



Etude de la surfusion à l'aide d'un module thermoélectrique



TEC1-12708

Problématique :

Dans quelles conditions et par quelles optimisations un module Peltier peut-il générer un refroidissement suffisant et contrôlé pour induire la surfusion de l'eau ?





Sommaire

01

Introduction à la surfusion

02

Théorie du module Peltier

03

Cheminement des expériences

04

Analyse et comparaison des résultats

05

Approfondissement

06

Conclusion





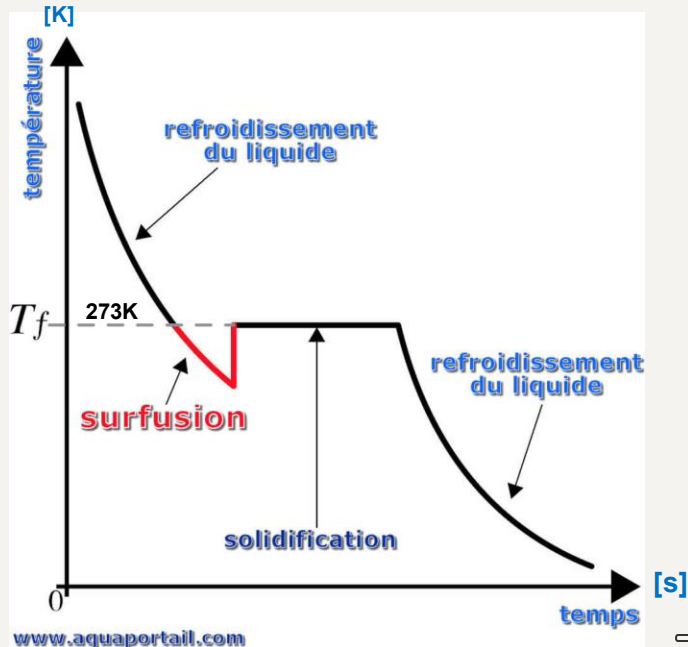
01

La surfusion

Application à l'eau

Phénomène de surfusion

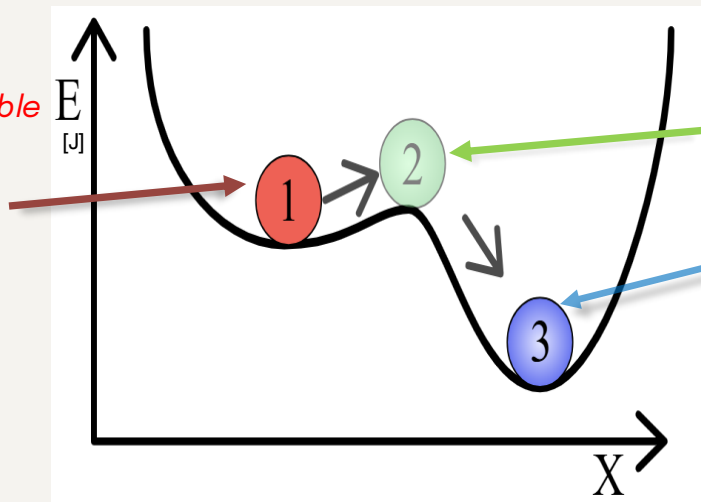
Evolution de la température en fonction du temps



Phénomène de surfusion

Evolution de l'énergie potentielle en fonction de l'état de l'espèce considérée

Un état métastable correspond à un minimum local d'énergie potentielle

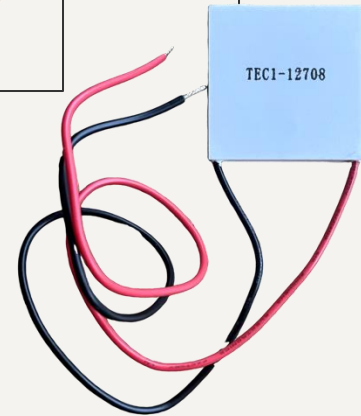


Energie d'activation

Equilibre thermodynamique (minimum global)

02

Théorie du module Peltier



Son utilisation

Peltier : création d'une différence de températures à partir d'un courant.

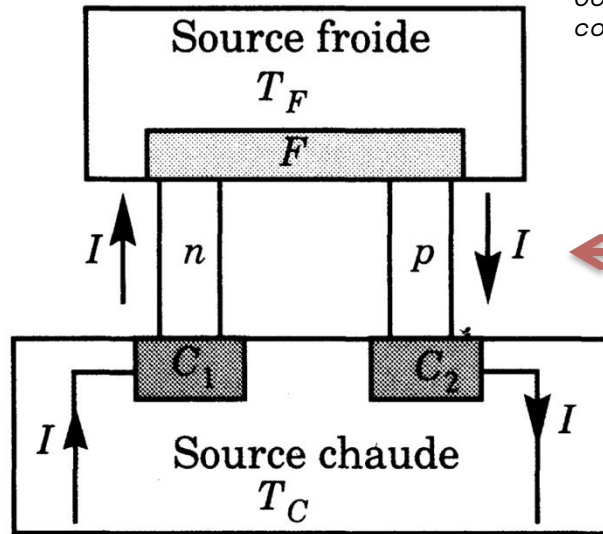
Seebeck : création d'un courant à partir d'une différence de température.

Utilisation :
Refroidissement électronique et réfrigération (glacière)



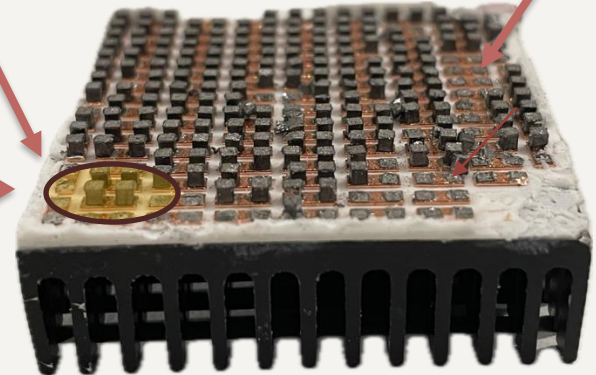


Schéma du module Peltier



Couple d'éléments semi-conducteurs (type n et p)

Jonction cuivre



Dissipateur thermique

Théorie

Hypothèses :

- Les parois latérales des deux barreaux semi-conducteurs sont supposées **adiabatiques**.
- Problème est **unidimensionnel**
- En régime **stationnaire**

Bilan (source froide) :

On considère ici $\vec{J}_q = \epsilon T \vec{J}_e$ pendant la durée dt :

- **reçoit** un transfert thermique $J_{qn} \Sigma dt = \epsilon_n T_f J_e \Sigma dt$ du barreau de type n par lequel le courant entre
- **cède** un transfert thermique $J_{qp} \Sigma dt = \epsilon_p T_f J_e \Sigma dt$ au barreau de type p par lequel le courant sort.

J_{qn} = densité de flux thermique issue du semi conducteur n

ϵ_n = pouvoir thermoélectrique du semi conducteur n

Σ = La surface de la face froide



Théorie

Ceci correspond à une puissance algébriquement reçue :

$$P_P^F = (\epsilon_n - \epsilon_p) T_F I$$

De même :

$$P_P^C = (\epsilon_p - \epsilon_n) T_C I$$

Bilan Global :

$$P_E = P_P^F + P_P^C = (\epsilon_p - \epsilon_n) (T_C - T_F) I$$

Ainsi on retrouve le rendement de Carnot d'une machine frigorifique :

$$e = \frac{-P_P^F}{P_E} = \frac{T_F}{(T_C - T_F)}$$

$$T_F = 268\text{K} (-5^\circ)$$

$$T_C = 293\text{K} (20^\circ)$$

$$e = 10,7$$



Théorie

On réalise un bilan en prenant en compte :

- l'effet Peltier
- l'effet Joules
- la conduction thermique dans les barreaux n et p

A l'aide d'un bilan du premier principe, de la loi de Fourier et des relations entre J_E et J_q :

$$P_F = (T_C - T_F)G + \frac{1}{2}RI^2 + (\epsilon_n - \epsilon_p)T_F I$$

Bilan global :

$$P_E = P_C + P_F = (\epsilon_p - \epsilon_n)(T_C - T_F)I + RI^2$$

Le rendement :

$$e = -\frac{P_F}{P_E} = \frac{(T_C - T_F)G + \frac{1}{2}RI^2 + (\epsilon_n - \epsilon_p)T_F I}{(\epsilon_p - \epsilon_n)(T_C - T_F)I + RI^2}$$

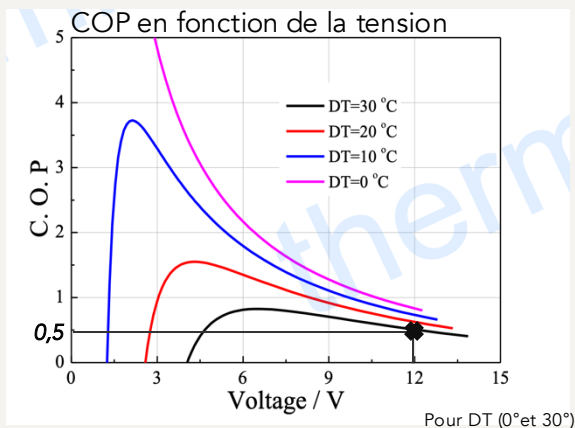
$$\begin{aligned} T_F &= 268K (-5^\circ) \\ T_C &= 293K (20^\circ) \\ R &= 5,2m\Omega \\ G &= 12mW.K^{-1} \end{aligned}$$

$$e = 0,78$$



Performance du système

COP théorique sans pertes	COP théorique	COP réel
COP = 10,7	COP = 0,78	COP = 0,5

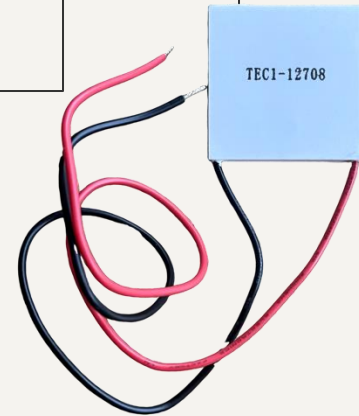


Tension de fonctionnement	12V
Tension de fonctionnement maximale	15V
Plage de courant de fonctionnement	3-6A



Expériences

03



Expériences



01

Module Peltier

Comprendre son fonctionnement

**Module Peltier +
dissipateur +
ventilateur**

Améliorer la dissipation de
transfert thermique de la source
chaude

02



03

Utilisation d'un système à plus grande échelle

Recherche d'un refroidissement
plus efficace



Système final
Diffusion efficace

04



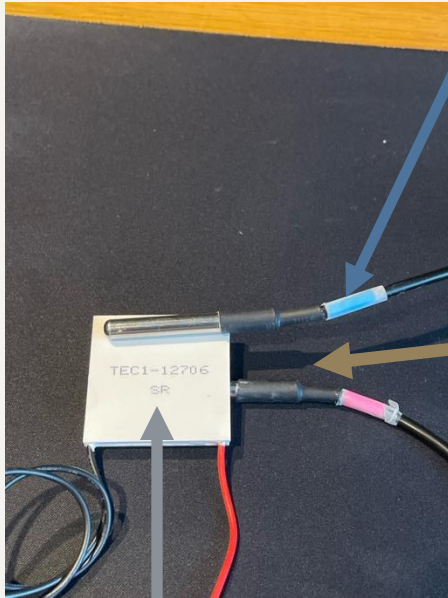


01

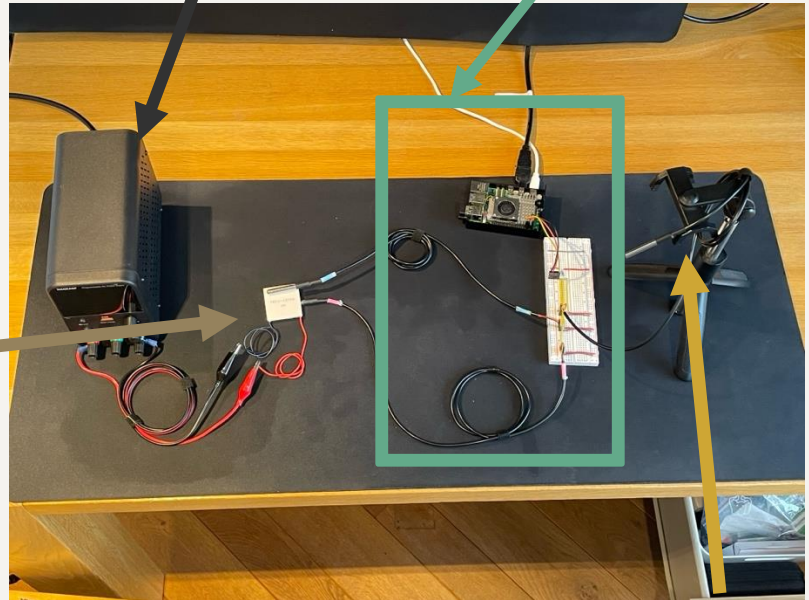
Capteur de
température froide

Générateur

Système d'acquisition



Module Peltier



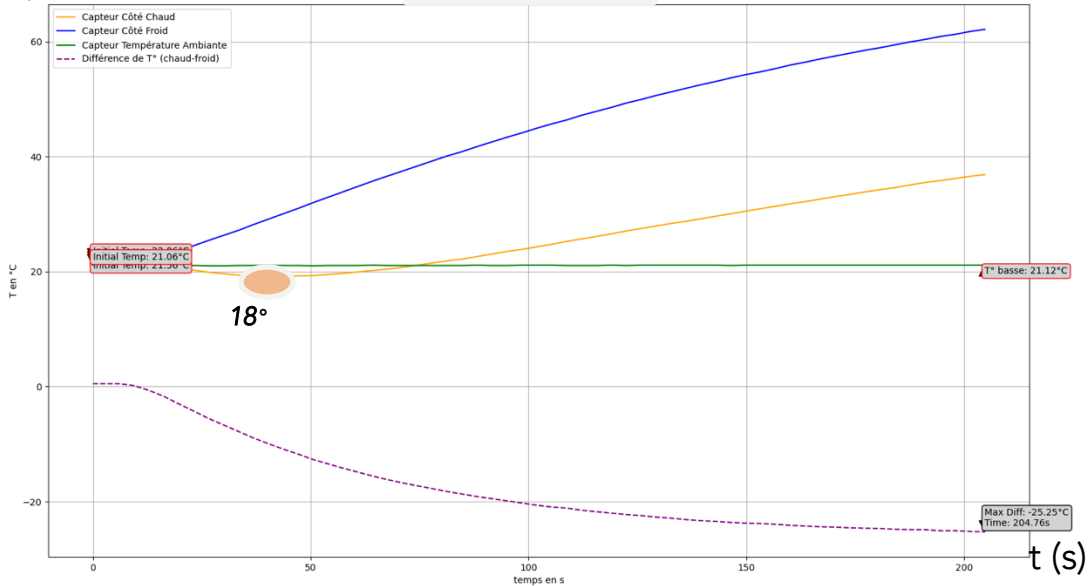
Capteur de
température am

Résultats

1 Ampères, 6 Volts et pas d'eau

Evolution de la température en fonction du temps

T (°C)



Pas de surfusion possible

21°



18°

Expériences

01

Module Peltier

Comprendre son fonctionnement

*Module Peltier +
dissipateur +
ventilateur*

Améliorer la dissipation de
transfert thermique de la source
chaude

02



03

Utilisation d'un système à plus grande échelle

Recherche d'un refroidissement
plus efficace



Système final

Diffusion efficace

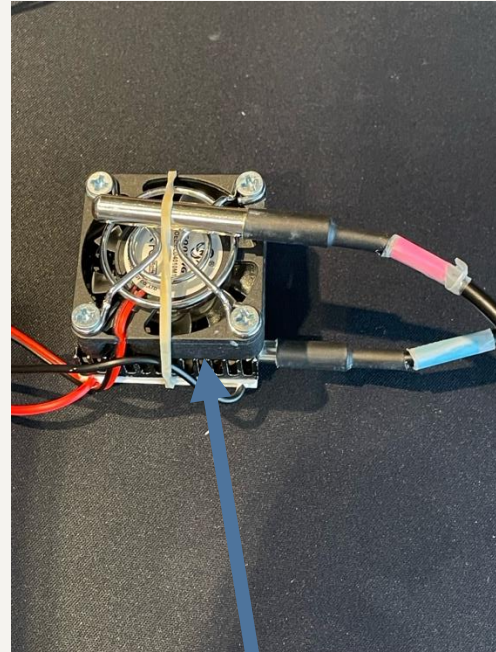
04



02



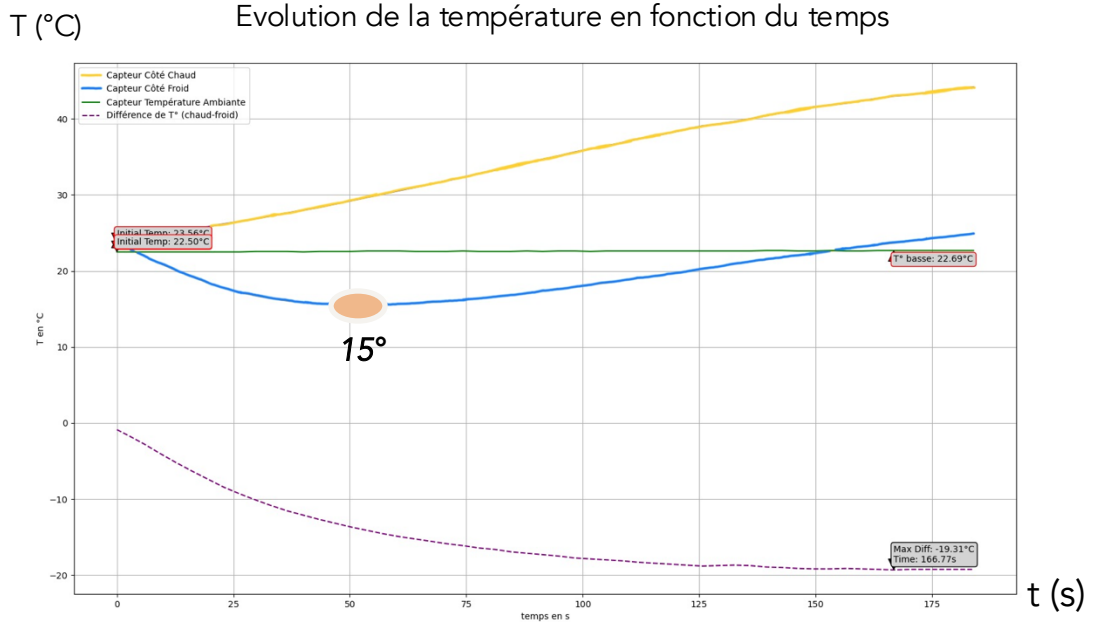
Dissipateur thermique



Ventilateur

Résultats

2 Ampères, 6 volts, pas d'eau, dissipateur + ventilateur



Pas de surfusion possible

23°
↓
15°

Expériences

01

Module Peltier

Comprendre son fonctionnement

Module Peltier + dissipateur + ventilateur

Améliorer la dissipation de
transfert thermique de la source
chaude

02



03

Utilisation d'un système à plus grande échelle

Recherche d'un refroidissement
plus efficace



Système final

Diffusion efficace

04



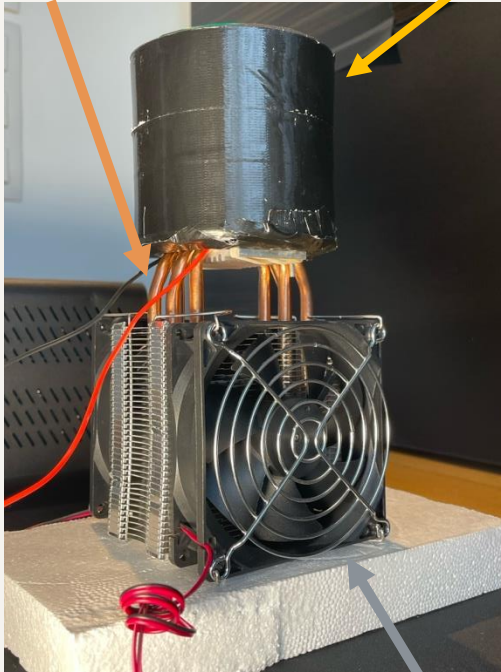


03

Tube dissipateur
en cuivre

Récipient de
refroidissement

Eau



Ventilateurs

Expériences



01

Module Peltier

Comprendre son fonctionnement

*Module Peltier +
dissipateur +
ventilateur*

Améliorer la dissipation de
transfert thermique de la source
chaude

02



03

Utilisation d'un système à plus grande échelle

Recherche d'un refroidissement
plus efficace



Système final

Optimisation

04





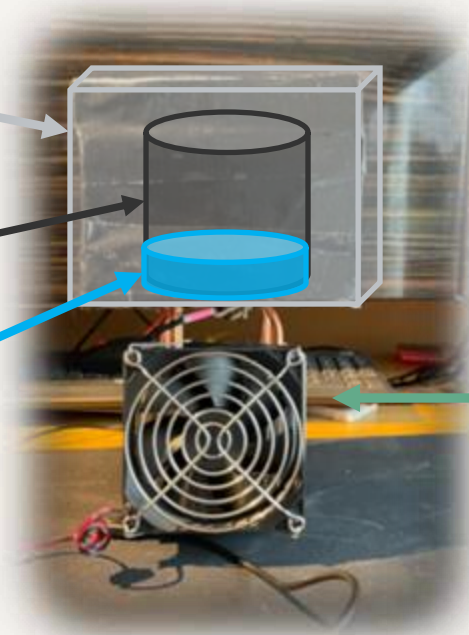
Montage pour refroidissement de l'eau

Isolation en polystyrène

Récipient en aluminium

Eau

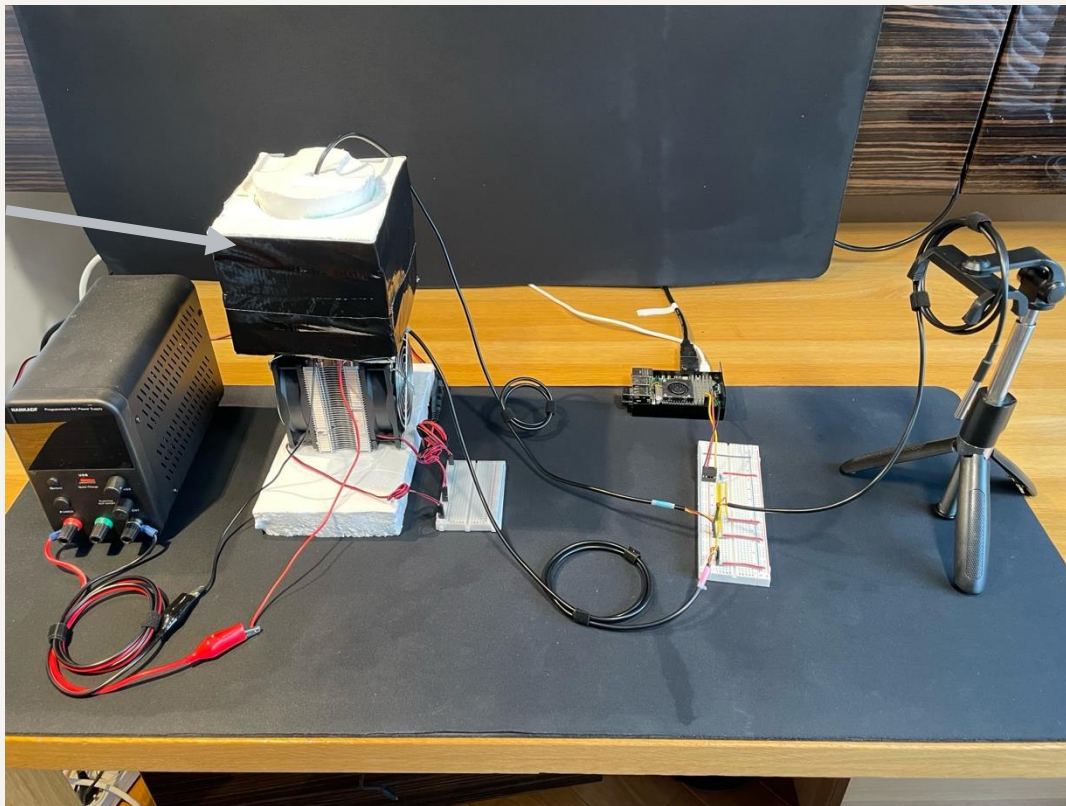
Ventilateur





04

Isolement
polystyrène





Optimisation

Système [récipient en aluminium + eau]

Les énergies :

$$Q_{eau} = m_{eau} c_{eau} \Delta T_{eau}$$

$$Q_{alu} = m_{alu} c_{alu} \Delta T_{eau}$$

$$Q_{total} = Q_{eau} + Q_{alu}$$

Par la loi de Fourier :

$$\Phi_{pol} = \lambda_{pol} \frac{\Delta T_{eau}}{e} \Sigma$$

Donc :

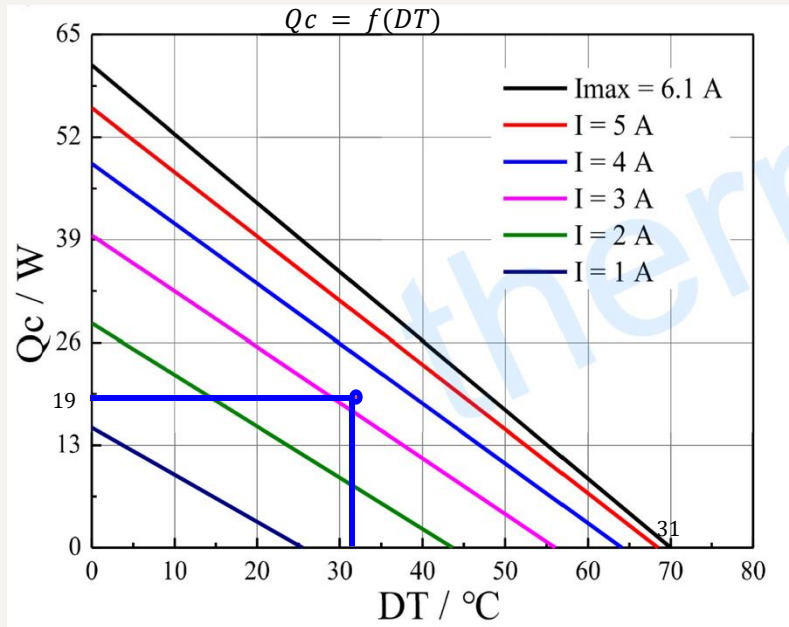
$$P_C = \frac{Q_{total}}{\Delta t} + \Phi_{pol}$$

On obtient $P_C = 19W$



Optimisation

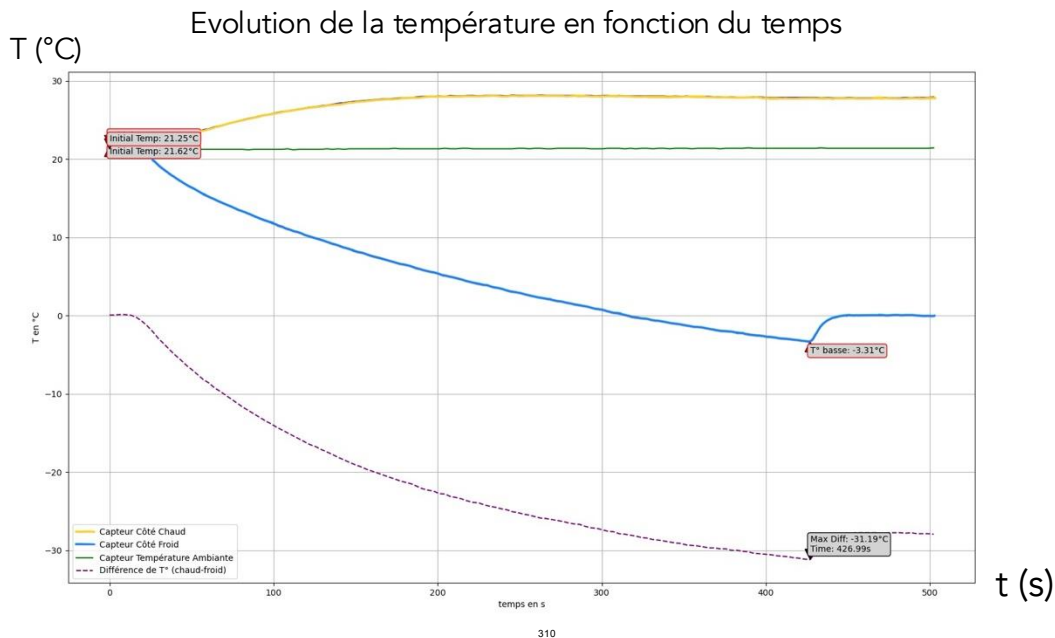
Pour une différence de température de 31°
Une puissance de 19W



La documentation du constructeur recommande
I compris en 3A et 4 A.

Résultats

3,2 Ampères, 12 Volts et 30g d'eau



Il y a surfusion



Paille

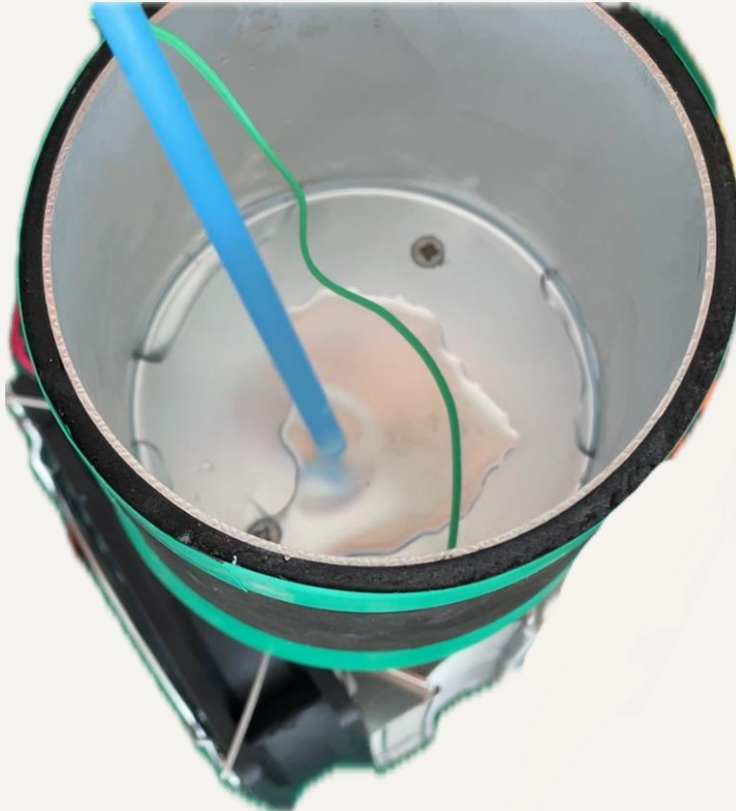
Thermocouple

Système de
refroidissement

Eau

Mise en évidence de la surfusion
de l'eau :

- Système de refroidissement amenant l'eau à -3°
- Création d'un choc pour dépasser l'état métastable





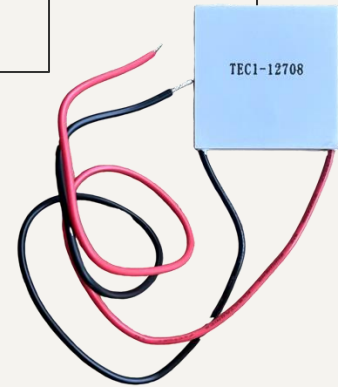






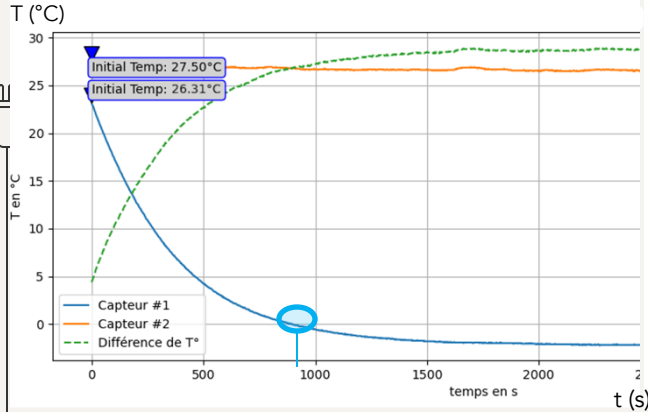
Comparaison des résultats

04

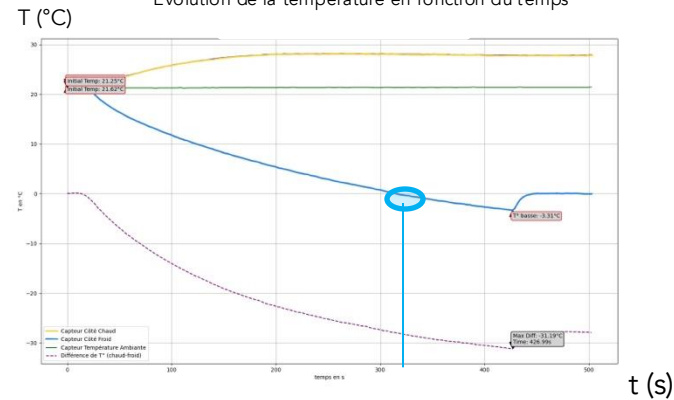


Résultats

Evolution de la température en fonction du temps



Evolution de la température en fonction du temps



Influence

4 A et 12 V

$T_i = 27^{\circ}\text{C}$

Rapidité : $t = 800 \text{ s}$

Température initiale sur la rapidité

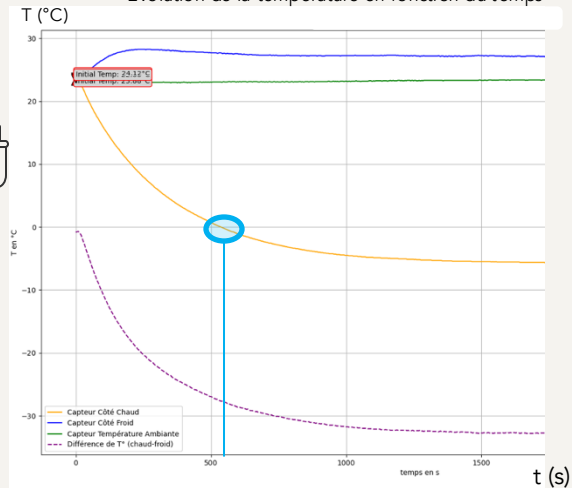
4 A et 12 V

$T_i = 21^{\circ}$

Rapidité : $t = 330 \text{ s}$

Résultats

Evolution de la température en fonction du temps

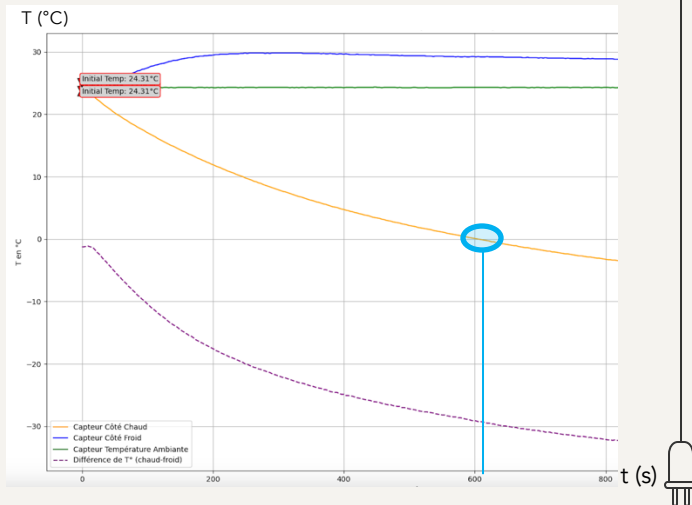


Avec isolation
4 A et 12 V
 $T_i = 24^\circ\text{C}$
Rapidité : $t = 510$ s

Influence

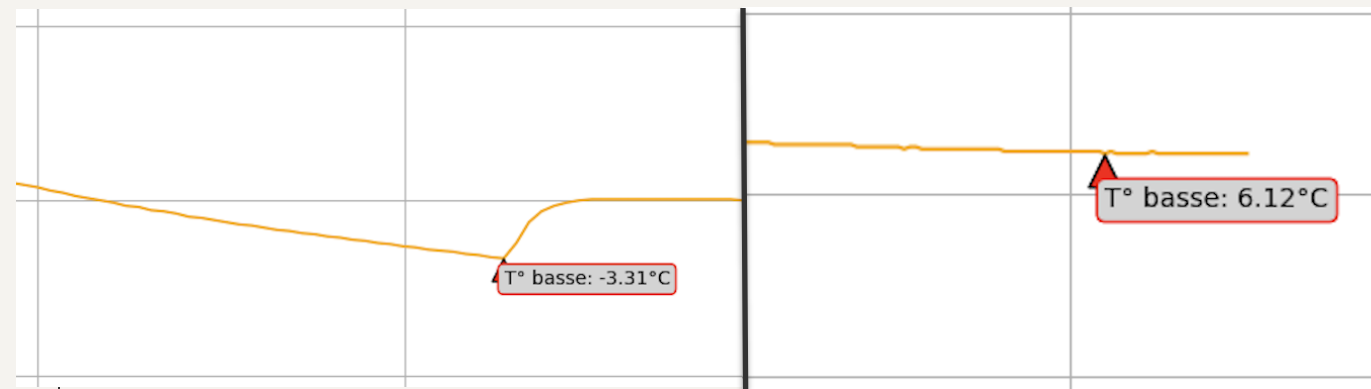
Isolation sur la rapidité

Evolution de la température en fonction du temps



Sans isolation
4 A et 12 V
 $T_i = 24^\circ$
Rapidité : $t = 610$ s

Résultats



3,2 A et 12 V
 $T_i = 24,1^{\circ}\text{C}$
 $t_{\text{final}} = -3,31^{\circ}\text{C}$

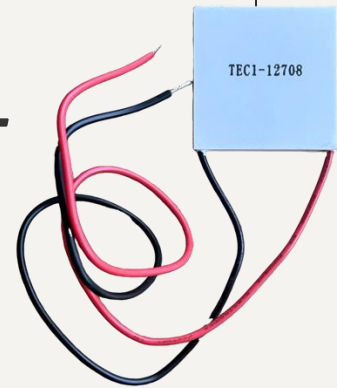
Influence

Puissance électrique fournie sur la
température finale

1 A et 3 V
 $T_i = 21^{\circ}$
 $t_{\text{final}} = 6,12^{\circ}\text{C}$

05

Approfondissement



Incertainitudes

Moyenne :

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i = -3,77^\circ$$

$$N = 18$$

-4.50 ; -4.00 ; -3.50 ; -2.50 ; -2.00 ; -3.40 ; -3.60 ; -4.60 ; -5.12 ; -5.10 ;
-4.12 ; -3.10 ; -5.08 ; -5.20 ; -2.90 ; -3.05 ; -3.15 ; -3.00

Ecart type :

$$u(T) = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (T_i - \bar{T})^2} = 0,92^\circ$$

Incertainitude type (95%) :

$$U(T) = 2 \times \sigma = 1,84^\circ$$

$$T = -3,77 \pm 1,84^\circ$$



06 Conclusion

Problématique :

Dans quelles conditions et par quelles optimisations un module Peltier peut-il générer un refroidissement suffisant et contrôlé pour induire la surfusion de l'eau ?

Utilisation fonctionnelle

Le **module Peltier** permet d'obtenir les conditions suffisantes pour atteindre **la surfusion**.

A certaines conditions

Une **isolement** suffisant , une **diffusion** de la chaleur chaude, une **température** extérieure minimale, un **courant** optimal.

Problème

Les rendements réels de l'ordre de **0,5**, ne permettent pas une utilisation à **grande échelle** ou un refroidissement parfaitement contrôlé.



Annexe

$$R = \frac{L}{\Sigma} \left(\frac{1}{\gamma_n} + \frac{1}{\gamma_p} \right)$$

$\gamma_{n/p}$ = Conductivité électrique du semi conducteur n ou p
 L = Longueur du barreau

$$G = \frac{\Sigma}{L} (\lambda_n + \lambda_p)$$

λ_n = Conductivité thermique du semi conducteur n ou p

$$R = 5,2m\Omega \quad G = 12mW.K^{-1}$$

$$\gamma_n = 7,1.10^4 \Omega^{-1}m^{-1} \quad \lambda_n = 1,25 W.m^{-1}K^{-1} \quad \varepsilon_n = -190 \mu V.K^{-1}$$

$$\gamma_p = 8,3.10^4 \Omega^{-1}m^{-1} \quad \lambda_p = 1,15 W.m^{-1}K^{-1} \quad \varepsilon_p = 200 \mu V.K^{-1}$$

$$L = 5mm. \quad \Sigma = 25mm^2$$



Schéma électrique du système d'acquisition

