LES EFFETS THERMOELECTRIQUES :

Estimation de l'influence de l'Effet Thomson

Khalid MAKROUMI N° 44934

Juin-Juillet 2021

Sommaire

1

Motivation & Introduction

Motivation

Fig 1.1 : La croissance économique.

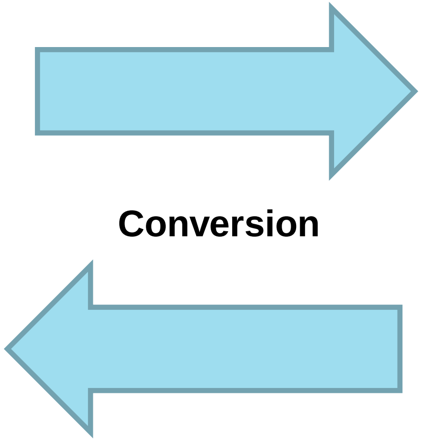
Fig 1.2 : Charbon.

Fig 1.3 : Emission de gaz à effet de serre

Fig 1.4 : Respect de l’environnement.

Introduction

Fig 1.5 : Chaleur



Conversion

Fig 1.6 : Electricité

2

Quelques effets thermoélectriques

Effet Seebeck

- **Conduction électrique (Ohm 1827)**

$$T = \text{cste} \; (\vec{\nabla} T = \vec{0})$$

Georg Simon Ohm

$$\vec{j} = j_x \vec{i}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V = -\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho}$$

Loi d'Ohm locale

E [V/m] : champ électrique

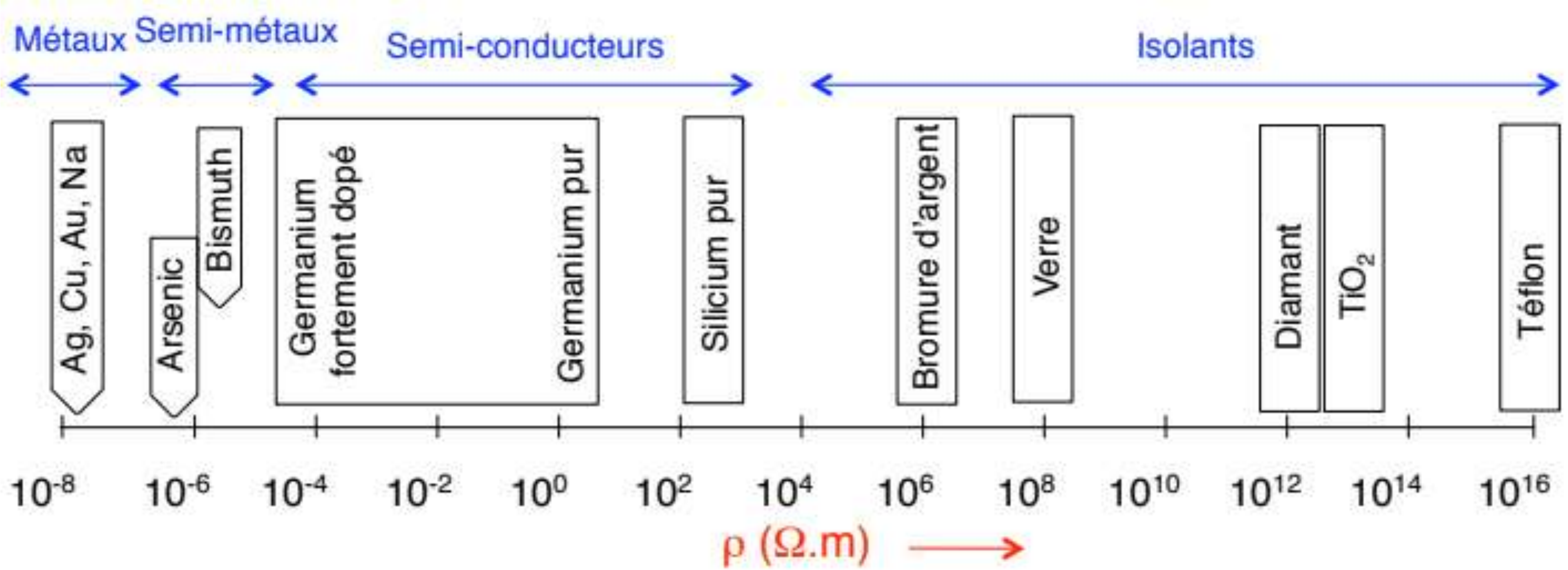
V [V] : potentiel électrique

j [A/m²] : densité de courant

ρ [Ω.m] : résistivité électrique

σ [Ω⁻¹.m⁻¹] : conductivité électrique

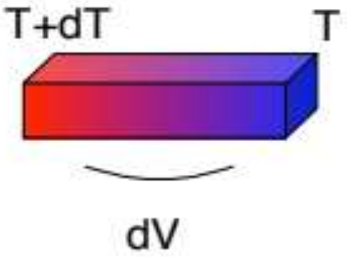
Ordre de grandeur de la résistivité de quelques matériaux



▪ Effet Seebeck (1821)

$$\vec{j} = \vec{0}$$

Thomas Yohann Seebeck



$$dV = -\alpha\, dT \qquad \boxed{\vec{E} = \alpha\, \vec{\nabla} T}$$

V [V] : tension
E [V/m] : champ électrique
α [V/K] : coef. Seebeck

$\alpha \geq 0$ ou < 0, propriété intrinsèque

Interprétation Microscopique

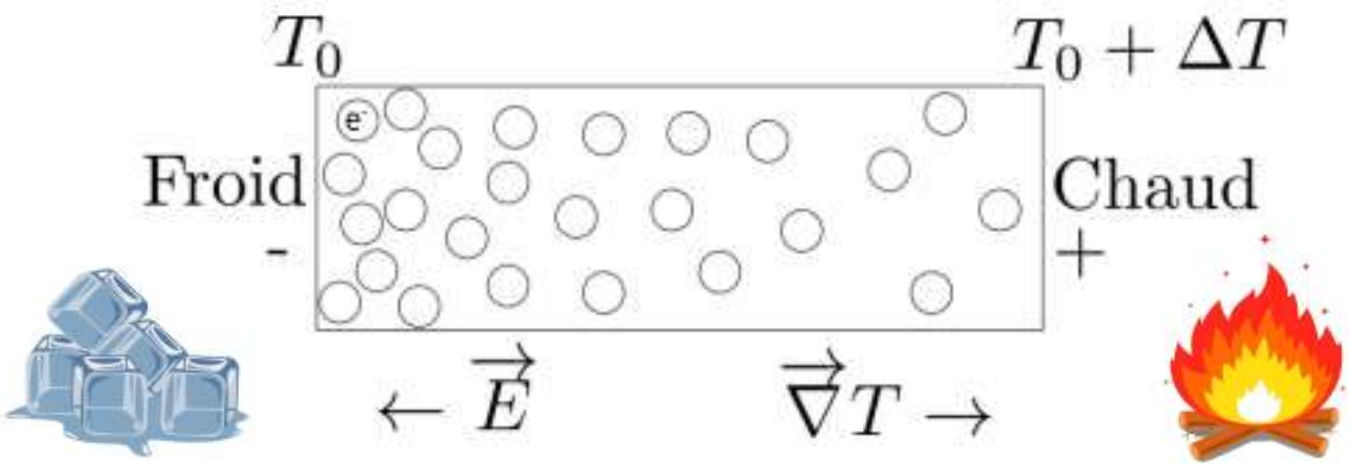
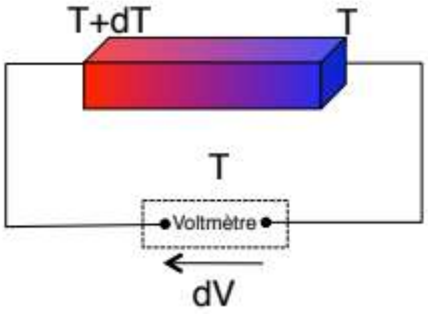


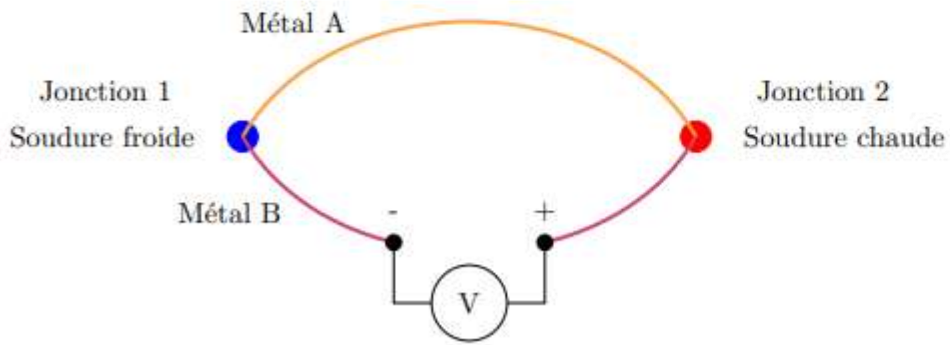
Fig 2.1 : Schéma de principe de l’effet Seebeck dans un métal ou semi-conducteur.

Expérimentalement, on n'accède pas directement à α !



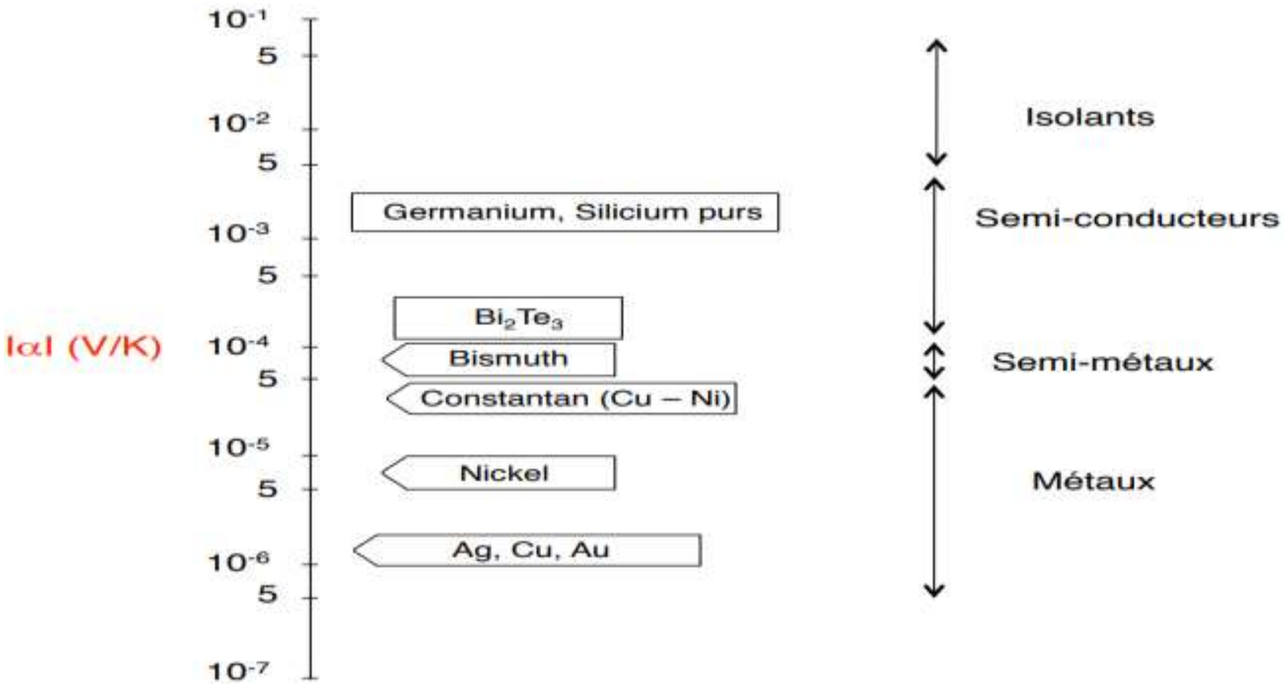
$$dV = (\alpha - \alpha_{fil})dT$$

Généralement



$$dV = \alpha_{AB} dT = (\alpha_A - \alpha_B)dT$$

Ordre de grandeur du coefficient Seebeck de quelques matériaux



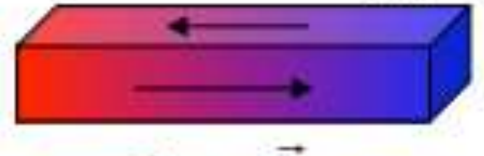
Effet Peltier

- **Conduction thermique (Fourier 1822)**

Joseph Fourier

$$\vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x}\vec{i}$$

$\vec{j} = \vec{0}$



$$\vec{j}_{Th} = j_{Thx}\vec{i}$$

Loi de Fourier

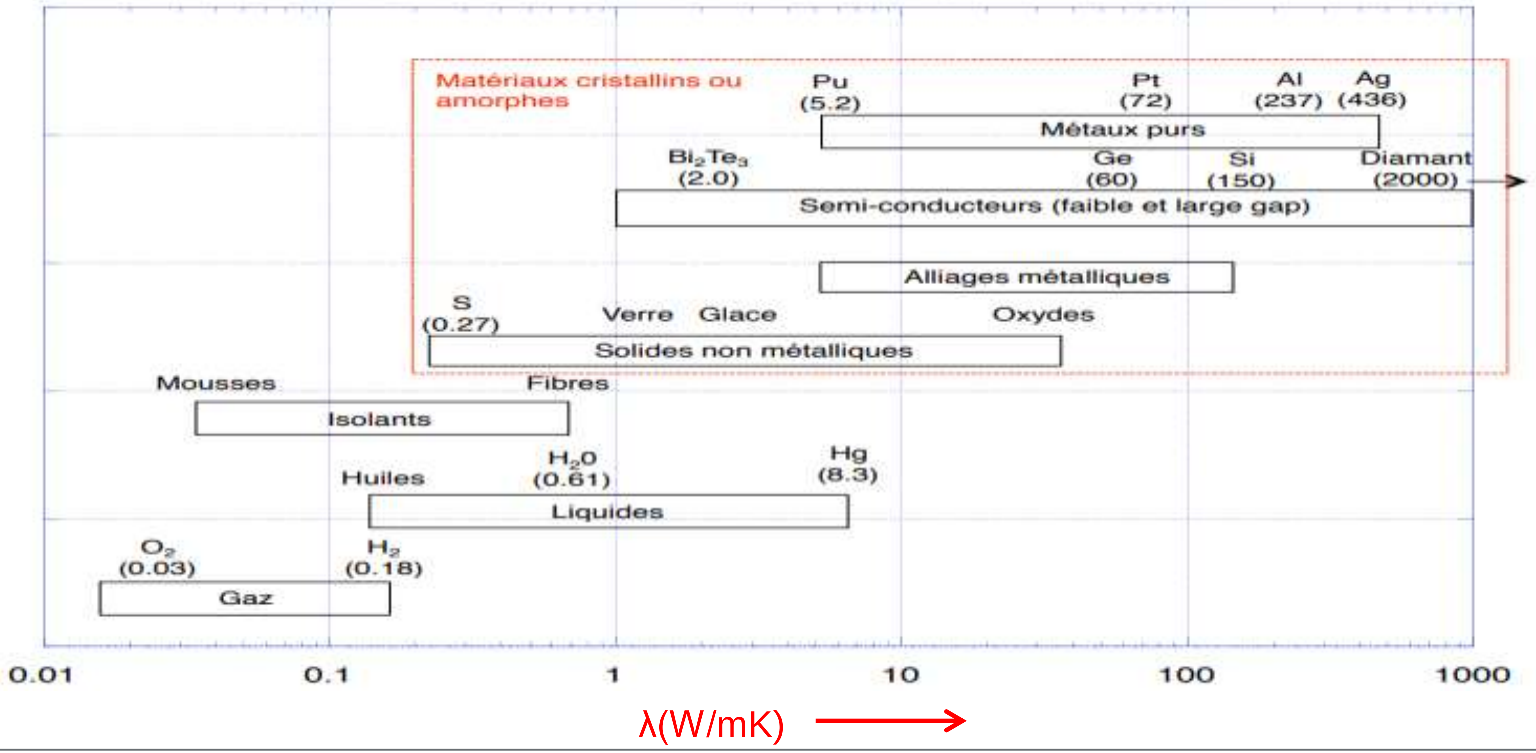
$$\boxed{\vec{j}_{Th} = -\lambda\, \vec{\nabla} T}$$

j_{Th} [J/s.m²] : densité de courant thermique

T [K] : température

λ [W/mK] : conductivité thermique

Ordre de grandeur de la conductivité thermique de quelques matériaux

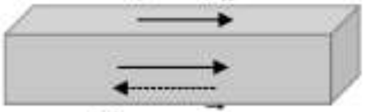


▪ **Effet Peltier (1834)**

Jean-Charles
Athanase Peltier

$T = \text{cste} \; (\vec{\nabla} T = \vec{0})$

$\vec{j} = j_x \vec{i}$

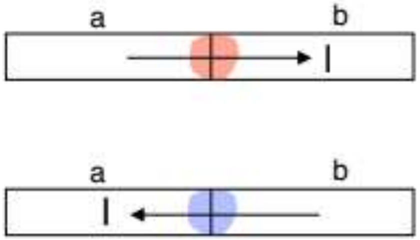


$\vec{j}_{Th} = j_{Thx} \vec{i}$

$$\boxed{\vec{j}_{Th} = \pi \, \vec{j}}$$

π [V] : coefficient Peltier

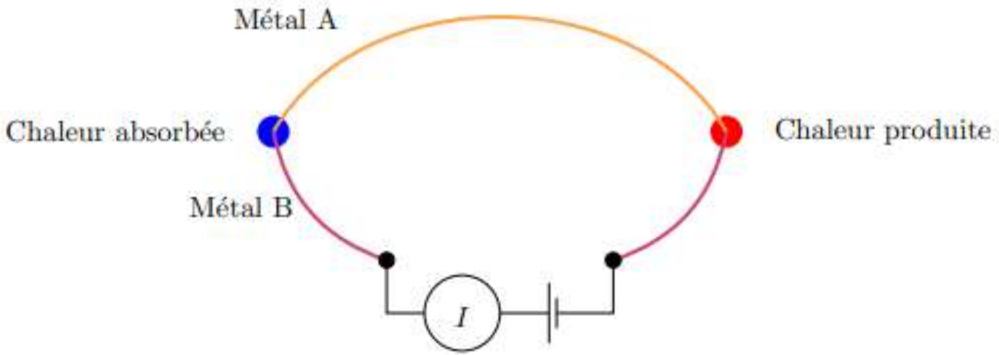
$\pi \geq 0$ ou < 0, propriété intrinsèque



$\pi_a > \pi_b$

$$Q = (\pi_a - \pi_b) I = \pi_{ab} \, I$$

Q [W] : puissance thermique
I [A] : courant électrique



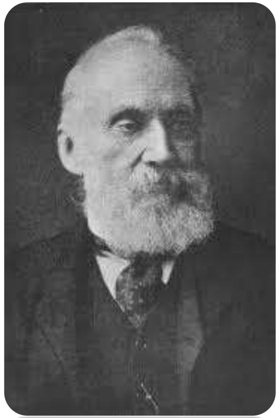
avec : $\pi_A \succ \pi_B$

Fig 2.2 : Réfrigération à effet Peltier.

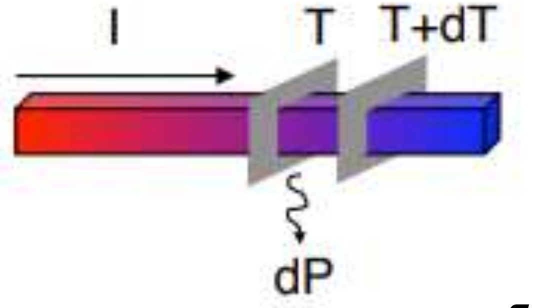
La deuxième relation de Kelvin : $\boxed{\pi = \alpha T}$

Effet Thomson

- **Effet Thomson (1851)**



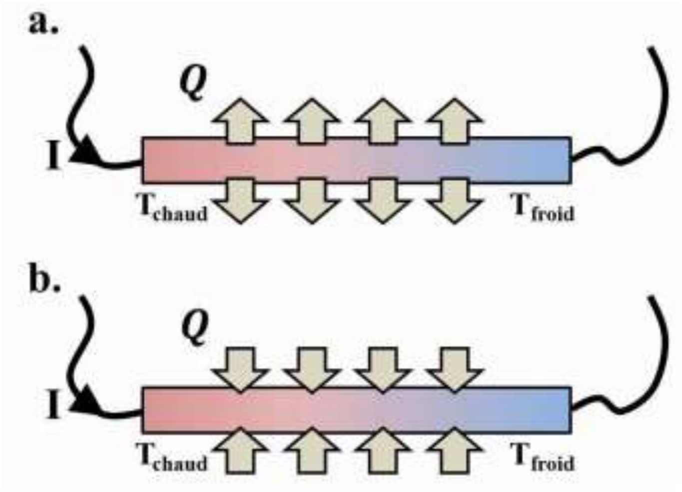
William Thomson
(Lord Kelvin)



$$\boxed{dP = \tau I dT}$$

τ [V/K] : coefficient Thomson

$\tau \geq 0$ ou <0



$\tau \prec 0$

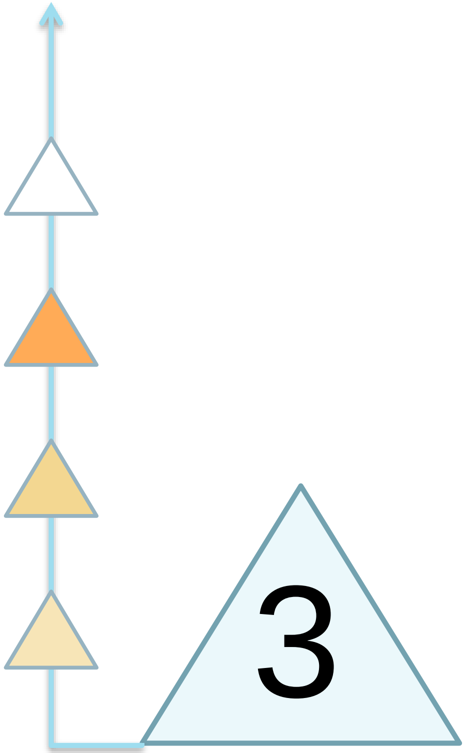
$\tau \succ 0$

$$P_{Thomson} = -\tau \vec{j}.\vec{\nabla} T$$

$P_{Thomson}$ [W/m^3] : puissance thermique volumique

- La première relation de Kelvin :

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT}$$



Etude de l'impact de l'Effet Thomson sur les métaux

(exemple : le cuivre)

Etude Théorique

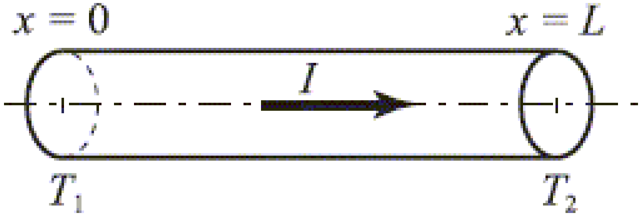


Fig 3.1 : Barre conductrice de cuivre calorifugée.

$dP_J = dRI^2$ Or : $dR = \dfrac{dx}{\gamma S}$

Donc : $\boxed{dP_J = \dfrac{I^2 dx}{\gamma S}}$ $\boxed{dP_T = \tau I dT}$

L [m] : longueur de la barre.

S [m²] : surface de la base.

γ [S/m] : conductivité électrique du cuivre.

I [A] : courant continu.

λ [W/m.K] : conductivité thermique du cuivre.

c [j/kg.K] : capacité calorifique massique du cuivre.

ρ [kg/m³] : masse volumique du cuivre.

τ [V/K] : coefficient thomson.

Sans Prise en considération l'Effet Thomson

- Volume du cuivre compris entre les sections d'abscisse x et x+dx : Sdx

- Masse du cuivre : $S\rho dx$

- Capacité thermique : $S\rho c dx$

- Flux thermique entrant : $Sj_{Th}(x,t) + dP_J$

- Flux thermique sortant : $Sj_{Th}(x+dx,t)$

- $T_2 \succ T_1$

<u>Application du premier principe de la thermodynamique :</u>

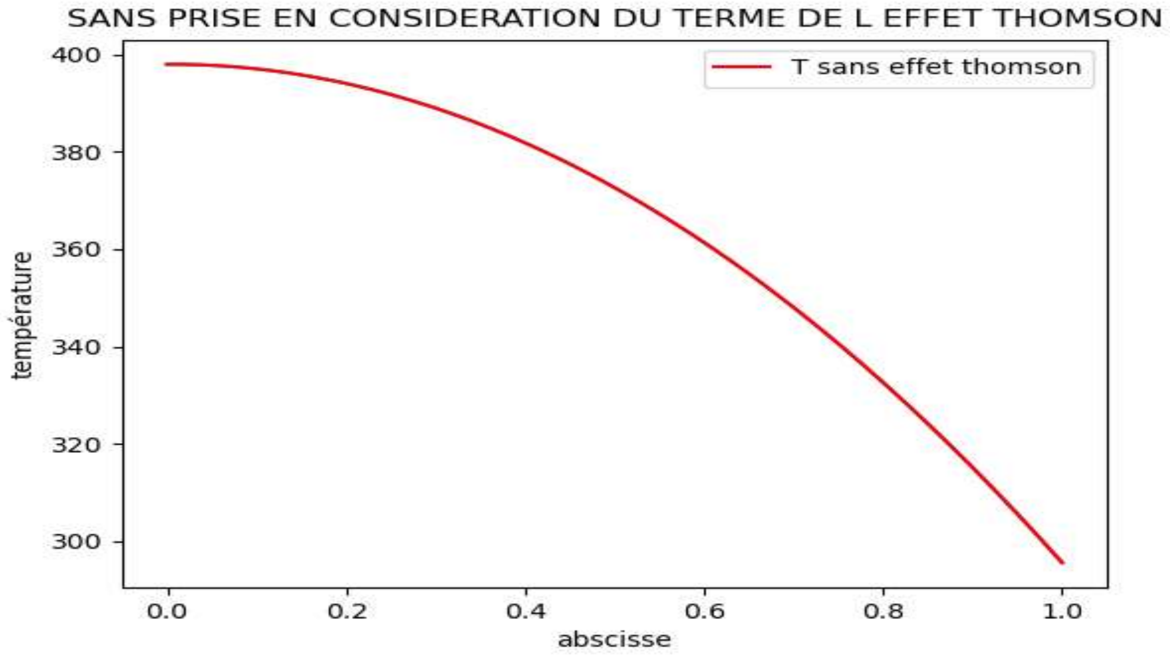
$$Sj_{Th}(x,t)dt + \frac{I^2 dx}{\gamma S} dt - Sj_{Th}(x+dx,t)dt = S\rho c dx dT$$

$$-S\frac{\partial j_{Th}}{\partial x} dx dt + \frac{I^2 dx}{\gamma S} dt = S\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dx$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{I^2}{\gamma S^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$ (Loi de Fourier)

$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{I^2}{\lambda \gamma S^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}}$$

Résolution numérique de l'équation différentielle dans le régime stationnaire



$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{I^2}{\lambda \gamma S} = 0}$$

▪ Prise en considération l’Effet Thomson

- Volume du cuivre compris entre les sections d’abscisse x et x+dx : Sdx

- Masse du cuivre : $S\rho dx$

- Capacité thermique : $S\rho c dx$

- Flux thermique entrant : $Sj_{Th}(x,t) + dP_J$

- Flux thermique sortant : $Sj_{Th}(x+dx,t) + dP_T$

- $T_2 \succ T_1$

Application du premier principe de la thermodynamique :

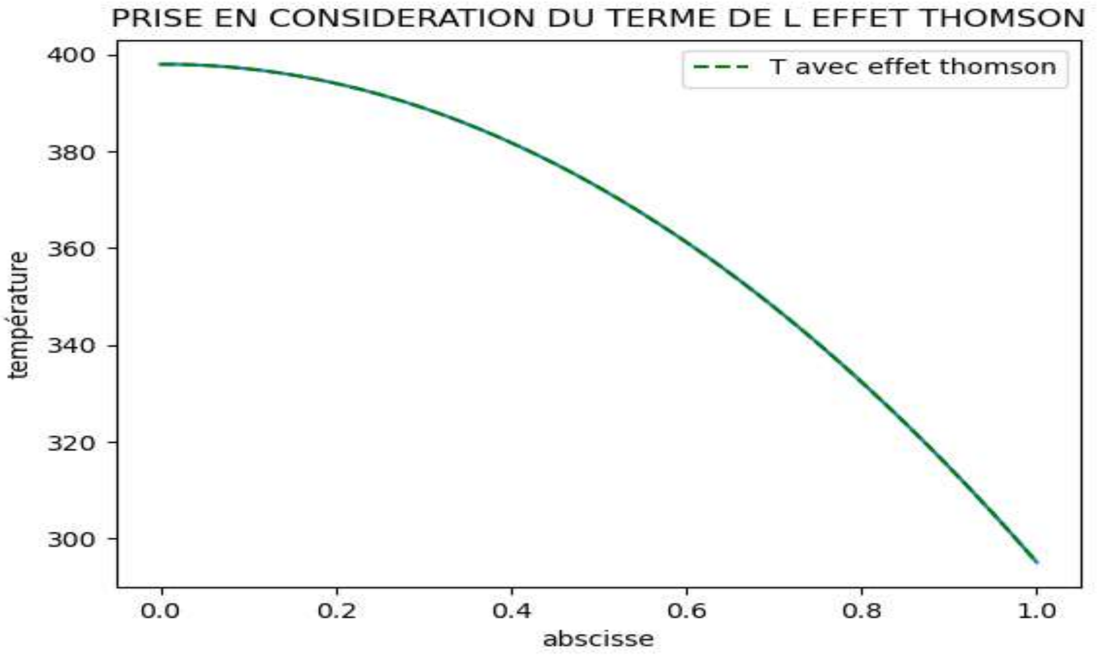
$$Sj_{Th}(x,t)dt + \frac{I^2 dx}{\gamma S}dt - Sj_{Th}(x+dx,t)dt - \tau I dT dt = S\rho c dx dT$$

$$-S\frac{\partial j_{Th}}{\partial x}dxdt + \frac{I^2 dx}{\gamma S}dt - \tau I\frac{\partial T}{\partial x}dxdt = S\rho c\frac{\partial T}{\partial t}dtdx$$

$$\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\tau I}{S}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{I^2}{\gamma S^2} = \rho c\frac{\partial T}{\partial t}$$ (Loi de Fourier)

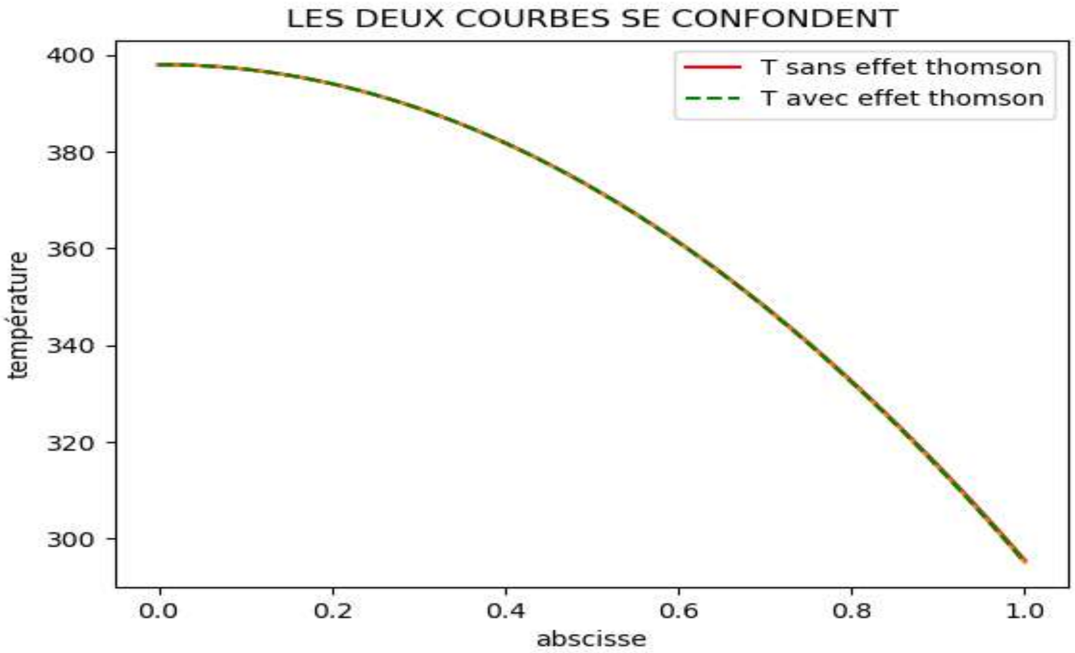
$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\tau I}{\lambda S}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{I^2}{\lambda\gamma S^2} = \frac{\rho c}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t}}$$

Résolution numérique de l'équation différentielle dans le régime stationnaire



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\tau I}{\lambda S}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{I^2}{\lambda \gamma S^2} = 0$$

Les deux courbes simultanément



Protocole expérimental

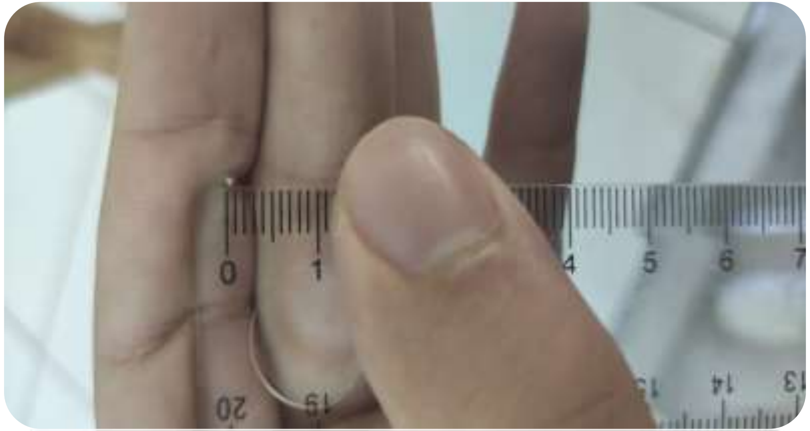


Fig 3.2 : Fil conducteur de cuivre de diamètre 1 mm.

Fig 3.3 : Chalumeau à gaz.

Fig 3.4 : Mesure de la température.

Fig 3.5 : Thermomètre.

4

Conclusion

Merci pour votre attention.

Annexe

Code Python

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def euler(F,a,b,Z0,N):
    h=(b-a)/(N-1)
    x=np.linspace(a,b,N)
    Z=np.zeros((N,2))
    Z[0]=Z0
    for i in range (0,N-1):
        Z[i+1]=Z[i]+h*F(x[i],Z[i])
    return x,Z[:,0]
```

```
h = (2.2)*(10**(-6))
S = (7.85)*(10**(-7))
lmb = 400
I = 1.75
gamma = 6*(10**7)

A=1/(gamma*lmb*(S**2))


# SANS PRISE EN CONSIDERATION DU TERME DE L'EFFET THOMSON

def FJ(x,Z):
    # Z=[T,T']
    # Z'=[T',T"]
    # Z'=[T',-A*(I**2)]
    return np.array([Z[1],-A*(I**2)])

# test

Z0=np.array([398,0])
x,T1=euler(FJ,0,1,Z0,100)
plt.plot(x,T1)
plt.xlabel('abscisse')
plt.ylabel('température')
plt.title('SANS PRISE EN CONSIDERATION DU TERME DE L EFFET THOMSON')
plt.plot(x, T1,'r', label="T sans effet thomson")
plt.legend()
plt.show()
```

```
# PRISE EN CONSIDERATION DU TERME DE L'EFFET THOMSON

def FT(x,Z):
    # Z=[T,T']
    # Z'=[T',T"]
    # Z'=[T',(h/(S*lamb))*I*T'-A*(I**2)]
    return np.array([Z[1],(h/(S*lmb))*I*Z[1]-A*(I**2)])

# test

Z0=np.array([398,0])
x,T2=euler(FT,0,1,Z0,100)
plt.plot(x,T2)
plt.xlabel('abscisse')
plt.ylabel('température')
plt.title('PRISE EN CONSIDERATION DU TERME DE L EFFET THOMSON')
plt.plot(x, T2,'g--', label="T avec effet thomson")
plt.legend()
plt.show()
```