

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**



**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté de génie de la construction  
Département de génie mécanique**

*En vue de l'obtention du diplôme de Master II professionnel en Génie Mécanique,  
énergétique*

*Option : Froid chauffage et climatisation*



**Thème**

*Etude et réalisation d'un système de refroidissement  
d'un microprocesseur par l'effet conjugué du Peltier  
et un Matériaux à Changement de Phase*

**Proposé et dirigé par :**

**Directeur : M<sup>r</sup> Makhlouf Said**

**Co-directeur : M<sup>r</sup> Laghrouche Mourad**

**Réalisé par :**

**M<sup>lle</sup> Ait Zai Fatma Zohra**

**Promotion 2017/2018**



## Remerciements

*En premier lieu, j'tiens à remercier mon DIEU, notre créateur de m'avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Monsieur MAKHLOUF SAID directeur de mémoire et professeur à l'université de tizi ousou, je tiens à vous exprimer ma profonde reconnaissance pour la bienveillance et la confiance dont vous avez fait preuve à mon égard en me proposant ce thème. Vos multiples conseils, toujours très justes, m'ont permis d'apprendre, d'évoluer et de me surpasser tout au long de mes études.*

*Monsieur LAGHROUCHE MOURAD mon co-directeur, professeur à l'université de tizi ousou et vice doyen de la faculté de génie électrique et informatique, vous trouvez ici toute ma reconnaissance pour votre grande disponibilité. Je ne vous remercierais jamais assez pour ces nombreuses discussions, votre soutien sans faille et votre confiance.*

*Monsieur SAADAOUI, je vous adresse toute ma gratitude et mes remerciements d'avoir accepté mon travail et également pour vos précieux conseils.*

*Je suis extrêmement reconnaissante aux demoiselles DJEFEL DIHIA et BOUSSABA LIZA, doctorantes à l'université de tizi Ouzou, pour toutes l'aide qu'elles m'ont apportée et pour leurs perpétuelle bonne humeur.*

*Mes sincères remerciements aussi pour tous mes enseignants du Département de Génie Mécanique, en particulier M<sup>r</sup> R. NEBBALI / M<sup>r</sup> BOUTOUJ / M<sup>r</sup> M. HAMZAOUI si je l'ai cité c'est que l'un des enseignants qui ont marqué mon parcours universitaire y compris mon promoteur MAKHLOUF SAID.*

*Je remercie vivement les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Je tiens à remercier particulièrement ma copine SONIA AIT SAADA doctorante à l'université de tizi Ouzou, plus qu'une collègue, une amie ! Tu m'as apporté beaucoup durant ce travail, autant sur les points techniques, scientifiques. J'ai apprécié les pauses café partagées avec toi ainsi que les discussions qui les ont accompagnées.*

*A ces remerciements, j'ai le grand plaisir d'associer toute ma famille, pour leur compréhension, leur dévouement et leurs encouragements.*

*Enfin, je remercie, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin.*

# Dédicace

*On ne se construit pas seul mais au travers de nos différentes expériences et les personnes chères qui nous ont permis d'en arriver là à qui je dédie ce travail :*

*A la mémoire de mon très cher cousin Amer ezzahi « Ait Zai Amer » ;*

*A ma chère et tendre mère*

*Qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.*

*A mon cher père*

*A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi*

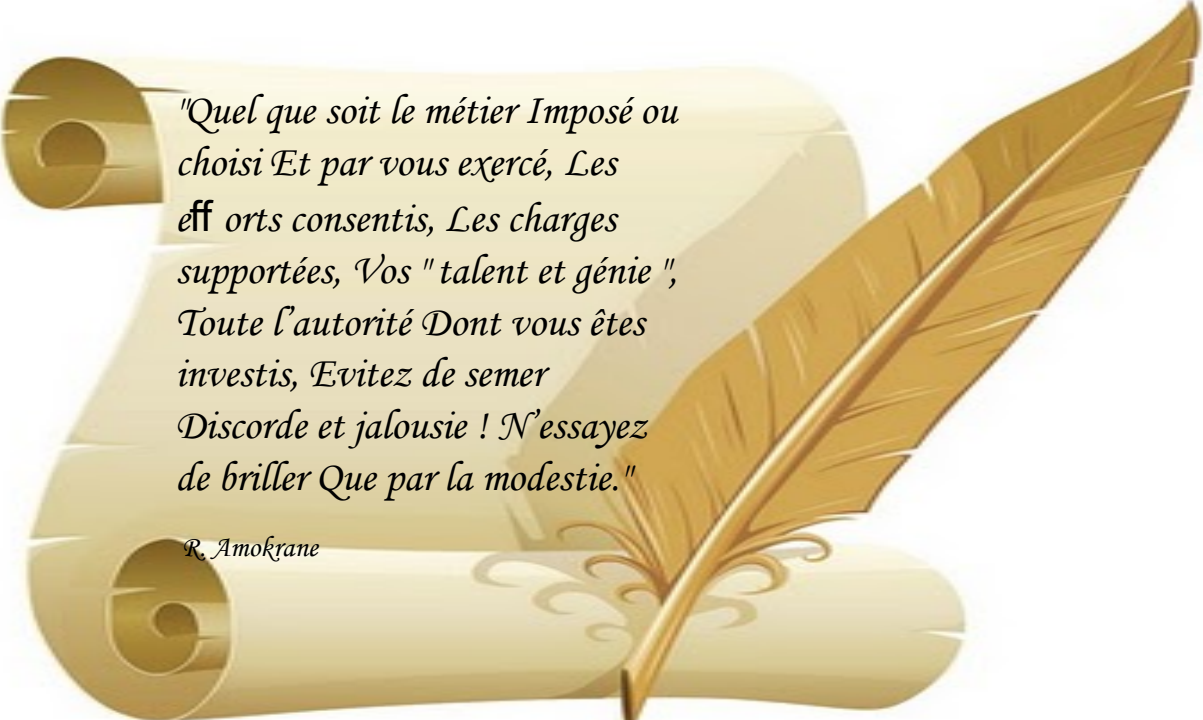
*Ames frères et sœurs*

*Mes alliés je vous adore*

*A ma copine Sonia Ait Saada*

*A tous mes ami(es)*

*A toute la famille AIT ZAI*



*"Quel que soit le métier Imposé ou  
choisi Et par vous exercé, Les  
efforts consentis, Les charges  
supportées, Vos "talent et génie",  
Toute l'autorité Dont vous êtes  
investis, Evitez de semer  
Discorde et jalousie ! N'essayez  
de briller Que par la modestie."*

*R. Amokrane*

# Nomenclature

## Caractères latins

Caractères	Signification	Unités
<b>m</b>	Masse	Kg
<b>T</b>	Température	(°C)
<b>C<sub>p</sub></b>	Chaleur massique	J/ (kg.K)
<b>C<sub>ps</sub></b>	Chaleur spécifique du corps a l'état solide	J/ (kg.K)
<b>C<sub>pl</sub></b>	Chaleur spécifique du corps a l'état liquide	J/ (kg.K)
<b>L<sub>f</sub></b>	Chaleur latente de fusion (f pour fusion)	J/kg
<b>L<sub>v</sub></b>	Chaleur latente de vaporisation (v pour vaporisation)	J/kg
<b>ΔH</b>	Variation d'enthalpie	J/kg
<b>H<sub>i</sub></b>	Enthalpie initial	J/kg
<b>H<sub>f</sub></b>	Enthalpie final	J/kg
<b>ΔL<sub>f</sub></b>	Enthalpie spécifique de fusion	J/kg
<b>T<sub>i</sub></b>	Température initial	(°C)
<b>T<sub>f</sub></b>	Température final	(°C)
<b>E<sub>sensible</sub></b>	La quantité d'énergie stockée à l'état sensible	J/kg
<b>E<sub>latent</sub></b>	La quantité d'énergie stockée à l'état latent	J/kg
<b>w</b>	Puissance électrique	(w)
<b>Q<sub>h</sub></b>	Puissance thermique absorbée du coté chaud	(w)
<b>λ</b>	Conductance thermique	w/m.k
<b>ΔT</b>	Différence de température	(°C)

## Abréviations et indices

Symboles	Signification
Pa	Paraffine
Gr	Graphite
MCP	Matériaux à changement de phase
TEC	Module thermoélectrique
CEP	Cellule a effet Peltier
UAL	Unité arithmétique logique
PC	Program Counter
SP	Stack Pointer
CPU	Central Process Unit ou microprocesseur
CPI	Cycle par instruction
MIPS	Millions d'instruction par seconde

## Liste des figures

<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure. I.1</b>	Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck	5
<b>Figure. 1.2</b>	Dispositif expérimental d'écrit par Peltier	6
<b>Figure. I.3</b>	Effet Thomson	8
<b>Figure. I.4</b>	Conversion d'énergie par effet thermoélectrique (a)refroidissement et (b) génération [5]	9
<b>Figure I.5</b>	Cellules à effet Peltier	13
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Microprocesseur	15
<b>Figure II.2</b>	Refroidissement par azote liquide	19
<b>Figure II.3</b>	Radiateur	20
<b>Figure II.4</b>	Refroidissement par eau	21
<b>Figure II.5</b>	Refroidissement par air	22
<b>Figure II.6</b>	Module Peltier	23
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	25
<b>Figure III.2</b>	Classification des MCP	31
<b>Figure III.3</b>	Surfusion lors du refroidissement d'un MCP	38
<b>Figure III.4</b>	Matériau composite	41
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Acide laurique	43
<b>Figure IV.2</b>	Graphite en poudre.	43
<b>Figure IV.3</b>	Fibre de cellulose	43

## Liste des figures

<b>Figure IV.4</b>	Graphite tamisé	45
<b>Figure IV.5</b>	Moulin à café manuel	46
<b>Figure IV.6</b>	Carton en poudre	47
<b>Figure IV.7</b>	Pesée des trois matériaux	48
<b>Figure IV.8</b>	Fabrication des pastilles	48
<b>Figure IV.9</b>	L'immersion de la pastille dans de l'eau distillé	49
<b>Figure IV.10</b>	Papier en aluminium	50
<b>Figure IV.11</b>	Plastifieuse	50
<b>Figure IV.12</b>	Pastilles plastifiées	51
<b>Figure IV.13</b>	Alimentation électrique	52
<b>Figure IV.14</b>	Capteur de température	53
<b>Figure IV.15</b>	Polyuréthane	54
<b>Figure IV.16</b>	Pate thermique	54
<b>Figure IV.17</b>	Moule de verre	55
<b>Figure IV.18</b>	plaque (300× 300× 9mm <sup>3</sup> )	55
<b>Figure IV.19</b>	CT mètre	56
<b>Figure IV.20</b>	Tests Peltier	58
<b>Figure IV.21</b>	Calcul de température sur le Peltier sans refroidissement	59
<b>Figure IV.22</b>	Test 2 62% al, 29% gr, 9% fc	59
<b>Chapitre V</b>		
<b>Figure V1</b>	Schéma test 1 sans refroidissement	61
<b>Figure V2</b>	L'évolution des température test 1 sans refroidissement	61
<b>Figure V3</b>	Scheme test 2	62
<b>Figure V4</b>	L'évolution des température test 2	63
<b>Figure V5</b>	Scheme test3	64
<b>Figure V6</b>	L'évolution des température test 3	65
<b>Figure V7</b>	Comparaison entre les températures chaude du Peltier et les deux pastilles du composite	66
<b>Figure V8</b>	Comparaison des températures froide du Peltier et deux pastilles du composite	66

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Types d'éléments Peltier	8
<b>Tableau I.2</b>	Types éléments Peltier	13
<b>Tableau III.1</b>	Caractéristiques physiques du MCP	27
<b>Tableau.III.3</b>	Différents hydrates salins	35
<b>Tableau III.4</b>	Exemple de matériaux composites, pris en sens large	40
<b>Tableau IV.1</b>	Propriétés chimiques et physiques de l'acide laurique	44
<b>Tableau IV.2</b>	Propriétés chimiques et physiques du graphite	44
<b>Tableau IV.3</b>	Propriétés de fibre de cellulose	45

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

## **Chapitre I : la thermoélectricité**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. La Thermoélectricité.....	4
I.3.1. Les différents effets de la thermoélectricité.....	4
I.3.1.1 Effet Seebeck.....	4
I.3.1.2 Effet Peltier.....	6
I.3.1.2.1 Modules Peltier.....	7
1-Applications de ces régulateurs à effet Peltier.....	7
2-Avantage de l'élément Peltier.....	7
3- Les différents types de modules existants.....	7
I.3.1.3. Effet Thomson.....	8
I.4. Génération et refroidissement thermoélectrique.....	8
I.4. Comparaison des technologies de refroidissement.....	9
1. Forces des systèmes Peltier En général.....	9
2. Faiblesses des systèmes Peltier Avec les modules Peltier.....	10
3. L'efficacité énergétique.....	10
I.5. Formules physique effet thermoélectriques.....	10
I.6. Différents Modules de refroidissement thermoélectriques régulier.....	12
I.7. Cellules à effet Peltier.....	13
I.7.1. Présentation.....	13
Conclusion.....	14

## **Chapitre II : généralité sur les microprocesseurs**

II.1. Introduction.....	15
II.2. Définition générale.....	15
II.3. Structure d'un microprocesseur.....	15
II.4. Fonctionnement.....	16
II.5. Les modèles microprocesseur.....	17

II.6. Méthodes de refroidissement pour ordinateur .....	17
II.7. Dissipation thermique dans des composants électroniques .....	18
II.7.1. Système de refroidissement par azote liquide .....	18
II.7.1.1. Principe de fonctionnement .....	18
II.7.2. Refroidissement par radiateur .....	19
II.7.2.1 principe de fonctionnement .....	19
II.7.3. Refroidissement par eau : le water cooking.....	20
II.7.3.1. Principe de fonctionnement .....	20
II.7.4. Refroidissement par air : ventilateur .....	21
II.7.4.1. Principe de fonctionnement .....	21
II.7.5. Refroidissement par le module Peltier.....	22
II.7.5.1. Principe de fonctionnement .....	22
Conclusion.....	23

### **Chapitre III : Généralités sur les matériaux à changement de phase**

III.1. Introduction .....	24
III.2. Principe du changement de phase .....	24
III.2.1. Transfert thermique par chaleur sensible (CTS).....	24
III.2.2. Transfert thermique par chaleur latente.....	25
III.3. Intérêt du changement de phase .....	29
III.4. Matériaux à changement de phase.....	29
III.4.1. Les caractéristiques idéales d'un MCP .....	29
a) Propriétés thermodynamiques et thermiques .....	29
b) Les propriétés cinétiques .....	30
c) Les propriétés chimiques.....	30
d) Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement.....	30
III.5. Classification des MCPs.....	30
III.5.1. Les composés organiques .....	31
III.5.1.1 Paraffines.....	31

III.5.1.2. Non paraffiniques .....	32
III.5.1.3. Alcools de sucre .....	33
III.5.2. Les composés inorganiques.....	33
III.5.2.1. Hydrates de sels.....	34
III.5.2.2. Les sels .....	35
III.5.2.3. Métaux.....	36
III.5.3. Eutectiques .....	36
III.6. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage .....	37
III.6.1. La surfusion.....	37
III.6.2. Lasurchauffe.....	38
III.6.3. La dilatation.....	38
III.7. Les matériaux composites.....	38
III.7.1. Généralités sur les matériaux composites .....	39
III.7.1.2. Les propriétés des matériaux composite résultent .....	40
Conclusion.....	41
<b>Chapitre IV : Matériels et Méthodes</b>	
IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Elaboration du MCP.....	42
IV.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite .....	42
a) La paraffine .....	43
b) Le graphite .....	
c) Les fibres de cellulose .....	45
IV.2.1.1. Méthode suivie .....	46
IV.2.2. Préparation des composites de dimension (40 X40 X 11 $mm^3$ .....	47
IV.3. Test d'absorption d'eau (hygroscopique.....	49
IV.3.1. Plastification des pastilles .....	50

IV.4. L'expérience.....	51
IV.4.1. Les tests.....	57
Conclusion.....	60
<b>Chapitre V : Discussion des résultats</b>	
Conclusion générale .....	68

# Chapitre I

# **La thermoélectricité**

## I.1.Introduction

Le principe de la thermoélectricité est simple : un matériau transforme directement de la chaleur en électricité, ou déplace des calories par l'application d'un courant électrique. Ces applications concernent donc la réfrigération et la génération d'électricité grâce aux sources de chaleur perdue. Ce système offre de multiples avantages : absence de système mécanique et de désagréments sonores, grande fiabilité, durée de vie quasi illimitée, de surcroît, il permet de lutter contre les différentes pollutions créées par la combustion ou l'utilisation en réfrigération de gaz frigorigère. Ces applications peuvent être utiles dans de nombreux domaines comme la réfrigération des circuits électroniques ou la production d'électricité grâce à la chaleur dégagée par les moteurs thermiques.

## I.2.Historique

La thermoélectricité a connu deux principales périodes de développement. Une première de 1821 à 1851 et une seconde de la fin des années 1930 au début des années 1960.

- **1821** : Le physicien allemand Thomas Johann Seebeck découvre le premier effet thermoélectrique. Il remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de natures différentes liées à leurs extrémités par des jonctions et qu'une des jonctions est maintenue à une température plus élevée que l'autre. Cet effet fut interprété comme une apparition d'un champ magnétique et servit même à expliquer le champ magnétique terrestre. Ce n'est que plus tard que l'on démontra que ce phénomène s'expliquait par l'apparition d'un courant électrique entre les jonctions froide et chaude
- **1834** : Le physicien Français Jean Peltier découvre le second effet thermoélectrique, qui est en fait le phénomène inverse de l'effet Seebeck soit : si l'on applique un courant à un solide métallique on observe un déplacement de chaleur d'une face à l'autre. Là aussi les explications que fournit Peltier se trouvent incorrectes.
- **1838** : Heinrich Lenz explique les découvertes de Peltier. Si l'on fait passer un courant électrique dans un circuit conçu avec deux matériaux différents et dont les raccords sont à la même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre. Cette démonstration fut effectuée à l'aide du couple thermoélectrique antimoine/bismuth. La jonction de ces deux fils métalliques est placée dans une goutte d'eau : quand le courant passe dans un sens la goutte d'eau gèle, quand le courant passe dans l'autre sens, la glace fond.

- **1851** : William Thomson (lord Kelvin) relie les effets Seebeck et Peltier. Un matériau, soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique, échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Inversement un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.
- **1865** : Robert Bunsen et Joseph Stefan montrent que les semi-conducteurs donnent également naissance à l'effet Seebeck avec un rendement très supérieurs à ceux obtenus avec les métaux.
- **1909** : Le scientifique Allemand Edmund Altenkirch effectue pour la première fois le calcul satisfaisant des propriétés des circuits thermoélectriques.
- **1950** : Abraham Ioffe découvre que les semi-conducteurs dopés ont un effet thermoélectrique plus élevé que les autres matériaux.
- **1990** : Regain d'intérêt pour la thermoélectricité dû aux préoccupations environnementales. [1]

## I.3. La Thermoélectricité

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique caractéristique de certains matériaux contribuant à la conversion de l'énergie. Un matériau thermoélectrique permet de transformer directement de la chaleur en électricité (génération d'électricité) ou de déplacer des calories par l'application d'un courant électrique (application de réfrigération); Ainsi l'énergie thermique peut être transformée en énergie électrique et réciproquement. [2]

### I.3.1. Les différents effets de la thermoélectricité

- Effet Seebeck
- Effet Peltier
- Effet Thomson

### I.3.1.1 Effet Seebeck

#### Principe

Soit deux matériaux a et b de nature différente reliés entre eux par deux jonctions de température  $T$ . Une des jonctions est portée à la température  $T_1$  telle que  $T_1 > T$ . Une différence de tension apparaît alors entre les jonctions froide et chaude.

Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge,  $e^-$  (électrons) ou  $e^+$  (trou) du côté chaud vers le côté froid. Pour un circuit ouvert les  $e^-$  (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les  $e^+$  (trou) se massent dans la partie froide du matériau de type p. La partie froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une différence de charges qui a pour effet de créer une différence de potentiel entre les deux extrémités froides de ces matériaux. [3]

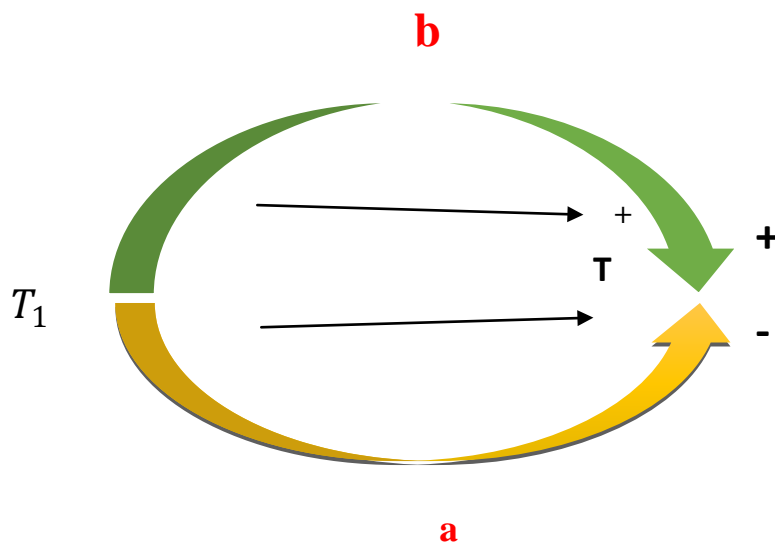


Figure I.1 : Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck

## Applications

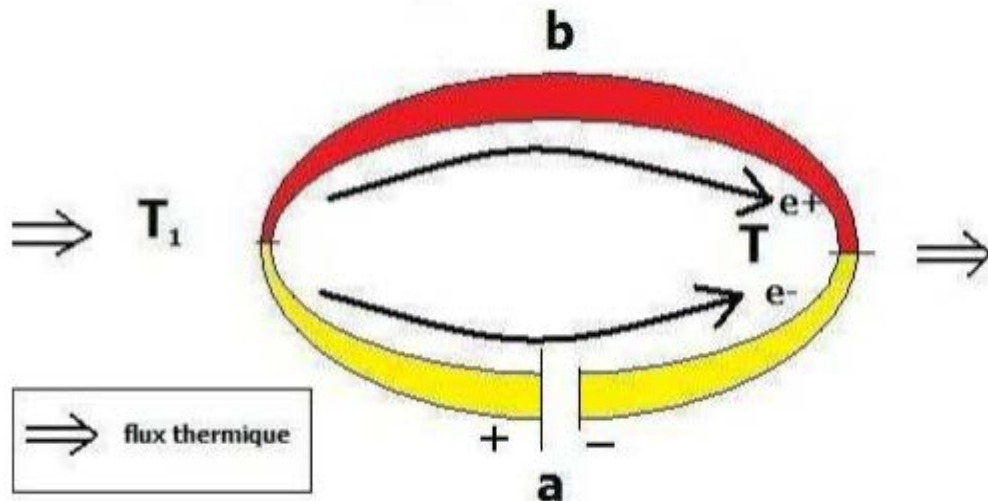
L'application principale de cet effet est la mesure de température. En effet pour deux matériaux donnés la différence de tension ne dépend que de la différence de température. On peut donc déduire l'écart de température entre les deux jonctions. La deuxième application, et non des moins intéressantes, est celle du thermo générateur, soit un générateur fonctionnant grâce à une différence de température. De telles applications sont utilisées en Russie pour alimenter, grâce à une lampe à pétrole, un poste de radio dans les régions reculées n'ayant pas accès à l'électricité

### I.3.1.2 Effet Peltier

#### Principe

Si l'on fait passer un courant dans un circuit avec deux conducteurs différents ayant leur jonction à une même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre.

Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. La jonction qui absorbe de la chaleur est alors celle dans laquelle le courant passe du matériau de type n (b) au matériau de type p (a) soit la jonction à la température. Inversement celle qui la restitue est la jonction dans laquelle le courant passe du matériau de type p (a) au matériau de type n (b) soit la jonction à la température T. On a donc  $T > T_1$ . [3]



**Figure I.2** : Dispositif expérimental d'écrit par Peltier

## Applications

Les applications les plus intéressantes de cet effet se trouvent dans le domaine de la réfrigération miniaturée de faible puissance et en particulier dans l'aéronautique et l'électronique. Les réfrigérateurs thermoélectriques présentent des caractéristiques pour le moins très intéressantes : longue durée de vie, précisions, fiabilité, silence. Ils ont cependant un faible rendement. Toutefois des modèles de glacières portables fonctionnant sur allume-cigares sont commercialisés par certaine entreprise. [3]

### I.3.1.2.1 Modules Peltier

Les éléments Peltier, qui sont également appelés modules thermoélectriques ou **TEC**, constituent une sorte de pompe à chaleur, qui est entraînée électriquement. Ceux-ci transmettent l'énergie sous forme de chaleur d'un côté du module à l'autre où elle est évacuée. Le module Peltier se base sur l'effet Peltier, que décrit le renversement de l'effet Seebeck. L'effet Peltier revient à dire que l'énergie sous forme de chaleur peut être transportée par un flux de courant dans un semi-conducteur. De cette manière, on obtient une différence de température des deux côtés. L'élément Peltier représente quasiment une pompe de chaleur, qui est basée sur le transport du courant électrique dans un semi-conducteur.





## 1-Applications de ces régulateurs à effet Peltier [4]

- ❖ Refroidissement d'éléments électro-optique
- ❖ Stabilisation de diodes lasers
- ❖ Refroidissement de détecteurs infrarouges
- ❖ Refroidissement de cartes PC ou microélectronique
- ❖ Refroidissement d'aliments

**2-Avantage de l'élément Peltier**

- ❖ La commande exacte par courant électrique
- ❖ Inversion du flux thermique par inversion de la polarité des raccords de l'élément Peltier
- ❖ Fonctionnement quasi sans vibration
- ❖ Longévité de l'effet (>20 ans)
- ❖ Faible(s) encombrement/dimensions de montage
- ❖ Aucun liquide, comme dans les agrégats

**3-LES DIFFERENT TYPES DE MODULES EXISTANTS**

Elément 4*4(cm)	Elément en cascade	Elément avec perçage	Elément circulaire
			

**Tableau I.1 :**Types d'éléments Peltier

**I.3.1.3. Effet Thomson**

Effet thermoélectrique qui, dans un conducteur homogène parcouru par un courant et soumis à un gradient de température, provoque un transfert de chaleur.

Cet effet est différent des effets Peltier et Seebeck. Ce dernier existe pour un seul matériau et ne nécessite pas de jonction.

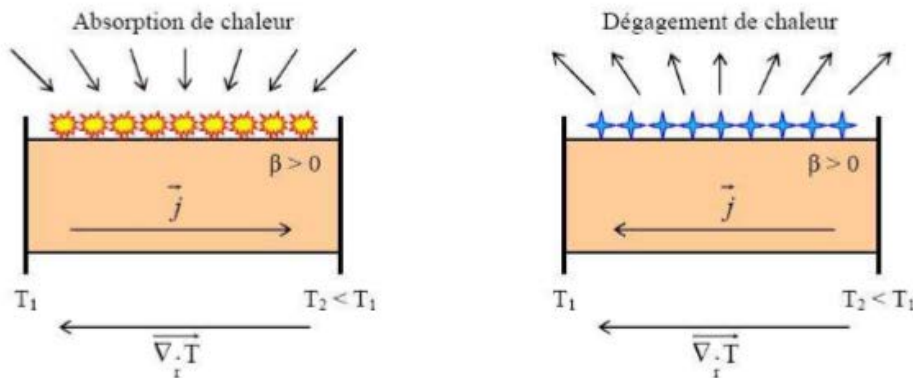
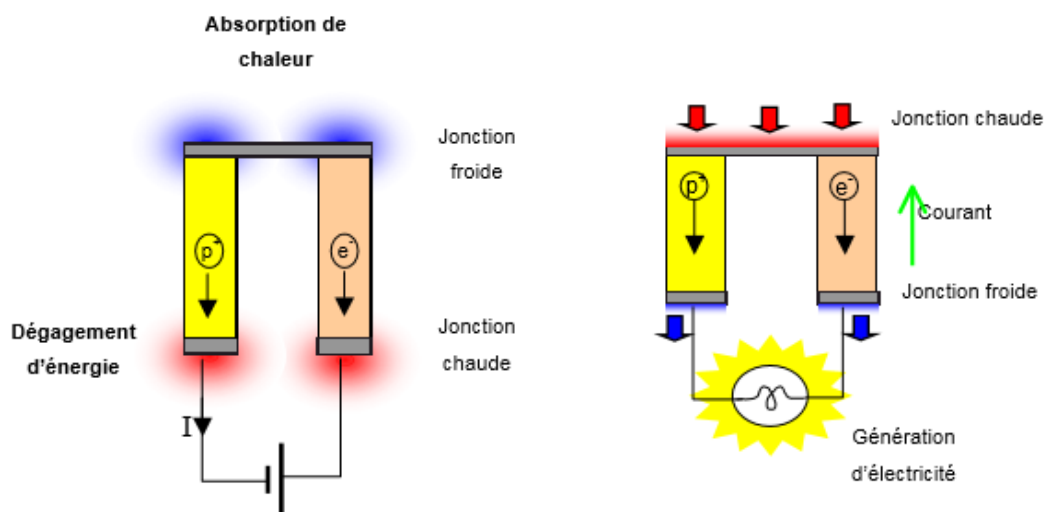


Figure I.3. Effet Thomson

### I.4. Génération et refroidissement thermoélectrique

La génération d'électricité et le refroidissement sont produits par des machines thermiques appelées convertisseurs thermoélectriques, générateurs thermoélectriques ou encore refroidisseurs thermoélectriques. Dans la pratique, les applications thermoélectriques utilisent des semiconducteurs de type n et p placés thermiquement en parallèle et reliés électriquement en série par un matériau dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul. En effet les semi-conducteurs n et p ont un courant créé de sens opposé pour une même différence de température. Ceci est exprimé par un coefficient de Seebeck positif pour les semi-conducteurs type p et un coefficient de Seebeck négatif pour ceux de type n.[5]



**Figure I.4.** conversion d'énergie par effet thermoélectrique (a) refroidissement et (b) génération

[5]

## **I.4. Comparaison des technologies de refroidissement**

### **1. Forces des systèmes Peltier En général**

Les éléments Peltier sont très fiables, demandent peu de maintenance et sont durables grâce à l'absence de pièces mobiles sujettes à l'usure. De plus, ils opèrent silencieusement et sans vibration. Ils peuvent être petits et légers même en ayant combiné plusieurs modules dans un seul système. Un autre avantage est leur coût de fabrication réduit. Les systèmes Peltier ne contiennent pas de réfrigérants qui sont inflammables, nuisibles pour la couche d'ozone et contribuent à l'effet de serre. L'intégralité du système de froid comprenant compresseur, larges évaporateurs et condenseurs est éliminé. Les éléments Peltier ne nécessitent aucune maintenance et sont remplacés facilement et rapidement en cas de panne. Les technologies récentes de contrôle permettent de mieux doser le refroidissement que les compresseurs conventionnels. Il est aussi possible d'inverser la fonction d'un système en inversant la polarité, c'est-à-dire qu'un élément refroidissant peut devenir un élément chauffant efficace.

### **2. Faiblesses des systèmes Peltier Avec les modules Peltier**

Il n'existe aucune solution technique pour contourner le fait que les côtés chaud et froid sont très proches. En pratique, les modules Peltier actuels ne mesurent que 3 à 5mm d'épaisseur. Il est donc très important de gérer efficacement le flux de chaleur entrant et sortant du module. Techniquement, ceci est assuré par de larges dissipateurs de chaleurs équipés de ventilateurs. Les performances d'un module Peltier sont directement liées à la différence de température. Plus elle est importante, plus la capacité d'absorption nécessaire est basse. Des différentiels de température importants ne peuvent être obtenus qu'avec des éléments multi-étages complexes.

### **3. L'efficacité énergétique**

Les éléments Peltier peuvent absorber la chaleur d'un côté et la dissiper de l'autre. Le vecteur utilisé pour cette pompe réversible est le courant électrique. Le courant agit en quelque sorte comme un réfrigérant dans un circuit de refroidissement et la capacité de pompage est idéalement proportionnelle au courant électrique. Il est inévitable que ce courant soit

irréversiblement converti en chaleur par effet Joule. La génération de chaleur ne signifie pas seulement une perte de puissance, mais aussi une perte de chaleur sur le côté froid qui doit être compensée par la capacité de pompage pour obtenir un effet de refroidissement. En pratique, une démultiplication de la capacité de pompage thermique doit être acceptée comme une perte de puissance des systèmes Peltier. La capacité de refroidissement des systèmes à compresseurs est, elle, deux fois plus importante que nécessaire. [6]

### I.5. Formules physiques effet thermoélectriques [7]

#### Couple thermoélectrique (thermocouple)

C'est un ensemble de deux conducteurs électriques différents, dont les jonctions sont soumises à des températures différentes et qui présentent alors des particularités énergico-électriques.

#### Rendement d'un couple thermoélectrique

Comme partout ailleurs, le rendement (du thermoélectrique) est le rapport entre deux puissances : celle (électrique) fournie au circuit récepteur envers celle (calorifique) prélevée à la source de chaleur.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \quad \text{(I.1)}$$

W puissance électrique (W)

$Q_h$  puissance thermique absorbée du coté chaud (W)

La puissance électrique W s'exprime en fonction de l'effet Seebeck et de la différence de température T, selon l'équation suivante :

$$W = (S_p - S_n) \times I \times \Delta T \quad \text{(I.2)}$$

Par ailleurs, le flux de chaleur diffusif Q se calcule par le produit de la conductance thermique totale  $\lambda$  par la différence de température T, soit :

$$Q = \lambda \times \Delta T \quad \text{(I.3)}$$

Dans cette équation,  $\lambda$  représente la conductance thermique des matériaux n et p placés en parallèle. Quant à la puissance thermique absorbée  $Q_h$ , elle est la résultante de la somme du flux de chaleur et de l'effet Seebeck, soit :

$$\varphi_h = (S_p - S_n) \times I \times T_h + \lambda \times \Delta T \quad \text{(I.4)}$$

Ainsi, en négligeant les résistances de contact au niveau des jonctions chaudes et froides devant la somme des résistances des bras, nous obtenons finalement l'expression du rendement :

$$\varphi = \frac{(S_p - S_n) \times I \times \Delta T}{(S_p - S_n) \times I \times T_h + \lambda \times \Delta T} \quad \text{(I.5)}$$

Par ailleurs, le maximum du rendement peut se mettre sous la forme :

$$\varphi_{max} = \eta_c \cdot \eta_{th} \quad \text{(I.6)}$$

Où  $\eta_c$  et  $\eta_{th}$  représentent respectivement le rendement de Carnot et le rendement propre au système thermoélectrique :

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_c} \quad \text{(I.7)}$$

$$\eta_{th} = \frac{\sqrt{(1 + Z_c \cdot T_m)} - 1}{\sqrt{(1 + Z_c \cdot T_m)} + \frac{T_c}{T_h}} \quad \text{(I.8)}$$

Dans cette dernière équation,  $Z_c$  et  $T_m$  sont définis respectivement comme étant le coefficient de mérite du couple n - p et la température moyenne.

Lefacteur de mérite ( $Z$ ) définit si le matériau a de bonnes propriétés thermoélectriques ou non

$$Z = \frac{S^2}{\rho \cdot \lambda} \quad \text{(I.9)}$$

Où

S coefficient de Seebeck  
(V/°C)

$\rho$  La résistivité électrique (Ohm.cm)

$\lambda$

Conductivité thermique

(W/cm.°C)

### I.6. Différents Modules de refroidissement thermoélectriques régulier

Numéro de modèle	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	T <sub>max</sub> (°C)	Q <sub>max</sub> (W)
TEC1 12703	3A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 63°C	27W
TEC1 12705	4A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 64°C	48W
TEC1 12708	8A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 61°C	75W
TEC1 12709	9A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 61°C	85W
TEC1 12710	10A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 60°C	100W
TEC1 12712	9.5A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 62°C	114W
TEC1 12715	11.8A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 62°C	142W
TEC1 12730	30A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 65°C	288W
TEM1-12710	10A	DC12V(15.4V)	Au-dessus 66°C	100W
TES1-12704	4A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 65°C	36W
TEC2-19003	3A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 85°C	35W
TEC2-19008	6.8A	DC12V(15.5V)	Au-dessus 80°C	80W
TES1-7102	2A	8V	Au-dessus 65°C	
TEM1-12706	6A	DC12V(15.4V)	Au-dessus 66°C	60W
TES1-7103	3A	8V	Au-dessus 65°C	

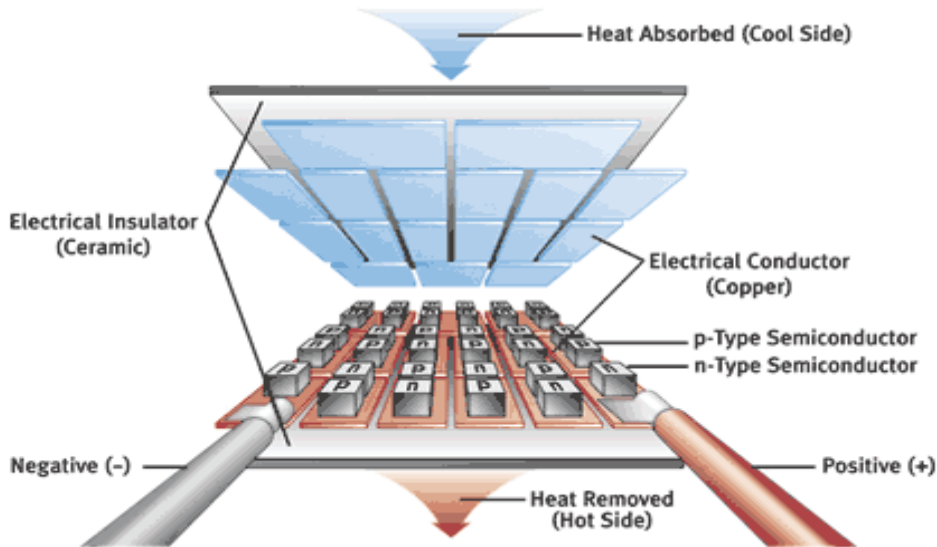
Tableau I.2. Types éléments Peltier

### I.7. Cellules à effet Peltier

#### I.7.1. Présentation

Les cellules à effet Peltier (**CEP**) ou modules thermoélectriques sont constitués de pavés semi-conducteurs (principalement du tellure de bismuth) de type n et p, reliés en série par un matériau conducteur (souvent le cuivre) et des semelles d'échange thermique en céramique. Nous pouvons remarquer que les jonctions sont de type p-n sur une face et n-p sur l'autre.

Lorsqu'on fait circuler un courant électrique continu dans un tel circuit, il apparaît une face « froide » et une face « chaude ». Si on inverse le sens du courant, la température des deux faces change de côté.[8]



**Figure I.5** : Cellules à effet Peltier

## Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé quelques notions indispensables sur la thermoélectricité. La technologie Peltier ouvre de nouvelles opportunités pour des applications spécifiques, notamment si elles ne demandent pas une capacité de refroidissement maximale ou une grande efficacité. Sa miniaturisation et son positionnement libre permet de développer de petits appareils portables. Le prochain chapitre sera consacré aux généralités sur les microprocesseurs.

# Chapitre II

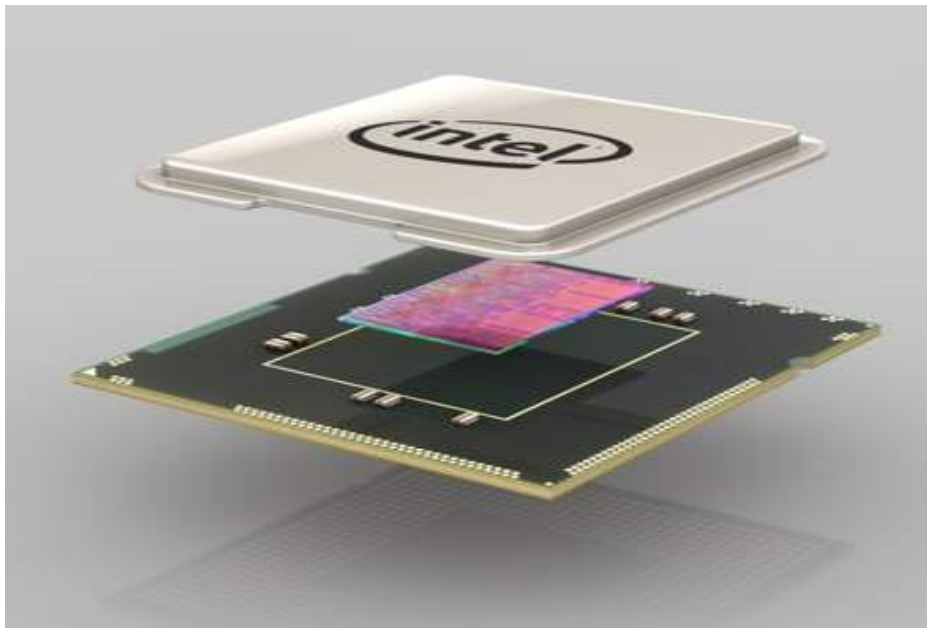
# **Généralités sur les microprocesseurs**

## II.1. Introduction

L'élément central de tout micro-ordinateur est son microprocesseur. Le microprocesseur est en effet un circuit complexe qui dirige toutes les autres parties de l'ordinateur (mémoire, carte son, carte réseau, écran, imprimante...), selon les instructions fournies par un programme. Durant son fonctionnement, un microprocesseur consomme de la puissance électrique. Elle sera dissipée sous forme de chaleur par effet joule ce qui est à l'origine de la limitation des performances du microprocesseur ainsi que la diminution de sa durée de vie.

## II.2. Définition générale

Le microprocesseur est un processeur dont tous les composants ont été suffisamment miniaturisés pour être regroupés dans un unique boîtier, le processeur est la partie d'un ordinateur qui exécute les instructions et traite les données des programmes. [9] (voir figure (II.1))



FigureII.1 :Microprocesseur

## II.3. Structure d'un microprocesseur [9]

L'unité centrale d'un microprocesseur comprend essentiellement :

- ❖ Une unité arithmétique logique (UAL) qui effectue les opérations ;
- ❖ Des registres qui permettent au microprocesseur de stocker temporairement des données ;

- ❖ Une unité de contrôle qui commande l'ensemble du microprocesseur en fonction des instructions du programme.

Certains registres ont un rôle très particulier :

- ❖ Le registre indicateur d'état (*flags*), ce registre donne l'état du microprocesseur à tout moment, il peut seulement être lu ;
- ❖ Le compteur de programmes (*PC, Program Counter*), il contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter ;
- ❖ Le pointeur de pile (*SP, Stack Pointer*), c'est le pointeur d'une zone spéciale de la mémoire appelée pile où sont rangés les arguments des sous-programmes et les adresses de retour.

Seul le *Program Counter* est indispensable, il existe de (rares) processeurs ne comportant pas de registre d'état ou pas de pointeur de pile.

L'unité de contrôle peut aussi se décomposer :

- ❖ Le registre d'instruction, mémorise le code de l'instruction à exécuter ;
- ❖ Le décodeur décode cette instruction ;
- ❖ Le séquenceur exécute l'instruction, c'est lui qui commande l'ensemble des organes du microprocesseur.

## II.4. Fonctionnement

Le processeur noté **CPU** (central processing unit) est un circuit électronique cadencé au rythme d'une horloge interne, grâce à un crystal de quartz qui est soumis à un courant électrique, envoie des impulsions appelées (**top**). La fréquence d'horloge (appelée également cycle, correspondant aux nombres d'impulsions par seconde, s'exprime en Hertz(Hz). Un ordinateur à 200 Hz possède une horloge envoyant 200 000 000 de battements par seconde. La fréquence d'horloge est généralement un multiple de la fréquence du système (FSB, Front-SIDE bus), c'est-à-dire un multiple de la fréquence de carte mère.

A chaque top d'horloge le processeur exécute une action, correspondante à une instruction ou une partie d'instruction. L'indicateur appelé **CPI** (cycle par instruction), permet de représenter le nombre moyen du cycle d'horloge nécessaire à l'exécution d'une instruction sur un microprocesseur. La puissance du microprocesseur peut ainsi être caractérisée par le

nombre d'instruction qu'il est capable de traiter par seconde. L'unité utilisée est le **MIPS** (millions d'instruction par seconde) correspondant à la fréquence du processeur que divise le CPI. [10]

### II.5. Les modèles microprocesseur [11]

Différents modèles sont adaptés pour les ordinateurs portables en réduisant la consommation par différentes techniques comme réduire la tension d'alimentation ou la vitesse en fonction de la charge. D'autres sont plus spécialisés pour les serveurs, surtout au niveau de leur puissance de calcul. Il est optimisé pour exécuter les instructions le plus rapidement possible. La deuxième caractéristique est liée à des bus externes qui permettent d'accepter des capacités élevées de mémoire RAM mais aussi se contrôler des composants spécialisés pour les communications externes comme le PIC (interruptions), UART (communication séries), PIO (parallèle), RTC (horloge en temps réel) .... La majorité de ces composants sont maintenant regroupés dans des chipsets. Les fréquences élevées dans ces modèles nécessitent un refroidissement par radiateur ventilé avec l'utilisation de pâte thermique pour améliorer la conductivité.

- **Modèles actuels :**

Athlon 64 – Phenom – Opteron – I7 d'Intel – I5 – Xeon – Itanium (64bits pour serveur réseaux), G620.

- **Anciens modèles :**

- Types CISC : 80286-80386-80486-AM5X86-Pentium 1-Pentium MMX.
- Types RISC : Pentium 2-3et4 -Intel core2 (duo) – Duron K6 – 2et K6-3 - Athlon – Athlon XP – Sempron 64 -Celeron.
- Modèles pour serveurs multiprocesseurs : Pentium pro – Athlon MP.

### II.6. Méthodes de refroidissement pour ordinateur [12]

Les méthodes de refroidissement pour ordinateurs sont les moyens permettant de réduire la température de certains composants d'ordinateur afin d'éviter leur surchauffe. La majorité des composants d'un ordinateur chauffent, allant d'une très faible production de chaleur pour les lecteurs optiques, à une production beaucoup plus importante pour le microprocesseur voire la carte graphique qui consomme parfois plus que le processeur. Un échauffement

normal est sans conséquence, mais une surchauffe de ces composants peut entraîner des dysfonctionnements (erreurs de calculs, bugs, redémarrages intempestifs, etc.), pouvant parfois aller jusqu'à leur détérioration.

## II.7. Dissipation thermique dans des composants électroniques [13]

Il existe à l'heure actuelle plusieurs types de refroidissement, nous allons présenter les 5 parmi les plus connus, les plus performantes, et les plus abordables financièrement.

### II.7.1. Système de refroidissement par azote liquide[13]

#### II.7.1.1. Principe de fonctionnement

- ❖ L'azote est un gaz qu'on trouve naturellement dans nos PC car il est le principal composant de notre atmosphère (à 78%).
- ❖ Une fois mis sous pression, il se liquéfie et on obtient une substance semblable à de l'eau bouillante (si on laisse l'azote liquide à température ambiante). Lorsqu'il s'évapore le liquide Nitrogène (LN2) formé absorbe énormément d'énergie et peut descendre jusqu'à -196°C.
- ❖ Une fois le système monté et mis en route, l'azote liquide va circuler dans le tuyau gris (fig.II.2) pour atterrir sur le microprocesseur, isolé par de la vaseline, du silicone et du néoprène. On voit aussi du givre se déposer sur les composants (fig.II.2). La température descend alors rapidement, pour atteindre un minimum de -125°.

#### a- Les avantages

- ✓ Polyvalent
- ✓ Faible entretien

#### b- Les inconvénients :

- ✓ Prix élevé
- ✓ Fort encombrement



Figure II.2. Refroidissement par azote liquide

## II.7.2. Refroidissement par radiateur[13]

### II.7.2.1 principe de fonctionnement

- ❖ Le radiateur est une structure solide (aucun mouvement mécanique entre les pièces). L'air chaud qui vient du microprocesseur est transféré dans les ailettes en aluminium du radiateur qui lui renvoie la chaleur dans l'air ambiant.
- ❖ Il est parfois accompagné d'un ventilateur qui aide à la dissipation de l'air chaud.
- ❖ Il faut vérifier régulièrement toutes les composantes du système de refroidissement pour qu'elles soient en bon état de fonctionnement.

#### a- Avantages

- ✓ Aucun bruit

#### b-Inconvénients

- ✓ Encombrement
- ✓ Efficacité moyenne
- ✓ Entretien régulier nécessaire



Figure II.3. Radiateur

### II.7.3. Refroidissement par eau : le water cooking[13]

#### II.7.3.1. Principe de fonctionnement

- ❖ Watercooling veut dire Refroidissement par eau.
- ❖ Le principe de ce système de refroidissement est simple : on fait circuler de l'eau par l'intermédiaire de tuyaux dans un radiateur qui va refroidir le microprocesseur de l'unité central.

#### a- Avantages

- ✓ Aucun bruit (en dehors de celui de la pompe)
- ✓ Faible entretien

#### b- Inconvénients

- ✓ Fort encombrement
- ✓ Solution réservée aux utilisateurs initiés, pour les débutants prévoyez une installation faites par un pro ( = allonger encore quelques €:US ) car en cas de mauvais branchement, de l'eau pourrait endommager votre microprocesseur.



Figure II.4. Refroidissement par eau

## II.7.4. Refroidissement par air : ventilateur[13]

### II.7.4.1. Principe de fonctionnement

- ❖ Il pousse l'air chaud hors du coffret et le remplace par de l'air froid qu'il aspire de l'extérieur du coffret.
- ❖ Cet air froid est réchauffé par le système qui se trouve à l'intérieur du coffret.
- ❖ Le ventilateur pousse cet air chaud hors du coffret et le remplace par de l'air froid qu'il aspire de l'extérieur du coffret et ainsi de suite ...

#### a- Avantages

- ✓ Petit encombrement
- ✓ Pas d'entretien à faire

**b- Inconvénients**

- ✓ Bruit important
- ✓ Efficacité moyenne



Figure II.5. Refroidissement par air

**II.7.5. Refroidissement par le module Peltier[13]****II.7.5.1. Principe de fonctionnement**

Une possibilité de produire de la réfrigération sans faire intervenir des mécanismes et des écoulements de fluides frigorigènes est d'utiliser un refroidisseur qui s'appuie sur les effets thermoélectriques

**a- Avantage**

- Très efficace pour le refroidissement
- Refroidissement effectué par charges électriques : aucun risque de fuite de gaz ou de liquide.

**b- Inconvénients**

- Consommation en énergie importante
- Entretien régulier nécessaire



**Figure II.5.** Module Peltier

**Conclusion**

Dans ce chapitre on a abordé une petite revue sur les généralités sur les microprocesseurs et les différents types existant ainsi que leurs systèmes de refroidissements, le prochain chapitre sera consacré aux généralités sur les matériaux a changement de phase.

# Chapitre III

# **Généralités sur les matériaux à changement de phase**

### III.1. Introduction

Les Matériaux à Changement de Phase **MCP** (PCM Phase Change Materiels) 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 MCPs 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 les restituent lorsque la température baisse.

### III.2. Principe du changement de phase

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou à céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue deux types de transfert de chaleur (ou transfert thermique) [14] :

- **Transfert thermique par chaleur sensible**
- **Transfert thermique par chaleur latente**

#### III.2.1. Transfert thermique par chaleur sensible (CTS)

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la chaleur sensible échangée par un matériau est la chaleur massique, notée  $C_p$  et exprimée en  $J/(kg.K)$ .

Exemple : si on prend le  $C_p$  de l'eau qui est égale à  $4186 J/kg.K$ , cela signifie que pour élever  $1kg$  d'eau de  $1\text{ }^\circ C$ , il faut utiliser une quantité de chaleur de  $4186 J/(kg.K)$ . La quantité d'énergie stockée dans une masse  $m$  de matériau lorsque sa température évolue de la température  $T_1$  à  $T_2$ , à pression constante, peut être exprimée par la relation :

$$E_{sensible} = \Delta H = H_{final} - H_{initial} = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_p(T) dt \quad \text{(III.1)}$$

Si la capacité calorifique est indépendante de la température, la chaleur spécifique est constante dans l'intervalle de températures entre  $T_1$  et  $T_2$ . Cette relation devient :

$$E_{sensible} = \Delta H = m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad \text{(III.2)}$$

La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température, alors :

- Si  $T_1 > T_2$  on dira que c'est un stockage du chaud.
- Si  $T_2 > T_1$  on dira que c'est un stockage du froid.

### III.2.2. Transfert thermique par chaleur latente

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer le matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit le changement de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gazeuse ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et varie selon l'équation (III-3) :

$$E_{latent} = m \cdot \Delta H_{s-L \text{ ou } L-G} \text{ (III.3)}$$

$E_{latent}$  la quantité de chaleur stockée (J/kg)

$m$  la masse du matériaux (kg)

$\Delta h_s$  l'enthalpie spécifique (J/kg)

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe (température – énergie) de la Figure (III-1).

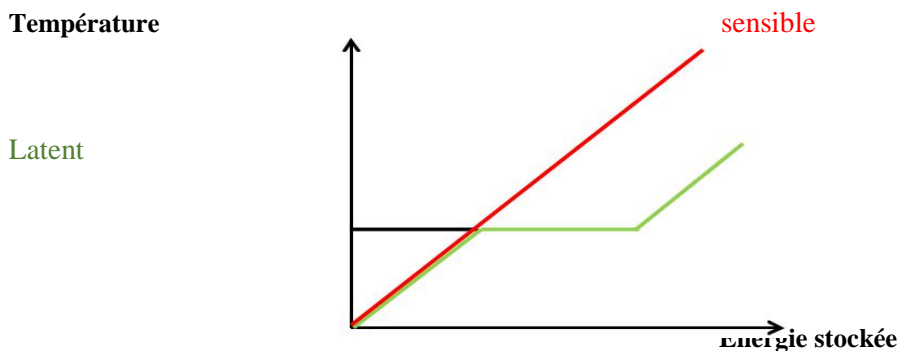


Figure III.1 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [14].

Lorsqu'un matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible, lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme (pour un corps pur) sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation (III-4) :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{P,S} dt + \Delta h_{s-l} + \int_{T_{initial}}^{T_{final}} m C_{P,L} dT \text{ (III.4)}$$

- Q La quantité d'énergie stockée(J/kg)
- m La masse du matériaux (kg)
- $C_{P,S}$  La chaleur spécifique à l'état solide J/(kg.K)
- $C_{P,L}$  La chaleur spécifique à l'état liquide J/(kg.K)
- $\Delta h_{S-L}$  L'enthalpie spécifique (solide, liquide)

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCPs peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz.

Il est important de noter que les quantités d'énergie mises en jeu dans le processus de changement de phase sont énormément plus importantes que celles qui interviennent lors des transferts sensibles (étant donné qu'on travaille sur des intervalles restreints de températures). C'est grâce à ces transferts latents qu'il est actuellement envisageable de diminuer énormément le volume d'un élément de stockage d'énergie (Compacité), ou encore d'augmenter particulièrement fortement la quantité d'énergie contenue dans un même volume de stockage (Densité Énergétique) [14].

**Exemple :**

Nom	Acétate tri hydrate de sodium
$T_{FUSION}$	55-58 °C
$L_F$	242, 85.10 <sup>3</sup> J/kg
$C_{P_{SOLIDE}}$	3, 31.10 <sup>3</sup> J/ (kg. K) à 30 °C
$C_{P_{LIQUIDE}}$	3, 06.10 <sup>3</sup> J/ (kg. K) à 70 °C
$\rho_{SOLIDE}$	1392 kg/m <sup>3</sup> à 30 °C
$\rho_{LIQUIDE}$	1279 kg/m <sup>3</sup> à 70 °C

Tableau III.1 :Caractéristiques physiques du MCP

Densité

L'énergie  $E_{30-70}$  accumulée par 1 m<sup>3</sup> de ce MCP entre 30 °C et 70 °C vaut :

$$E_{MCP} = V_s \cdot \rho_{solide} \cdot C_{p,mcp,solide} \cdot \Delta T + V_s \cdot \rho_{solide} \cdot L_f + V_l \cdot \rho_{liquide} C_{p,mcp,liquide} \cdot \Delta T \quad (III.5)$$

$$E_{MCP} = [1.1392.1279.3,31.10^3 \cdot (55 - 30)] + [1.1392.242,85.10^3] + [1,07.1279.3,06.10^3 \cdot (70 - 58)]$$

$$= 5.00.10^8 J = 139 kWh$$

$E_{mcp}$  Chaleur stockée par le matériau à changement de phase (kWh)

V Volume du MCP (m<sup>3</sup>)

$C_{p,mcp,solide}$  Chaleur spécifique massique du MCP à l'état solide J/ (kg. K)

$\Delta T$  Différence de température (K)

$\rho_{solide}$  Masse volumique du MCP à l'état solide (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{liquide}$  Masse volumique du MCP à l'état liquide (kg/m<sup>3</sup>)

$L_f$  Chaleur latente de fusion du MCP (J/kg)

$C_{p,mcp,liquide}$  Chaleur spécifique massique du MCP à l'état liquide J/(kg.K)

Sur le même intervalle de température, le même volume d'eau (1 m<sup>3</sup>) accumulerait une quantité  $E_{eau30-70}$  :

$$E_{eau\ 30-70} = V \cdot \rho_{eau} \cdot C_{p,eau,liquide} \cdot \Delta T \text{ (III.6)}$$

$$E_{eau} = 1.1000.4186. (70 - 30) = 1,67. 10^8 J = 46,4 KWH$$

$\rho_{eau}$  Masse volumique de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)

$C_{p,eau,liquide}$  Chaleur spécifique massique de l'eau J/(kg.K)

Le MCP a par conséquent permis de stocker plus de trois fois plus d'énergie pour un même volume. Il possède par conséquent une plus grande Densité Énergétique.

### Compacité

De la même manière, pour stocker 100 kWh de 55 °C à 58 °C, nous avons besoin des volumes  $V_{eau}$  et  $V_{MCP}$  suivants :

$$V_{eau} = \frac{100000.3600}{C_{peau} (58 - 55)\rho_{eau}} \text{ (III. 7)}$$

$$= \frac{100000.3600}{4186. (58 - 55). 1000} = 28,7m^3$$

$$V_{mcp} = \frac{100000.3600}{L_{f,mcp} \cdot \rho_{mcp}} \text{ (III. 8)}$$

$$= \frac{100000.3600}{242,85. 10^3. 1293} = 1,1m^3$$

Le volume du MCP utilisé pour stocker 100 kWh entre 55 °C et 58 °C est par conséquent plus de 27 fois plus petit que celui de l'eau. Il possède par conséquent une plus grande compacité.

### **III.3. Intérêt du changement de phase**

Le caractère isotherme ou quasi isotherme de la charge et de la décharge énergétique d'un MCP permet son utilisation en tant que régulateur de température : en effet, si l'on intègre ce dernier à l'enveloppe (murs extérieurs, plancher, plafond, ...) d'un bâtiment, il devient alors possible de stocker de la chaleur lorsque celle-ci est surabondante (été) ou présente au mauvais moment (dans la journée l'hiver).

En été, l'énergie solaire apportée au cours de la journée est stockée au fur et à mesure par les parois et ce, sans fluctuation excessive de la température à l'intérieur du bâtiment. Il est alors possible d'écrêter de 3 °C à 5 °C les pics de température d'une pièce.

En hiver, on peut de la même manière stocker la chaleur apportée par le soleil dans les MCPs incorporés aux parois ; ceux-ci restitueront la chaleur accumulée dans la journée à la fin de la journée et pendant la nuit.

Par ailleurs, tout MCP peut servir de déphaseur thermique : tout apport ou perte énergétique (variation de température, rayonnement solaire...) en provenance du milieu ambiant peut provoquer la fusion ou la cristallisation du matériau à température quasi constante. Dès lors, le milieu situé de l'autre côté du MCP ne ressent pas aussitôt l'effet de cet apport ou de cette perte, mais ne commencera à le ressentir qu'après la fusion ou la cristallisation totale du matériau [17].

### **III.4. Matériaux à changement de phase**

#### **III.4.1. Les caractéristiques idéales d'un MCP**

Les caractéristiques idéales d'un MCP sont présentées à titre indicatif et classées en quatre catégories : propriétés thermodynamiques et thermiques, propriétés cinétiques, propriétés chimiques, propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement). [16]

##### **a) Propriétés thermodynamiques et thermiques**

- Une température de fusion dans la gamme de températures désirée.
- Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante.
- Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage.

- Une bonne conductivité thermique, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge.
- Une bonne chaleur spécifique, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeurs.

**b) Les propriétés cinétiques**

- Le matériau ne doit pas présenter de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage.
- Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

**c) Les propriétés chimiques**

- Vis à vis de la température : Pas de décomposition chimique dans la gamme de température de fonctionnement du stockage. Une fusion congruente, pour que la composition chimique du MCP ne change pas au cours du temps.
- Vis à vis du milieu environnant : Pas de corrosion avec les matériaux de construction, pas de risque d'inflammabilité ni d'explosion en contact avec l'atmosphère.

**d) Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)**

- Le MCP doit être disponible en grandes quantités.
- Être bon marché.
- Être non toxique pour les êtres vivants.

- Être recyclable en fin de vie.

### III.5. Classification des MCPs [15]

On peut classer les MCPs selon leurs compositions en trois catégories :

- **Les composés minéraux (inorganiques)** : ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion, parmi ces composés : les sels, les métaux, les alliages et les sels hydratés.
- **Les composés organiques** : de propriétés thermiques moindres que les sels hydratés, ils sont utilisés en particulier pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces composés, on trouve les paraffines ; les acides gras, les polyalcools.
- **Les eutectiques** : ils peuvent être organiques ou inorganiques.

Comme le montre l'organigramme suivant :

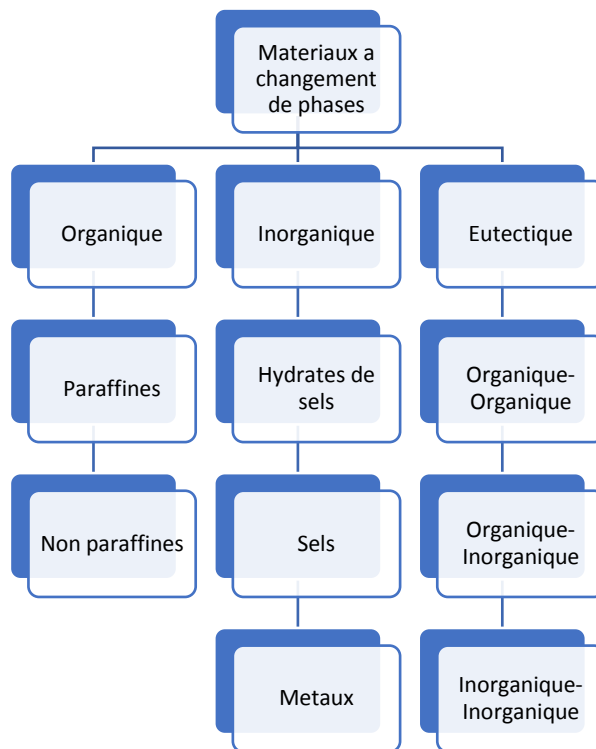


Figure III-2 : Classification des MCP [15].

#### III.5.1. Les composés organiques

##### III.5.1.1 Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute  $C_nH_{2n+2}$ , aux propriétés très similaires. Parmi les MCPs solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ( $T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$ ), n-Nonacosane ( $T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$ ) ou encore le n-Triacontane ( $T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$ ) [18].

**a) Avantages**

- Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.
- Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables.
- Elles ont une faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation.
- Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion.
- Facilement disponibles et peu coûteuses.

**b) Inconvénients**

- Leur conductivité thermique reste très faible ( $\approx 0,25 \text{ W/m.K}$ ).
- Elles présentent une expansion volumique assez élevée ( $\approx 15 \%$ ).
- Une densité peu importante. ( $\approx 800 \text{ kg/m}^3$ ).

Les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir.

**III.5.1.2. Non paraffiniques :**

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique  $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$  et ont à peu près les mêmes propriétés thermo-physiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ( $T_{\text{fusion}} = 57,5 \text{ °C}$ ), l'acide sébacique ( $T_{\text{fusion}} = 132 \text{ °C}$ ), l'acide palmitique ( $T_{\text{fusion}} = 61-63 \text{ °C}$ ) et l'acide myristique ( $T_{\text{fusion}} = 51,5-53,6 \text{ °C}$ ): [19]

**a) Avantages**

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre d'atomes de carbone dans leur chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-sourcé.

**b) Inconvénients**

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

**III.5.1.3. Alcools de sucre**

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malititol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs [20].

**a) Avantages**

- Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de phase élevées.
- Ils présentent une grande masse volumique de l'ordre de  $1500 \text{ kg/m}^3$ , ce qui conduit à une densité énergétique très élevée.
- Des produits peu coûteux et non toxiques.

**b) Inconvénients**

- Les alcools de sucre présentent une surfusion.
- Certains alcools de sucre présentent des problèmes de compatibilité avec l'air ambiant car ils réagissent avec l'oxygène.

### III.5.2. Les composés inorganiques

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux [21].

#### III.5.2.1. Hydrates de sels :

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale  $AB \cdot nH_2O$ .

Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  ( $T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). On peut citer aussi le  $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  pour les applications de climatisation.

##### a) Avantages

- Les hydrates de sels sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ( $\approx 100-300 \text{ kJ/kg}$ ).
- Une température de fusion adaptée aux applications à basse température ( $\approx 8-100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité.
- Ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ  $0,5 \text{ W/m.K}$ ).

##### b) Inconvénients

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du container par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification. Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion.

Certains hydrates de sels peuvent montrer des problèmes de corrosion des structures métalliques des systèmes de stockage.

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 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $\text{Na CH}_3 \text{COOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	170-264
Hydroxyde de Baryum octahydrate $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	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	70	184
Carbonate de calcium déca hydrate $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 10\text{H}_2\text{O}$	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40-43	140

Tableau.III.3. Différents hydrates salins. [21]

### III.5.2.2. Les sels

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type.

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le  $\text{NaNO}_3$  ( $T_{\text{fusion}} = 307 \text{ °C}$ ), le  $\text{KNO}_3$  ( $T_{\text{fusion}} = 333 \text{ °C}$ ) ou encore le  $\text{LiNO}_3$  ( $T_{\text{fusion}} = 250 \text{ °C}$ ) [21].

#### a) Avantages

- Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, car ils possèdent une température de fusion entre 250 et 1680 °C
- Des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg.
- Ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques (de l'ordre de 7 %)
- Leur coût relativement faible devant les composés organiques.

**a) Inconvénients**

Certains sels peuvent aussi présenter un peu de surfusion. Un autre point non négligeable est leur aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée. Par ailleurs, les sels peuvent être des oxydants puissants et sont donc incompatibles avec les huiles thermiques, dont l'utilisation comme fluide caloporteur sera à proscrire. Enfin, quelques sels présentent des problèmes de stabilité thermique, leurs propriétés pouvant s'altérer avec le temps.

**III.5.2.3. Les Métaux**

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment J. P. Kotzé *et al.* Ou encore H. Ge *et al.*. On peut citer notamment le Potassium ( $T_{\text{fusion}} = 63.2$  °C), le  $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$  ( $T_{\text{fusion}} = 138$  °C) ou encore le Lithium ( $T_{\text{fusion}} = 186$  °C) [21].

**a) Avantages**

Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus élevée que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique.

**b) Inconvénients**

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCPs envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.

### III.5.3. Eutectiques

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

On peut citer les eutectiques de nitrates tel que  $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$  avec une composition massique de 25%-65%-10% ( $T_{\text{fusion}} = 80.5^\circ\text{C}$ ) ou encore les eutectiques d'organiques tel que  $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$  avec une composition massique de 50%-50% ( $T_{\text{fusion}} = 65^\circ\text{C}$ ).

Les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $T_{\text{fusion}} = 59.1^\circ\text{C}$ ) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ( $T_{\text{fusion}} = 85^\circ\text{C}$ )[25].

#### a) Avantages

- Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs.
- Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs.
- Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels.

#### b) Inconvénients

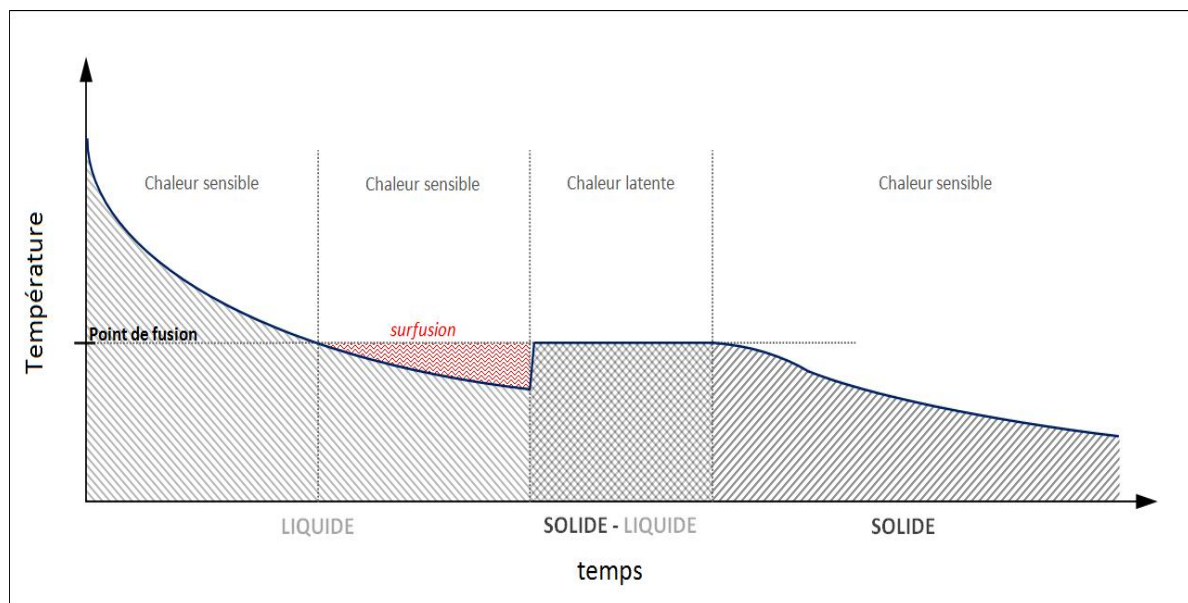
L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

## III.6. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

### III.6.1. La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la

solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [25].



**Figure III.3** : Surfusion lors du refroidissement d'un MCP [25].

### III.6.2. Lasurchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [25]

### III.6.3. La dilatation

Pendant le changement de phase solide- liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise

un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

### **III.7. Les matériaux composites [26]**

#### **Introduction**

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes.

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. [26]

#### **III.7.1. Généralités sur les matériaux composites**

Un matériau composite est constitué d'un renfort et d'un liant, ce dernier étant couramment appelé matrice. Le renfort, comme son nom l'indique, va assurer la tenue mécanique du composite. La matrice pour sa part, assure la cohésion entre les différents éléments et gère les flux d'efforts, tout en garantissant la tenue à l'environnement et à la température. Il existe différents types de matériaux composites en fonction du couple renfort/matrice choisi. Parmi les renforts fibreux couramment utilisés, on peut citer :

- les fibres de verre, actuellement les plus utilisées ;
- les fibres de carbone, utilisées pour des applications structurales ;
- les fibres d'aramide, utilisées pour des applications beaucoup plus ciblées, comme la protection balistique ;
- les fibres naturelles, quant à elles sont en pleine émergence du fait de leur faible coût et de leur impact positif sur l'environnement.

Il existe également différents types de matrices et on distingue trois grandes familles : les matrices organiques, les matrices céramiques et les matrices métalliques. Parmi les matrices organiques, trois catégories de polymères peuvent être utilisées :

- les polymères thermoplastiques ;
- les polymères thermodurcissables ;
- les élastomères.

L'importante diversité de renfort et de matrice permet de façonner les matériaux composites en fonction du besoin exprimé. L'amélioration des caractéristiques physicomécaniques de ces matériaux constitue une des clés de leur développement industriel. [26]

**III.7 .1.2. Les propriétés des matériaux composite résultent [27] :**

- Des propriétés des matériaux constituants
- De leur distribution géométrique
- De leur interaction

Des exemples de matériaux pris au sens large sont donné au tableau III.4 [27]

Type de composites	Constituants	Domaine d'application
<b>1- Composite à matrice organique</b>		
Papier carton	Résine/charges/fibre cellulosiques	Imprimerie, emballage, etc.
Panneau de particules	Résine/fibre de bois	Menuiserie
Panneau de fibres	Résines souples/tissus	Bâtiment
Matériaux d'étanchéité	Elastomère/bitume/textiles	Sport, bâtiment
Pneumatique	Caoutchouc/toile/acier	Toiture, terrasse, etc.
Stratifiés	Résine/charge/fibres de verre, de Carbon, etc.	Automobile
Plastiques renforcés	Résine/microsphères	Domaines multiples
<b>2-composites à matrice minérale</b>		
Béton	Ciment/sable/granulats	Génie civil
Composite Carbone-Carbone	Carbone/fibre de carbone	Aviation,espace,sports,bio-médecine,etc.
Composites céramiques	Céramique/fibre de céramique	Piece thermo-mécaniques
<b>3-Composites à matrice métallique</b>		
	Aluminium/fibre de bore	Espace
	Aluminium/fibre de carbone	

<p><b>4-Sandwiches</b></p> <p>{  <b>Peaux</b>  <b>Ames</b></p>	<p>Métaux, stratifié, etc.  Mousse, nids d'abeilles, balsa,  plastiques renforcés, etc.</p>	<p>Domaines multiples</p>
--	---	---------------------------

**Tableau III.4.** Exemple de matériaux composites, pris en sens large. [27]

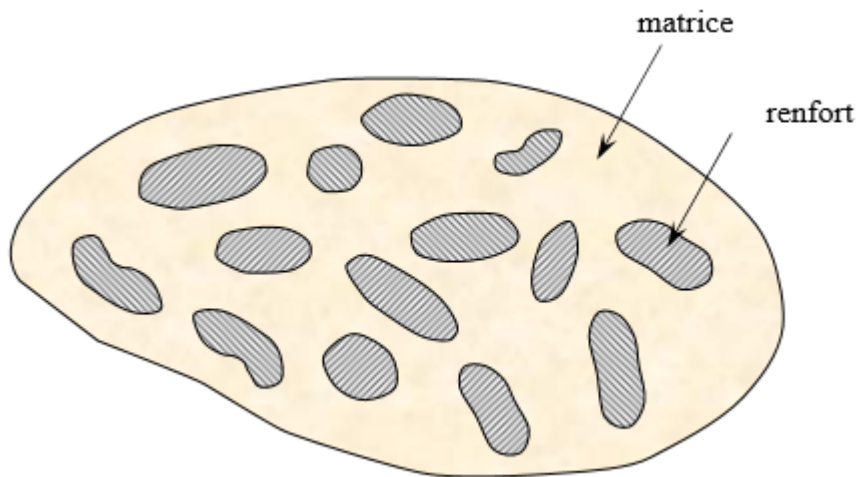


Figure III.4. Matériau composite [28]

**CONCLUSION**

Ce chapitre a été consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase MCP où le principe de changement de phase est défini et les propriétés de ces matériaux ainsi que leur classification ont été développées. Quelques phénomènes ayant un impact sur le changement de phase ont été cités. Le prochain chapitre sera consacré à la partie expérimentale du travail effectué.



# Chapitre IV

# **Matériels et méthodes**

## IV .1. 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 l'intérêt des thermiciens et des architectes. Beaucoup d'intérêts dans divers domaines scientifiques secteurs technologiques et plus particulièrement dans les applications en rapport avec le système de stockage de chaleur ainsi que de dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement dans de composants électroniques.

Notre projet a pour objectif de réaliser un composite à base de graphite / acide laurique / fibres de cellulose (carton en poudre). Des pastilles pour les utiliser dans le système de refroidissement d'un composant électronique.

### - Partie 1

## IV.2 Elaboration du MCP

### IV.2.1 Matériaux utilisés pour la préparation du composite

Le premier critère de choix à retenir pour un MCP est la température de transition solide/liquide puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable il est plus judicieux de choisir celui qui présentera la plus grande chaleur latente.

Le matériau à changement de phase utilisé dans cette étude est l'acide laurique, ainsi que le graphite en poudre pour améliorer la conductivité thermique et les fibres de cellulose comme renfort [carton en poudre (carton broyé)], voir figures (IV.1 acide laurique) (IV.2 graphite en poudre).(IV.3 fibre de cellulose)



Fig.IV.1 acide laurique



Fig. IV.3 fibre de cellulose Fig.IV.2 graphite en poudre.

### a) La paraffine

Le MCP qu'on a utilisée est l'acide laurique, c'est un acide gras saturé à 12 atomes de carbone. On le trouve notamment dans l'huile de coco et dans l'huile de palmiste (extraite des graines du fruit du palmier) ainsi que dans le lait de divers mammifères. On l'utilise au laboratoire en synthèse organique et dans l'industrie pour produire des parfums, des lubrifiants, des graisses, des colorants, des plastiques, des additifs alimentaires et des produits pharmaceutiques.

<i>Propriétés physique</i>	<i>Propriétés chimique</i>
<i>Formule brute</i> $C_{12}H_{24}O_2$	<p><math>T^\circ</math> de fusion <math>44^\circ - 46^\circ</math></p> <p>Masse volumique 6,91 (vapeur), 0,883 à <math>25^\circ\text{C}</math> (liquide)</p> <p><math>\lambda_{solide}</math> 0.116 w/m.k à <math>25^\circ\text{C}</math></p> <p><math>\lambda_{liquide}</math> 0.160 w/m.k à <math>50^\circ\text{C}</math></p>

**Tableau IV.1:** Propriétés chimiques et physiques de l'acide laurique [32]

### b) Le graphite

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, d'éclat métallique et d'aspect gras et luisant caractérisé par :

- Une densité faible qui varie de 2,1 à 2,3 ;
- Un point de fusion très élevé ( $3\ 500^\circ\text{C}$ ).

Dans notre étude, le carbone synthétique qui a été utilisé, est de même composition que le graphite naturel. Il est obtenu par la graphitisation (cuisson entre  $2\ 600^\circ$  et  $3\ 000^\circ\text{C}$ ) d'un mélange de coke de pétrole et de brai (bitume) précuit. Il est plus pur (environ 99 % de carbone) que le graphite naturel et offre une meilleure conductivité électrique ainsi qu'une plus grande résistance chimique.

<i>Propriétés chimiques</i>	<i>Propriétés physiques</i>
<p><i>Formule brute</i> C</p> <p><i>Masse molaire</i> : 338,65 g/mol</p> <p><i>Masse volumique</i> : 2250kg /m<sup>3</sup></p> <p><i>Densité</i> : 2.26g/cm<sup>3</sup></p>	<p><math>T^\circ</math> fusion : <math>3\ 652^\circ\text{C}</math></p> <p>Conductivité thermique jusqu'à : 500-1000W/m.K</p> <p>Capacité thermique massique : 720J/kgK</p>

**Tableau IV.2:** Propriétés chimiques et physiques du graphite [31]

Pour la préparation du graphite alors on a très bien tamisé jusqu'à obtention d'une poudre de graphite très fine voir (FigIV.4)



**Figure IV.4** graphite tamisé

### c) Les fibres de cellulose

Les fibres de cellulose possèdent un diamètre moyen qui varie de 15 à 30  $\mu\text{m}$  selon leur origine et leur mode de fabrication. Elles sont très rigides et sont considérées comme de bons isolants thermiques et acoustiques. Elles présentent également de bonnes qualités absorbantes. La conformation spatiale de la cellulose détermine ses propriétés physiques et chimiques.

<i>Nom Substance</i>	<i>Détails</i>
<i>Fibres de cellulose</i>	Masse volumique 1,5 à 1,55 $\text{g}/\text{cm}^3$
	Allongement à la rupture 20 à 40 %
	Coefficient de dilatation thermique 80.10 /K
	Conductivité thermique 0,065 $\text{W}/\text{m.K}$ à 23 °C

**Tableau IV.3:** Propriétés de fibre de cellulose [30]

**IV.2.1.1. Méthode suivie**

Pour avoir des fibres de cellulose les étapes ci-dessous ont été suivies :

- 1- Du carton a été coupé en petits morceaux puis laissé tremper dans de l'eau pendant 24 heures.
- 2- La pâte du carton a ensuite été séchée à l'air libre.
- 3- Le carton été broyé à l'aide d'un moulin à café manuel. (Voir fig. **IV.5**).
- 4- L'opération du broyage a été faite trois fois jusqu'à l'obtention d'une poudre de cellulose (voir fig. **IV.6**).



**Figure IV.5.** Moulin à café manuel



**Figure IV.6.** Carton en poudre

### **IV.2.2. Préparation des composites de dimension (40 X40 X 11mm<sup>3</sup>)**

Après l'obtention des trois matériaux du composite, une pesée des composants a été effectuée ;

1. Pour la préparation du composite c'est la pesée des différents matériaux utilisés dans le composite-MCP (l'acide laurique, fibre de cellulose, graphite) avec la balance électronique de précision. (fig IV.7) qui a été effectuée en premier.
2. Mélange de ces trois éléments de façon homogène et chauffage jusqu'à la fusion dans un bain marie.
3. Après obtention du mélange, on verse le contenu du récipient dans l'empreinte d'un moule en acier de forme parallélépipédique, fabriqué à cet effet. Par la suite, les plaques obtenues (40\*40\*11mm<sup>3</sup>) subissent une compression de 70 kg. (Voir fig.IV.8)

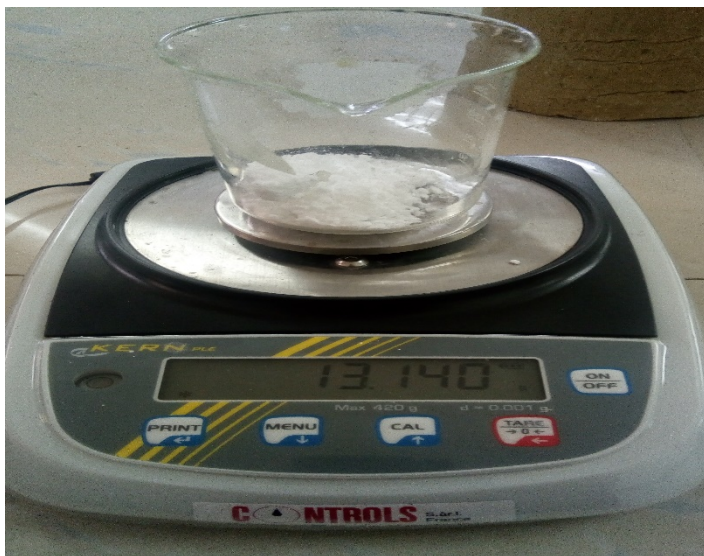
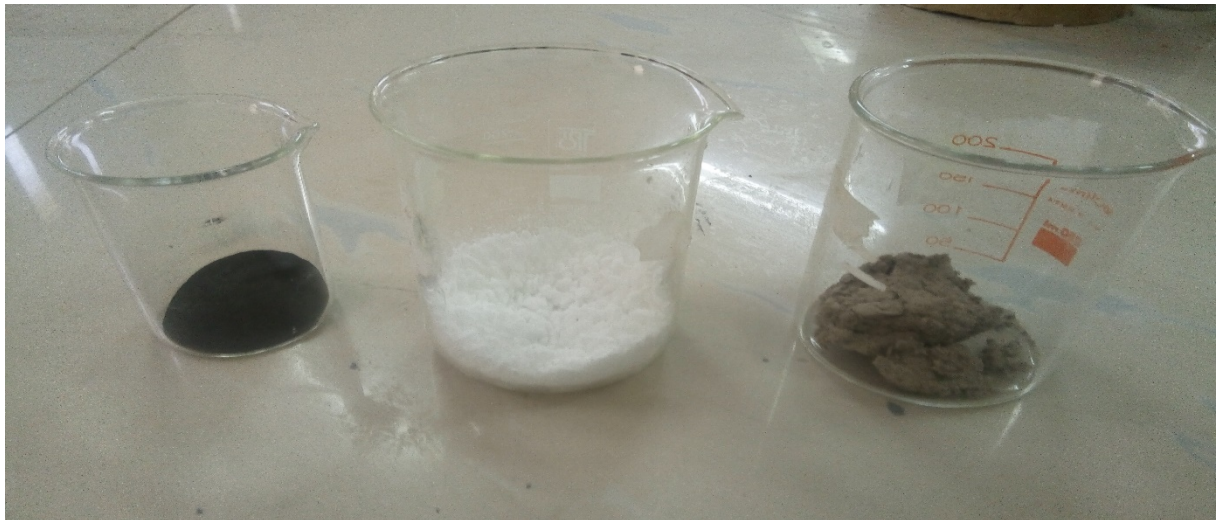


Figure IV.7 pesée des trois matériaux



Figure IV.8. Fabrication des pastilles

**IV.3. Test d'absorption d'eau (hygroscopique)**

Une pastille, parmi celles réalisés, est pesée comme nous montre la FigureIV.9. Elle est par la suite plongée dans un récipient rempli d'eau distillée (FigureIV.9a). Après 24 h, la pastille est retirée de l'eau et elle est pesée à nouveau. La masse de l'échantillon reste invariante, ce qui explique que le matériau est imperméable à l'eau.



FigureIV.9a l'immersion de la pastille dans de l'eau distillé

Sachant que la quantité des matériaux utilisée pour l'élaboration des composites MCP est estimée à 21.19g et 21g vue que j'ai réalisé quatre (4) pastilles dont deux (62% d'acide laurique, 29% Graphite, 9% Fibre de cellulose) et deux autres (72% d'acide laurique, 18% Graphite, 10% Fibre de cellulose). Et les pourcentages en masse sont comme suite :

$$\begin{array}{l}
 \text{C qui donne : } 0.62 \times 21.19 = 13.14\text{g} \quad 0.72 \times 21 = 15.12\text{g} \\
 0.29 \times 21.19 = 6.14\text{g} \quad 0.1 \times 21 = 2.1\text{g} \\
 0.09 \times 21.19 = 1.91\text{g} \quad 0.18 \times 21 = 3.78\text{g}
 \end{array}$$

**IV.3.1. Plastification des pastilles**

La plastification se fait à l'aide d'une plastifieuse faite à cet effet, et le papier en aluminium utilisé est celui de l'emballage du café en poudre (voir fig.IV.10).



FigureIV.10. Papier en aluminium



Figure IV.11. Plastifieuse



**Figure IV.12.** Pastilles plastifiées

#### IV.4. L'expérience

Le matériel nécessaire utilisé pour cette expérience :

- Module Peltier(TEC 12706)
- Deux pastilles (MCPs) 62% 72% d'acide l'aurique
- Polyuréthane
- Alimentation électrique (voir figIV.13)
- Capteurs de température SHT75(voir figIV.14)
- Pate thermique (voir figIV.15)



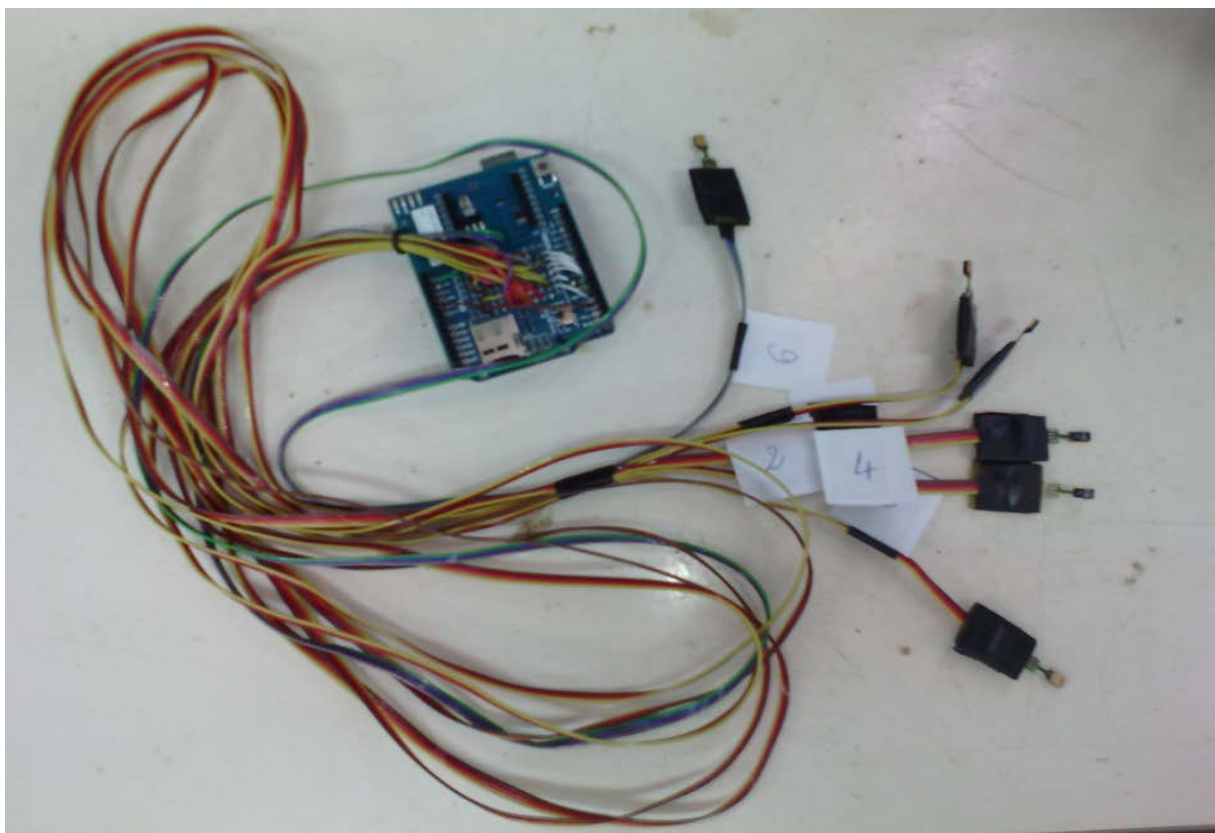
Figure IV.13 alimentation électrique

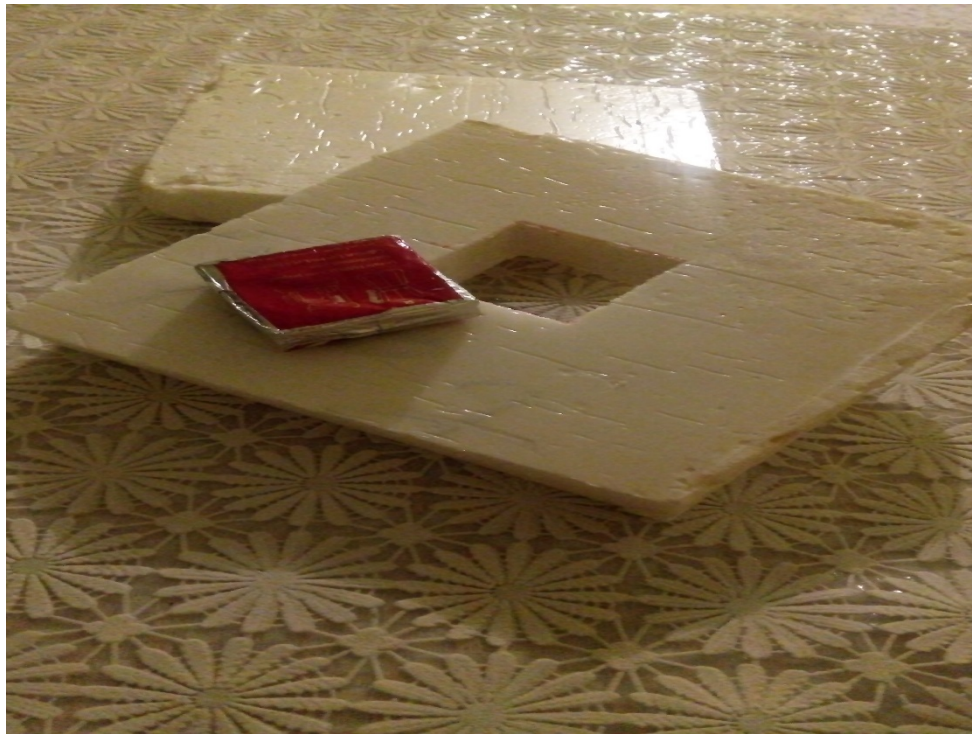
### **Description du capteur de température utilisé**

Le capteur combiné d'humidité relative et de température SHT75 est un appareil de mesure haut de gamme. En plus des capteurs d'humidité et de température, la puce contient une électronique d'évaluation, une mémoire pour les données de calibration et une interface numérique. Le capteur capacitif entièrement calibré fournit ainsi un signal de sortie numérique et n'a plus besoin d'être calibré. Le SHT75 et ses quatre broches à dimensions standard le rendent à la fois soudable et enfichable.

**Caractéristiques techniques (voir Figure IV.14)**

Catégorie	Capteur de température et d'humidité
Référence	SHT75
Connexion (capteur)	Pour circuits imprimés
Tension de fonctionnement min.	2.4 V
Tension de fonctionnement max	5.5 V
Tension de fonctionnement	2.4 - 5.5 V
Température min.	-40 °C
Température max	+125 °C
Longueur	19.5 mm
Larg.	5.1 mm
Hauteur	3.1 mm

**Figure IV.14** capteurs de températures



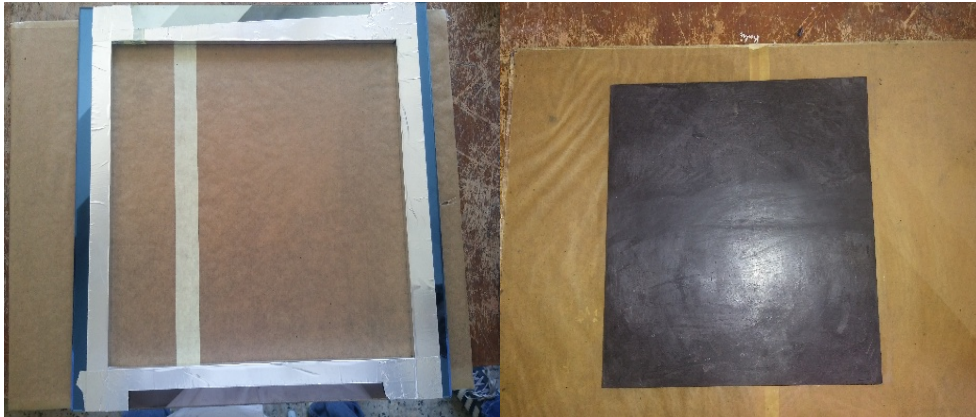
**Figure IV.15** Polyuréthane



**Figure IV.16** Pate thermique

L'utilisation du polyuréthane dans cette expérience est d'isoler le Peltier et avoir un flux unidirectionnel.

Aussi l'ajout de la pâte thermique, vue qu'elle a une très bonne conductivité thermique  $>1.93 \text{ W/m.K}$  et le but aussi est d'avoir un bon contact entre le Peltier et la pastille (MCP).



**Figure IV.17:** Moule de verre

**Figure IV.18 :** plaque ( $300 \times 300 \times 9 \text{ mm}^3$ )

### Calcul de la conductivité thermique de la plaque

Pour la mesure de la conductivité thermique du matériau composite, nous avons utilisé un CT mètre.

#### • Le CT mètre :

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif. Il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements (**Figure IV.19**)

#### • Description de l'appareil :

Une armoire à charnières en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température constante de façon à ce que la plaque soit sensiblement isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt, proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée d'une manière électronique à une température de consigne et

l'entrée de la température par voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignée à vis situé en haut de l'armoire.

Un indicateur à cadran dont la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens de l'épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70 °C).

Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.



Figure IV.19 : CT mètre

- **Méthode d'essai**

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de 300×300 mm.

La résistance thermique se situe entre 0,1 et 1,4 m<sup>2</sup>.K/W. En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des feuilles de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide.

Pour les spécimens granuleux, comme le sable et le gravier une plinthe de bois est fournie pour y mettre le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

- **Méthode de calcul**

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% lorsqu'elle ne change pas.

A chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de  $T_1$  et  $T_2$  et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre  $T_1$  et  $T_2$  sont calculées.

Selon que les tapis de caoutchouc à la silicone soient utilisés ou non, la conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I_s[(K_1+(K_2*T)) + ((K_3+(K_4*T)*HFM)) + ((K_5+(K_6*T))*HFM^2)]}{dT} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$\lambda$  : conductivité thermique

$I_s$  : épaisseur du spécimen en m

$dT$  : différence de température en °C ( $T_1-T_2$ )

$T$  : température moyenne en °C ( $(T_1+T_2)/2$ )

HFM : sortie du débitmètre (HeatFolowmetre Reading) en mV.

$T_1$  : température de la plaque chaude.

$T_2$  : température de la plaque froide.

$$K_1 = 88.1389$$

$$K_4 = 0.8037$$

$$K_2 = -2.7829$$

$$K_5 = 0.7954$$

$$K_3 = -21.3064$$

$$K_6 = -0.0189$$

Avec : température chaude = 27°C

Température froide = 12.4°C

Température moyenne = 22.1°C

Différence de température = 9.8°C

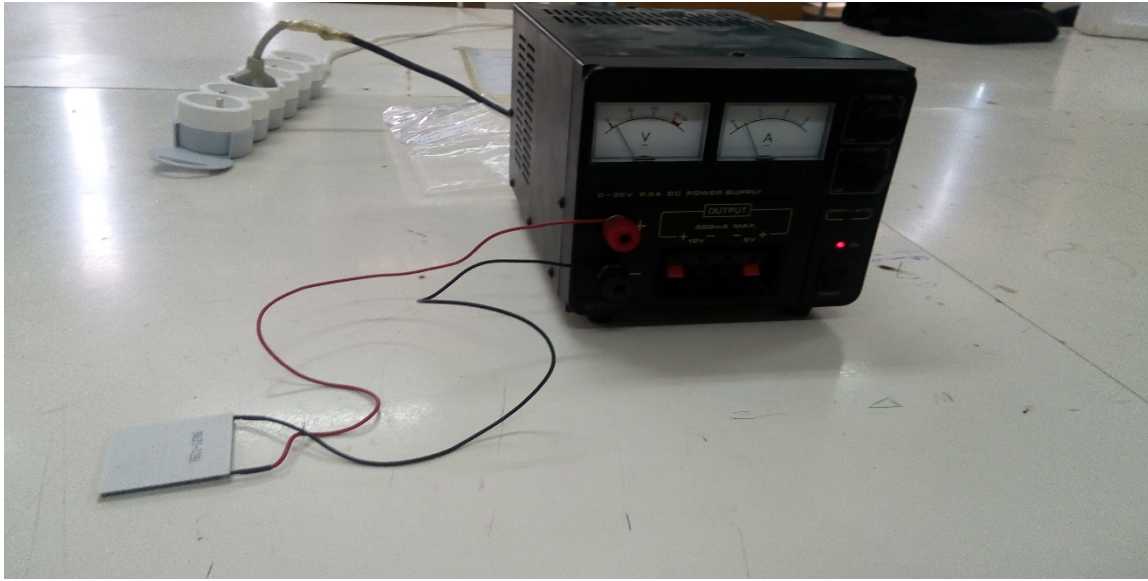
HFM = 23 mv

Donc :  $\lambda = 0.135$  w/m.k

#### IV.4.1. Les tests

On a effectué trois tests :

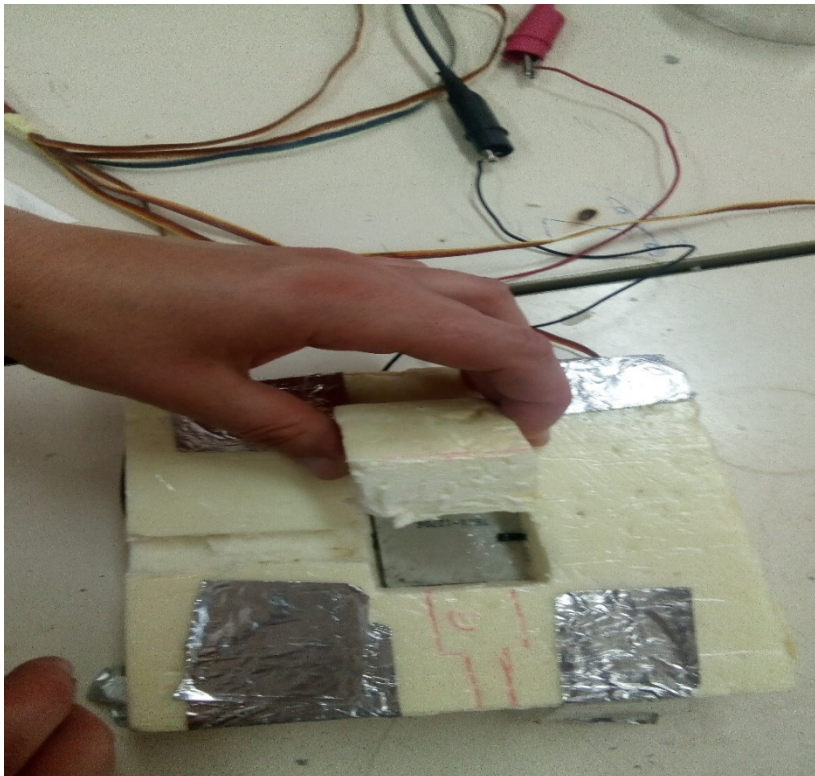
Mais avants ces tests on a alimenté le Peltier pour savoir laquelle de ces plaques est chaude ou froide. (Voir fig. IV.20)



**Figure IV.20** tests Peltier

1-Peltier seul isolé sans refroidissement (voir fig.IV.20)

On lui place trois capteurs de températures un sur la plaque froide et l'autre sur la plaque chaude la dernière température ambiante.



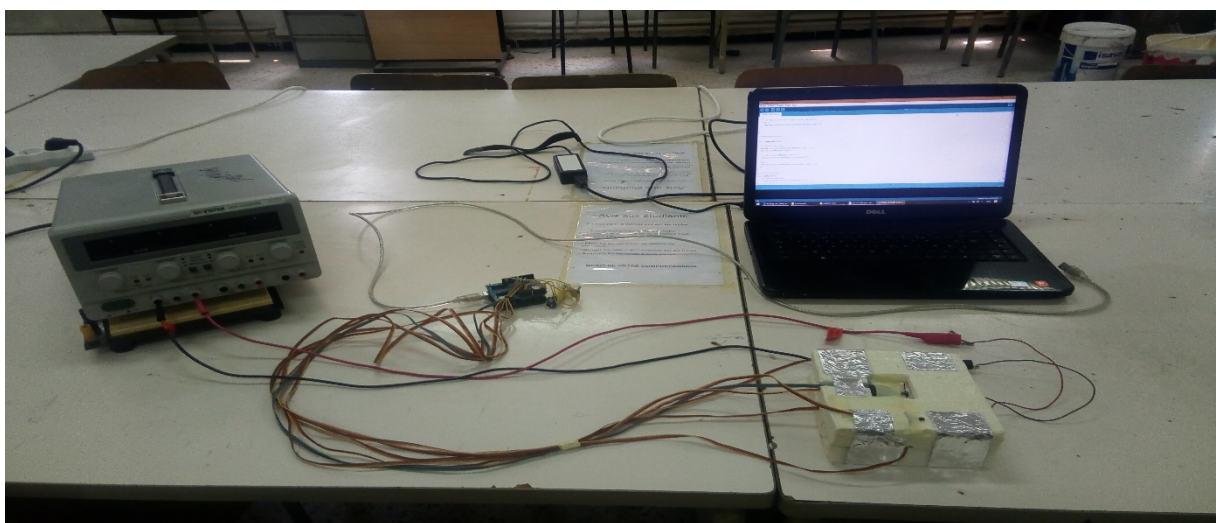


**figIV.21** calcule de température sur le Peltier sans refroidissement

**2-**le deuxième tests la pastille 62% al et 29% gr et 9% fc voir figure figIV.21

On a utilisé 6 capteurs de températures

Le 1<sup>er</sup> pour la face froide, après le 2eme pour la face chaude, 2 capteurs pour le mcp chacun sur une face, un autre pour calculer la température dégagée par le mcp, et le dernier pour la température ambiante.



**Figure IV.22**test 2 [62% al, 29% gr, 9% fc]

**3-**le dernier test avec la pastille de 72% al, 18% gr, 10% fc

Même procédure avec le test 2 précédant mais le résultat obtenu est différent.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a les critères de choix des matériaux utilisés, et les étapes suivies en détails pour la réalisation du composite ainsi que le mode suivie pour faire les tests.

Pour le 1<sup>er</sup> test sans refroidissement le Peltier monte en température et produit beaucoup de chaleur.

Pour le 2<sup>ème</sup> test [62% AL,29% GR,18% fc]après l'ajout du composite la température froide est diminuée de 20.63°C.

Pour le 3<sup>ème</sup> test [72% AL,18% GR,10% FC] la température a été diminuer de 23.63°C.

# Chapitre V

# **Résultats et discussion**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différentes opérations faites dans la partie expérimentale.

**Test 1 sans refroidissement (module Peltier)**

Lorsde cette expérience nous avons applique une tension de 3.7 V et une intensité de 0.83 A ce qui donne une résistance de  $4.48\Omega$  et une puissance de 3.07W, le module est bien isolé dans du polyuréthane pour éviter les pertes latérales. Les résultats obtenus son présenté sous forme de graphe ci-dessous.

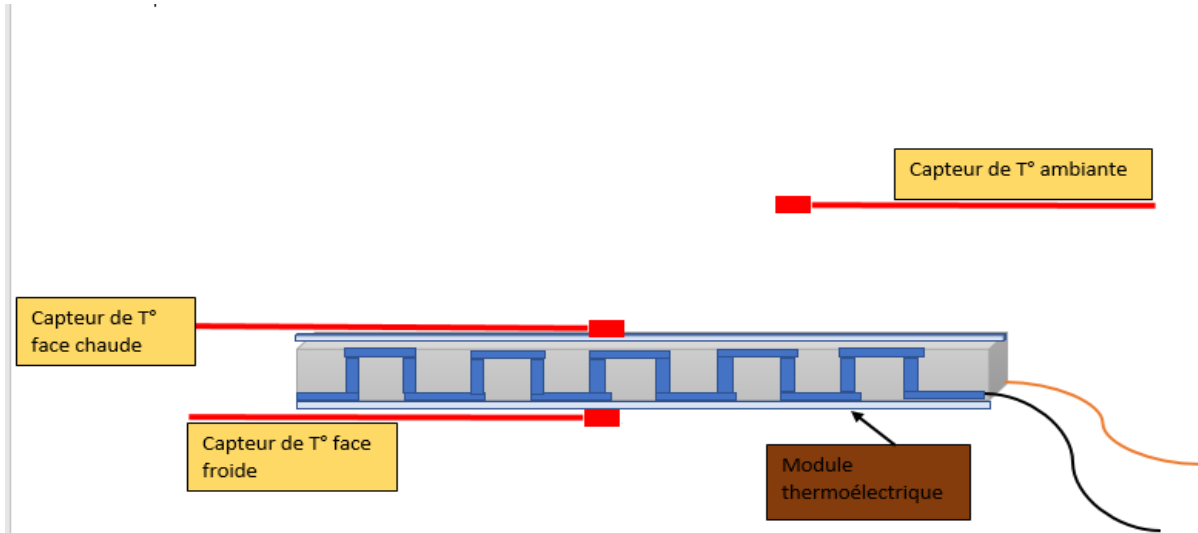


Figure V1 : schéma test1 sans refroidissement

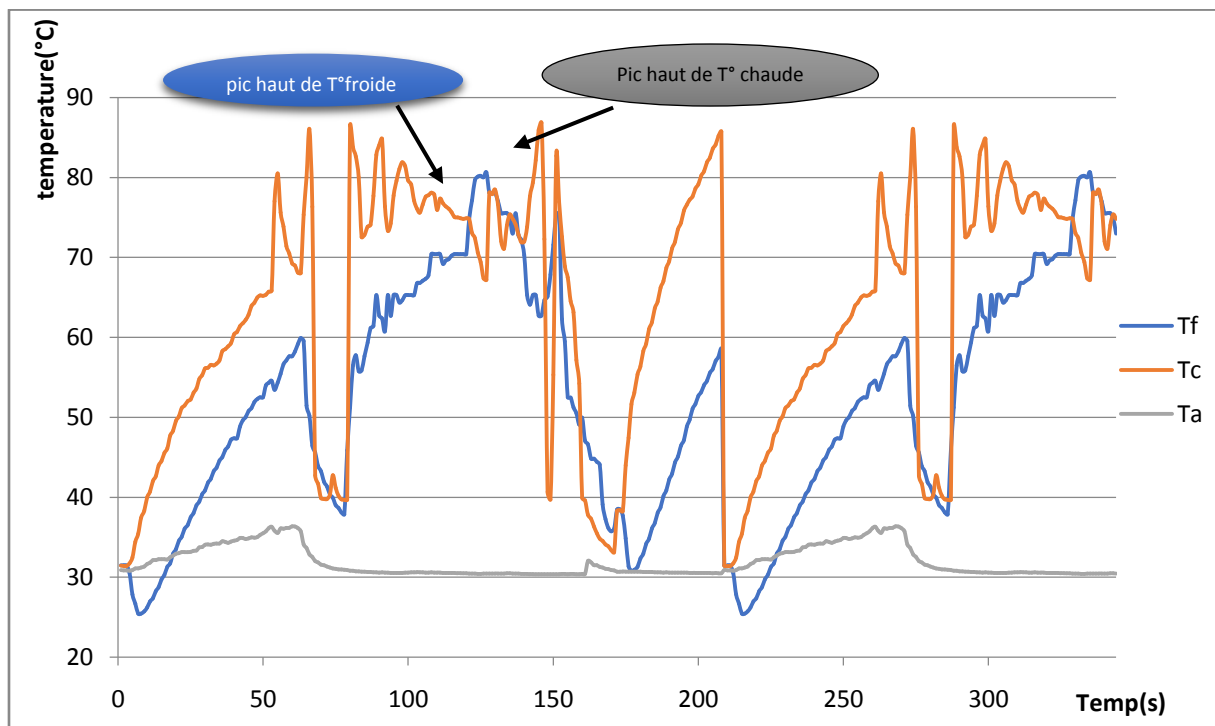


Figure V2 : l'évolution des température test 1 sans refroidissement

$T_f$  est la température de la plaque froide du module.

$T_c$  est la température de la plaque chaude du module.

$T_a$  est la température ambiante.

D'après la courbe on peut déduire:

	Limite haute	Limite basse
Température de la plaque froide	80.66	25.45
Température de la plaque chaude	86.85	31.49
Température ambiante	36.36	30.36

Tableau V.1 représente la limite des températures

### Discussion

Le module thermoélectrique atteint un point où il ne peut pas transférer suffisamment du froid (indiqué sur le graphe la différence de température entre la plaque chaude et froide et de  $6.19^{\circ}\text{C}$  très proche, ce qui explique que la chaleur est alors transférée au côté froid du module, l'évolution du graphe a comme effet de régulation, et la température ambiante ne change pas vraiment.

### Test 2 : refroidissement du module avec la pastille 1 de MCP[62% d'acide laurique, 29% graphite, 9% fibre de cellulose]

Entre le module Peltier et le composite on a rajouté de la pâte thermique qui a une très bonne conductivité thermique et elle permet la dissipation de chaleur au contact.

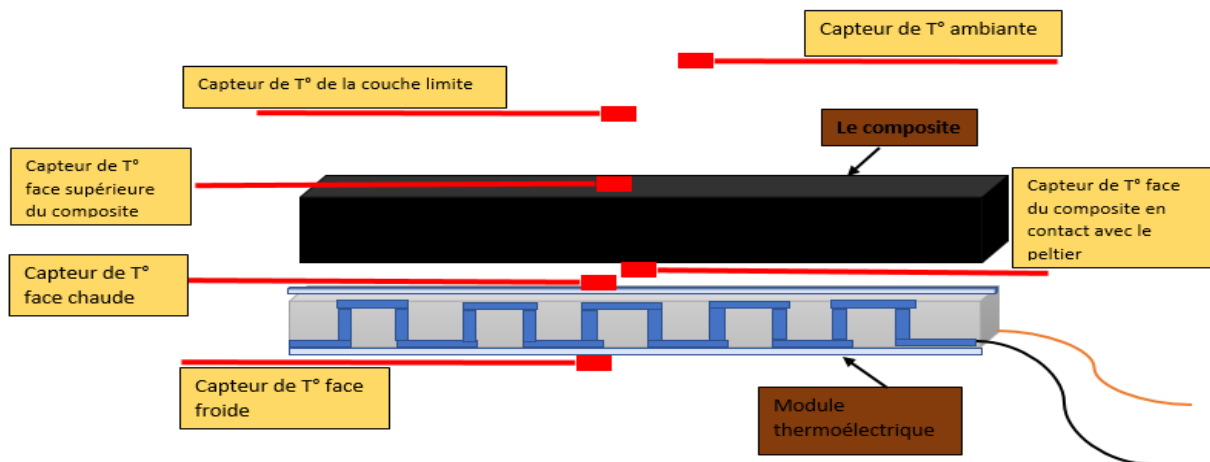


Figure V3 : schème test2

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps sur le module Peltier et le composite.

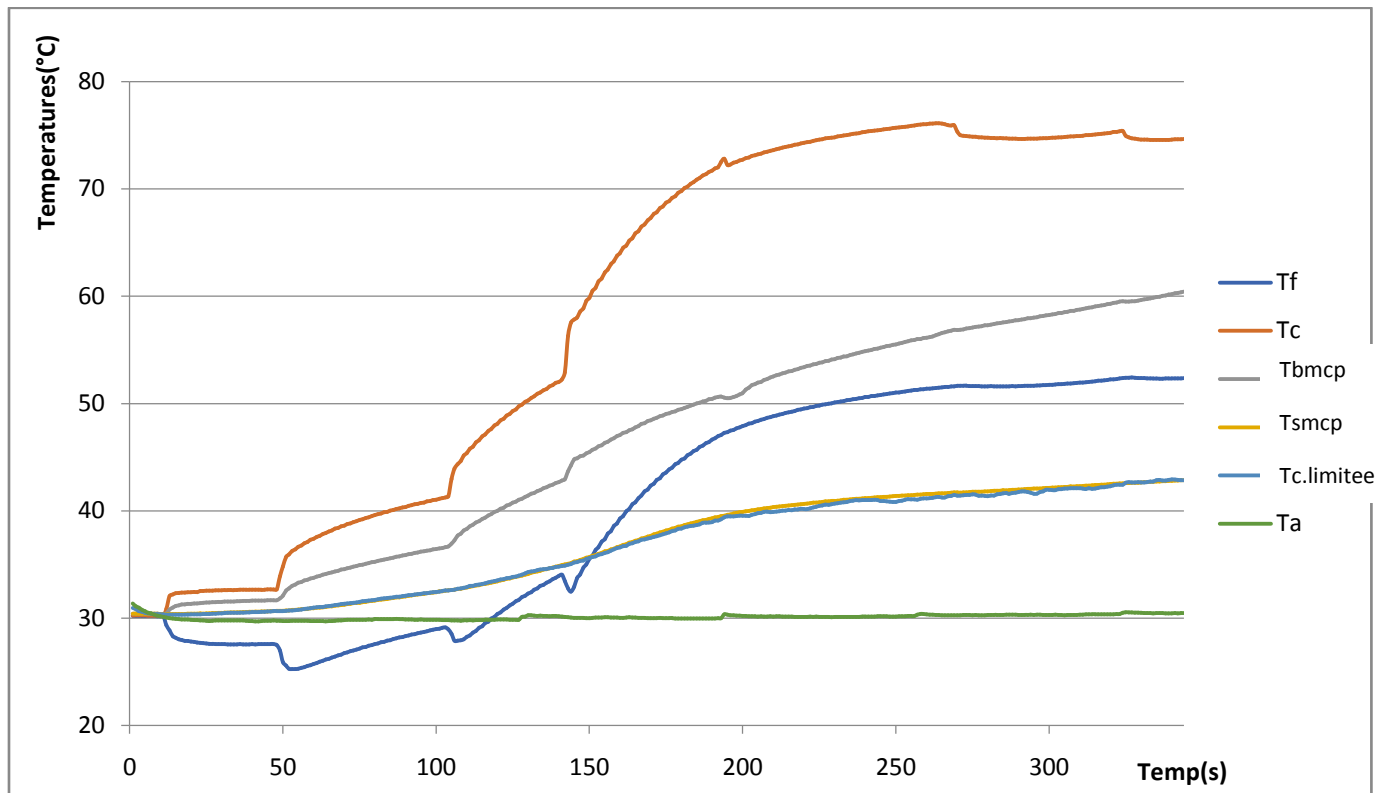


Figure V4 : l'évolution des température test 2

$T_f$  Température de la plaque froide

$T_c$  Température de la plaque chaude

$T_{b\ comp}$  Température de la face du composite en contact avec le Peltier

$T_{s\ comp}$  Température de la face du composite exposée vers l'extérieur

$T_{c.limite}$  Température de la couche limite

$T_a$  Température ambiante

	TF	TC	Tbcomp	Tscomp	Tc.limite	TA
<b>Limite basse</b>	25.25	30.24	30.41	30.38	30.31	29.70
<b>Limite haute</b>	52.41	76.11	60.41	42.85	42.86	31.09

Tableau V.2 : limite des température test 2

Pour cette expérience on a appliqué une tension de 4V et intensité comprise entre (0.23-0.83)A.Ce qui nous donne une résistance de  $4.82 \Omega$  et une puissance de 3.32W.

### Discussion

Ce graphe présente l'évolution des températures sur la face du composite et du module Peltier en fonction du temp. Tout d'abord pour la courbe de la face chaude on peut la diviser en trois paliers. Le premier est légèrement stable à environ  $33^{\circ}\text{C}$ , pour le deuxième palier la température chaude augmente avec le temps jusqu'à  $76.11^{\circ}\text{C}$ , ensuite la température commence à se stabiliser, et la courbe du composite augmente, ce qui explique l'absorption de la chaleur à partir de la température de  $45^{\circ}\text{C}$ . On remarque une légère stabilité ce qui explique que le composite entame la phase de fusion et la chaleur a été rejetée et absorbée par le composite. En outre la température de la plaque froide a été diminuée de ( $28.24^{\circ}\text{C}$ ) et la face chaude a été diminuée de  $10.74^{\circ}\text{C}$ .

### Test 3 : refroidissement du module avec la pastille 2 de [72% d'acide laurique, 18% graphite, 10% fibre de cellulose]

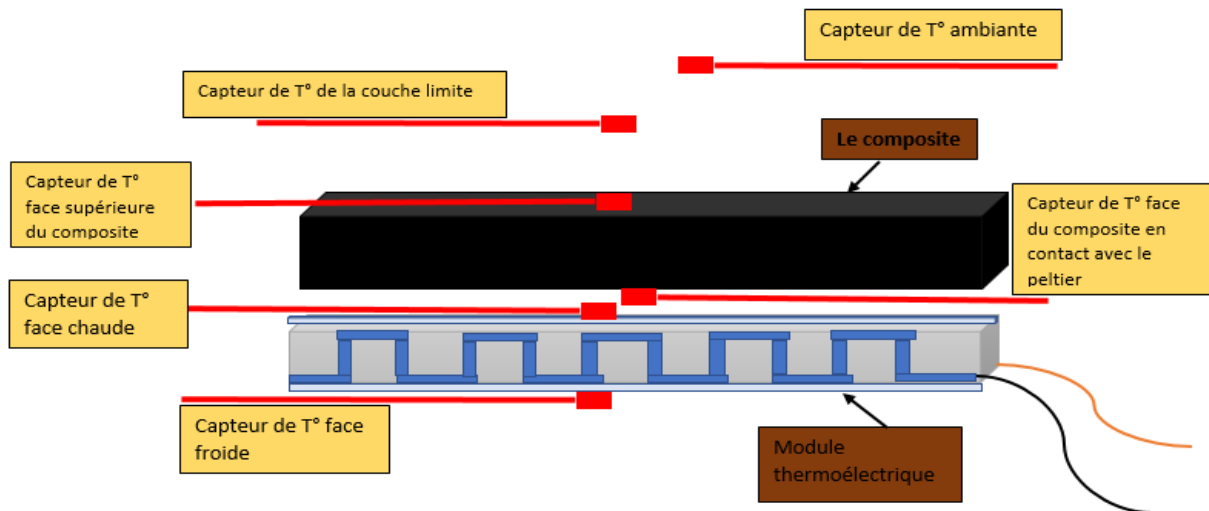


Figure V5 : schéma test3

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps sur le module Peltier et le composite.

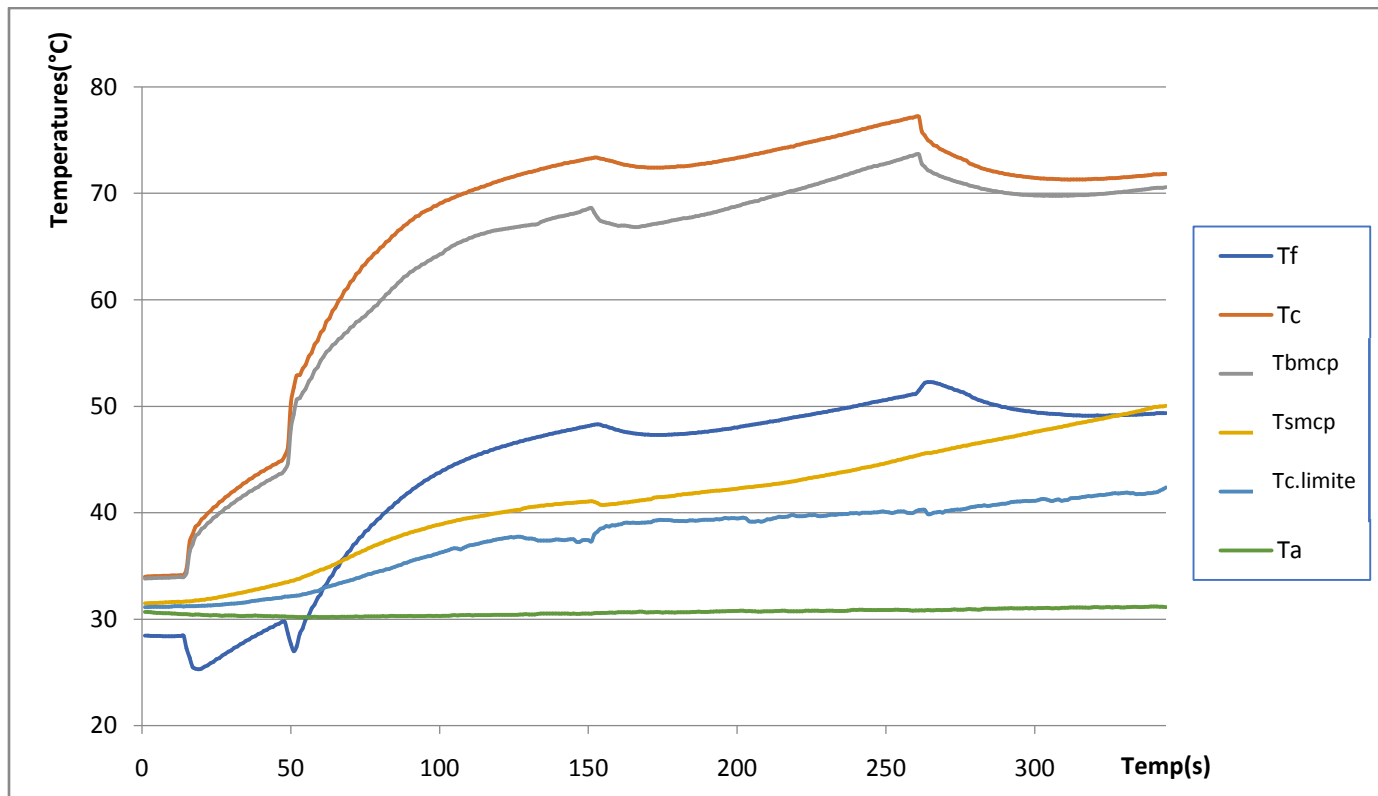


Figure V6 : l'évolution des température test 3

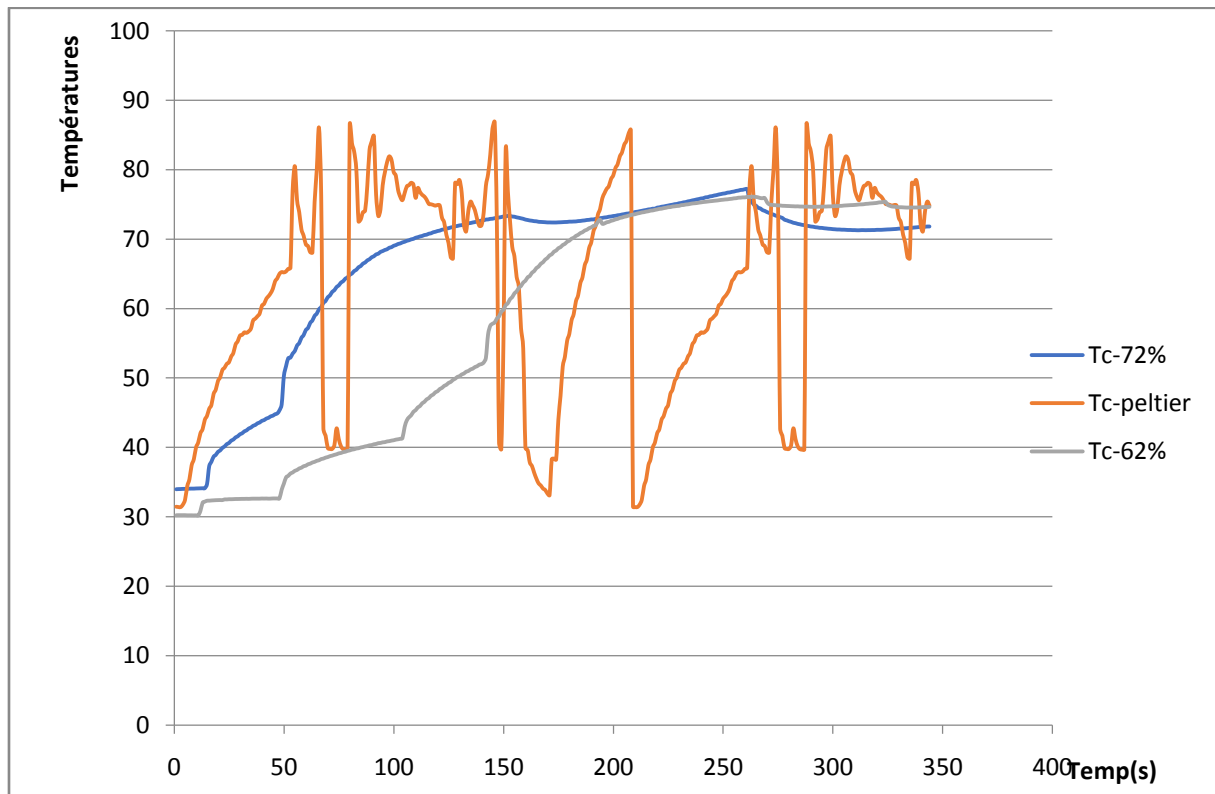
°C	Tc	Tf	Tbcomp	Tscomp	Tc. Limite	TA
<b>Limite basse</b>	33.98	25.30	33.79	31.49	31.13	30.17
<b>Limite haute</b>	77.22	52.27	73.67	50.06	42.38	31.19

Tableau V.3 : limite des température test 3

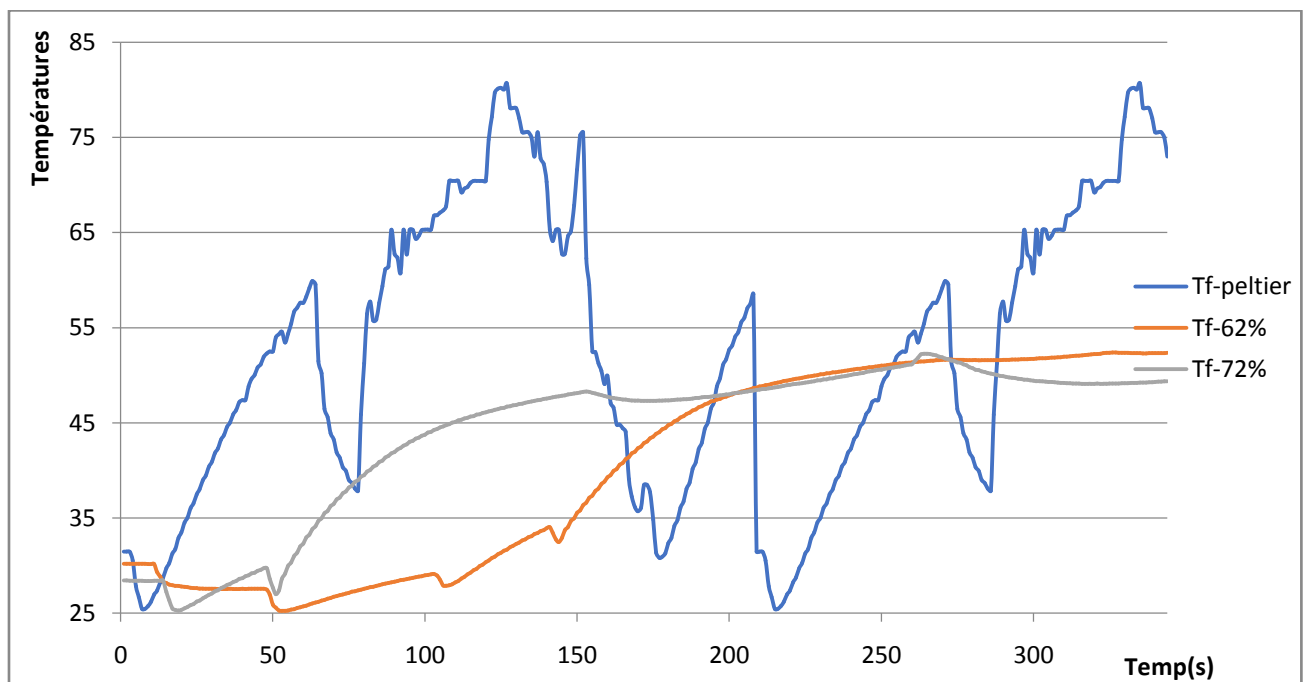
### Discussion

On remarque que le composite a absorbé beaucoup de chaleur lorsqu'on voit que la température du côté composite en contact avec le module augmente jusqu'à stabilisation, une chose est sûre que la pastille a changé de phase complètement, comme indiqué sur le graphe

la phase de fusion à commencer après 2mn et la température froide du 3eme test par rapport au 1<sup>er</sup> test a été diminuée de 28.39°C.



**Figure V7** Comparaison entre les températures chaude du Peltier et les deux pastilles du composite



**Figure V8** Comparaison des températures froide du Peltier et deux pastilles du composite

**Tableau récapitulatif**

	<b>Sans refroidissement</b>	<b>Pastille 62%al,29%GR,9%FC</b>	<b>Pastille 72%AL,18GR,10FC</b>
<b>Température froide</b>	80.66	52.41	52.27
<b>Température chaude</b>	86.85	76.11	77.22

**Conclusion**

D'après les trois tests effectués on remarque que le Peltier dissipe beaucoup d'énergie calorifique pour peu de froid. Donc pour réussir un bon transfert de chaleur on a dû rajouter de la pâte thermique sur la face chaude du Peltier (2 tubes et demi) qui a une bonne conductivité thermique en plus le composite. Si on prend le test 2 et le test 3 « en comparant les températures, celle de la face froide diminue de  $0.14^{\circ}\text{C}$  et la température du composite augmente de  $13.26^{\circ}\text{C}$  ce qui explique qu'il y avait une bonne dissipation et absorption de chaleur. Pour le MCP les essais effectués au laboratoire sur les plaques de MCP avec un point de fusion approprié associées à un Peltier donnent des résultats encourageant pour une application des MCP dans le refroidissement des composants électroniques.

# **Conclusion général**

## CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons entrepris, nous a permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur le module Peltier et démontre le concept de refroidissement thermoélectrique. Cette expérience nous a permis de mettre en évidence le phénomène du stockage et déstockage de la chaleur dans un matériau à changement de phase. Le but de ce projet est de refroidir un module Peltier au lieu et à la place d'un microprocesseur, vu qu'ils ont la même source de chaleur et dégagent même quantité de chaleur.

- Les résultats du 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> test montrent que l'ajout de la pâte thermique entre le composite et le Peltier a amélioré le transfert de chaleur.
- La composition (MCP, GRAPHITE, ACIDE LAURIQUE) du composite de 72% d'acide laurique a pu diminuer la température froide de 0.14°C par rapport à celle de 62% d'acide laurique ce qui montre que l'acide laurique a une bonne conductivité thermique.
- En conclusion les modules thermoélectriques peuvent abaisser la température du microprocesseur avec succès.

Ces essais montrent que l'on peut très bien envisager le refroidissement des microprocesseurs par des batteries de MCP en association avec les systèmes classiques de refroidissement.

Comme toute œuvre humaine ce travail ne peut être jugé comme terminé et nous sommes à l'écoute pour toute personne qui peut y apporter une suggestion ou critique pour mieux parfaire le document.

## Référence bibliographiques

- [1] la thermoélectricité Roux-Briffaud Jonas MP1 A2 26/05/2008
- [2] Synthèse et Etude des Matériaux Thermoélectrique du Système  $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$  Djalila Boudemagh
- [3] la thermoélectricité Roux-Briffaud Jonas MP1 A2 26/05/2008
- [4] THESE : MODÉLISATION ET RÉGULATION THERMIQUE D'UN ENSEMBLE DE COMPOSANTS ÉLECTRONIQUE Présenter ALINE Lemoine
- [5] la thermoélectricité Roux-Briffaud Jonas MP1 A2 26/05/2008
- [6] Les technologies de refroidissement Le Dr Jens Thielmann est biologiste et chef Produit Croissance & Stockage chez BINDER GmbH. Il est responsable des différents incubateurs utilisés dans la recherche médicale, scientifique et pharmaceutique pour l'incubation de bactéries ou de cultures cellulaires, ainsi que des congélateurs à très basse température pour le stockage à long terme d'échantillons sensibles.
- [7] Thermal Design:HeatSinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact HeatExchangers, and Solar CellsHoSung Lee © 2011 John Wiley& Sons, Inc.
- [7][www.formules-physique.com/categorie/596](http://www.formules-physique.com/categorie/596)
- [8] STPI/P6-3/2008 – Conversion de la chaleur en électricité / Etude du module thermoélectrique
- [9] [www.digikey.fr](http://www.digikey.fr)
- [encyclopedie\\_universelle.fracademic.com/119706/effet Thomson](http://encyclopedie_universelle.fracademic.com/119706/effet-Thomson)
- [9] [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)
- [10]processeur fonctionnement
- [11] [www.materiel-informatique.Be](http://www.materiel-informatique.Be)

## Référence bibliographiques

[12] [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)

[13] <http://www.clashinfo.com>

[14] H. Mehling et L.F Cabeza, Heat and cold storage with PCM, springer-Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.

[15] ABHAT A, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage material. Solar energy, VOL, 30, NO313-332.5(1983).

[16] SHARMA S.D SAGARAK. "Latent heat storage material and system a review". International journal of green energy 2: 1-56. (2005).

[17] LANE G.A phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. Solar energy materials and solar cells 27:135-160 (1992).

[18] K. Pielichowska et K Pielichowski «phase change materials for thermal energy storage», progresse in material science, VOL.65, no.0, pp 67-123. Aug 2014.

[19] M. K Rathod et J. Banerjee; «Thermal stability of phase change material, used in latent heat energy storgesysteme»: review, Renwable and sustainable energy Review, Vol 18. Pp 246-258, Feb 2013.

[20] SAMSA Newsletter «sugar Alcohol based Materials for seasonal storage application» 2015.

[21] M. M. Farid. A M. Khadhair, S.A Rzack et S. Al Hallaj «A Review on phase change materials and application» Energy conversion and management, Vol 45, no 9-10, pp. 1597-1615 June 2004.

[22] Amina Akrouche. Mémoire de magister, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans les matériaux a changement de phase, Ecole des mines de Nantes 29/10/2011.

## Référence bibliographiques

- [23] R. Velraj, R. V Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer «Heat transfer enhancement in latent heat storage system». Sol. Energy. Vol. 65. No 3, pp 171-180 Feb 1999.
- [25] AdeleSoupart-Caron. Stockage de chaleur dans les matériaux a changement de phase. Genie des procedes. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAI078>. <tel-01266813>
- [26] Matthieu Martinelli. Stockage d'´energie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. <tel-01412771v2>
- [27] thèse : Élaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyéthylène présenté par : Amaury Lepetit
- [28] BAHLOULI Nadia, Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle.
- [29] J.M. Berthelot, matériaux composites, (1996). Comportement mécanique et analyse des structures, Masson 2e Edition (1996).
- [30] Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES--Edition 2011
- [31] [WWW.wikipedia.COM](http://WWW.wikipedia.COM)
- [32] synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acide/ activated Carbon composites as phase change materials for thermal energy storage  
ZHI CHER.FENG SHAN, LEI CAO, GUIYIN FANG  
School of physics nanjing university nanjing 210093. CHINA.