

# **République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Blida-1

Faculté des Sciences et Technologies

**Département des Energies Renouvelables**



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

**Option : Conversion Photovoltaïque**

Thème :

## **Conception et Fabrication d'un conservateur Médical portable Solaire a effet Peltier**

**Réaliser par :**

**AMMOUR Merouane**

**GUECHIDA Rabeh**

**Soutenu devant le jury composé par :**

**Pr. N. SAID**

**USDB**

**Président**

**Pr. B. CHEKNANE**

**USDB**

**Examineur**

**Promoteur**

**Co- Promoteur**

**Juillet 2023**

# *Remerciements*

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

On adresse nos remerciements à notre professeur et notre encadreur Pr SAID Noureddine. Merci pour vos précieux conseils et vos compétences techniques, vos encouragements, vos orientations. Merci pour votre gentillesse, et votre aide qui nous a permis de finaliser ce travail

Nous remercions également notre Co-promoteur Pr CHEKNANE Benamar pour nous avoir accueillis chaleureusement dans son équipe du laboratoire et son aide.

On tient à remercier aussi notre chef d'option Mr DOUMAZ Toufik pour son aide et pour tous les matériels fournis pour élaborer notre travail et pour tous ses conseils et son encouragement et aussi d'avoir suivi alternativement et activement la progression de notre travail.

Nos remerciements sont dédiés aussi à notre chef de département Dr BOUZAKI Mohamed Mostafa pour son aide dans la simulation numérique et pour faciliter les papiers administratifs pour notre stage.

On tient à remercier aussi chef département d'électronique et Mr Yahia Pour leurs efforts et pour fournir un lieu de travail sur notre projet.

Nous remercions tous les membres du jury d'examiner ce travail et de l'évaluer.

Enfin, nous remercions, également, toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents, Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour*

*Ma mère et mon Père Il n'y a pas de mots pour décrire l'étendue de mes remerciements et de ma gratitude envers vous, peu importe ce que vous faites et quoi que vous donniez, je n'accomplirai pas ce que vous avez donné et vous avez veillé des nuits pour notre confort, que Dieu prolonge votre vie*

*Que je leurs porte, ni la profonde gratitude que je leurs témoignes pour tous les sacrifices*

*Qu'ils n'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir*

*Répondu aux espoirs qu'ils ont fondé en moi, et que modeste travail soit l'exaucement de leurs vœux,*

*A mon meilleur ami Nour El houda qui a toujours été à mes côtés à tout moment et en toutes circonstances.*

*A mon binôme GUECHIDA Rabeh Ce fut un honneur de travailler avec lui sur ce projet*

*A tous les membres de ma famille, petits et grands.*

*A toute la promo master conversion PV, puisse Dieu mes garder, éclairer leurs routes et les*

*Aider à réaliser leurs vœux les plus chers.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*AMMOUR MEROUANE*

# Dédicace

*Je dédie ce travail a :*

*Ma mère et mon Père Il n'y a pas de mots pour décrire l'étendue de mes remerciements et de ma gratitude envers vous, peu importe ce que vous faites et quoi que vous donniez, je n'accomplirai pas ce que vous avez donné et vous avez veillé des nuits pour notre confort, que Dieu prolonge votre vie*

*Que je leurs porte, ni la profonde gratitude que je leurs témoignes pour tous les sacrifices Qu'ils n'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir Répondu aux espoirs qu'ils ont fondé en moi, et que modeste travail soit l'exaucement de leurs vœux.*

*A mon binôme AMMOUR MEROUANE Ce fut un honneur de travailler avec lui sur ce projet*

*A mon précieuse amie Meriem Ihcane Douifi Qui a été une grande source d'aide pour nous, un ami merveilleux qui répand la positivité partout*

*A tous les membres de ma famille, petits et grands*

*A tous mes amies*

*A toute la promo master conversion PV, puisse Dieu mes garder, éclairer leurs routes et les Aider à réaliser leurs vœux les plus chers.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*GUECHIDA RABEH*

**المخلص:** الهدف من هذا المشروع هو تصميم وتنفيذ محفظة محمولة للقاحات أو الأنسولين بسعر منخفض. تتكون المحفظة من غرفة معزولة حراريًا، ووحدة بلتبير (وحدة كهروحرارية)، وتزويد بالطاقة من خلال لوحة شمسية، وإلكترونيات تنظيمية. تم تصميم هذه المحفظة الشمسية لتلبية متطلبات الحفظ الطبي في المناخ الجزائري. تم اختيار استقلالية بدون ضوء الشمس لمدة 24 ساعة متواصلة مع درجة حرارة داخل الحجر المبردة تتراوح بين 2 و8 درجة مئوية. يتم اعتماد نهج دراسة العناصر المنفصلة في هذه الدراسة، حيث يتم تحديد واختبار كل عنصر أساسي من المنتج بشكل فردي. يتم ترك تجميع وتجربة المحفظة النهائية وفقًا للمواصفات التقنية المفروضة للمرحلة الأخيرة.

في المرحلة الأولى من المشروع، يُنصح بوضع مواصفات تقنية تحدد خصائص كل مكون وفقًا لكمية اللقاح أو الأنسولين ودرجة الحرارة ووقت الحفظ المطلوب. بعد تحديد واقتناء عناصر المحفظة، يتم تصميمها مع مراعاة البيانات المناخية وظروف الاستخدام.

تتمثل المرحلة الثانية من المشروع في تجميع وتجربة المحفظة في ظروف الاستخدام الفعلية لفترة زمنية كافية.

تتمثل المرحلة النهائية من المشروع في إجراء تحليل تكلفة وفي حالة الاقتضاء دراسة فنية واقتصادية لاحتمالية إطلاق هذا المنتج في السوق.

**الكلمات المفتاحية:** حافظة محمولة، وحدة تأثير بلتبير (وحدة كهروحرارية)، لوحة كهروضوئية، إلكترونيات تنظيمية، استقلالية.

**Résumé :** L'objectif de ce projet est de concevoir et réaliser un conservateur portable de vaccin ou d'insuline à bas prix. Le conservateur est constitué d'une chambre isotherme régulée, d'un module à effet Peltier, d'une alimentation par panneau photovoltaïque et d'une électronique de régulation. Ce conservateur solaire est dimensionné pour répondre aux exigences demandées pour la conservation médicale en climat algérien. Une autonomie sans soleil est choisie égale à 24 h consécutives avec une température à l'intérieur de l'enceinte frigorifique comprise entre 2 et 8 °C. L'approche d'étude par éléments séparés est privilégiée dans cette étude. C'est ainsi que chaque élément essentiel du produit est dimensionné et testé individuellement. L'assemblage et l'expérimentation du conservateur final selon les caractéristiques techniques imposées sont laissés à la dernière étape.

Dans la première phase du projet, il est préconisé l'établissement d'un cahier des charges dans lequel sont précisées les spécificités techniques de chaque composant en fonction de la quantité, la température et le temps de conservation de l'insuline ou le vaccin à conserver. Après

identification et acquisition des éléments du conservateur, le dimensionnement de celui-ci est réalisé en tenant compte des paramètres météorologiques et des conditions d'utilisation.

La deuxième phase du projet consiste à assembler et expérimenter le conservateur en conditions réelle d'utilisation sur une période assez conséquente.

La phase finale du projet consiste à réaliser une analyse de coût et le cas échéant une étude technico-économique dans l'éventualité de mettre ce produit sur le marché.

**Mots clés:** conservateur portable, module à effet Peltier (thermoélectrique), panneau photovoltaïque, électronique de régulation, Autonomie.

**Abstract:** The objective of this project is to design and develop an affordable, portable vaccine or insulin cooler. The cooler consists of a regulated thermal chamber, a Peltier module, a photovoltaic panel for power supply, and a control system. This solar cooler is designed to meet the requirements for medical storage in the Algerian climate. It is designed to have a 24-hour autonomy without sunlight, maintaining a temperature inside the refrigerated compartment between 2 and 8 °C. The study follows a component-based approach, where each essential element of the product is dimensioned and tested individually. The assembly and experimentation of the final cooler, according to the specified technical characteristics, are left for the last stage.

In the first phase of the project, it is recommended to establish a specification document that outlines the technical requirements of each component based on the quantity, temperature, and storage time for insulin or vaccines. After identifying and acquiring the components, the sizing of the cooler is performed, taking into account meteorological parameters and usage conditions.

The second phase of the project involves the assembly and real-life experimentation of the cooler over a significant period.

The final phase of the project involves conducting a cost analysis and, if applicable, a techno-economic study to assess the possibility of bringing this product to the market.

**Keywords:** portable conservator, Peltier module, Photovoltaic panel, Control electronics, Autonomy.

# Nomenclature

<b>Ac</b>	surface des parois du refroidisseur, $m^2$
<b>Am</b>	Surface de section transversale du TEM, $m^2$
<b>Apv</b>	Surface du module PV recevant l'irradiation solaire, $m^2$
<b>Ca</b>	Chaleur spécifique de l'air humide, $1,3 \text{ kJ/m}^3$
<b>COP</b>	coefficient de performance
<b>Cp</b>	Capacité calorifique spécifique des stylos, $\text{kJ/kg.K}$
<b>E</b>	L'énergie fourni par le panneau solaire, Wh
<b>Eb</b>	Nombre de fois que l'air du refroidisseur est échangé par jour
<b>G</b>	Éclairement global, $\text{W/m}^2$ .
<b>Gp</b>	Éclairement global reçu à la surface de panneau solaire, W $Gp = G * Apv$
<b>Imax</b>	Courant électrique maximum d'entrée dans le TEM, A
<b>K</b>	Fr Note du ventilateur, W
<b>K</b>	Conductance thermique du matériau du TEM, W/K
<b>Ki</b>	Conductivité thermique de la mousse de polyuréthane, $\text{W/m.K}$
<b>Km</b>	Conductivité thermique du tellurure de bismuth, $\text{W/m.K}$
<b>Kp</b>	Conductivité thermique de la paroi en polyuréthane, $\text{W/mK}$
<b>Mp</b>	Masse des stylos à insuline, kg
<b>P</b>	La puissance de panneau. W
<b>Pc</b>	Consommation d'énergie du TEC expérimental, W
<b>Ptm</b>	Consommation d'énergie électrique du TEM, W
<b>Qc</b>	Quantité de chaleur absorbée à l'extrémité froide du TEM, W
<b>Qj</b>	Taux de chauffage à effet joule du TEM, W
<b>Qk</b>	Conduction de chaleur entre les extrémités froide/chaude du TEM, W
<b>Qmax</b>	Chaleur maximale absorbée à l'extrémité froide du TEM lorsque $I_{max}$ et $\Delta T_{max} = 0$
<b>Qpc</b>	Taux de refroidissement du Peltier, W
<b>Qph</b>	Taux de chauffage du Peltier, W
<b>Qh</b>	Quantité de chaleur transférée au côté chaud du TEM, W
<b>R</b>	Résistance électrique du TEM, $\Omega$
<b>T0</b>	Température moyenne de l'air extérieur, $^{\circ}\text{C}$
<b>Tc</b>	Température à l'extrémité froide du TEM, $^{\circ}\text{C}$

<b>TEM</b>	Module thermoélectrique
<b>Th</b>	Température à l'extrémité chaude du TEM, °C
<b>Ti</b>	Température intérieure de la chambre de refroidissement, °C
<b>Tpf</b>	Température finale des stylos, °C
<b>Tpi</b>	Température initiale des stylos, °C
<b>U</b>	Coefficient global de transfert de chaleur, W/m <sup>2</sup>
<b>Vb</b>	Volume interne de la boîte de refroidissement, m <sup>3</sup>
<b>Xm</b>	Épaisseur/longueur du TEM,
<b>Xp</b>	Épaisseur de la paroi en PEHD, m
<b>ZT</b>	Facteur de mérite.

### **Symboles grecs**

<b><math>\alpha</math></b>	Coefficient de Seebeck du TEM, V/K
<b><math>\Delta T</math></b>	Différence de température entre le côté chaud et froid du module thermoélectrique, °C
<b><math>\Delta T_{max}</math></b>	Différence de température maximale entre le côté chaud et froid du TEM lorsque $Q_c = 0$ , °C

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<i>Chapitre I : Etat de l'art de la conservation thermoélectrique</i>	
<b>I-1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I-2 Historique de l'effet thermoélectrique.....</b>	<b>4</b>
I-2-1 Effet Seebeck.....	4
I-2-2 Effet Peltier.....	4
I-2-3 Loi de Thomson .....	5
I-2-4 Recherche contemporaine .....	6
<b>I-3 Application de la thermoélectricité .....</b>	<b>7</b>
<b>I-4 État de l'Art des conservateurs médicaux à effet Peltier .....</b>	<b>8</b>
Y.J. Dai et al (2002) .....	8
Sabah A. Abdul-Wahab et al (2008) .....	8
S.M.A. Rahman et al (2017) .....	9
Md. Shariful Islam et al (2017) .....	9
Uttam Kumar Chaudhary et al (2018) .....	9
S. Vijayarengan et al (2018) .....	9
Lalith Pankaj Raj Nadimuthu et al (2021) .....	9
<b>I-5 Conclusion.....</b>	<b>10</b>
<i>Chapitre II : Analyse des Performances du conservateur a effet Peltier</i>	
<b>II-1 Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>II-2 Production de froid par voie solaire thermoélectrique .....</b>	<b>12</b>
II-2-1 Historique .....	12
II-2-2 Effet Peltier .....	13
<b>II-3 Méthodologie de l'analyse des performances .....</b>	<b>14</b>
II-3-1 Bilan thermique de la chambre du conservateur .....	14
II-3-2 Bilan thermoélectrique du module Peltier .....	16
II-3-3 Propriétés du module Peltier .....	18
II-3-4 Dimensionnement du système photovoltaïque.....	18

1. Gisement Solaire Minimal.....	18
2. Choix d'onduleur.....	18
3. Choix des panneaux.....	19
4. Nombre de panneaux.....	19
5. Capacité des Batteries.....	19
6. Nombre des batteries.....	19
<b>II-4 Energie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>20</b>
II-4-1 Historique de photovoltaïque .....	20
II-4-2 Principe de fonctionnement de panneaux PV .....	20
II-4-3 Les cellules solaires .....	21
II-4-4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque .....	21
II-4-5 Assemblage des cellules solaires et des panneaux PV .....	21
II-4-6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	23
<b>II-5 Conclusion.....</b>	<b>23</b>
<i>Chapitre 3 : Matériel et Méthode</i>	
<b>III-1 Introduction.....</b>	<b>25</b>
<b>III-2 Spécificités du mini conservateur à insulín.....</b>	<b>25</b>
<b>III-3 Conception du mini conservateur a effet Peltier.....</b>	<b>26</b>
III-3-1 Spécifications et contraintes de conception.....	26
III-3-1-1 Structure Intérieur (Aluminium).....	26
III-3-1-2 Isolant (Polyuréthane).....	27
III-3-1-3 Structure extérieur (FOREX).....	27
Caractéristiques de produit.....	28
III-3-2 Choix des composants nécessaires.....	29
III-3-1-1 Module Peltier.....	29
III-3-1-2 La pâte thermique.....	30
III-3-1-3 Thermostat numérique W1209.....	31
III-3-1-4 Dissipateur de chaleur (les ailettes) .....	31
III-3-1-4 Ventilateur.....	32
<b>III-4 Schéma de câblage et connexion des composants.....</b>	<b>33</b>
III-4-1 Description du câblage.....	33

<b>III-5 Construction et assemblage du mini conservateur médical.....</b>	<b>34</b>
<b>III-6 Tests et ajustements.....</b>	<b>36</b>
III-6-1 Analyse du bilan thermique du module thermoélectrique.....	36
III-6-2 Thermostat numérique.....	36
III-6-3 Ventilateurs.....	36
III-6-4 Les batteries.....	37
III-6-5 Régulateur chargeur de batterie BMS 2s 20 A 7.4v 8.4v li-ion.....	37
III.6.6 convertisseur élévateur dc-dc xl6009 4a.....	38
<b>III-7 Adjustments.....</b>	<b>40</b>
<b>III-7-1 Module Peltier.....</b>	<b>40</b>
<b>III-7-2 Thermostat numérique.....</b>	<b>40</b>
<b>III-8 Dimensionnement du système d'alimentation PV du conservateur.....</b>	<b>41</b>
<b>III-9 Conclusion.....</b>	<b>42</b>
<i>Chapitre 4 : Analyse des résultats expérimentaux</i>	
<b>IV-1 Introduction.....</b>	<b>44</b>
<b>IV-2 Etalonnage du thermostat.....</b>	<b>44</b>
<b>IV-3 Expérimentation du module Peltier.....</b>	<b>46</b>
<b>IV-4 Caractérisation expérimentale du panneau utilise.....</b>	<b>47</b>
<b>IV-5 Expérimentation du conservateur.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.6 Dimensionnement pour le système réalise .....</b>	<b>51</b>
IV.6.1 Les batteries.....	51
IV.6.2 Le panneau solaire.....	51
<b>IV.7 Cout de notre conservateur.....</b>	<b>53</b>
<b>IV-8 Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERENCE</b>	

# Liste des figures

Figure II.1 : Chronologie des personnages importants de la thermoélectricité.....	13
Figure II.2 : Principe de fonctionnement de l'effet Peltier.....	13
Figure II.3 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [17] .....	20
Figure II.4: Cellule solaire [18] .....	21
Figure II.5 : Assemblage en parallèle.....	22
Figure II.6 : Assemblage en série.....	22
Figure III.1 : Prototype Boîte d'aluminium.....	27
Figure III.2 : Isolation en polyuréthane.....	27
Figure III.3: La boîte extérieur en FOREX.....	29
Figure III.4 : Module Peltier.....	29
Figure III.5 : La Pate thermique.....	30
Figure III.6 : contrôleur de température W1209.....	31
Figure III.7 : les ailettes en Al.....	32
Figure III.8 : les deux ventilateurs.....	32
Figure III.9 : Schéma de câblage et connexion des composants.....	33
Figure III.10 : Photo détaillé de l'ensemble sous forme de vue éclaté.....	35
Figure III.11: Batterie 28000mah Lithium ion.....	37
Figure III.12 : chargeur batterie BMS 1S 3.7V – 8a – Li-ion 18650 [24] .....	38
Figure III.13 : convertisseur élévateur dc-dc xl6009 4a [25] .....	39
Figure III.14 : photo d'alimentation stabilisé de test Peltier avec un Vmax et Imax.....	40
Figure III.15 : Résultats de dimensionnement sous Excel.....	42

Figure IV.1 : étalonnage du thermostat utilisé par Testo 176T.....	44
Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du thermostat utilisé.....	45
Figure IV.3 : graphe expriment Variation de la température au cours du temp module Peltier.....	46
Figure IV.4 : Banc de caractérisation du module PV par le traceur [26] .....	47
Figure IV.5 : Caractéristiques I-V du module PV théorique (ligne bleue) et mesuré (en rouge) pour $G = 756 \text{ W/m}^2$ . La courbe rouge discontinue représente l'allure P-V. [26] ..	48
Figure IV.6 : Simulation des caractéristiques I-V du module PV sous PVSyst.....	49
Figure IV.7 : Variation de la température en fonction du temps.....	50
Figure IV.8 : photo de panneau solaire 20W.....	54

## Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques du Forex [21] .....	28
Tableau III.2 : Analyse du bilan thermique du module thermoélectrique.....	36
Tableau IV.2 : Estimation de l'énergies fourni par le panneau solaire.....	54
Tableau IV.3 : détails du cout du conservateur réalisé.....	55

# **Introduction générale**

## **Introduction générale :**

### **1. Contexte de l'étude :**

Jusqu'à aujourd'hui, de nombreuses régions reculées ou isolées des zones urbaines en Algérie manquent de fournitures médicales et d'électricité, ce qui constitue l'un des principaux problèmes pour les habitants de ces régions. Le diabète est l'une des maladies chroniques les plus courantes parmi les patients vivant dans ces zones reculées. La prévalence du diabète en Algérie est en augmentation. On estime à près de 4 millions le nombre de cas de diabète chez les adultes. Le nombre de personnes atteintes de diabète est en augmentation, tant pour les cas diagnostiqués que pour les cas non diagnostiqués. Les personnes atteintes de diabète ont besoin de médicaments, soit sous forme de comprimés, soit par injections d'insuline. L'aide médicale dans les régions reculées est encore un problème majeur aujourd'hui, et les personnes diabétiques ayant besoin de prendre des médicaments, soit sous forme de comprimés, soit par injections d'insuline. L'aide médicale ne suffit pas à elle seule car une fois qu'ils ont obtenu l'insuline, elle doit être conservée dans un espace réfrigéré jusqu'à son utilisation. Par conséquent, pour résoudre le problème du stockage de l'insuline, cette étude a été menée dans le but de concevoir un réfrigérateur portable alimenté par l'énergie solaire qui puisse atteindre la température souhaitée pour le stockage de l'insuline et qui puisse être utilisé dans les zones rurales souffrant d'une pénurie d'électricité. Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Concevoir un prototype fonctionnel d'un système de réfrigération thermoélectrique portable capable d'atteindre et de maintenir la température de stockage de 2°C à 8°C pour l'insuline et pouvant être alimenté par l'énergie solaire,
- Tester les performances du refroidisseur thermoélectrique portable dans un scénario réel.

Cette étude visait à bénéficier aux personnes vivant dans les zones rurales et ayant besoin d'un moyen alternatif de stocker leur insuline. L'objectif était de fournir un stockage portable et efficace de l'insuline dans les zones rurales en utilisant l'énergie solaire comme source d'alimentation pour l'appareil.

## **2. Objectifs du PFE :**

L'objectif de ce projet est de concevoir et de développer un conservateur médical portable solaire qui utilise l'effet Peltier pour maintenir des températures spécifiques requises pour la conservation des produits médicaux.

Cela implique la création d'un dispositif compact, léger et économe en énergie qui peut être facilement transporté et utilisé dans des régions éloignées ou hors réseau, où les ressources énergétiques et les infrastructures de réfrigération sont limitées.

L'objectif est de fournir une solution durable et autonome en énergie pour la conservation des vaccins, des insulines, afin de garantir leur efficacité et leur sécurité lorsqu'ils sont stockés, transportés ou utilisés dans ces environnements.

En proposant une solution utilisant l'énergie solaire photovoltaïque, qui est souvent abondante en Algérie, cette étude peut aider à surmonter les contraintes énergétiques et à garantir la conservation adéquate des produits médicaux tels que l'insuline ou les vaccins.

## **3. Structure du PFE :**

Ce document est structuré en chapitres. Après une introduction générale (chapitre 1) et un état de l'art dans lequel nous effectuons une présentation approfondie des études existantes sur la conservation médicale, notamment la conservation de l'insuline, en utilisant de l'énergie solaire photovoltaïque (chapitre 1). Le chapitre 2 propose une méthodologie d'analyse rigoureuse des performances du conservateur à effet Peltier. Dans le chapitre 3, nous définissons le matériel utilisé et discuterons des méthodes et techniques utilisées dans le processus d'évaluation. L'analyse et l'interprétation des données pour l'évaluation de l'efficacité du conservateur médical portable solaire sont consignées dans le chapitre 4.

Nous terminerons par une conclusion générale et des recommandations.

**Chapitre I**  
**Etat de l'art de la conservation**  
**thermoélectrique**

## **I.1 Introduction :**

Ce chapitre a pour objectif de décrire les différentes études effectuées dans le domaine de la conservation de produits médicaux par voie solaire, notamment la conservation d'insulines et de vaccins. En effet, Le réfrigérateur thermoélectrique (conservateur médical) solaire est un type spécial de réfrigérateur qui utilise l'énergie solaire au lieu de l'énergie électrique conventionnelle pour alimenter le module thermoélectrique qui a été utilisé pour refroidir l'espace de réfrigération. Le produit concerné est généralement de l'insuline ou un vaccin doit être conservé dans une plage de température comprise entre 2 et 8 °C. Toutefois, il est difficile d'atteindre et de maintenir cette température dans les sites isolés et lors du transport. Les conservateurs portables classiques utilisent un gel congelé, mais perd lentement sa température au cours de la journée, ce qui ne garantit pas la plage de température nécessaire.

## **I.2 Historique de l'effet thermoélectrique :**

L'effet thermoélectrique est un phénomène qui décrit la conversion directe d'une différence de température en une différence de potentiel électrique, ou vice versa. Il a été découvert et étudié au cours du XIXe siècle par plusieurs scientifiques.

L'histoire de l'effet thermoélectrique a connu une chronologie depuis sa découverte :

**I.2.1 Effet Seebeck :** Lorsque Thomas Johann Seebeck a découvert l'effet thermoélectrique en 1821, il a utilisé une configuration simple consistant en une boucle métallique composée de deux métaux différents. Lorsqu'il chauffait une jonction de cette boucle, il observait l'apparition d'une tension électrique aux autres jonctions. Seebeck a publié ses résultats dans son ouvrage intitulé "Magnetic Polarization of Metals and Ores by Heat" (Polarisation magnétique des métaux et des minerais par la chaleur). [4]

**I.2.2 Effet Peltier :** En 1834, Jean Charles Athanase Peltier a découvert l'effet inverse de l'effet Seebeck. Il a observé qu'en appliquant une tension électrique à une jonction de deux métaux différents, un transfert de chaleur se produisait. Cet effet, connu sous le nom d'effet Peltier, est la base du fonctionnement des refroidisseurs Peltier modernes. Peltier a publié ses résultats dans son article "Nouvelles expériences sur la chaleur dégagée au passage du courant électrique à travers

les métaux" (New Experiments on the Heat Developed in the Passage of an Electric Current through Metals). [4]

**I.2.3 Loi de Thomson :** En 1851, Lord Kelvin (William Thomson) a formulé les lois fondamentales de l'effet thermoélectrique, également connues sous le nom de loi de Thomson. Ces lois décrivent la relation entre la tension, le courant électrique et la température dans un circuit thermoélectrique. Les lois de Thomson ont fourni une base théorique solide pour comprendre les phénomènes thermoélectriques et ont contribué à l'avancement de la thermoélectricité.

En 1909, un thermodynamicien allemand, Edmund Altenkirch, calcule pour la première fois correctement l'efficacité énergétique d'un générateur thermoélectrique fondé sur l'effet Seebeck.

En 1949, un académicien et chercheur russe A.F. IOFFE a développé une théorie sur les semi-conducteurs thermoélectriques. En 1956, le même auteur a conçu l'idée de l'alliage, ou former des solutions solides, semi-conducteurs isomorphes dans le but de réduire la conductivité thermique des matériaux thermoélectriques. Du fait d'une absence de progrès jusque dans les années 1970, il a été postulé qu'un  $ZT$  de 1 était une sorte de barrière d'efficacité thermoélectrique. Cette limite empirique a altéré grandement l'intérêt porté aux recherches dans le domaine de la thermoélectricité, sachant qu'un  $ZT$  d'au moins 3 est nécessaire pour concurrencer les systèmes de réfrigération classiques utilisant des fluides caloporteurs.

Au début des années 1990, l'espoir renaît avec les travaux théoriques de Hicks et Dresselhaus qui proposent d'utiliser des matériaux présentant des structures de basse dimensionnalité. Selon leurs calculs, l'utilisation de Tellure de Bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) avec une structure de type multi-puits quantiques permettrait de multiplier par 13 le facteur de mérite du  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  massif. De même, un  $ZT$  spectaculaire de 1.4 est prédit pour des fils quantiques à base de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . De telles prédictions à l'époque même où les nanotechnologies explosent ont donc provoqué un regain d'intérêt pour la recherche en thermoélectricité. Cependant, il faut attendre le début des années 2000 pour voir apparaître les premiers matériaux thermoélectriques nanostructurés, présentant des  $ZT$  dépassant la limite empirique de 1. Venkatasubramanian et al. Mettent en avant en 2001 des super réseaux constitués de couches minces de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  et de Tellure d'Antimoine ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) présentant un  $ZT$  record de 2,4 à température ambiante. L'année suivante

Harman et al. Présentent des super-réseaux à boîtes quantiques à base de PbSeTe comportant un ZT de 1,6 à température ambiante. Plus tard, en 2004, Hsu et al. Proposent un matériau massif à base de  $\text{AgPbmSbTe}_{2+m}$  comportant des inclusions nanométriques riches en Ag-Sb avec un  $ZT \sim 2,2$  à la température de 800K. Bien que cette température soit trop élevée pour envisager des applications en réfrigération, ce type de matériau peut tout de même être intéressant pour la génération d'énergie électrique. En 2008, Poudel et Al proposent de réaliser la mécano-synthèse d'alliages massifs de BiSbTe constitués d'une multitude de grains nanométriques. Les matériaux obtenus présentent alors un ZT maximum de 1,4 à la température de 100°C. La même année, deux travaux dévoilent des ZT de 0,6 à 300 K et de 1 à 200 K pour des nanofils de silicium, alors que le ZT du silicium massif est de l'ordre de 0,01 à 300 K. De nos jours, la recherche dans ce domaine se concentre autour d'une optimisation du facteur de mérite, qui a pris toute son ampleur depuis le début des années 2000 avec le développement fulgurant des nanotechnologies et plus particulièrement des techniques de nano-fabrication. La nanostructuration permet effectivement de moduler les propriétés des matériaux indépendamment les uns des autres et apporte donc, en ce sens, un renouveau dans le domaine de recherche de la thermoélectricité. [4]

**I.2.4 Recherche contemporaine** : La recherche sur les matériaux thermoélectriques se poursuit aujourd'hui avec des objectifs tels que l'amélioration de leur efficacité et de leur rendement. Les chercheurs explorent de nouvelles compositions de matériaux, des nanostructures et des techniques d'ingénierie pour améliorer les propriétés thermoélectriques. L'objectif est de développer des matériaux thermoélectriques plus performants pour des applications allant de la conversion de chaleur résiduelle en électricité à la récupération d'énergie dans des environnements à haute température.

L'histoire de l'effet thermoélectrique est marquée par des découvertes pionnières, des avancées théoriques et des progrès dans la recherche sur les matériaux. Ces développements ont ouvert la voie à des applications pratiques dans des domaines tels que la mesure de température, le refroidissement et le chauffage électriques, ainsi que la conversion d'énergie thermique en électricité.

### **I.3 Application de la thermoélectricité :**

Les dispositifs thermoélectriques fournissent une forme compacte de refroidissement/chauffage thermoréversible et rapide, sans pièces mobiles. Ils sont principalement utilisés dans la médecine pour des petits refroidissements comme les vaccins médicaux, les insulines et la conservation du sang. Ils sont aussi utilisés pour le contrôle thermique et la gestion des Central Processing Unit (CPU) et pour refroidir les lasers à diode. De plus, ils sont utilisés dans les systèmes de chauffage/refroidissement des sièges automobiles. Ils sont également utilisés pour produire une température de  $-80^{\circ}\text{C}$  afin de faire fonctionner les capteurs dans les systèmes d'imagerie infrarouge et les systèmes de vision nocturne.

Les thermoélectriques sont utilisés aussi pour récupérer la chaleur résiduelle dans un large éventail d'applications allant de la faible puissance via la moyenne puissance jusqu'à la haute puissance :

- La faible puissance : on peut principalement mentionner les capteurs sans fil autonomes et le chargement de batteries. Une autre application intéressante est la montre-bracelet thermoélectrique qui est alimentée par la chaleur récupérée du corps. Deux fabricants connus de ces montre-bracelet TEG sont Seiko et Citizen ; la montre Seiko produit typiquement 300mV de tension en circuit-ouvert à partir d'un gradient de température de 1.5 K.
- La moyenne puissance : il s'agit ici des applications automobiles. Des groupes automobiles comme Volkswagen, Volvo, Ford et BMW ont développé des systèmes de récupération de chaleur perdue pour améliorer l'économie de carburant de leurs véhicules avec une puissance potentielle générée à partir du TEG ( Thermo-Electric Generator) dans la plage de 1kW.
- La haute puissance : il s'agit de la production d'énergie géothermique et des systèmes hybrides photovoltaïque-TEG.

Aujourd'hui, Les performances actuelles des dispositifs thermoélectriques sont bien adaptées à leur utilisation en réfrigération. Les modules à effet Peltier disponibles dans le commerce sont très utilisés pour le refroidissement de composants et systèmes électroniques.

Les industriels travaillent actuellement à l'utilisation de l'effet Peltier pour créer des systèmes de climatisations. Dans le secteur automobile, cette technologie particulièrement fiable conduirait à la réalisation de systèmes climatiseurs réversibles plus performants que ceux actuellement utilisés. De plus, ces systèmes thermoélectriques sont plus compacts et plus simples à fabriquer que les systèmes actuels. Enfin, ceux-ci n'utilisent aucun gaz réfrigérant (impact sur l'effet de serre).

#### **I.4 État de l'Art des conservateurs médicaux à effet Peltier :**

Plusieurs chercheurs se sont intéressés au développement de conservateurs médicaux utilisant l'effet Peltier, nous citerons quelques études pertinentes.

**Y.J. Dai et al (2002):** Cette étude présente une enquête expérimentale sur un réfrigérateur thermoélectrique alimenté par des cellules solaires. L'objectif de l'étude est de développer un réfrigérateur pouvant répondre aux besoins de 2 à 3 personnes pour une utilisation en extérieur. Le système de réfrigération a été construit à l'aide d'un TEC de 45W (12V) et alimenté par deux panneaux solaires de 50W. Une batterie de stockage a également été incluse pour permettre un fonctionnement autonome de 24 heures. Les résultats de l'expérience ont montré que l'unité était capable de maintenir la température dans le réfrigérateur à 5-10°C et a atteint un coefficient de performance (COP) d'environ 0,3. [1]

**Sabah A. Abdul-Wahab et al (2008) :** L'objectif principal de cette étude est de concevoir et de construire un réfrigérateur thermoélectrique solaire abordable. Le réfrigérateur a un volume de (23\*18\*32) cm<sup>3</sup> et est alimenté par 10 TEC de 5W chacun, ainsi que 115,2 W de cellules solaires. Les résultats de l'étude ont montré que le réfrigérateur était capable de réduire la température de 27°C à 5°C en 44 minutes et avait un coefficient de performance (COP) d'environ 0,16. [2]

**S.M.A. Rahman et al (2017):** Cette étude porte sur la conception et l'investigation expérimentale d'un réfrigérateur thermoélectrique solaire portable. Le réfrigérateur fonctionne sur le principe du module thermoélectrique, et un conteneur rectangulaire en aluminium d'une dimension de (6.86.815) cm<sup>3</sup> est utilisé comme chambre de refroidissement. Le système utilise six modules TEC, un module PV de 15W et une batterie de 7Ah. Les résultats de l'expérience ont montré que le système était capable d'atteindre une température de surface froide de 40°C sur le module

thermoélectrique et une température du réfrigérant de 100°C. La chambre chaude a atteint une température de 300°C, et le coefficient de performance (COP) du système a été mesuré à 0,66. [3]

**Md. Shariful Islam et al (2017):** Cette étude porte sur la préservation des médicaments et des vaccins au Bangladesh à l'aide d'une unité de réfrigération thermoélectrique (Peltier). Le système de réfrigération a été conçu avec une chambre de refroidissement mesurant (28\*23.5\*25) cm<sup>3</sup> et un TEC de (4\*4) cm<sup>2</sup>, avec une puissance électrique appliquée de 57,7 W. Les résultats de l'expérience ont montré que l'unité de réfrigération était capable de réduire la température de 30°C à 19,5°C en 8 heures, avec un coefficient de performance (COP) maximal de 0,55. [4]

**Uttam Kumar Chaudhary et al (2018):** Cette étude porte sur la réfrigération solaire à l'aide d'un module Peltier, avec pour objectif principal de fournir un système de réfrigération aux zones reculées où l'alimentation électrique n'est pas possible. La chambre de refroidissement utilisée a une capacité de 7,8 L, avec une cellule solaire de 10 W et une batterie de 7,2 Ah. Les résultats de l'expérience ont montré que l'unité de réfrigération était capable de réduire la température de 30°C à 12°C en 13 minutes. [5]

**S. Vijayarengan et al (2018):** L'objectif de cette étude était de concevoir et de fabriquer un réfrigérateur solaire thermoélectrique basé sur le principe d'un module TEC. Le conteneur réfrigéré a des dimensions intérieures de 20 cm x 20 cm x 30 cm. Le système est alimenté par un module PV intégré et une batterie de 7.5 Ah pour une autonomie de 3 heures en mode autonome. Les résultats de l'expérience ont montré que le réfrigérateur était capable de réduire la température de 31°C à 16°C en 120 minutes. [6]

**Lalith Pankaj Raj Nadimuthu et al (2021):** Cet article décrit la conception, le développement et l'investigation expérimentale d'un système de stockage à froid micro thermoélectrique (TEC) alimenté par des panneaux solaires PV en tant que transporteur de vaccin Covid-19 pour les zones rurales. Le système est conçu pour maintenir une plage de température de +2 à +8 °C. Sur la base de l'analyse expérimentale, la température a été réduite de +24 à +8 °C en 35 minutes. La chambre de stockage à froid a une capacité de 12 litres (212141 cm<sup>3</sup>) et est alimentée par un module PV de 100 W et une batterie de 50 Ah avec 6 heures de fonctionnement en autonomie. Le coefficient de performance (COP) maximal était de 0.2131. [7]

## **I.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons abordé des généralités sur la conservation thermoélectrique qui inclut tout ce qui concerne l'effet thermoélectrique, et en a souligné les applications de la thermoélectricité et en final on a cité quelques études sur les conservateurs médicaux.

# **Chapitre II**

## **Analyse des Performances du conservateur a effet Peltier**

## **II.1 Introduction:**

Les systèmes de réfrigération sont conçus pour abaisser la température d'un milieu solide, liquide ou gazeux, ou pour maintenir une température basse. Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que la conservation des aliments, la préservation des produits médicaux, le refroidissement de l'air, etc.

## **II.2 Production de froid par voie solaire thermoélectrique:**

### **II.2.1 Historique:**

En 1794, Alessandro Volta [8], met en évidence l'apparition de « forces » sous l'influence de la différence de température. En 1821, un physicien allemand Thomas Johann Seebeck remarque qu'un circuit formé par deux conducteurs métalliques différents dont les deux jonctions sont soumises à une température différente dévie une aiguille métallique [9]. Seebeck pense à tort que cet effet est dû au champ magnétique induit par la différence de température et qu'il doit être relié au champ magnétique terrestre. Peu de temps après, en 1825, Oersted donne la bonne explication. Il s'aperçoit qu'en réalité, la différence de température crée une différence de potentiel qui, si le circuit est fermé permet le passage du courant et donc induit un champ magnétique. En 1834, Jean Peltier, physicien et horloger, découvre que la circulation d'un courant électrique peut soit produire, soit absorber de la chaleur à la jonction de deux matériaux différents [10]. C'est en 1838 que Lenz a expliqué le phénomène en concluant que le chauffage ou le refroidissement dépendaient du sens de circulation du courant. Pour se faire, il a cristallisé de l'eau autour d'une jonction bismuth-antimoine, et, en inversant le sens de circulation du courant, a fait fondre la glace. Un peu plus tard, dans les années 1840, James Prescott Joule démontre l'existence d'un phénomène irréversible lorsqu'un courant circule dans un matériau, c'est l'effet Joule. Ce dernier indique que la quantité de chaleur produite par la circulation du courant est proportionnelle au carré de son intensité. Ce n'est qu'en 1851, avec William Thomson, devenu Lord Kelvin, que l'on lie les effets Seebeck et Peltier avec les relations de Kelvin. Ce dernier prédit même un troisième effet thermoélectrique connu sous le nom d'effet Thomson qui ne nécessite pas l'existence de 2 matériaux et d'une jonction. La Figure 1 présente une chronologie des pionniers de la thermoélectricité.

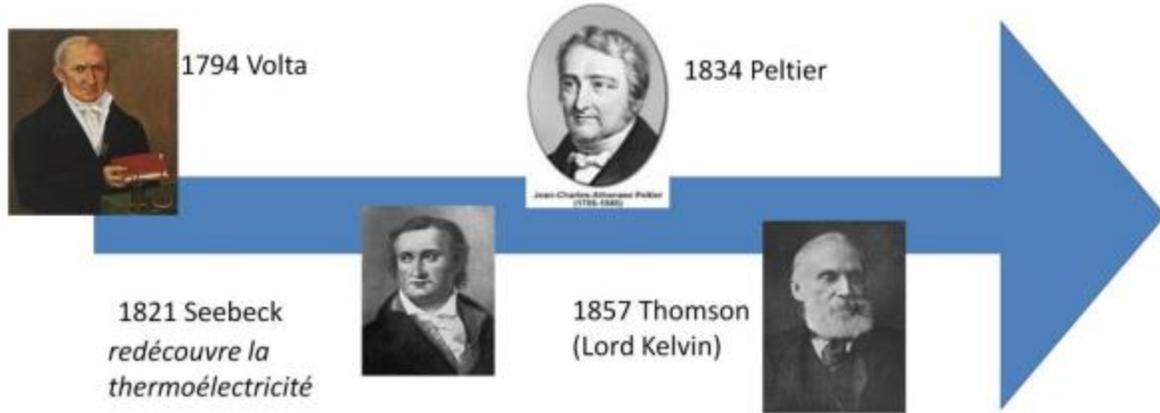


Figure II.1 : Chronologie des personnages importants de la thermoélectricité

## II.2.2 Effet Peltier:

Nous nous intéressons dans cette étude à l'effet Peltier uniquement. Son principe de fonctionnement est : si l'on fait passer un courant dans un circuit avec 2 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  $T_1$ . 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  $T > T_1$ .

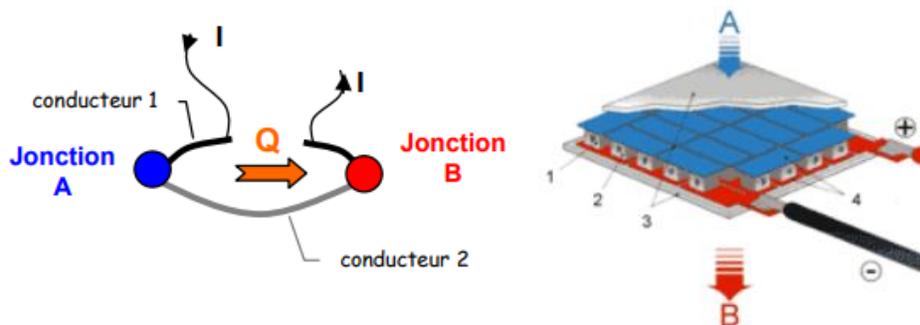


Figure II.2 : Principe de fonctionnement de l'effet Peltier.

Sur la figure 2, on voit que la jonction A refroidit, pendant que B se réchauffe lorsque les conducteurs sont parcourus par un courant I.

Les applications les plus intéressantes de cet effet se trouvent dans le domaine de la réfrigération miniature de faible puissance et en particulier dans la médecine 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.

### II.3 Méthodologie de l'analyse des performances:

Dans l'évaluation des performances des systèmes de refroidissement thermoélectrique alimenté par l'énergie solaire, les calculs du gain de chaleur total de la chambre de refroidissement, du COP du module thermoélectrique et de la taille du module solaire PV sont les facteurs les plus importants.

#### II.3.1 Bilan thermique de la chambre du conservateur:

Le processus de refroidissement est une fonction de transfert de chaleur à travers les parois de la chambre de refroidissement du conservateur, de la chaleur produite par le produit, de la chaleur dégagée par le ventilateur et de la chaleur due à l'infiltration d'air due aux ouvertures. La température moyenne extérieure pendant le fonctionnement du conservateur est prise en charge dans le calcul de la chaleur, car la température extérieure varie avec le temps.

La perte de chaleur (par conduction et convection) à travers la paroi de la chambre ( $Q_w$ ) est estimée en utilisant la formule suivante :

$$Q_w = A_c U (T_0 - T_i) \quad (II.1)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \sum_i^j \frac{e_i}{k_i} + \frac{1}{h_i}}$$

La perte de chaleur par conduction ( $Q_m$ ) à l'intérieur du module thermoélectrique peut être estimée comme suit:

$$Q_m = \frac{km Am (Th - Tc)}{em} \quad (II.2)$$

La chaleur produite par le produit ( $Q_p$ ) dans la chambre est déterminée selon la méthode décrite par Gökçek et Şahin [4]. La chaleur produite par le produit fait référence à la chaleur dégagée par le produit stocké. Dans cette étude, trois stylos d'insuline de 0,088 kg sont conservés dans le conservateur thermoélectrique solaire comme de produit. La capacité thermique spécifique des stylos d'environ 3,85 kJ/kg K.

$$Q_p = \frac{Mp Cp (T_{pi} - T_{pf})}{3,6 \Delta T} \quad (II.3)$$

La consommation d'énergie électrique nominale du ventilateur ( $Q_f$ ) est utilisée pour calculer la chaleur dégagée par le ventilateur du côté froid du module thermoélectrique :

$$Q_f = N_f F_r \quad (II.4)$$

La chaleur due à l'infiltration d'air dans la chambre de refroidissement en ouvrant le couvercle supérieur peut être estimée comme suit :

$$Q_i = \frac{Ca Eb Vb (T_0 - T_i)}{3,6} \quad (II.5)$$

L'énergie totale ( $Q_T$ ) est calculée en ajoutant le flux de chaleur entrant dans la chambre de refroidissement, la perte de chaleur par conduction à l'intérieur du module thermoélectrique, la chaleur produite par le produit, la chaleur dégagée par le ventilateur et la chaleur d'infiltration d'air. L'énergie totale en Watts est donnée par :

$$Q_T = Q_w + Q_c + Q_p + Q_f + Q_i \quad (II.6)$$

### II.3.2 Bilan thermoélectrique du module Peltier:

En général, dans l'étude du chauffage ou du refroidissement à effet Peltier un modèle d'équilibre énergétique à l'état permanent tel que décrit par Riffat et Ma [12] est utilisé pour caractériser les performances théoriques du module thermoélectrique.

La chaleur transférée du côté froid du module thermoélectrique (refroidissement à effet Peltier) est calculée à l'aide de l'expression suivante [12] :

$$Q_{pc} = \alpha I T_c \quad (\text{II.7})$$

La chaleur transférée du côté chaud du module thermoélectrique (chauffage à effet Peltier) est estimée en utilisant la formule suivante [12] :

$$Q_{ph} = \alpha I T_h \quad (\text{II.8})$$

Selon la loi d'Ohm, le module thermoélectrique génère de la chaleur à effet Joule lorsque le courant circule à travers celui-ci en raison de la résistance électrique (R). Il vient que, 50% de la chaleur est transférée vers le côté froid et 50% vers le côté chaud pour équilibrer la chaleur à effet Joule [9]. Le taux de chauffage à effet Joule ( $Q_j$ ) du côté froid ou du côté chaud peut être estimé comme suit :

$$Q_j = 0,5 I^2 R \quad (\text{II.9})$$

La conduction (loi de Fourier) du côté froid vers le côté chaud à travers le matériau thermoélectrique soumis au gradient de température est donnée par :

$$Q_k = K (T_h - T_c) = K\Delta T \quad (\text{II.10})$$

La quantité de chaleur délivrée par le module thermoélectrique ou absorbée du côté froid du module thermoélectrique, c'est-à-dire la capacité de refroidissement ( $Q_c$ ), peut être estimée en considérant les équations du bilan thermique (7), (9) et (10) :

$$Q_c = \alpha I T_c - 0,5 I^2 R - K\Delta T \quad (\text{II.11})$$

La quantité de chaleur transférée du côté chaud du module thermoélectrique ( $Q_h$ ) peut être calculée en tenant compte des équations du bilan (8), (9) et (10) :

$$Q_h = \alpha I T_h - 0,5 I^2 R - K\Delta T \quad (\text{II.12})$$

La consommation d'énergie électrique du module thermoélectrique ( $P_{tm}$ ) peut être estimée en prenant la différence entre l'absorption de chaleur et le rejet de chaleur aux côtés froid et chaud du module thermoélectrique, respectivement, selon la première loi de la thermodynamique, on a :

$$P_{tm} = Q_h - Q_c = I^2 R + \alpha I (T_h - T_c) \quad (\text{II.13})$$

La consommation d'énergie électrique du refroidisseur thermoélectrique expérimental ( $P_c$ ) est estimée en ajoutant la consommation d'énergie du module thermoélectrique et des ventilateurs.

Comme l'énergie thermique dans l'espace refroidi de la chambre thermoélectrique est absorbée au niveau du côté froid du module Peltier pendant le processus de refroidissement,  $Q_T$  ou  $Q_c$  peuvent être utilisés pour estimer le coefficient de performance (COP) du refroidisseur thermoélectrique.

Le COP du module thermoélectrique expérimental en mode de refroidissement est estimé par:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P_c} \quad (\text{II.14})$$

Le courant électrique optimal à fournir au module Peltier pour obtenir le COP maximal possible du matériau thermoélectrique existe lorsque les températures des côtés chaud et froid sont à l'équilibre thermique. Le courant électrique peut être déterminé comme suit :

$$I = \frac{V - \alpha T}{R} \quad (\text{II.15})$$

### II.3.3 Propriétés du module Peltier:

Comme les valeurs des propriétés du module thermoélectrique telles que la résistance électrique (R), la conductance thermique (K) et le coefficient de Seebeck ( $\alpha$ ) ne sont pas fournies par le fabricant, une méthode décrite par Zhao et Tan [13] et Chen et Snyder [14] a été utilisée pour déterminer ces propriétés par les équations suivantes :

$$R = \frac{2 (Th - \Delta T_{max})^2 Q_{max}}{Th I_{max}^2} \quad (\text{II.16})$$

$$K = \frac{(Th - \Delta T_{max})^2 Q_{max}}{Th^2 \Delta T_{max}} \quad (\text{II.17})$$

$$\alpha = \frac{(Th - \Delta T_{max}) Q_{max}}{Th^2 I_{max}} \quad (\text{II.18})$$

### II.3.4 Dimensionnement du système photovoltaïque:

#### 1. Gisement Solaire Minimal (Hmin/Gmin) :

Prend les données de gisement solaire minimal dans le site pvgys.

#### 2. Choix d'onduleur :

$$P_{ond} = P_{crête} * \text{Coef de sécurité} \quad (\text{II.19})$$

$P_{crête}$  :  $\sum$  puissance d'utilisateur \* Nombre.

**Coef de sécurité** : 1.1 jusqu'à 1.3.

### 3. Choix des panneaux :

$$P_{cr\grave{e}te} = \frac{E_j \times I_r}{G_{min} \times \eta} \quad (II.20)$$

$E_j$  : énergie journalière.

$I_r$  : Irradiation de référence 1000w/m<sup>2</sup>.

$G_{min}$  : Gisement solaire minimale.

$\eta$  : Rendement.

### 4. Nombre de panneaux :

$$N_{Panneaux} = \frac{P_{Cr\grave{e}te}}{P_{panneaux}} \quad (II.21)$$

### 5. Capacité des Batteries:

$$C_{Batt} = \frac{E_j \times N_{Autonomie}}{V_{Syst} \times DOD \times Coef \text{ de Temp\acute{e}ratu}} \quad (II.22)$$

$E_j$  : énergie journalière.

$N_{autonomie}$  : Nombre de Jour d'autonomie.

**DOD**: l'état de décharge.

**Coef de température** : 25° → 100%

### 6. Nombre des batteries:

$$N_{serie} = \frac{V_{syst}}{V_{Batt}} \quad (II.23)$$

$$N_{parall\grave{e}le} = \frac{C_{syst}}{C_{Batt}} \quad (II.24)$$

## II.4 Energie solaire photovoltaïque

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire via des panneaux solaires est ce qu'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque. Cette forme d'énergie est considérée comme renouvelable car la source d'énergie, c'est-à-dire le soleil, est inépuisable à l'échelle humaine. [15].

#### II.4.1. Historique de photovoltaïque

Le physicien français Antoine César Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque en 1839 [16]. Par la suite, dans les années 1930, les premières applications d'hélioélectricité ont émergé avec l'utilisation de cellules à oxyde cuivreux et au sélénium. Cependant, c'est en 1954, grâce aux travaux réalisés dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que les premières cellules photovoltaïques en silicium ont été développées, ouvrant ainsi la voie à la production d'énergie [17].

#### II.4.2. Principe de fonctionnement de panneaux PV:

Le terme "photovoltaïque" est composé des mots "photo" (qui fait référence à la lumière) et "Volta" en l'honneur du physicien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrochimique en 1800 [17]. L'énergie photovoltaïque est obtenue à partir de la lumière du soleil. Un module photovoltaïque est constitué de cellules solaires en silicium qui sont capables de convertir l'énergie des photons en électricité, sous forme de courant continu (CC).

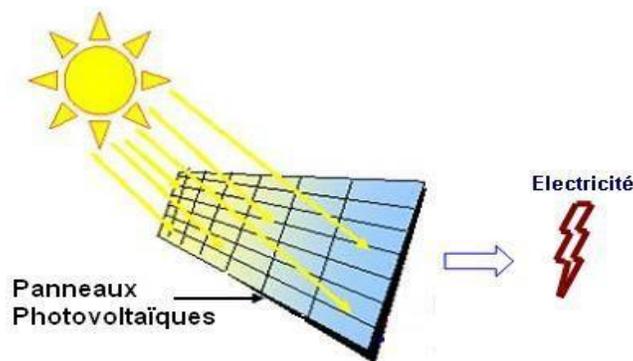


Figure II.3 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [17]

#### II.4.3. Les cellules solaires:

Le silicium utilisé dans la fabrication des cellules solaires provient du sable, mais il doit subir un processus de purification approfondi pour atteindre un niveau élevé de pureté. Différents types de silicium sont utilisés, tels que le silicium monocristallin avec un rendement compris entre 16 et 24%, le silicium polycristallin avec un rendement de 13 à 19%, et le silicium amorphe avec une efficacité entre 5 et 10%. En outre, d'autres matériaux tels que le tellure de cadmium et l'arséniure de gallium, appelés technologies multi-jonctions, sont actuellement en cours de tests en laboratoire et présentent un rendement pouvant atteindre 38% [15].

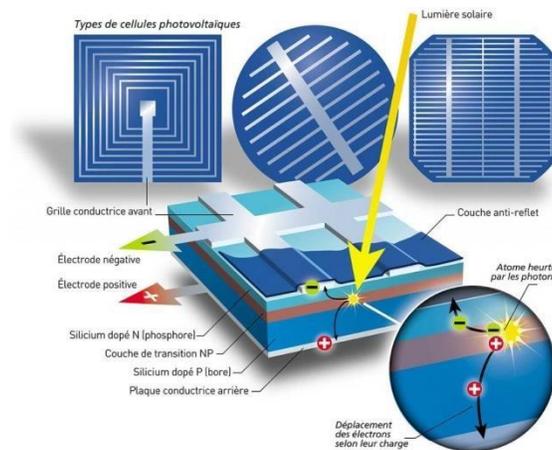


Figure II.4: Cellule solaire [18]

#### II.4.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque:

Le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie lumineuse en électricité par le biais de l'effet photovoltaïque repose sur la génération et le transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'influence du rayonnement solaire. Ce matériau est composé de deux parties distinctes, l'une avec un excès d'électrons (dopée de type n) et l'autre avec un déficit d'électrons (dopée de type p).

#### II.4.5. Assemblage des cellules solaires et des panneaux PV

Le branchement des panneaux photovoltaïques permet d'augmenter la puissance de sortie. Les panneaux peuvent être connectés en parallèle pour maintenir la même tension tout en augmentant l'intensité du courant, ou en série pour maintenir l'intensité du courant tout en augmentant la tension.

La connexion en parallèle est couramment utilisée dans les systèmes de 12V. Cependant, cela nécessite l'utilisation de câbles épais, en particulier pour de longues distances. De plus, pour les systèmes de 1000 W et 50 A avec une distance de plus de 3 mètres entre les panneaux photovoltaïques et le régulateur, le transfert peut devenir difficile [19].

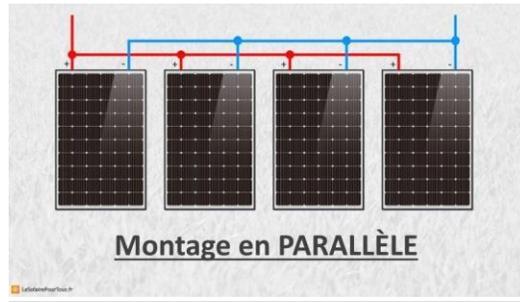


Figure II.5 Assemblage en parallèle

La connexion en série des panneaux photovoltaïques est utilisée en conjonction avec un régulateur MPPT, ce qui permet d'augmenter la tension tout en maintenant le même courant. Les régulateurs MPPT sont adaptés à cette configuration car ils acceptent une tension élevée et sont capables de charger des batteries de 12V ou plus.

Cependant, un inconvénient des systèmes en série est que si un panneau est partiellement ombré, cela aura un impact sur l'ensemble de la chaîne de panneaux. Lorsque les panneaux sont connectés en série, ils dépendent les uns des autres. En revanche, un avantage de cette configuration est qu'il est plus facile de transférer l'électricité sur de longues distances [19].

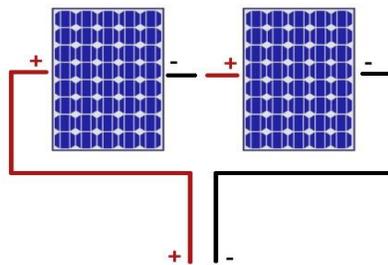


Figure II.6 : Assemblage en série

#### II.4.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:

- Les avantages :

- ✓ Énergie propre sans émission des gaz à effet de serre.
- ✓ Energie renouvelable et gratuit.
- ✓ Installation facile.
- ✓ Réalisable dans des endroits éloignés.
  - **Les inconvénients :**
- ✓ Rendement faible relativement au d'autre source d'énergie.
- ✓ Nécessite un système de stockage.
- ✓ Le cout des installations photovoltaïque est cher.

## **II.5 Conclusion:**

La réfrigération solaire peut être une alternative prometteuse pour les régions éloignées ou bénéficiant d'un rayonnement solaire annuel élevé. Les systèmes de réfrigération sont bien adaptés à l'utilisation de cette forme d'énergie renouvelable.

# **Chapitre III**

## **Matériel et Méthode**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail le matériel utilisé pour le mini conservateur médical. Cela comprendra une description complète du conservateur lui-même, en mettant l'accent sur sa conception, ses dimensions, ses caractéristiques techniques et ses capacités de refroidissement. Nous décrirons également les différents composants du conservateur, tels que le système de refroidissement à effet Peltier, les capteurs de température, le système de régulation et les indicateurs visuels.

En ce qui concerne les capteurs de température, nous fournirons des informations détaillées sur leur type, leur précision, leur plage de mesure et leur positionnement à l'intérieur du conservateur. Nous expliquerons comment les capteurs ont été calibrés pour assurer des mesures précises et fiables de la température.

Nous aborderons également les échantillons médicaux utilisés pour les tests. Nous décrirons leur nature, leur volume, leur conditionnement et les protocoles spécifiques suivis pour leur préparation avant leur placement dans le conservateur. Nous mentionnerons les caractéristiques particulières des échantillons médicaux utilisés, tels que leur sensibilité à la température et les exigences de stockage recommandées.

### **III.2 Spécificités du mini conservateur à insuline**

Le conservateur d'insuline proposé est un dispositif conçu spécifiquement pour stocker et maintenir l'insuline à des températures appropriées afin de préserver son efficacité et sa qualité. Voici le cahier des charges du conservateur d'insuline proposé :

- ✓ Plage de température : L'insuline doit être conservée dans une plage de température spécifique, généralement entre 2°C et 8°C, pour garantir sa stabilité. Le conservateur d'insuline doit donc être capable de maintenir une température constante dans cette plage.
- ✓ Capacité de stockage : Le conservateur d'insuline doit avoir une capacité suffisante pour stocker au moins trois stylos d'insuline.
- ✓ Dimensions et portabilité : Pour faciliter son utilisation quotidienne, le conservateur d'insuline doit être compact, portable et facile à transporter

- ✓ Alimentation électrique : Le conservateur d'insuline peut être alimenté par des piles rechargeables par un système photovoltaïque. L'utilisation de piles permet une plus grande mobilité et offre une alimentation stable et continue.
- ✓ Contrôle de la température : Le conservateur d'insuline doit être équipé d'un système de régulation de la température précis. La surveillance de la température est essentielle dans le conservateur d'insuline pour surveiller en permanence la température interne. Cela permet de s'assurer que la température reste dans la plage recommandée et d'alerter l'utilisateur en cas de variation excessive.
- ✓ Interface utilisateur : Un affichage clair et convivial ainsi que des commandes simples peuvent faciliter l'utilisation et la configuration du conservateur d'insuline. Des indicateurs visuels ou sonores peuvent également être intégrés pour alerter l'utilisateur en cas de problème de température.
- ✓ Isolation thermique : Une isolation thermique efficace est essentielle pour minimiser les échanges thermiques avec l'environnement extérieur et maintenir une température stable à l'intérieur du conservateur d'insuline. Des matériaux isolants de haute qualité doivent être utilisés pour garantir une isolation optimale.

### **III.3 Conception du mini conservateur a effet Peltier**

#### **III.3.1 Spécifications et contraintes de conception :**

##### **III.3.1.1 Structure Intérieur (Aluminium):**

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité, avec une faible masse volumique de  $2,7 \text{ kg/dm}^3$  et un point de fusion de  $658^\circ\text{C}$ . Il possède également un faible module de Young de  $70000 \text{ N/mm}^2$  ( $70000 \text{ Mpa}$  ou  $7000\text{DaN/mm}^2$ ), une faible limite élastique et une forte capacité d'allongement à la rupture, ce qui le rend idéal pour les tôles minces, les feuilles et le papier. Sa conductivité est de 67% de celle du cuivre. Enfin, l'aluminium est très oxydable, mais se passivise immédiatement grâce à une fine couche d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  d'une épaisseur de quelques micromètres, qui le protège de la corrosion. Cela en fait un matériau très prisé dans l'industrie, notamment dans les secteurs de l'aéronautique, des transports et de la construction. [20]



**Figure III.1** : Prototype Boite d'aluminium

### **III.3.1.2 Isolant (Polyuréthane):**

Le polyuréthane est en effet un excellent isolant thermique, grâce à sa faible conductivité thermique qui lui confère un pouvoir isolant élevé par rapport à d'autres isolants couramment utilisés. Il est également très résistant à la compression et à l'humidité, ce qui en fait un choix idéal pour les espaces restreints ou humides.



**Figure III.2** : Isolation en polyuréthane

### **III.3.1.3 Structure extérieur (FOREX):**

Le FOREX classique est un panneau blanc en PVC rigide légèrement expansé avec une structure cellulaire fermée particulièrement fine et homogène et des surfaces soyeuses.

### 1.3.1 Caractéristiques de produit :

			1 – 3 mm	4 – 19 mm
Densité apparente (nominale)	DIN EN ISO 1183-1	kg/m <sup>3</sup>	700	500
Résistance à la traction	DIN EN ISO 527-1/2	MPa	16	8
Module E (essai de traction)	DIN EN ISO 527-1/2	MPa	800	500
Résistance à la flexion	EN ISO 178	MPa	22	18
Module E (essai de flexion)	EN ISO 178	MPa	1100	650
Résistance à la compression	ISO 844	MPa	---	4
Dureté de la surface	DIN 53 505	Shore D	44	40
Température de service max.		° C	55	
Coefficient de dilatation linéaire	DIN EN ISO 75-2	mm/(m·K)	0,07	
Absorption d'eau (23°C – 24 h)	EN ISO 62	%	<1	
Comportement au feu (France)	NF P 92-501	1 – 19 mm	M1	
Comportement au feu (Europe)	EN 13501-1	1 – 19 mm	C – s3 – d0	

**Tableau III.1** : Caractéristiques du Forex [21]

Les valeurs présentées ici sont indicatives pour une densité apparente moyenne. Il peut y avoir de petites divergences selon l'épaisseur des panneaux et l'anisotropie du matériau résultant du procédé de production. [21]



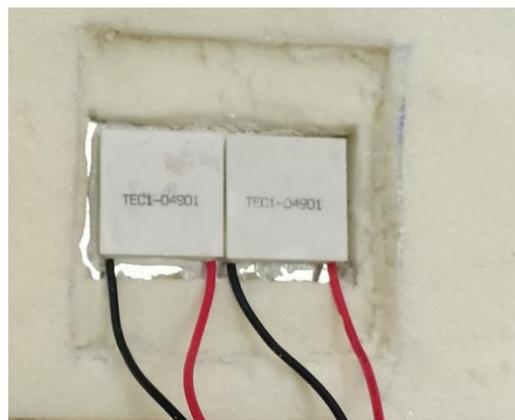
**Figure III.3:** La boîte extérieur en FOREX

### **III.3.2 Choix des composants nécessaires :**

#### **III.3.2.1 Module Peltier :**

Une cellule à effet Peltier est un dispositif composé d'une plaque en céramique capable de produire des zones froides et chaudes en réponse à l'application d'un courant électrique. Lorsque le courant passe à travers la plaque, l'une de ses faces absorbe la chaleur tandis que l'autre la dissipe. [21]

Dans notre prototype on va utiliser 2 modules de type 04901.



**Figure III.4 :** Module Peltier

### **Spécifications :**

**Modèle : TEC1-04901.**

Tension : DC5V.

Courant : 1A.

Différence de température : 50 °.

Taille d'apparence : 20\*20\*4.9mm.[22]

### **III.3.2.2 La pâte thermique :**

La pâte thermique est un composé indispensable dans le domaine de la dissipation thermique des composants électroniques. Son rôle consiste à agir en tant qu'interface entre une surface chaude, telle qu'un processeur, et un dissipateur thermique, afin de faciliter un transfert de chaleur efficace.



**Figure III.5 :** Pate thermique

Généralement, la pâte thermique est composée d'un mélange de matériaux conducteurs de chaleur tels que l'oxyde de zinc, l'argent ou le silicone, associée à un solvant qui facilite son application. Lorsqu'elle est appliquée entre les surfaces, la pâte thermique remplit les micro-aspérités et les irrégularités, réduisant ainsi la résistance thermique et améliorant la conductivité thermique. Cette action permet de prévenir la formation de points chauds et d'améliorer la stabilité ainsi que les performances des composants électroniques, en garantissant un refroidissement adéquat. Par conséquent, la sélection et l'application appropriées de la pâte thermique revêtent une importance cruciale pour optimiser la dissipation thermique et assurer des performances fiables des dispositifs électroniques. [9]

### III.3.2.3 Thermostat numérique W1209 :

Le thermostat numérique W1209 est un petit module thermostatique largement utilisé dans divers projets électroniques. Il est généralement utilisé pour contrôler la température dans des applications telles que les systèmes de refroidissement, les chauffages, les incubateurs, les aquariums, etc. Voici quelques caractéristiques courantes du thermostat numérique W1209 : [23]

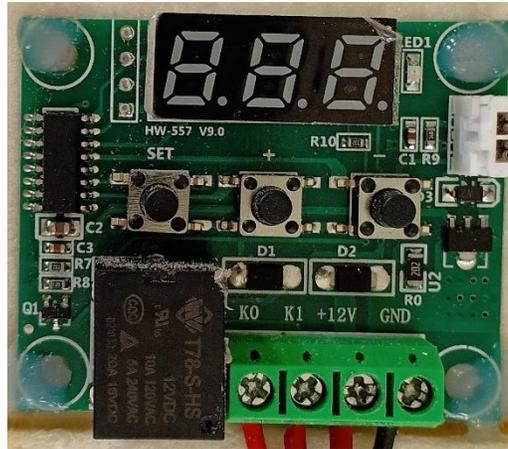


Figure III.6 : contrôleur de température W1209 [23]

1. Résolution : 0.1 ° C (-9.9 ~ 99.9 ° C), 1 ° C (Autres Gammes)
2. Précision : 0.1 ° C
3. Taux de rafraîchissement : 0.5s
4. Protection haute température : 0 ~ 110 ° C
5. Entrée de mesure : capteur de type imperméable NTC (10K 0,5%)
6. Gamme de sortie : sortie de relais 1 canal 10A
7. Humidité : 20% -85%
8. Environnement : -10 ~ 60 ° C, [23]

### III.3.2.4 Dissipateur de chaleur (les ailettes) :

Le dissipateur thermique a pour rôle d'absorber la charge thermique du côté chaud de l'élément Peltier et de la dissiper dans l'air ambiant. Il est essentiel que le dissipateur thermique soit suffisamment grand pour éviter une élévation excessive de sa température. Ce point ne doit pas être négligé lors de sa conception. D'autre part, le dissipateur thermique doit être adapté à

l'application en termes de forme et de dimensions. Selon vos besoins, il peut être envisagé un dissipateur thermique sur mesure ou l'utilisation d'un caloduc.



**Figure III.7 :** les ailettes en Al

Pour compléter le système thermique, il est nécessaire de fixer la face chaude du refroidisseur thermoélectrique à un dissipateur thermique approprié. Ce dissipateur doit être capable de dissiper à la fois la chaleur extraite par le module thermoélectrique et la chaleur de Joule générée par l'alimentation électrique du module. Le dissipateur thermique joue un rôle essentiel dans un système de refroidissement thermoélectrique et son importance pour les performances globales du système ne doit pas être négligée. Étant donné que toutes les caractéristiques opérationnelles des dispositifs thermoélectriques sont liées à la température du dissipateur thermique, il est crucial de sélectionner et concevoir ce dernier avec soin.

### III.3.2.5 Ventilateur:

Le ventilateur est utilisé pour ventiler le dissipateur thermique et éviter que sa température ne devienne trop élevée.

Deux ventilateurs de 12V ont été utilisés dans notre montage.



**Figure III.8 :** les deux ventilateurs

### III.4 Schéma de câblage et connexion des composants :

#### III.4 .1 Description du câblage:

- Une batterie est reliée à un BMS (Battery Management System) qui régule la charge afin de protéger la batterie contre la surcharge et la décharge excessive.
- La batterie est chargée à l'aide d'un panneau solaire connecté à la sortie du BMS.
- La sortie positive (+) et négative (-) du BMS est connectée à l'élevateur de tension pour atteindre une tension de 12V. Ensuite, le courant passe par un interrupteur avant d'être connecté au thermostat.
- Deux éléments Peltier ont été connectés en série et une sortie de Peltier est reliée en parallèle à deux ventilateurs.
- Le thermostat est connecté à la sortie de l'ensemble Peltier-Ventilateur (unité de refroidissement). Le fil positif est relié au port K0 et le fil négatif est relié au port GNR.

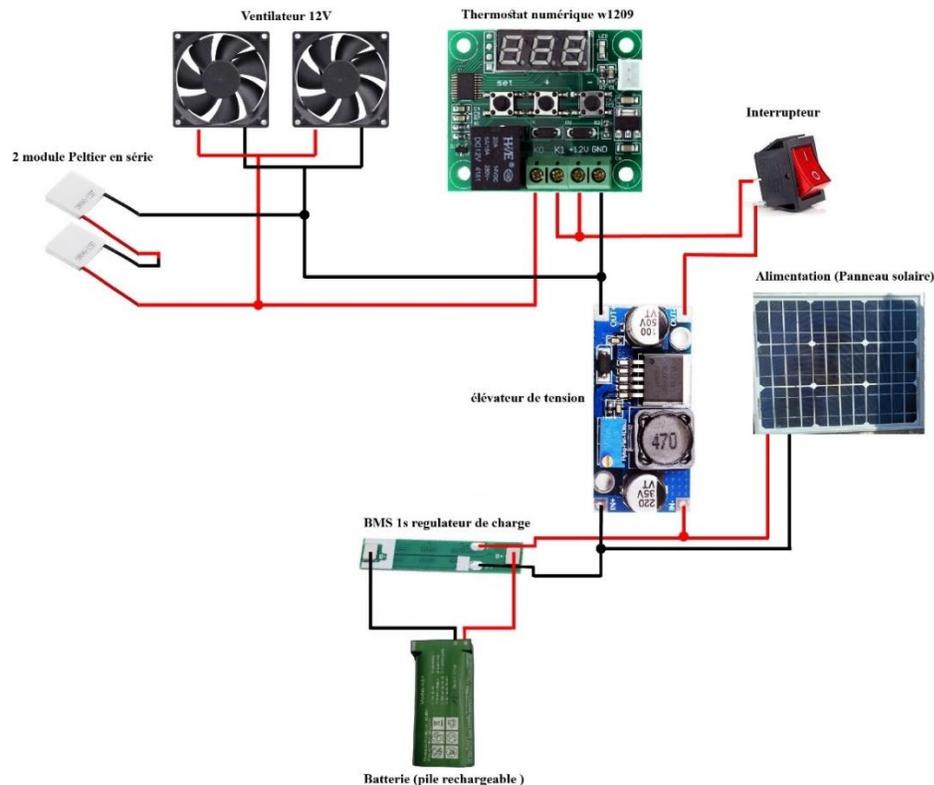


Figure III.9 : Schéma de câblage et connexion des composants

### **III.5 Construction et assemblage du mini conservateur médical :**

La chambre de refroidissement a été divisée en 3 couches. La chambre intérieure a été conçue pour accueillir 3 stylos d'insuline et mesurent  $(18*7*4)$  cm<sup>3</sup>. De l'aluminium d'une épaisseur de 1,2 mm a été utilisé en raison de sa conductivité thermique élevée, ce qui permet une bonne distribution de la chaleur à l'intérieur de la chambre, assurant ainsi un bon refroidissement des produits médicaux qu'elle contient.

Le côté inférieur externe de l'aluminium est connecté à la partie froide du module Peltier. Une couche de pâte thermique a été appliquée pour assurer un contact complet entre l'aluminium et la partie froide. La partie chaude de l'unité de refroidissement est connectée à un dissipateur thermique et à deux ventilateurs pour assurer une bonne dissipation de la chaleur, car l'efficacité de Peltier est améliorée lorsque le côté chaud est correctement refroidi.

En ce qui concerne l'isolation, l'aluminium est entièrement recouvert d'un isolant en polyuréthane d'une épaisseur de 1 cm. Le polyuréthane est léger, se découpe facilement, ce qui facilite sa manipulation et son utilisation. Il est résistant à l'humidité et à la moisissure, résiste à la pression et reste stable. Il présente une très faible conductivité thermique de 0,024 à 0,030 W/m K, ce qui en fait un excellent isolant durable.

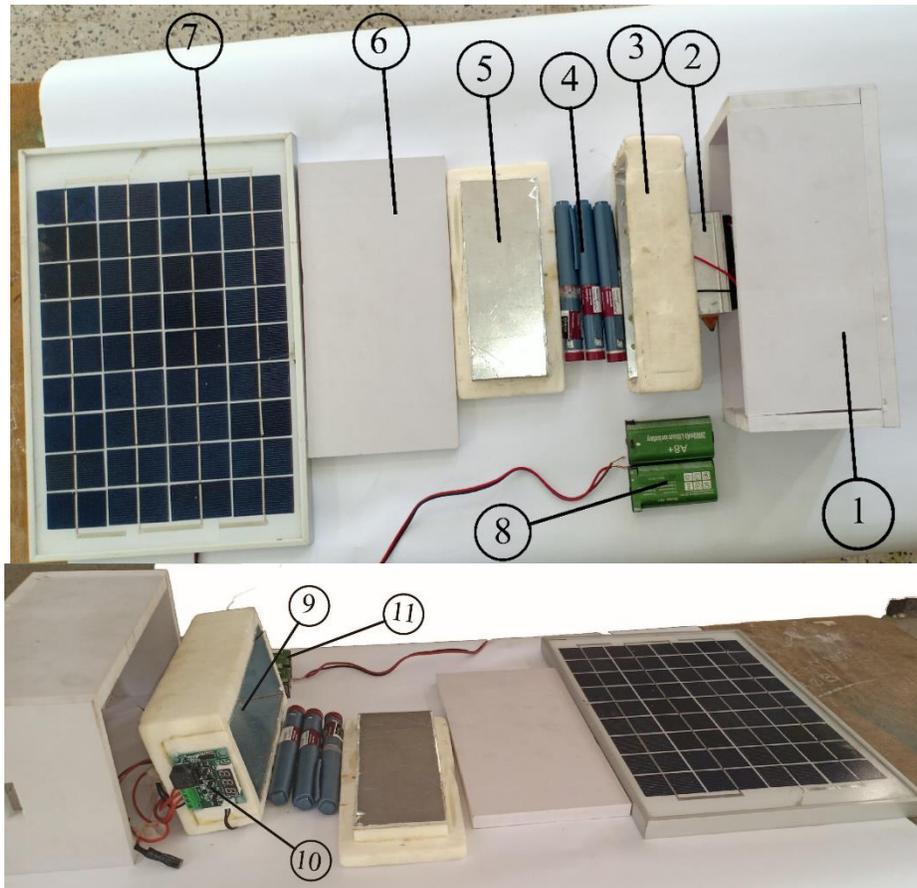
Pour protéger les matériaux utilisés et améliorer l'isolation, nous avons ajouté un étui à l'intérieur de la chambre fabriqué en Forex. Le Forex est connu pour son excellente isolation, sa résistance aux chocs et sa légèreté.

Après l'installation des éléments structurels, un capteur de température est placé à l'intérieur de la chambre en aluminium et est connecté à un thermostat. Le thermostat contrôle à son tour le module Peltier et les ventilateurs. Lorsque la température dépasse un seuil défini, le thermostat ferme le circuit électrique pour activer l'unité de refroidissement et les ventilateurs afin de refroidir la chambre. Lorsque la température atteint le niveau souhaité, l'alimentation de ces éléments est coupée.

De plus, ces éléments sont alimentés par une batterie rechargeable. La batterie est connectée à un régulateur de charge pour les protéger contre la décharge excessive ou la surcharge. La batterie

est chargée à l'aide d'un panneau solaire d'une puissance de 20 watts, qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique pour et charger la batterie.

Avant d'alimenter le conservateur, nous devons utiliser un convertisseur de tension pour obtenir du 12V, car le thermostat fonctionne avec une tension de 12V et nous devons lui fournir une tension normale pour qu'il fonctionne correctement. C'est pour ça on a choisi tous les éléments à 12V (2 éléments Peltier en série 11.6V, les ventilateur). Donc, l'élevateur est connecté entre le BMS et le conservateur.



**Figure III.10 :** Photo détaillé de l'ensemble sous forme de vue éclaté

- |                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1- Chambre extérieur (FOREX)          | 6- le couvercle de la boîte extérieur |
| 2- Peltier + ailette + ventilateur    | 7- panneau solaire                    |
| 3- Isolant (Polyuréthane)             | 8- les batteries + BMS                |
| 4- stylo d'insulin                    | 9- la boîte intérieure (Aluminium)    |
| 5- le couvercle de la boîte intérieur | 10- thermostat numérique              |
| 11- Elévateur de tension              |                                       |

### III.6 Tests et ajustements:

#### III.6.1 Analyse du bilan thermique du module thermoélectrique :

En général, dans l'étude du chauffage ou du refroidissement à effet Peltier un modèle d'équilibre énergétique à l'état permanent tel que décrit par Riffat et Ma [2] est utilisé pour caractériser les performances théoriques du module thermoélectrique.

Refroidissement à effet Peltier	$Q_{pc} = 0.0973$
Chauffage à effet Peltier	$Q_{ph} = 0.4844$
Le taux de chauffage à effet Joule	$Q_j = 2.03474$
La conduction du côté froid vers le côté chaud	$Q_k = 1.2732$
la capacité de refroidissement	$Q_c = -3.21064$
La quantité de chaleur transférée du côté chaud du module thermoélectrique	$Q_h = -2.82354$
La consommation d'énergie électrique du module thermoélectrique	$P_{tm} = 62.0451$
Le COP du module thermoélectrique expérimental	$COP = -0.5667$

**Tableau III.2 :** Analyse du bilan thermique du module thermoélectrique

#### III.6.2 Thermostat numérique :

Nous avons effectué des tests sur un thermostat alimenté par une source de 12V. Lors de l'état fermé, nous avons enregistré une consommation électrique minimale de 0,02A. Toutefois, lors de l'ouverture du relais par le thermostat, nous avons constaté une augmentation de l'ampérage à 0,04A. Cette augmentation significative suggère l'activation de composants ou de mécanismes supplémentaires à l'intérieur du thermostat. En mesurant ces variations d'ampérage, nous avons pu évaluer l'efficacité et la capacité du thermostat à réguler efficacement la température dans différentes conditions environnementales.

#### III.6.3 Ventilateurs:

Nous avons réalisé des tests sur un ventilateur alimenté par 12V. Le ventilateur maintenait constamment un ampérage de 0,1A tout au long de son fonctionnement, ce qui indique une

consommation d'énergie stable et efficace. Nous avons observé que le ventilateur fonctionnait en douceur, sans aucun bruit notable, garantissant un environnement agréable et sans perturbations. L'ampérage constant et le fonctionnement silencieux démontrent la fiabilité du ventilateur et sa capacité à répondre à différentes applications, telles que le refroidissement de composants électroniques ou la fourniture d'un flux d'air dans des espaces confinés.

### III.6.4 Les batteries:

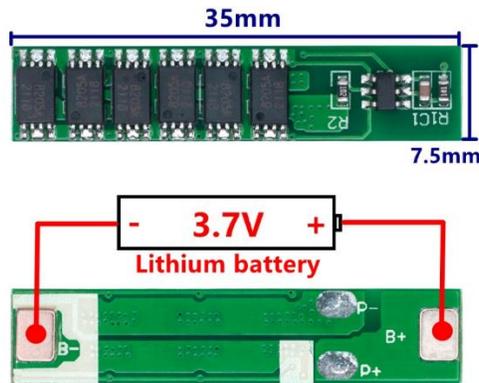
Nous avons procédé à des tests sur des batteries à l'aide d'un multimètre afin d'évaluer leur performance. Les résultats obtenus indiquent que les batteries se sont révélées très performantes. La tension mesurée était de 3.7V, démontrant ainsi une puissance stable et fiable. Cette valeur de tension correspond aux attentes en termes de performance pour ces batteries, ce qui confirme qu'elles fonctionnent dans la plage souhaitée. Nos tests confirment que ces batteries fonctionnent de manière optimale et sont conformes aux spécifications requises en termes de tension.



Figure III.11: Batterie 28000mah Lithium ion

### III.6.5 Régulateur chargeur de batterie BMS 1S 3.7V – 8a – Li-ion 18650 :

Le BMS 1S est un système de gestion spécifiquement conçu pour surveiller et protéger une batterie à une seule cellule, telle qu'une batterie lithium-ion. Il assure la protection de la batterie en limitant le courant de charge et de décharge, en prévenant la surcharge, la décharge excessive et les court-circuit. De plus, il équilibre les tensions des cellules pour garantir un fonctionnement optimal. L'indicateur "1S" fait référence au nombre de cellules présentes dans la batterie, indiquant qu'il s'agit d'une batterie à une seule cellule.



**Figure III.12** : chargeur batterie BMS 1S 3.7V – 8a – Li-ion 18650 [24]

### Fiche technique :

- Tension de détection de surcharge :  $4.25 + 0.05V$
- Tension de déconnexion de surcharge :  $4.23 + 0.05V$
- Tension de détection de décharge excessive :  $2.45 + 0.1v$
- Courant continu maximum: 12A
- Courant de détection de surintensité : 15A
- Tension de charge : 4.2V
- Taille du produit :  $35*7.6*2MM$
- Composant IC: DW01 + 8205A [24]

### III.6.6 convertisseur élévateur dc-dc xl6009 4a :

Le convertisseur élévateur DC-DC XL6009 est un module électronique conçu pour convertir une tension continue (DC) en une tension plus élevée. Il est capable de fournir jusqu'à 4A de courant en sortie.



Figure III.13 : convertisseur élévateur dc-dc xl6009 4a [25]

### Caractéristiques:

- Modèle: module boost DSN6009.
- Propriétés du module : Boost non isolé
- Rectification : correction non synchrone
- Plage de sortie : 5 V ~ 35 V.
- Courant d'entrée : 4 A (max), 18 mA (entrée 5 V, sortie 8 V, sans charge est inférieure à 18 mA. Plus la tension est élevée, plus le courant de charge est grand).
- Efficacité de conversion : < 94 % (plus la pression est élevée, plus l'efficacité est faible).
- Fréquence de commutation : 400 kHz.
- Ripple de sortie : 50 mV (plus la tension est élevée, plus le courant est élevé, plus l'ondulation est grande)
- Régulation de charge : +/-0,5%
- Régulation de la tension : +/-0,5%
- Température de fonctionnement : de -40 à +85 degrés.
- Dimensions du corps : 43 x 20 x 12 mm (L x l x H). [25]

## III.7 Ajustements

### III.7.1 Module Peltier :

Lors de nos tests sur un module Peltier avec une tension maximale de 5,8V, nous avons découvert que l'ampérage maximum mesuré était de 1,13A, contrairement à la valeur annoncée par le fabricant qui était de 1,4A. Cette constatation met une différence significative entre les spécifications du fabricant et les résultats obtenus lors de nos essais. Il est crucial de prendre en compte cette variation lors de l'utilisation du module Peltier, car elle peut avoir des répercussions sur ses performances et son fonctionnement.



**Figure III.14 :** photo d'alimentation stabilisée de test Peltier avec un  $V_{max}$  et  $I_{max}$

### III.7.2 Thermostat numérique :

Dans le cadre de notre projet final, nous avons procédé à la calibration du thermostat en utilisant un autre dispositif d'acquisition de données, le Testo 176 T4. L'objectif de cette calibration était d'assurer des mesures précises de la température et un contrôle thermique précis. Nous avons comparé les mesures affichées par le thermostat avec celles obtenues à l'aide du Testo 176 T4, qui est un appareil certifié et fiable. Les résultats ont révélé que le thermostat affichait une température supérieure de +0,9°C par rapport aux mesures du Testo 176 T4. Ce décalage a été pris en compte pour effectuer les ajustements nécessaires et garantir une précision optimale des mesures du thermostat. Grâce à cette calibration, nous avons pu assurer un contrôle précis de la température, répondant ainsi aux exigences de performance et de fiabilité pour une utilisation efficace du thermostat.

### **III.8 Dimensionnement *du système d'alimentation PV du conservateur***

Pour dimensionner le conservateur médical, nous proposons une démarche simple qui consiste à réaliser un bilan énergétique journalier permettant le choix du panneau solaire, de la batterie et du régulateur. Pour cela, nous proposons de suivre les étapes suivantes :

- ✓ Estimation de la consommation quotidienne : Évaluez la quantité d'énergie électrique nécessaire pour maintenir le conservateur à la température requise sur une base quotidienne. Cela peut être basé sur les spécifications du conservateur, la capacité de stockage et les exigences de refroidissement. Convertissez cette consommation en unités d'énergie en watt-heures (Wh).
- ✓ Dimensionnement du panneau solaire : Calculez la puissance du panneau solaire nécessaire pour recharger la batterie et alimenter le conservateur. Prendre en compte la disponibilité du rayonnement solaire et le rendement du panneau solaire. S'assurer que le panneau solaire peut compenser à la fois la consommation quotidienne du conservateur et les pertes dues au rendement du système.
- ✓ Calcul de la capacité de la batterie : En fonction de la consommation quotidienne estimée et de la période d'autonomie souhaitée, déterminez la capacité de la batterie requise pour stocker suffisamment d'énergie. Considérez également les pertes d'énergie dans le système de conversion et de stockage de l'énergie.
- ✓ Vérification des paramètres : Vérifiez que les dimensions physiques du panneau solaire et de la batterie correspondent aux besoins en termes d'espace disponible et de contraintes de poids. S'assurer également que les caractéristiques électriques du panneau solaire et de la batterie sont compatibles avec les exigences du système de charge et de la consommation du conservateur.

Un programme sous Excel a été réalisé dans cet objectif. La figure 13 illustre les données et les résultats du dimensionnement.

Panneau photovoltaïque PV	
Puissance P en W	<b>20 W</b>
Tension U en V	<b>12 V</b>
Intensité I en A (P/U)	1.67 A
Production jour (4h xW crête)	80 Wh
Production été (6h x W crête)	120 Wh
Production hiver (3h x W crête)	60 Wh

Régulateur de charge	
Tension	<b>12 V</b>
Ampère	<b>10 A</b>
adapté au panneau	Oui
PWM ou MPPT	<b>PWM</b>

Batterie	
Capacité Ah	<b>23 Ah</b>
Tension	<b>3.7 V</b>
Type	<b>Lithium</b>
Recharge max (0,3 de la capacité)	6.9 A
Décharge max (capacité 3x sup au cour	7.666667 28.36667

CONSOMMATION			
Objet	Puissance (	temps (h)	soit en Wh
Module Peltier 1	<b>8.12</b>	<b>8</b>	64.96
Module Peltier 2	<b>8.12</b>	<b>8</b>	64.96
Ventilateur 1	<b>1.2</b>	<b>8</b>	9.6
Ventilateur 2	<b>1.2</b>	<b>8</b>	9.6
Thermostat	<b>0.48</b>	<b>24</b>	11.52
<b>Total de la consommation</b>		<b>160.64 Wh</b>	
soit en Ah (/tension batterie)		43.42 Ah	
capacité batterie (x2 car 80% décharge)		52.10 Ah	
Nombre de jours d'autonomie		1 j	
soit batterie mini de		<b>52.09946 Ah</b>	
Puissance du panneau (pour 4h de prod crête)- conso/4		<b>40.16 W</b>	
MINI -si été - 6h de prod crête		<b>26.77 W</b>	
MAX -si hiver 1,5h prod crête		<b>53.55 W</b>	

Figure III.15 : Résultats de dimensionnement sous Excel

### ***III.9 Conclusion :***

En conclusion de ce chapitre sur le matériel et les méthodes, nous avons fourni une description détaillée de l'équipement utilisé ainsi que des procédures expérimentales mises en place.

L'objectif principal était de garantir la précision et la fiabilité des résultats obtenus. Nous avons également souligné l'importance de l'étalonnage de l'équipement, qui sera abordé en détail dans le chapitre suivant.

# **Chapitre IV**

## **Analyse des résultats expérimentaux**

## IV.1 Introduction :

Cette partie de l'étude vise à évaluer expérimentalement les performances du conservateur médical à effet Peltier pour la conservation de l'insuline. Nous avons conçu et réalisé une série de tests pour caractériser le fonctionnement de chaque composant du conservateur et mesurer la capacité du conservateur à maintenir une température stable dans la plage requise soit entre 2 et 8°C.

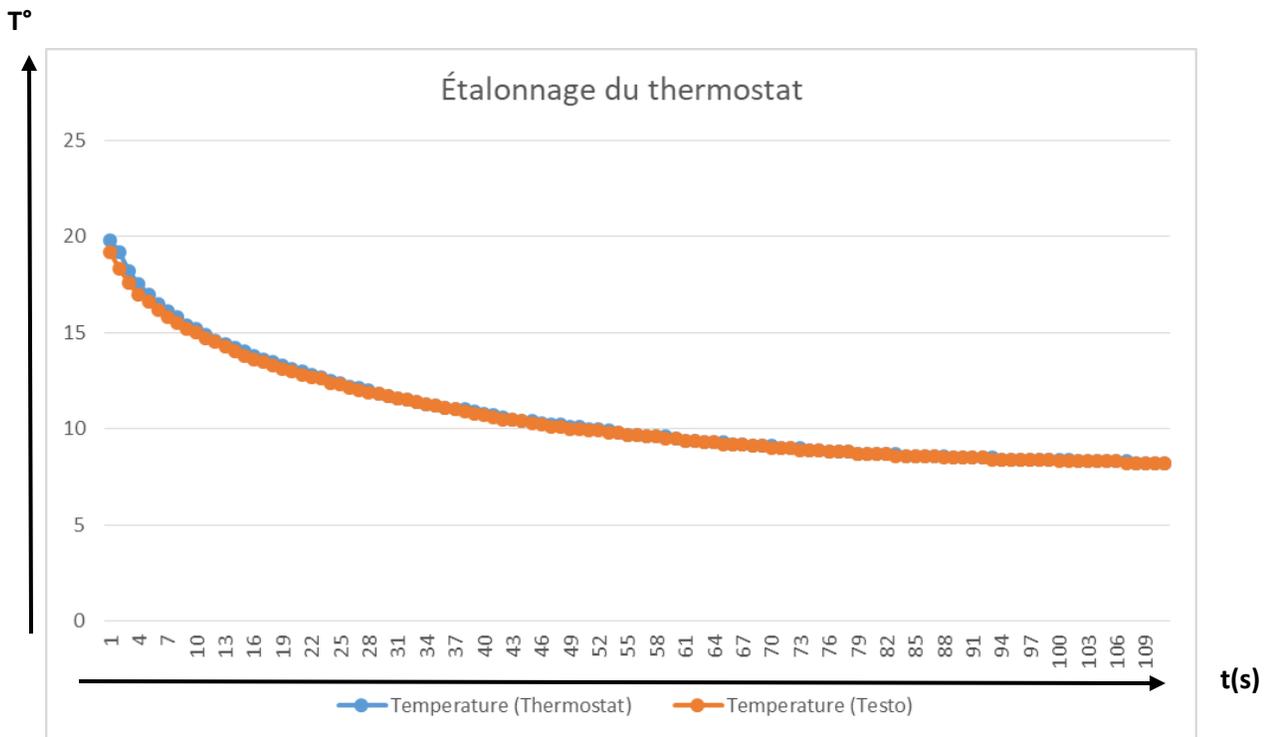
Nous présenterons en détail les résultats expérimentaux des dispositifs et équipements employés, ainsi qu'identifier les éventuelles améliorations à apporter au conservateur pour satisfaire les objectifs fixés au préalable. Notre approche expérimentale est basée sur des protocoles standardisés et des techniques de mesure précises pour garantir la fiabilité des résultats obtenus.

## IV.2 Etalonnage du thermostat :

L'étalonnage du thermostat est une étape essentielle pour garantir la précision des mesures de température. Dans notre étude, nous avons réalisé un test d'étalonnage en comparant les lectures de température fournies par notre capteur de température W1209 et celles enregistrées par le data logger de température Testo 176 T4. Le test a été effectué pendant une période de 110 minutes, et les résultats sont présentés dans la figure 2 :



**Figure IV.1** : étalonnage du thermostat utilisé par Testo 176T



**Figure IV.2 :** Courbe d'étalonnage du thermostat utilisé

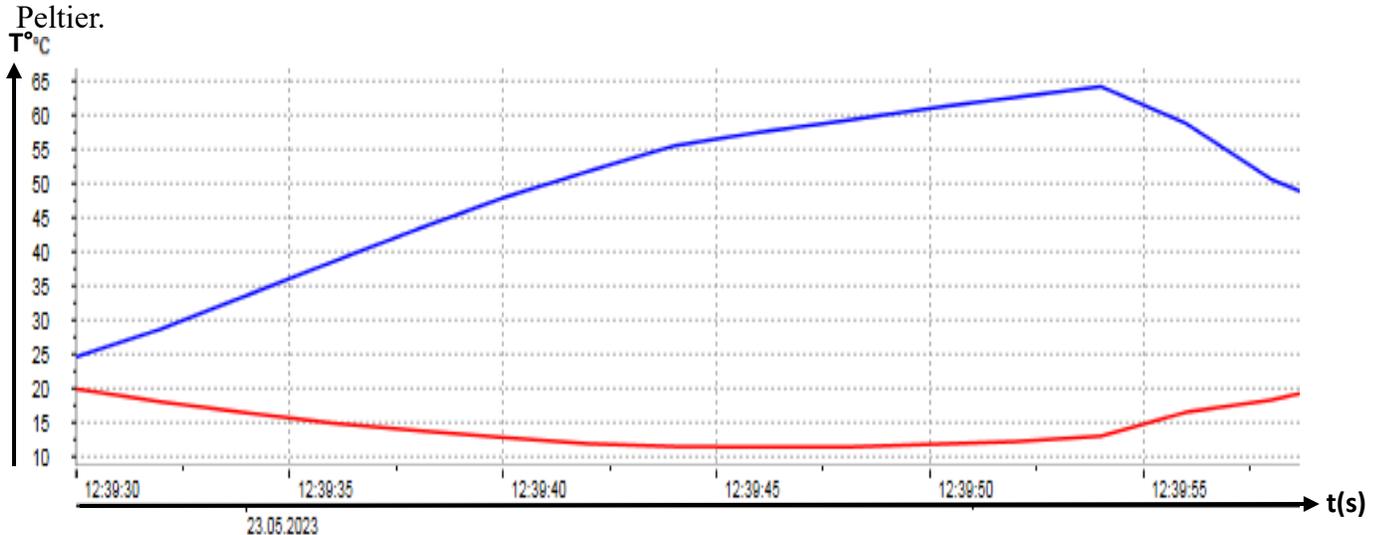
Nous avons observé un léger décalage entre les mesures de température du capteur W1209 (T1) et celle du thermocouple du data logger Testo 176 T4 (T2), d'environ 0.2°C. Cela peut être dû à des différences dans la précision et la sensibilité des capteurs de température utilisés.

Il est important de prendre en compte ce décalage lors de l'interprétation des données de température collectées dans nos expériences. Nous devons nous assurer de corriger les mesures de température en fonction de ce décalage afin d'obtenir des résultats précis et cohérents.

Ces résultats soulignent l'importance de l'étalonnage régulier des capteurs de température pour garantir la fiabilité des mesures. Il est recommandé de vérifier et d'ajuster les capteurs de température en fonction de références fiables pour maintenir la précision des mesures tout au long de l'étude.

### IV.3 Expérimentation du module Peltier :

Lors de nos tests sur le module Peltier, nous avons connecté celui-ci à une alimentation en courant continu et à un système d'acquisition de données (Testo 176T4) au sein du laboratoire. Le module Peltier a été alimenté avec une tension précise de 5,8 volts. Afin de mesurer la différence de température maximale et de déterminer les caractéristiques du refroidisseur thermoélectrique (TEC), nous avons positionné deux thermocouples de type J sur les côtés chaud et froid du module Peltier.



**Figure IV.3 :** Variation de la température au cours du temps module Peltier (expérimentale)

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Température côté chaud ( $T_h$ ) : 64,2 $^{\circ}\text{C}$
- Température côté froid ( $T_c$ ) : 12,9 $^{\circ}\text{C}$
- Courant maximal ( $I_{max}$ ) : 1,13 A

Pour déterminer les propriétés du module thermoélectrique, telles que la résistance électrique ( $R$ ), la conductance thermique ( $K$ ) et le coefficient de Seebeck ( $\alpha$ ), nous avons utilisé une méthode décrite par Zhao et Tan [3] et Chen et Snyder [4], qui utilise les équations suivantes :

- Résistance électrique ( $R$ ) :  $R = 3,1872 \Omega$
- Conductance thermique ( $K$ ) :  $K = 0,006678 \text{ W/K}$
- Coefficient de Seebeck ( $\alpha$ ) :  $\alpha = 0,0248 \text{ V/K}$

- Il convient de noter que ces valeurs de propriétés ont été déterminées à l'aide de méthodes spécifiques et qu'elles peuvent varier en fonction des caractéristiques et des spécifications du module Peltier utilisé.

Ces informations sur les propriétés du module thermoélectrique nous permettront de mieux comprendre son fonctionnement et d'évaluer ses performances dans le cadre de notre mini conservateur médical.

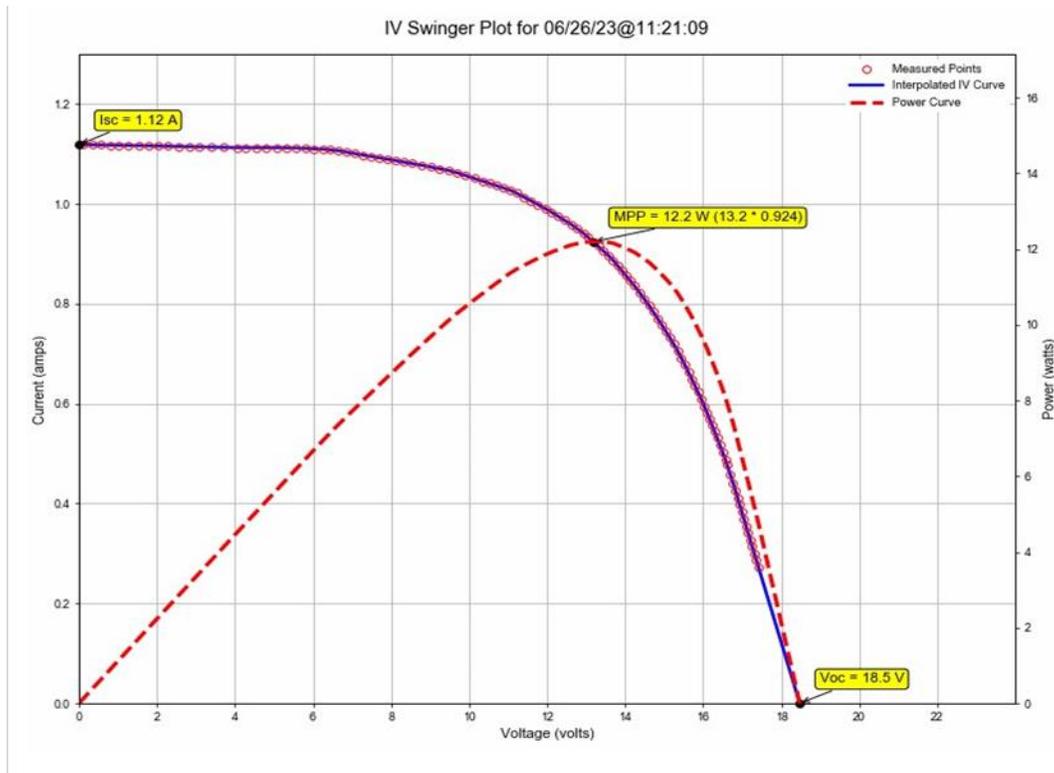
#### IV.4 Caractérisation expérimentale du panneau utilisé :

Nous avons utilisé un panneau solaire fabriqué à partir de cellules à silicium monocristallin de la marque SOSKY, d'une puissance maximale de 20 W. La caractérisation de ce panneau a été réalisée par [26] à l'aide d'un traceur I-V. Les tests ont été effectués le 26 juin 2023 à 11h, sous un éclairage global de  $756 \text{ W/m}^2$ . Le panneau solaire est incliné à un angle de  $36,5^\circ$  et orienté plein sud (figure 2).



**Figure IV.4 :** Banc de caractérisation du module PV par le traceur [26]

Les courbes I-V et P-V de ce panneau, pour un éclairage de  $756 \text{ W/m}^2$  sont représentées dans la figure 3.



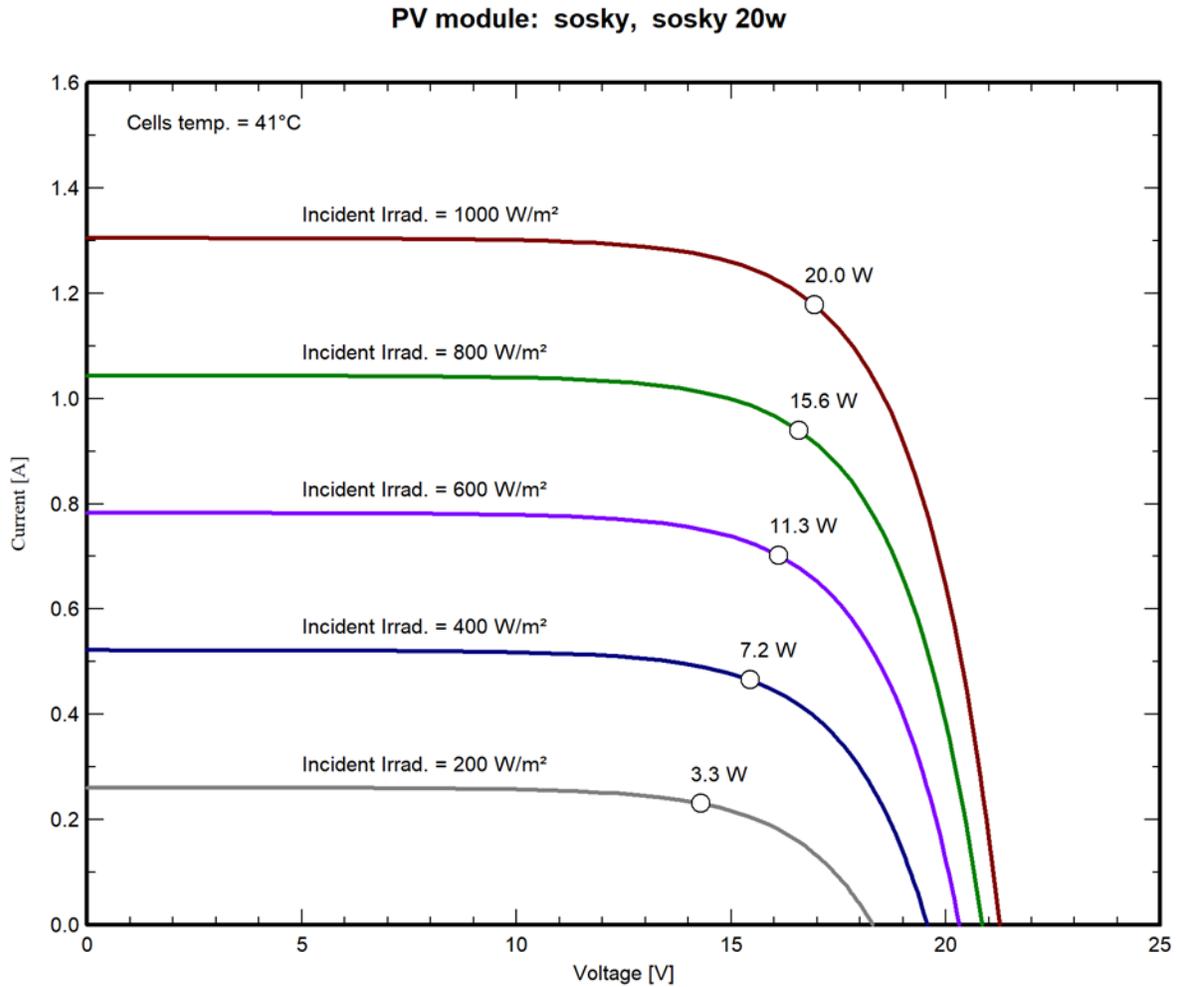
**Figure IV.5 :** Caractéristiques I-V du module PV théorique (ligne bleue) et mesuré (en rouge) pour  $G = 756 \text{ W/m}^2$ . La courbe rouge discontinue représente l'allure P-V. [26]

Afin de prédire les caractéristiques du panneau solaire sous différents niveaux d'éclairement, nous avons tracé les courbes I-V (courant-tension) à différents niveaux d'éclairement. Ces courbes nous permettent de visualiser comment les performances du panneau solaire varient en fonction de la quantité d'éclairement reçue.

Les tests ont été réalisés connaissant le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) à différents niveaux d'éclairement. Ensuite, nous avons tracé les courbes I-V correspondantes en utilisant le logiciel PVSyst (voir figure 4).

Ces courbes I-V nous donnent une idée précise de la relation entre le courant et la tension à travers le panneau solaire à différents niveaux d'éclairement. Elles nous permettent également de déterminer des paramètres importants tels que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance maximale et le rendement du panneau solaire.

L'analyse des courbes I-V à différents niveaux d'éclairement nous aide à comprendre le comportement du panneau solaire dans des conditions réelles d'utilisation. Ces informations sont essentielles pour évaluer les performances du panneau solaire dans divers environnements d'éclairement et pour prédire son rendement dans notre application spécifique. [26]

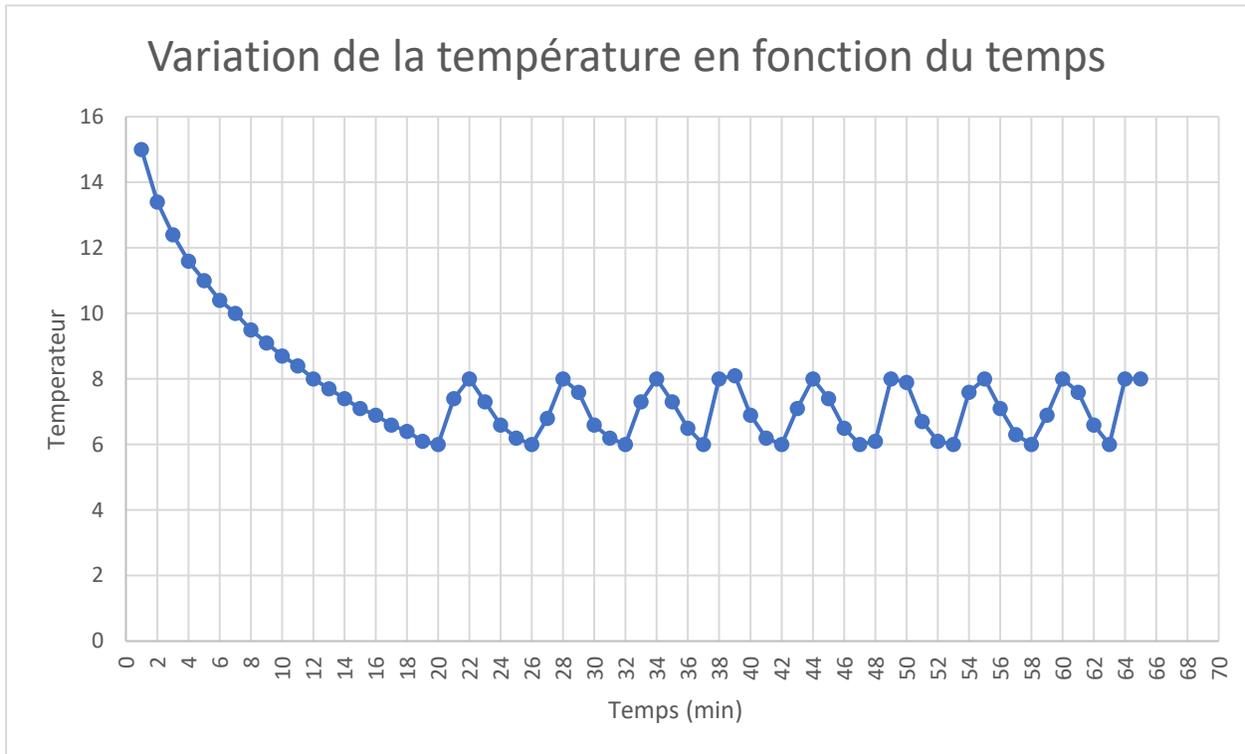


**Figure IV.6 :** Simulation des caractéristiques I-V du module PV sous PVSyst.

### IV.5 Expérimentation du conservateur :

Pour notre premier test, nous avons effectué les expériences dans un laboratoire situé au pavillon 26, où la température ambiante était maintenue à 30°C. Les résultats de ces tests sont présentés dans la figure 1. Pour simuler une utilisation réelle du conservateur, nous avons utilisé

trois stylos d'insuline et avons ouvert le conservateur à trois reprises. La figure montre l'évolution de la température en fonction du temps de fonctionnement.



**Figure IV.7 :** Variation de la température en fonction du temps

Le conservateur a besoin de 10 minutes pour atteindre la plage de température requise pour la conservation de l'insuline, c'est-à-dire entre 2 et 8 degrés Celsius. Le thermostat est programmé pour déconnecter le module Peltier lorsque la température atteint 6<sup>0</sup> C, dans la première occurrence, il a fallu 8 minutes pour que la température remonte 6 à 8<sup>0</sup> C. Ce délai prolongé peut être attribué à la qualité du module Peltier utilisé et à la capacité du système de dissiper la chaleur dans l'air ambiant, notamment si la température de la chambre est élevée (30<sup>0</sup> C). Au cours des autres occurrences, on observe une fréquence à laquelle la température diminue de 8 à 6<sup>0</sup> C en seulement 2 minutes. Cependant, le conservateur n'est pas capable de maintenir la température à 6<sup>0</sup> C pendant une période prolongée. Cela peut être dû à des problèmes d'isolation thermique qui permettent aux températures ambiantes de s'infiltrer ou à un capteur de température qui ne réagit pas suffisamment rapidement pour ajuster le refroidissement en conséquence. Ces facteurs peuvent entraîner une perte de température et rendre difficile le maintien d'une température constante à 6

<sup>0</sup>C. Il est donc recommandé d'améliorer l'isolation du système pour réduire les transferts de chaleur indésirables et de vérifier le capteur de température afin de s'assurer qu'il est réactif et précis. Ces mesures contribueront à améliorer le contrôle et la stabilité de la température, assurant ainsi une meilleure conservation de l'insuline dans la plage de température requise.

#### **IV.6 Dimensionnement pour le système réalisé:**

La consommation d'énergie du système a été évaluée à travers un test de conservation, donnant les résultats suivants : lorsque le système est en fonctionnement pendant 1 heure, il fonctionne pendant 40 minutes, consommant 10,88 watt-heures (Wh) d'énergie. Pendant les 20 minutes restantes, lorsque seul le thermostat est en fonctionnement, la consommation d'énergie est de 0,08 Wh. Ainsi, la consommation d'énergie totale du système pour 1 heure est  $E_h = 10,88 \text{ Wh} + 0,08 \text{ Wh} = 10,96 \text{ Wh}$ . En multipliant cette consommation d'énergie horaire par 24 heures, nous obtenons la consommation d'énergie pour une journée complète, qui s'élève à  $E_j = 263,04 \text{ Wh}$ . Par conséquent, la consommation d'énergie du système sur une période de 24 heures est de 263,04 Wh.

##### **IV.6.1 Les batteries :**

Nous avons une batterie au lithium avec une tension de 3,7 V et une capacité de 28000 mAh. L'énergie de cette batterie ( $E_b$ ) est de 103,6 Wh. Le temps d'utilisation prévu est calculé en utilisant la formule :  $\text{temps d'utilisation} = E_b * 0,9 / E_h$ .

En utilisant les valeurs fournies et en effectuant le calcul, nous obtenons :

$$T = 103,6 * 0,9 / 10,96$$

$$T \approx 8,53 \text{ h.}$$

Cela équivaut à environ 8 heures et 31 minutes d'utilisation.

##### **IV.6.2 Le panneau solaire :**

Nous disposons d'un panneau solaire d'une puissance de 20 W. Notre but est d'estimer la quantité d'énergie produite par ce panneau solaire afin de déterminer combien de (Wh) il peut fournir dans une journée.



**Figure IV.8 :** photo de panneau solaire 20W

La surface de ce panneau solaire est de 0,1482 m<sup>2</sup> et son rendement est de 13,49 %  
 ( $\eta = 20 \text{ (W)}/1000 \text{ (W/m}^2\text{)} * 0,1482 \text{ (m}^2\text{)}$ ).

Estimation de l'énergie fourni par le panneau solaire dans la journée 26 juin.

Temps (h)	8 :45	9 :45	10 :45	11 :45	12 :45	13 :45	14 :45	15 :45	16 :45	17 :45
G (W/m <sup>2</sup> )	5	260	438	561	615	602	517	411	277	86
G <sub>p</sub> (W)	0.741	38.532	64.9116	83.1402	91.143	89.2164	76.6194	60.9102	41.0514	12.7452
P(W)	0.0999	5.197	8.756	11.215	12.2951	12.035	10.335	8.2167	5.5378	1.71932
E (Wh)	0.0999	5.197	8.756	11.215	12.2951	12.035	10.335	8.2167	5.5378	1.71932

**Tableau IV.2 :** Estimation de l'énergie fourni par le panneau solaire

Donc : L'énergie totale fourni par le panneau solaire c'est la somme de l'énergie fourni dans 1h  
 E<sub>t</sub>= 75.410503 Wh.

Le panneau solaire que vous utilisez à une production d'énergie de 75.41 Wh, tandis que la batterie nécessite 103,6 Wh pour se charger. Cela signifie que le panneau solaire est capable de fournir d'énergie pour charger la batterie à 72.79 %.

#### IV.7 Cout de notre conservateur :

Comme notre objectif lors de la réalisation de conservateur était de proposer un coût plus bas par rapport à un autre conservateur disponible sur le marché, le tableau suivant présente les détails :

Composant	Prix en dinar algérien
La boîte de l'aluminium	400 DA
La boîte de forex	900 DA
L'isolation	300 DA
2 module Peltier	1,000 DA
2 Ventilateur De Refroidissement a 12 V 1.2 W	1,200 DA
Ailette	600 DA
La Pate thermique	200 DA
Thermostat numérique w1209	1,000 DA
Convertisseur élévateur dc-dc xl6009 4a	700 DA
BMS 1S 3.7V – 8a – Li-ion 18650	600 DA
La fiche + interrupteur + les câble	300 DA
Batterie lithium 3.7V 28000 mAh	1,500 DA
Panneau solaire 20W	4,000 DA
	Cout total : 12,700 DA

**Tableau IV.3 :** détails du cout du conservateur réalisé.

On voit que notre conservateur est moins cher que les conservateur électrique portable qui vaut 250 \$ (en dinar algérien 36,250 DA).

#### **IV.8 Conclusion:**

Pour améliorer les performances du conservateur thermoélectrique d'insuline proposé, plusieurs actions doivent être pris en compte. Une isolation adéquate est essentielle pour réduire les transferts de chaleur indésirables, tandis qu'un capteur de température réactif et précis est nécessaire pour un contrôle précis. Le système de dissipation de chaleur doit être efficace pour maintenir la stabilité de la température. L'utilisation de modules Peltier de haute qualité est recommandée pour un refroidissement optimal. Enfin, les conditions environnementales, telles que la température ambiante, doivent être prises en compte pour optimiser les performances. En tenant compte de ces améliorations, le conservateur pourra maintenir une température constante dans la plage requise pour la conservation de l'insuline et ainsi répondre au cahier des charges établi.

**Conclusion générale :**

## Conclusion générale :

Les conservateurs médicaux portables solaires à effet Peltier offrent une solution innovante pour le stockage et le transport des produits médicaux sensibles à la température dans des environnements éloignés ou peu accessibles à l'électricité. Ils utilisent le phénomène de refroidissement thermoélectrique, également connu sous le nom d'effet Peltier, pour maintenir une température stable à l'intérieur du conservateur.

L'avantage clé de ces conservateurs médicaux est leur capacité à maintenir une température constante à l'intérieur de l'appareil, généralement entre 2 et 8 degrés Celsius, pour assurer la conservation des médicaments, des vaccins ou d'autres produits médicaux thermosensibles. Cela garantit que les produits restent efficaces et sécuritaires pendant leur transport ou leur stockage, même dans des conditions climatiques défavorables.

En utilisant l'énergie solaire comme source d'alimentation, ces conservateurs médicaux portables réduisent la dépendance aux combustibles fossiles et contribuent à la préservation de l'environnement. Ils offrent également une solution économique à long terme, car ils éliminent les coûts récurrents liés à l'achat de glace ou de packs de congélation, souvent nécessaires pour maintenir la température appropriée dans les systèmes de conservation médicale traditionnels.

Cependant, il est important de noter que les conservateurs médicaux portables solaires à effet Peltier ont certaines limites. Ils dépendent fortement de l'exposition au soleil pour leur alimentation en énergie, ce qui signifie qu'ils peuvent être moins efficaces dans des régions où l'ensoleillement est limité ou pendant les périodes de mauvais temps. De plus, leur capacité de stockage peut être limitée, ce qui peut limiter la quantité de produits médicaux pouvant être transportés.

Malgré ces limitations, les conservateurs médicaux portables solaires à effet Peltier sont une innovation prometteuse dans le domaine de la conservation médicale, offrant une solution durable et pratique pour le stockage et le transport des produits médicaux sensibles à la température dans des conditions difficiles. Avec des améliorations continues de la technologie solaire et de l'efficacité des systèmes de refroidissement à effet Peltier, ils ont le potentiel de jouer un rôle crucial dans la fourniture de soins de santé de qualité dans les régions éloignées et les pays en développement.

## ***References:***

- [1] Y.J. Dai \*, R.Z. Wang, L. Ni, Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, Received 14 March 2002; accepted 1 May 2002.
- [2] Sabah A. Abdul-Wahab, Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator, a Sultan Qaboos University, College of Engineering, Mechanical and Industrial Engineering Department, 7 April 2008.
- [3] S.M.A. Rahman\*, A. Sara, R. Asmaa, S. Rasha, Design and Experimental Investigation of Portable Solar Thermoelectric Refrigerator, Sustainable and Renewable Energy Engineering, University of Sharjah, Sharjah 27272, United Arab Emirates, 2017, Volume 14.
- [4] Md. Shariful Islam, Afifa Alam, S.M. Mahmud Kamal, PRESERVATION OF MEDICINES & VACCINES BY THERMOELECTRIC (PELTIER) REFRIGERATION UNIT IN BANGLADESH PERSPECTIVE, Department of Mechanical Engineering Military Institute of Science and Technology (MIST), Mirpur Cantonment, Dhaka, Bangladesh. January 2017.
- [5] Uttam Kumar Chaudhary<sup>1</sup> , Adarsh patel<sup>2</sup> , Deepak Arya<sup>3</sup> , Deepanshu Gautam<sup>4</sup> , Prasoon Choudhary<sup>5</sup>, Solar Refrigeration using Peltier Module, Mechanical Engineering, IMS Engineering College ,Ghaziabad, Mar-Apr 2018, Volume 4.
- [6] S. Vijayarengan, R.Sooriyaraj, G.Vinithraj, C.Venkatesan, A.Vinoth, Design and Fabrication of Thermoelectric Solar Refrigerator, Department of Mechanical Engineering, Shivani Engineering College, Trichy, Tamilnadu, India, 4, April (2018), Volume 6.
- [7] Lalith Pankaj Raj Nadimuthu<sup>1</sup> · Kirubakaran Victor<sup>1</sup>, Environmental friendly micro cold storage for last-mile Covid-19 vaccine logistics, Centre for Rural Energy, The Gandhigram Rural Institute Deemed to be University, Gandhigram, Tamil Nadu 624 302, India, Published online: 23 November 2021.
- [8] A. Volta, “Nuova memoria Sull’ elettricità a animale. Divisa in tre lettere diretta al signor Abate Anton Maria Vassali, professore di fisica nella R. Università Torino. 1794-1795.” Institute for experimental medicine of Russia — «A.Galvani and A.Volta, selected papers on animal electricity», OGIZ Publ., M.— L., 1937., 1795-1794.
- [9] T. J. Seebeck, “Magnetische Polarisation der Metalle und Erze Durch TemperaturDifferenz,” in Ostwald’s Klassiker der Exakten Wissenschaften Nr. 70 (1895). Seebeck Biography 1. Seebeck Biography 2., 1822.

- [10] J. C. Peltier, “Nouvelles expériences sur la calorificité des courants électriques,” p. I. VI (1834) 371–87
- [11] M. Gökçek, and F. Şahin, “Experimental performance investigation of mini channel water cooled thermoelectric refrigerator”, Case Stud. Therm. Eng., vol. 10, pp. 54-62, 2017.
- [12] S. B. Riffat, and X. Ma, “Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review”, Int. J. Energy Res., vol. 28, pp. 753-768, 2004.
- [13] D. Zhao, and G. Tan, “Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling,” Energy, vol. 68, pp. 658-666, 2014.
- [14] M. Chen, and G. J. Snyder, “Analytical and numerical parameter extraction for compact modelling of thermoelectric coolers”, Int. J. Heat Mass. Trans., vol. 60, pp. 689-699, 2013.
- [15] Amel. F. Boudjabi. Cours : Conversion d'énergie. Université d'Oum El Bouaghi, 2015.
- [16] Moine Gérard. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé. Encyclopédie de l'énergie, article 167 , Avril 2018.
- [17] Sofia Belaid lalouni. Cours : Energie solaire photovoltaïque. Université de Bejaïa, 2015.
- [18] <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-sourceinepuisable-dinnovations>
- [19] série et parallèle fr.renogy.com.
- [20] ALMET, Informations techniques » Données techniques sur l'aluminium et ses alliages, <<https://almet-metal.com/informations-techniques/donnees-aluminium>>
- [21] 3A Composites GmbH, Fiche technique pour FOREX@classic  
, Singen, Germany, Date d'émission 01/2014
- [22] Alli express, TEC1-04901 TEC1-04902 Thermoélectrique Refroidisseur Peltier DIY 20\*20MM 5V l'autorisation/pipeline Nouveau de semi-conducteur réfrigération, <[https://fr.aliexpress.com/item/1005004398333347.html?spm=a2g0n.productlist.0.0.7314687amyeeP3&brower\\_id=9d6d1eb109d042568bc709255bca1b0c&aff\\_platform=msite&m\\_page\\_id=np](https://fr.aliexpress.com/item/1005004398333347.html?spm=a2g0n.productlist.0.0.7314687amyeeP3&brower_id=9d6d1eb109d042568bc709255bca1b0c&aff_platform=msite&m_page_id=np)>

utheczplzcasltt188c5719a8eb0f989a0252e3eb&gclid=&pdp\_npi=3%40dis%21DZD%21411.59%21184.74%21%21%21%21%21%40212278bd16869397367241133d07cd%2112000032876151278%21sea%21DZ%210&algo\_pvid=638c5323-db62-4c25-a395-8984d112e4bb >

[23] mhtronic, W1209 controleur de temperature, <<https://mhtronic.com/produit/w1209-controleur-de-temperature/>>

[24] Mhtronic, BMS 1S 3.7V – 8a – Li-ion 18650, < <https://mhtronic.com/produit/bms-1s-3-7v-8a-li-ion-18650/>>

[25] POWERTECH, convertisseur élévateur dc-dc xl6009, <<https://www.powertech-dz.net/products/single/convertisseur-eleveur-dc-dc-xl6009-4a-vente-composants-electronique-blida-algerie-421>>

[26] LAIB IZZEDDINE, ATBA ALAAEDDINE, Réalisation et conception d'un traceur I-V à base d'un Transistor MOSFET, MASTER en énergie renouvelable option conversion photovoltaïque, UNIVERSITE BLIDA 1, 2023.