

Arias Santiago

Escabias Remi

Présentation du Projet : Étude Thermodynamique d'une Enceinte Réfrigérée par Effet Peltier

1. Objectif du Projet

L'objectif principal de ce projet est de concevoir, d'instrumenter et de caractériser un système de réfrigération basé sur un module thermoélectrique (Peltier) appliqué à une enceinte isolée (glacière type Coleman).

Il s'agit de mener une démarche de physique expérimentale visant à :

- Quantifier les déperditions thermiques d'une enceinte réelle.
- Étudier la compétition entre l'effet Peltier (pompage de chaleur) et l'effet Joule (dissipation thermique) au sein du module.
- Déterminer expérimentalement le point de fonctionnement optimal (courant I_{opt}) pour maximiser le refroidissement.
- Mettre en place un système d'acquisition de données automatisé via un microcontrôleur.

2. Le Dispositif Expérimental (Le Montage)

Le montage est divisé en trois sous-systèmes isolés pour garantir la sécurité et la précision des mesures :

- **Le Circuit de Puissance (12V)** : Alimenté par un générateur de laboratoire, il comprend le module Peltier monté en série avec un ampèremètre, et un voltmètre en parallèle. Un ventilateur (tournant à 100% de sa capacité) est couplé au dissipateur thermique sur la face chaude du module. Les connexions à fort courant (jusqu'à 5A) sont sécurisées par des borniers (dominos).
- **Le Circuit de Commande** : La modulation de la puissance injectée dans le Peltier est assurée par un transistor MOSFET (IRFZ44N) piloté par le signal PWM d'une carte Arduino UNO.
- **Le Circuit d'Acquisition (5V)** : Trois sondes de température numériques (DS18B20) sont déployées pour mesurer en temps réel :
 - T_{int} : La température à l'intérieur de l'enceinte.
 - T_{ext} : La température sur le dissipateur (face chaude).
 - T_{amb} : La température ambiante du laboratoire (référence).

3. Protocoles Expérimentaux et Cadre Théorique

Le projet s'articule autour de trois expériences distinctes, permettant de caractériser chaque aspect du système thermodynamique, des pertes passives jusqu'au rendement actif.

Expérience 1 : Caractérisation Thermique de l'Enceinte (Méthode de la masse d'eau)

But : Déterminer la résistance thermique R_{th} de l'enceinte Coleman et en déduire la conductivité thermique (λ) de son isolant (polyuréthane).

- **Protocole Expérimental :**

- Introduire une masse d'eau précisément pesée et chauffée (environ 45-50°C) dans l'enceinte fermée. Le module Peltier est éteint.
- Lancer l'acquisition des données via l'Arduino pour enregistrer la température interne (T_{int}) et la température ambiante (T_{amb}) au cours du temps.
- Laisser le système se refroidir naturellement (relaxation thermique) pendant plusieurs heures jusqu'à ce que T_{int} s'approche de T_{amb} .

- **Lois Physiques et Relations :**

- **Loi de refroidissement de Newton :** Les échanges thermiques convectifs et conductifs globaux suivent une loi du premier ordre. L'équation différentielle s'écrit :

$$m_{eau} \cdot c_p \cdot \frac{dT_{int}}{dt} = - \frac{1}{R_{th}} (T_{int} - T_{amb})$$

- **Solution de l'équation (Régime transitoire) :** En intégrant, on obtient une décroissance exponentielle :

$$T_{int}(t) = T_{amb} + (T_{ini} - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Avec $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$ où $C_{th} = m_{eau} \cdot c_p$ avec $C_p \simeq 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

- **Loi de Fourier (Lien avec le matériau) :** En identifiant τ sur la courbe expérimentale (temps pour atteindre 63% de la chute de température), on déduit R_{th} . Sachant que $R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot A}$ (avec e l'épaisseur des parois et A la surface d'échange), on isole :

$$\lambda = \frac{e \cdot m_{eau} \cdot c_p}{A \cdot \tau}$$

Expérience 2 : Mise en évidence et Mesure de l'Effet Seebeck

But : Déterminer expérimentalement le coefficient de Seebeck (α) global du module thermoélectrique.

- **Protocole Expérimental :**

- Le module Peltier est déconnecté du circuit de puissance (circuit ouvert). Un voltmètre très précis est branché à ses bornes.
- Imposer une différence de température (ΔT) connue et stable entre les deux faces du module (par exemple : contact avec un bain d'eau glacée à 0°C d'un côté, et l'air ambiant ou un objet tiède de l'autre).
- Mesurer simultanément les températures des deux faces (T_{chaud} et T_{froid}) à l'aide des sondes DS18B20 et la tension générée ($U_{seebeck}$) au voltmètre.

- **Lois Physiques et Relations :**

- **Effet Seebeck :** L'application d'un gradient de température aux jonctions de deux matériaux conducteurs/semi-conducteurs différents génère une force électromotrice (tension).

$$U_{seebeck} = \alpha \cdot (T_{chaud} - T_{froid}) = \alpha \Delta T$$

- La pente de la droite $U_{seebeck} = f(\Delta T)$ nous donnera directement le coefficient α (en V/K) du module, paramètre indispensable pour l'expérience suivante.

Expérience 3 : Détermination du Courant Optimal de Refroidissement (I_{opt})

But : Trouver le point de fonctionnement où le module génère le maximum de froid, en illustrant la compétition entre l'effet Peltier et l'effet Joule.

- **Protocole Expérimental :**

- Alimenter le module Peltier. L'enceinte est vide (ou contient une faible masse thermique pour atteindre l'équilibre plus vite).
- Faire varier l'intensité du courant I par paliers (via la modulation PWM de l'Arduino et le MOSFET).
- Pour chaque palier de courant, attendre le régime stationnaire (température interne stable) et relever T_{int_min} , la tension U et le courant I .
- Tracer la courbe de la température interne minimale (ou du ΔT généré) en fonction du courant I .

- **Lois Physiques et Relations :**

- **Bilan de Puissance Thermique :** La puissance frigorifique nette (Q_c) absorbée par la face froide est la somme de trois phénomènes :

1. *L'effet Peltier (actif) :* $Q_p = \alpha \cdot T_{froid} \cdot I$ (linéaire, crée du froid).

2. *L'effet Joule (parasite) :* $Q_j = \frac{1}{2} R_{int} \cdot I^2$ (quadratique, crée de la chaleur, dont la moitié revient vers la face froide).

3. *La conduction thermique (fuite) :*
 $Q_K = \alpha \cdot T_{froid} \cdot I - \frac{1}{2} R_{int} \cdot I^2 - K_m \cdot \Delta T$ (la chaleur repasse de la face chaude à la face froide à travers le module).

Bilan total :

$$Q_c = \alpha \cdot T_{froid} \cdot I - \frac{1}{2} R_{int} \cdot I^2 - K_m \cdot \Delta T$$

- **L'optimum (lopt) :** En dérivant cette équation par rapport au courant ($\frac{dQ_c}{dI} = 0$), on démontre mathématiquement qu'il existe un courant pour lequel le refroidissement est maximal. Au-delà, l'effet Joule (I^2) domine l'effet Peltier (I).

$$I_{opt} = \frac{\alpha \cdot T_{froid}}{R_{int}}$$

- Expérimentalement, ce courant correspondra au minimum de notre courbe $T_{int} = f(I)$.

4. Planification et Répartition des Tâches

Pour mener à bien ce projet, les tâches suivantes ont été identifiées :

- **Phase 1 : Préparation matérielle (Hardware)**

- [] Câblage du circuit de puissance (dominos, câbles de section adaptée).
- [] Assemblage du circuit de commande sur breadboard (MOSFET, résistances, sondes).

- **Phase 2 : Développement logiciel (Software)**

- [] Écriture du code Arduino pour l'acquisition simultanée des 3 sondes DS18B20.
- [] Implémentation du contrôle PWM pour le MOSFET.
- [] Formatage des données sur le port série pour un export facile vers un tableur.
- **Phase 3 : Campagne de Mesures**
 - [] Réalisation de l'Expérience 1.
 - [] Réalisation de l'Expérience 2.
 - [] Réalisation de l'Expérience 3.
- **Phase 4 : Traitement des données et Rédaction**
 - [] Extraction des données brutes vers Excel ou Python.
 - [] Modélisation des courbes (régressions exponentielles pour trouver τ).
 - [] Rédaction du rapport final et préparation de la soutenance orale.