	35	48.2	63.8
13800	34.2	50.3	44.9	35.2	45.8	64
14400	34.3	50.5	44.8	34.8	43.6	63.9
15000	34.9	50.6	44.9	35.4	48.4	62.7

Résumé :

Le stockage de l'énergie thermique, et particulièrement par chaleur latente, représente l'un des moyens les plus prometteurs pour l'économie d'énergie. Ces systèmes de stockage ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transferts thermiques qui se déroulent au niveau de l'interface solide-liquide.

Donc le but de ce travail est consacré à l'analyse expérimentale de transfert de chaleur dans un système de stockage de chaleur mixte (chaleur latente, chaleur sensible). Par la réalisation d'un élément de stockage thermique d'une géométrie cylindrique avec une intégration de MCP (paraffine 56/58°C) entre un cylindre de 40cm de hauteur et de 34cm de diamètre et une cuve de stockage cylindrique avec échangeur de chaleur type serpent.

Mots clés : Stockage d'énergie thermique. Chaleur sensible, chaleur latente, les matériaux à changement de phase.

المخلص:

تخزين الطاقة الحرارية، خاصة عن طريق الحرارة الممتدة، تمثل أحد السبل الأكثر اعتماداً في اقتصاد الطاقة. هذه الأنظمة غير شائعة وهذا راجع إلى تصاميمها المعقدة بتعدد ظواهر انتقال الحرارة التي تحدث على مستوى الطبقة البينية بين السائل و الصلب.

الهدف من هذا العمل هو الدراسة التجريبية لانتقال الحرارة داخل نظام تخزين الحرارة مختلط (حرارة ممتدة، حرارة حساسة) عن طريق إنشاء وحدة تخزين حرارية أسطوانية الشكل و هذا بإضافة مادة قابلة للتمدد (شمع 58/56 م) بين أسطوانة ذات 40سم علو و 34سم قطر و وحدة تخزين أسطوانية الشكل مضاف إليها ناقل حرارة ملولب الشكل.

كلمات البحث: تخزين الطاقة الحرارية، الحرارة الحساسة، الحرارة الممتدة، المواد القابلة للتمدد.

Abstract:

The storage of heat energy, especially latent heat, is one of the most promising for energy storage. These storage systems are not widely used because their design is hampered by the complexity of the phenomena of heat transfer accruing at the solid-liquid interface.

The objective of this work is devoted to experimental analysis of heat transfer in a system of mixer heat storage (heat latent, heat sensible). With a fabrication of an element of heat storage cylinder geometer with including a cylinder of PCM (wax 56/58°C) of 34cm diameter and 40cm of hauteur in element of storage cylinder geometer with a heat exchanger.

KEY WORDS: Storage of Heat Energy, Latent Heat, Sensible Heat, Materials Change Phases.