

**Étude
thermodynamique
de la combinaison
de plongée
en néoprène**

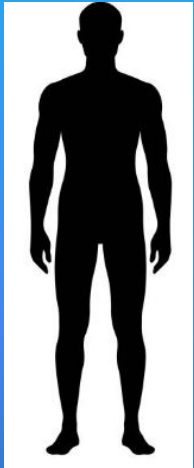


**Axel
Van den Bossche
21100**

A diver in a wetsuit is swimming underwater, silhouetted against a bright blue background. The diver is positioned on the right side of the frame, moving towards the left. The water is clear, and the diver's fins and mask are visible. The overall scene is a classic underwater photograph.

Comment les propriétés thermodynamiques du néoprène permettent-elles au plongeur de conserver sa chaleur corporelle?

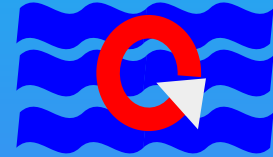
**Diffusion
thermique à
travers la
peau**



(1)

**Les différentes
pertes
thermiques lors
de plongée**

**Convection
de l'eau**



**Diffusion
thermique à
travers la
combinaison**

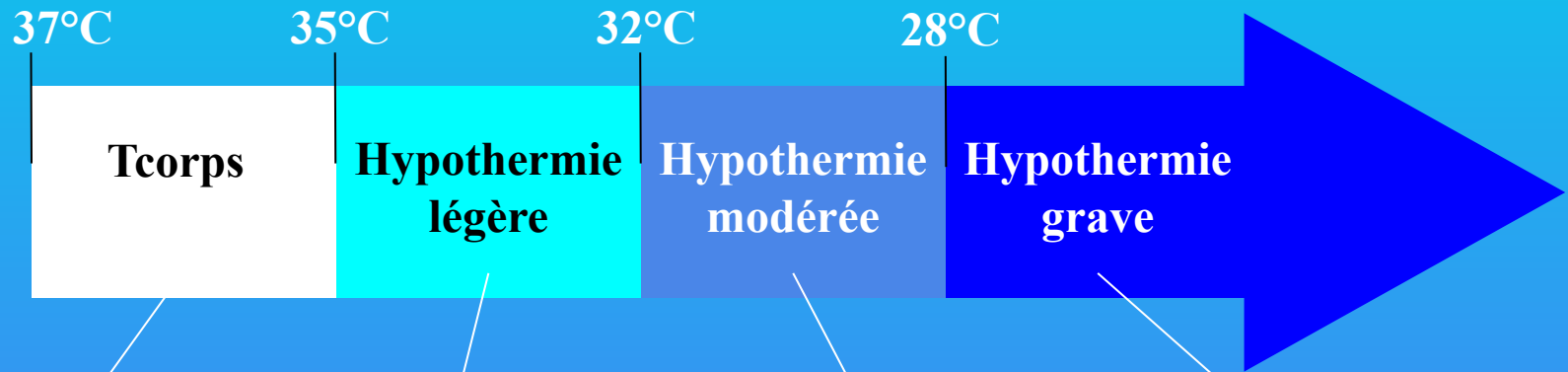


(2)

(1) silhouette-dhomme-restant-forme-noire-pleine-du-corps-humain.jpg (344×612) (istockphoto.com)

(2) Combinaison DEFINITION SCUBAPRO 5mm Homme (palanquee.com)

Risque d'hypothermie



Aucun risque

- Augmentation du rythme cardiaque
- Troubles de la coordination
- Frissons
- Réduction de l'activité motrice
- Épuisement

- Troubles accrus de la coordination musculaire
- Amnésie
- Diminution des frissons
- Somnolence
- Hallucinations

- Diminution du rythme cardiaque et respiratoire
- Perte de connaissance.
- Diminution de la tension artérielle
- Mort apparente

Objectifs

Estimer le temps de plongée avant d'atteindre l'hypothermie.

↳ **Mesurer la conductivité thermique du néoprène.**

↳ **Étudier la variation de la température sans et avec la présence d'une source de chaleur dans la combinaison.**

↳ **Estimer la puissance produite par le corps.**

Modélisation de la combinaison



Non étanche	Étanche

Épaisseurs possibles:

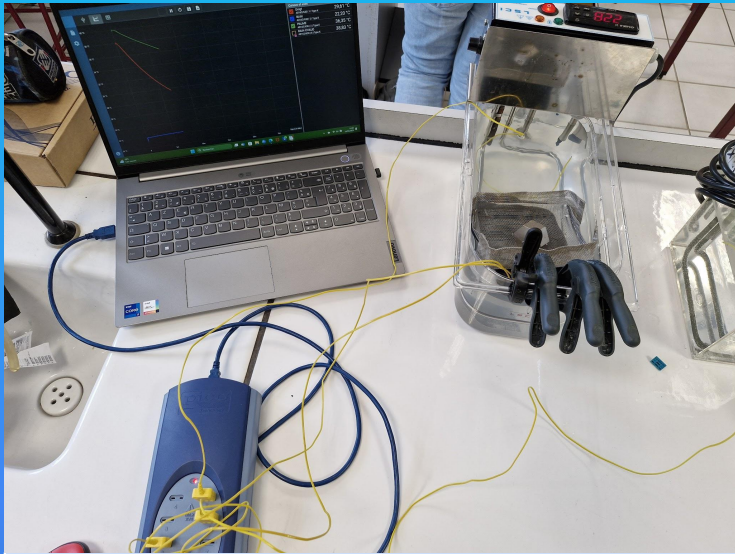
7 mm	6/5 mm	5/4 mm	4/3 mm	2 mm	1 mm
6/7 mm	5/6 mm	4/3 mm	3/2 mm		

Épaisseurs choisies:

- 3 mm
- 5 mm



Détermination de la conductivité thermique λ

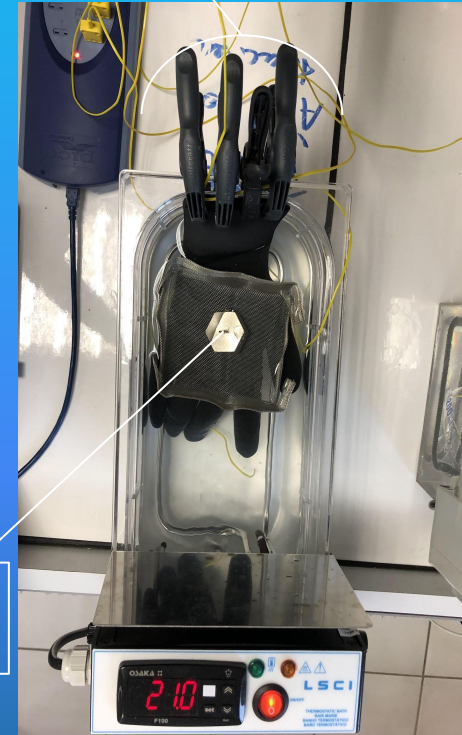


Vue globale



200 mL d'eau
chauffé à $\sim 40^{\circ}\text{C}$

Pinces

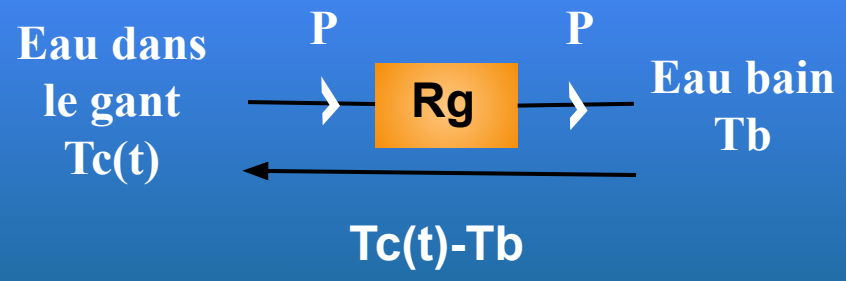
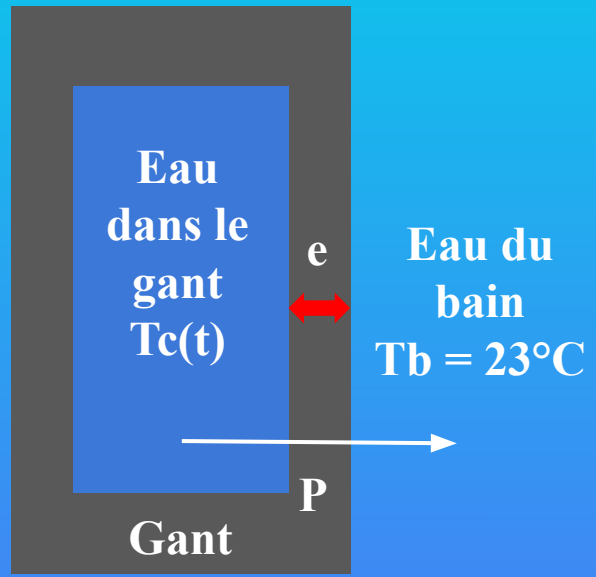


Masse

Vue de dessus

Modèle électrique

Schéma réel :



Avec $R_g = \frac{e}{\lambda_{comb} S}$

Par analogie avec la loi d'Ohm :

$$P = \frac{T_c(t) - T_b}{R_g}$$

Application du 1er principe de la thermodynamique à l'eau du gant :

$$C_{eau} m_{eau} \frac{dT_c}{dt} = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_g}$$

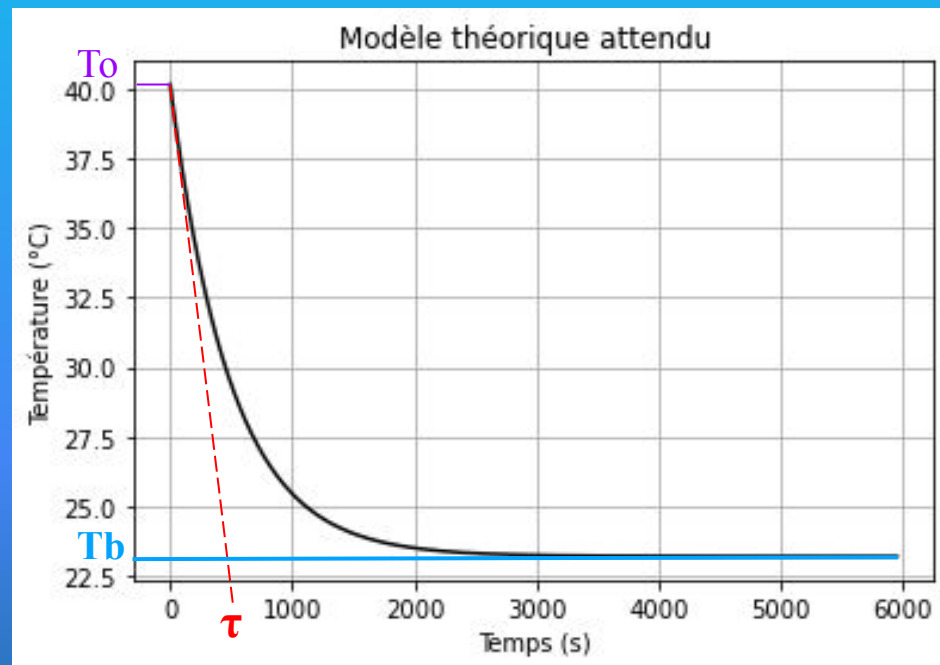
Modèle théorique

$$\frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c(t)}{\tau} = \frac{T_b}{\tau}$$

Solution :

$$T_c(t) = T_b + (T_o - T_b)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

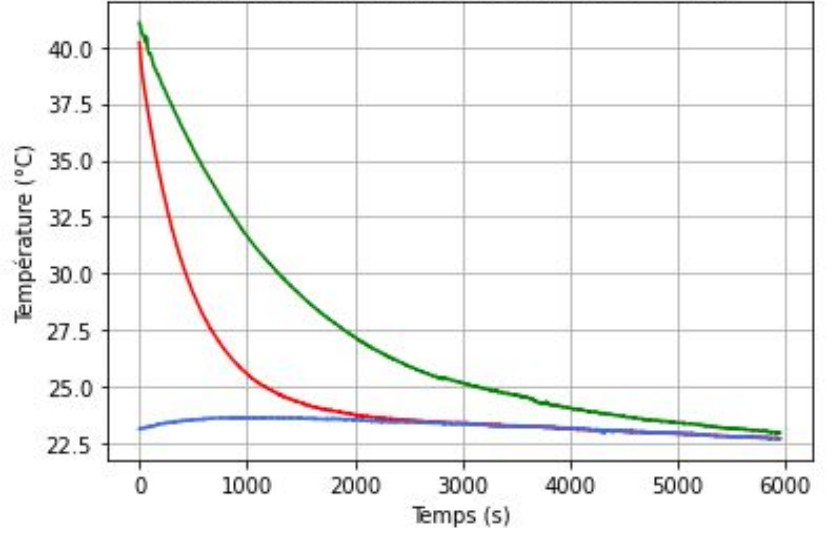
Avec $\tau = R_g C_{\text{eau meau}}$



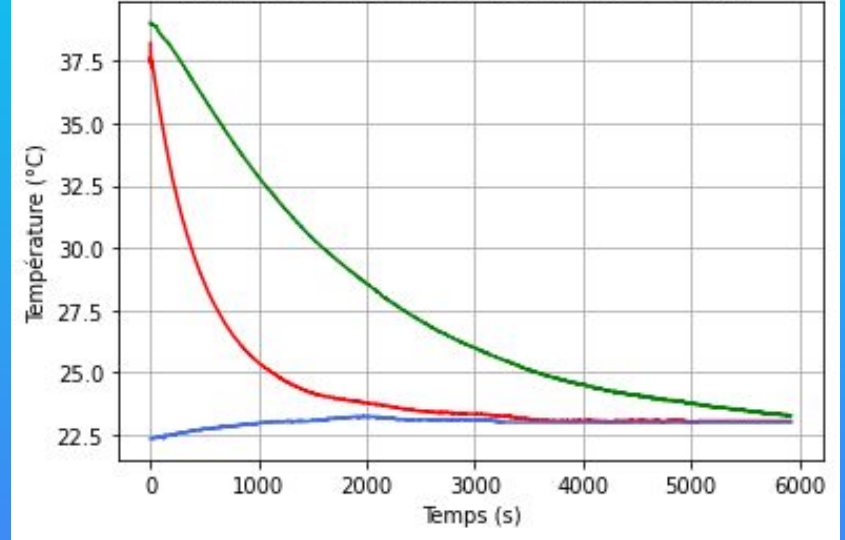
Recherche de τ pour avoir R_g , puis λ_{comb}

Avec eau chaude

Evolution de la température pour e = 3 mm

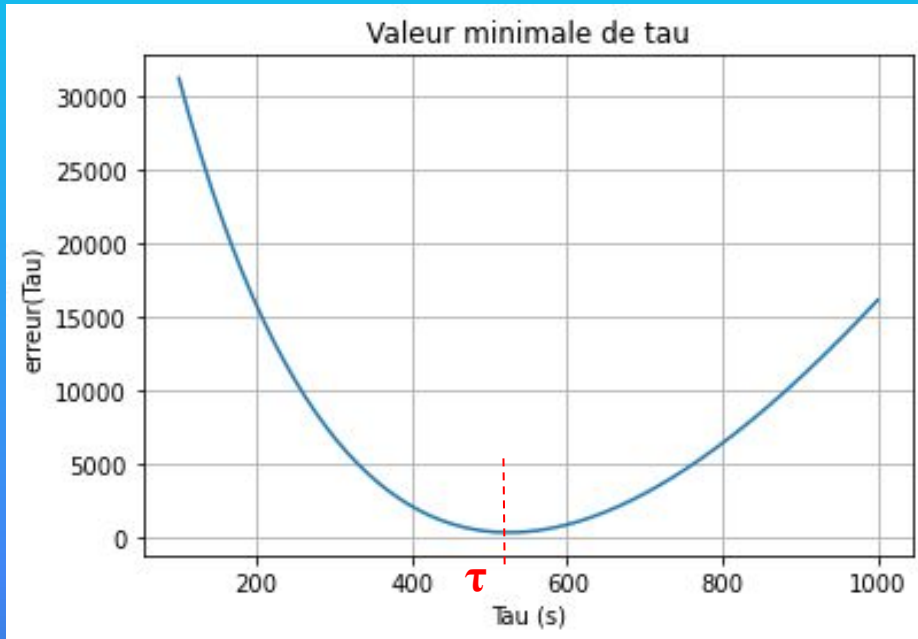


Evolution de la température pour e = 5 mm



● Bain thermostaté

Détermination du temps de relaxation τ



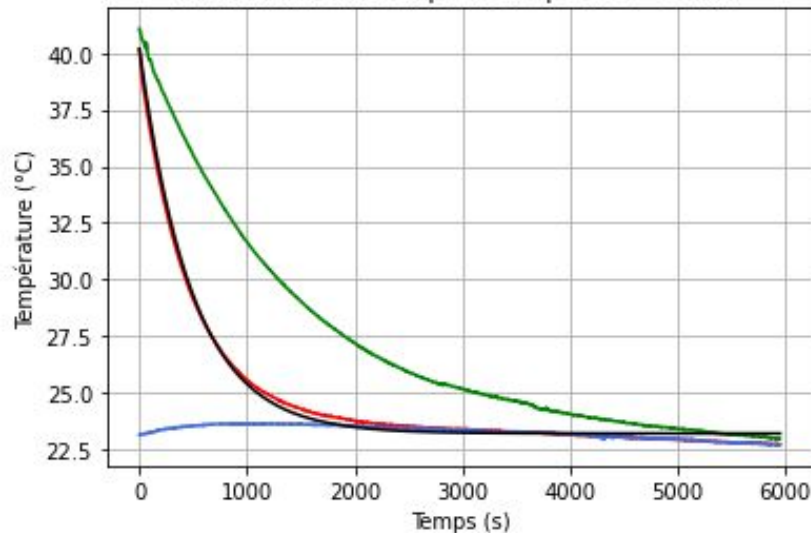
Fonction théorique $T_c(t)$

```
def th(t, Tau):  
    return Tf+(Ti-Tf)*np.exp(-t/Tau)  
  
def erreur(Tau):  
    Tdth=[]  
    s=0  
    for k in range (0, len(Td)):  
        a=th(t[k], Tau)  
        Tdth.append(a)  
        s+=(Td[k]-Tdth[k])**2  
    return s
```

Pour chaque valeur de τ ,
on calcule l'écart entre les
valeurs théoriques et
expérimentales

Recherche de R_g et λ à partir de τ

Evolution de la température pour $e = 3$ mm



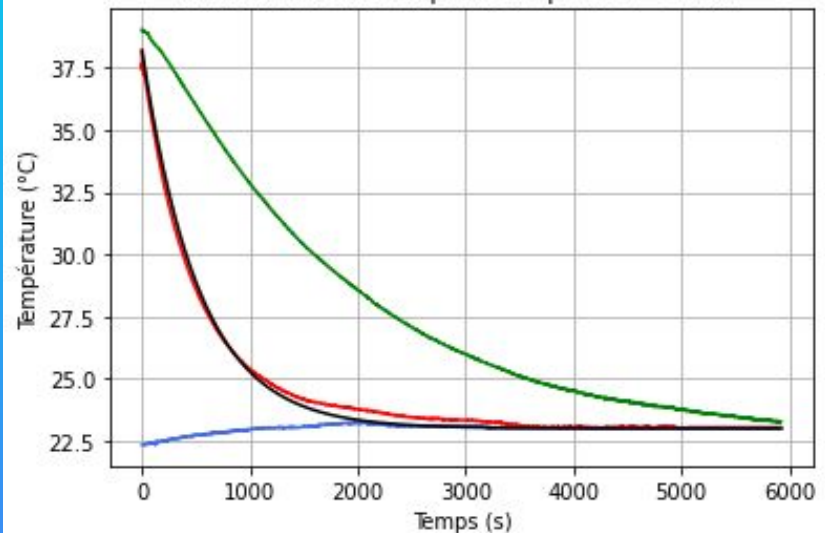
$$\tau = 487 \pm 1 \text{ s}$$

$$R_g = (583 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ K.W}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{comb}} = (160 \pm 7) \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{Odg : } \lambda \sim 192 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Evolution de la température pour $e = 5$ mm

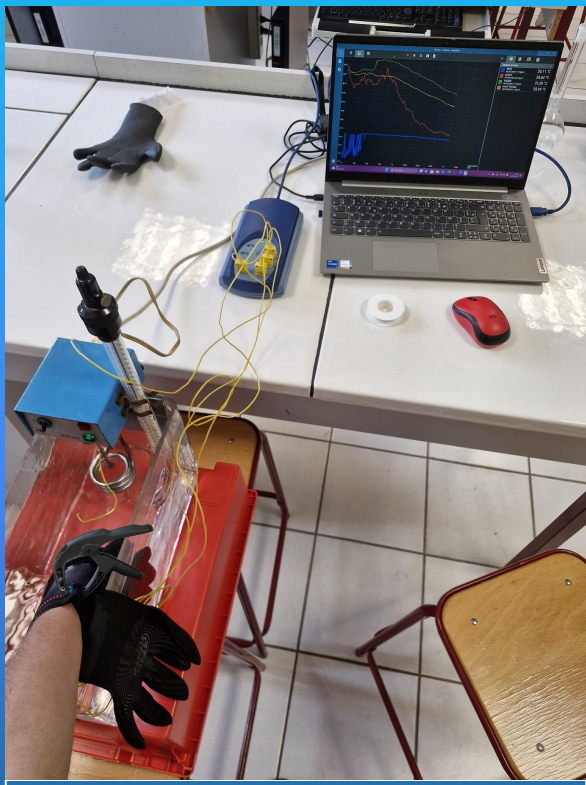


$$\tau = 527 \pm 1 \text{ s}$$

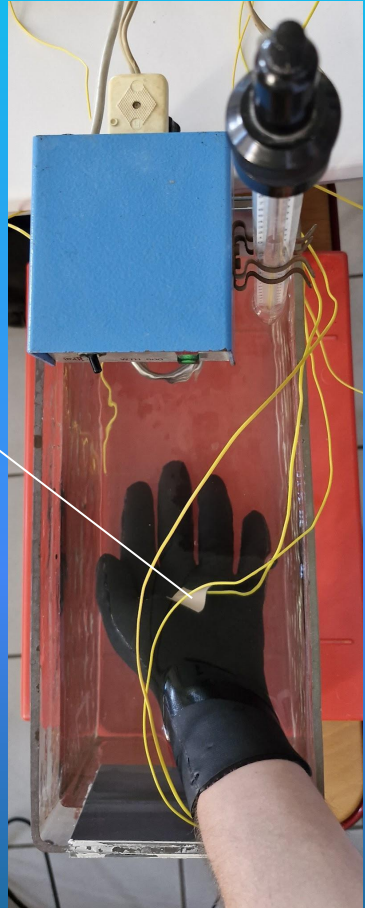
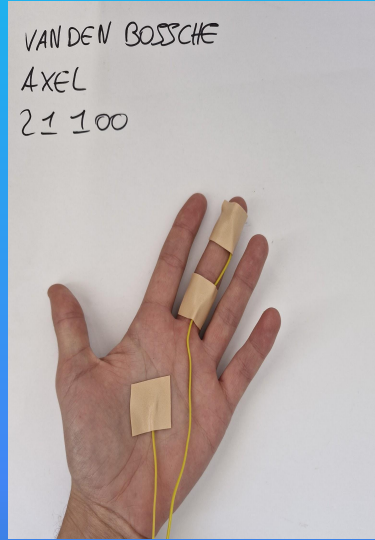
$$R_g = (628 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ K.W}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{comb}} = (220 \pm 7) \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Détermination de la puissance du métabolisme



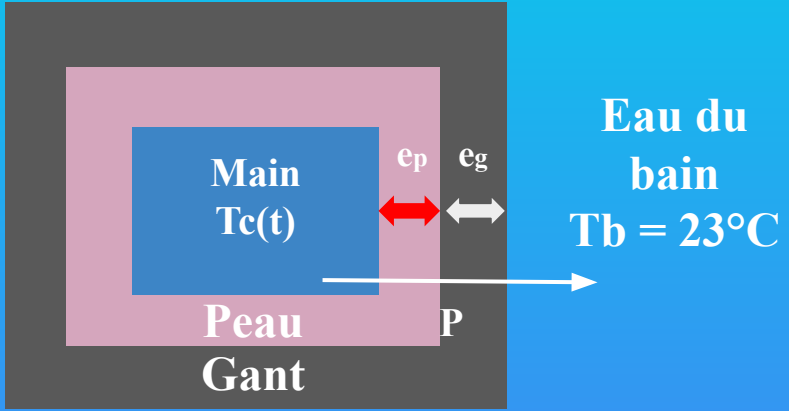
Vue globale



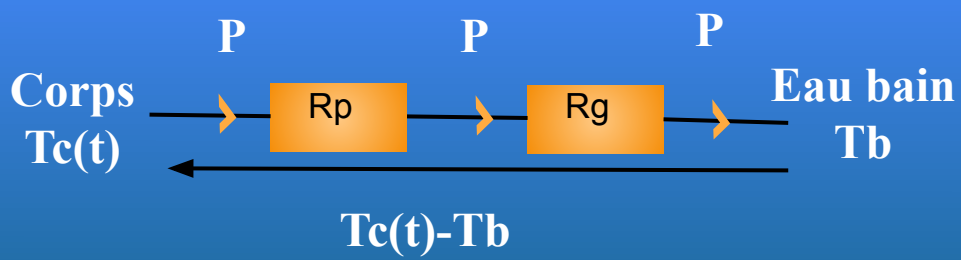
Vue de dessus

Modèle électrique

Schéma réel :



Résistances en série:



$$R_{th} = R_p + R_g$$

Application du 1er principe de la thermodynamique à la main :

$$C_{corps} \frac{dT_c}{dt} = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_{th}} + P_{méta}$$

Solution :

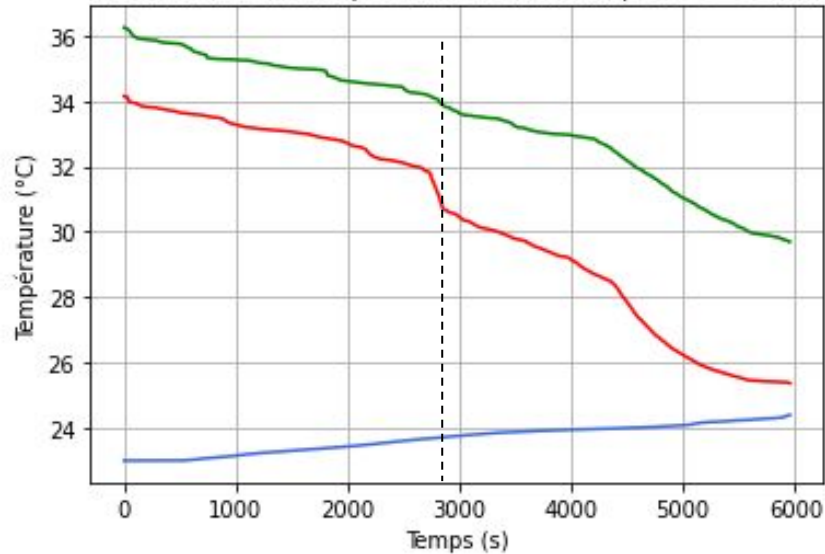
$$T_c(t) = T_f + (T_o - T_f) e^{\frac{-t}{\tau}}$$

Avec $T_f = T_b + R_{th} P_{méta}$

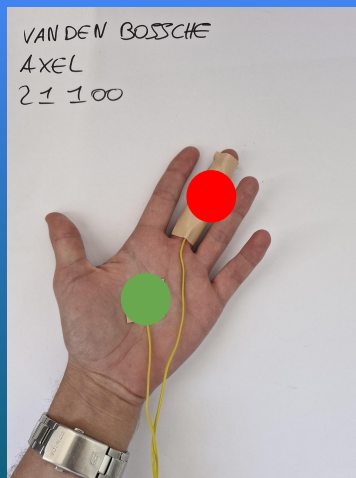
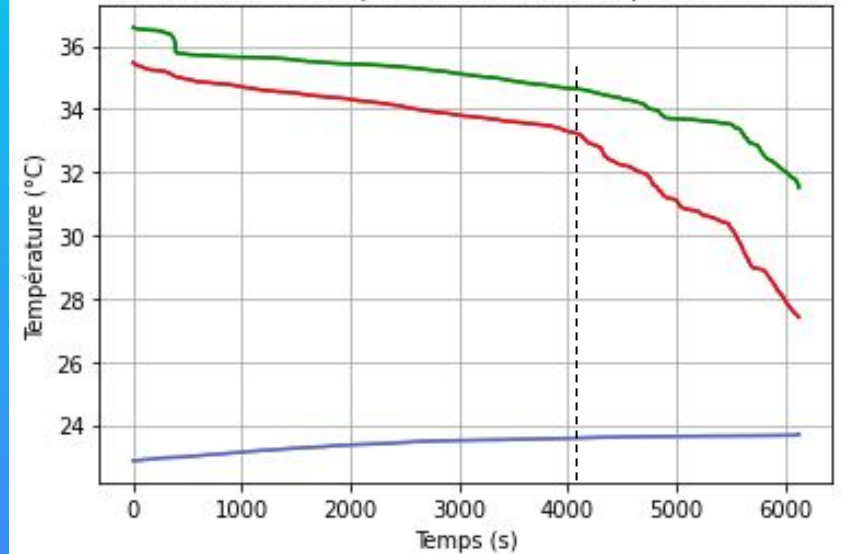
Avec $\tau = R_{th} C_{corps} m_{main}$

Température de la main dans le gant

Evolution de la température de la main pour $e = 3 \text{ mm}$



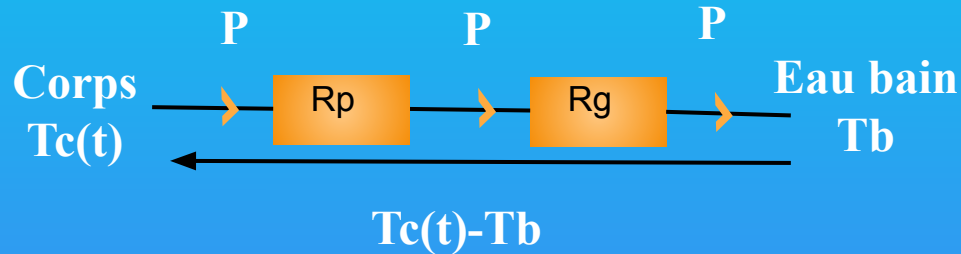
Evolution de la température de la main pour $e = 5 \text{ mm}$



● Bain thermostaté

Détermination de la puissance du métabolisme

Modèle électrique :



Pour la main en régime en stationnaire :

$$P_{méta} = P = \frac{T_c - T_b}{R_p + R_g}$$

Odg du corps humain $\sim 100\text{W}$ (1)

Pour la main :

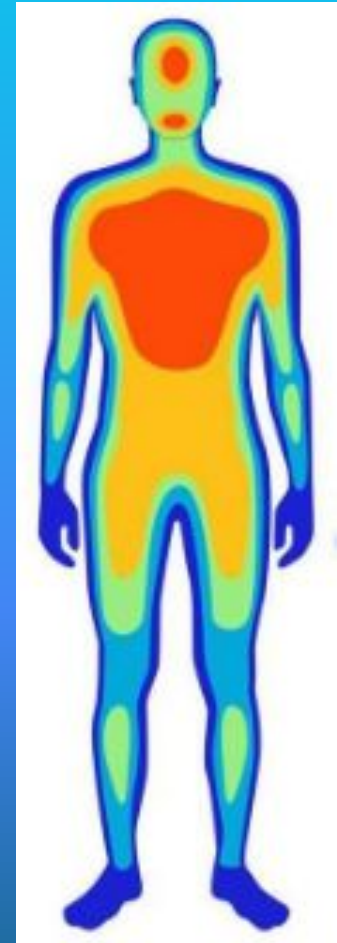
Avec $S_{main} = 400 \text{ cm}^2$

$P_{main} = 2.2 \text{ W}$

Pour le corps :

Avec $S_{corps} \sim 2 \text{ m}^2$

$P_{méta} = 110 \text{ W}$



(2)

(1) 20_conduc-thermique_td-enonce.pdf (etienne-thibierge.fr)

(2) <https://www.vecteezy.com/vector-art/12706124>

Détermination du temps théorique avant d'atteindre l'hypothermie

Solution :

$$T_c(t) = T_f + (T_o - T_f)e^{\frac{-t}{\tau}}$$

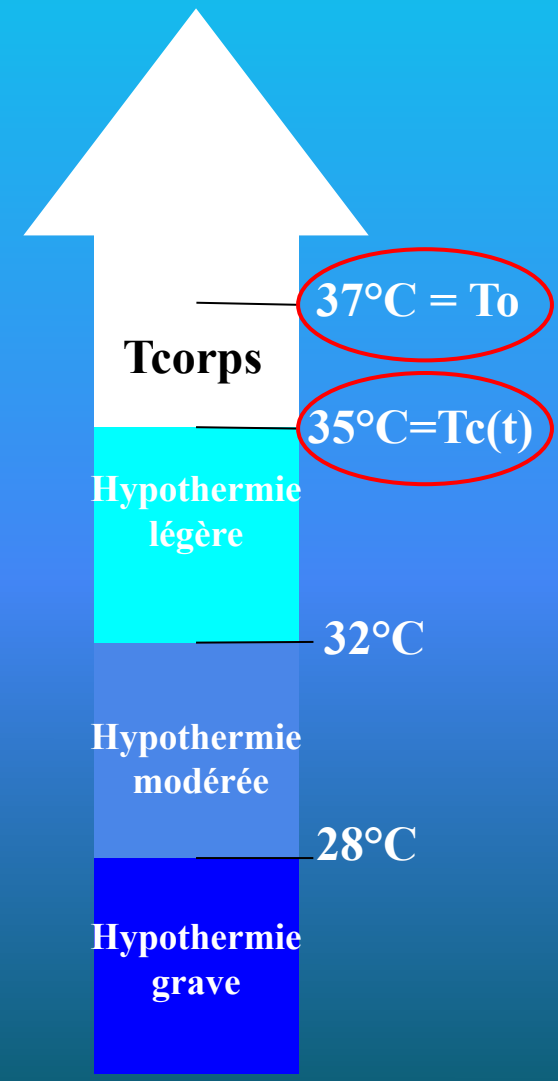
On a :

$$t = \tau \ln\left(\frac{T_o - T_f}{T_c(t) - T_f}\right)$$

Avec $T_f = T_b + R_{th} P_{méta}$

Avec $\tau = R_{th} C_{corps} m_{main}$

Température de l'eau / Epaisseur	15°C	20°C	25°C
0 mm	1 min	1 mins 30 s	2 mins
3 mm	14 mins	20 mins	30 mins
5 mm	15 mins	20 mins	31 mins



Conclusion

La résistance thermique dépend de l'épaisseur de la combinaison qu'on porte.

Plus e est grand plus R_{th} est grand.

Le néoprène est un bon isolant thermique, ce qui permet de maintenir la température corporelle plus longtemps, avant hypothermie.

La puissance du métabolisme permet de maintenir le corps en température sur une plus longue durée par l'apport de chaleur.

Annexe : Code Python :

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
import csv
#Importation des tableaux Excel sur Python
a=open('Mesures 2 expérimentales 24°C(3mm)21-05-2024 AM.csv','r')

A=csv.reader(a,delimiter=';')
Tb=[] #Bain
Td=[] #Doigt
Tp=[] #Paume

#Adaptation du Excel au Python
for ligne in A:

    X=ligne[1].replace(',','.')
    X=X.replace("''", "")
    Tb.append(float(X))

    Z=ligne[4].replace(',','.')
    Z=Z.strip()
    Td.append(float(Z))

    U=ligne[3].replace(',','.')
    U=U.strip()
    Tp.append(float(U))

figure=plt.figure()
t=np.linspace(1,len(Td),len(Td))

```

Importation des tableaux de valeurs d'Excel sous forme de liste en Python.

Annexe :

```

# Détermination de la valeur de tau
Ti=Td[0]
Tf=Td[-1]

def th(t,Tau):
    return Tf+(Ti-Tf)*np.exp(-t/Tau)

def erreur(Tau):
    Tdth=[]
    s=0
    for k in range (0,len(Td)):
        a=th(t[k],Tau)
        Tdth.append(a)
        s+=(Td[k]-Tdth[k])**2
    return s

Tau=np.linspace(500,6000,200)
# plt.plot(Tau,erreur(Tau))
plt.show()
Taumin=min(erreur(Tau))
print('x=',Taumin)

n=Tau[0]
for i in range(1,len(Tau)):
    if erreur(Tau[i])<erreur(n):
        n=Tau[i]
print('tau=',n,'s')

#Traçage des courbes

plt.plot(t,Td,'r')
plt.plot(t,Tb,'royalblue')
plt.plot(t,Tp,'g')
# plt.plot(t,th(t,n),'black')
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Température (°C)')
plt.title('Evolution de la température de la main pour e = 3 mm')
plt.grid()
plt.show()

```

```

#Calcul de L'incertitude par La méthode de Monte Carlo
#Entrée des valeurs
Rg=0.5830491349754359 #K.W-1
Ccorps=3.5E3 #J.kg-1.K-1
e=3E-3 #m
Vmain=380E-6 #m3
rho=1E3 #kg.m-3
Mmain= rho*Vmain #kg
S_=398E-4 #m2
lambda__=0.2 #W.m-1.K-1
Tcorps= 37 #°C
Tgm=25.3 #°C

#Entrée des incertitudes
u_m=1E-5 #kg
u_e=1E-4 #m
u_V=1E-9 #m3

m_main=np.random.normal(Mmain,u_m,1000)
e_=np.random.normal(e,u_e,1000)
V_=np.random.normal(Vmain,u_V,1000)

#Calcul de La résistance thermique Rth
Rth_=n/(m_main*Ccorps)
Rth=np.mean(Rth_)
print('Rth=',Rth,'K.W-1')

#Calcul de La conductivité thermique lambda
L=e_/(S_*Rth)
lambda_=np.mean(L)
u_l=np.std(L)
print('Lambda=',lambda_,'+/-',u_l,'W.m-1.K-1')

```

```

#Calcul de la résistance thermique de la main
#Entrée des valeurs de température
LTp=[Tp[i] for i in range (0,2500)]
LTd=[Td[i] for i in range (0,2500)]

#Moyenne et écart-type des températures
u_Tp=np.std(LTp)
u_Td=np.std(LTd)
Tpm=np.mean(LTp)
Tdm=np.mean(LTd)

Tpm_=np.random.normal(Tpm,u_Tp,1000)
Tdm_=np.random.normal(Tdm,u_Td,1000)

Rpp_=Rg*(Tcorps-Tpm_)/(Tpm_-Tgm)
Rpp=np.mean(Rpp_)
u_Rpp=np.std(Rpp_)

Rpd_=Rg*(Tcorps-Tdm_)/(Tdm_-Tgm)
Rpd=np.mean(Rpd_)
u_Rpd=np.std(Rpd_)

print('Rp=',(Rpp+Rpd)/2,'+/-',u_Rpp,'K.W-1')
print('Rd=',Rpd,'+/-',u_Rpd,'K.W-1')

Rthp_=Rg+Rpp
Rthd_=Rg+Rpd

```

Valeurs numériques :

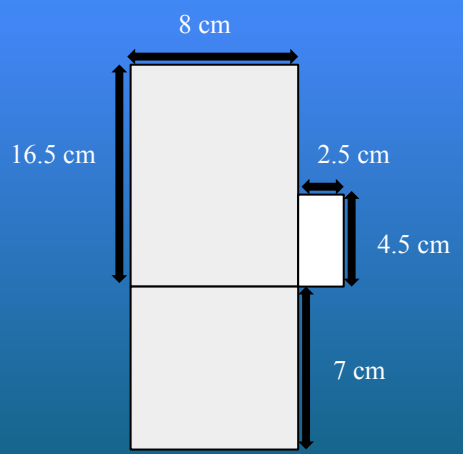
$m_{\text{eau}} = 200 \text{ g}$
 $C_{\text{eau}} = 4.18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 $m_{\text{corps}} = 60 \text{ kg}$
 $C_{\text{corps}} = 3,5 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Pour 3 mm : $R_g = 0.5830538345420557 \text{ +/- } 0.0012029157159180153 \text{ K.W-1}$

Pour 5 mm : $R_g = 0.6299890491338881 \text{ +/- } 0.0012176433473651417 \text{ K.W-1}$

$R_p = 0.1994787003739793 \text{ +/- } 0.03455488729825587 \text{ K.W-1}$

Calcul de la surface de la main :



A.N. :

$$8 \cdot 10^{-2} * 16.5 \cdot 10^{-2} + 8 \cdot 10^{-2} * 7 \cdot 10^{-2} + 4.5 \cdot 10^{-2} * 2.5 \cdot 10^{-2} = 398 \text{ cm}^2$$

Détermination de

Calcul de l'équation de l'équation différentielle : (explicite)

On applique le premier principe de la thermodynamique de l'eau de masse m_{eau} et de température $T_c(t)$ dans le gant :

$$dU = \delta Q + \delta W$$

Avec $\delta W = 0$ car $V = \text{cste}$

ça c'est dU

$$\Leftrightarrow dU = m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} dT_c - \frac{T_c(t) - T_b}{R_g} dt \quad \text{et} \quad \delta Q = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_g} dt$$

$$\Leftrightarrow m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} dT_c = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_g} dt$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{eau}} m_{\text{eau}} \frac{dT_c}{dt} = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_g}$$

ça c'est δQ

$$\Leftrightarrow \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c(t)}{\tau} = \frac{T_b}{\tau} \quad \text{Avec } \tau = R_g m_{\text{eau}} C_{\text{eau}}$$

Determination

Calcul de l'équation de l'équation différentielle : (*expérience 2*)

On applique le premier principe de la thermodynamique à la main de masse m_{main} et de température $T_c(t)$ dans le gant :

$dU = \delta Q + \delta W$ Avec $\delta W = 0$ car $V = cste$

ça c'est dU

$\leftrightarrow dU = m_{main} C_{corps} dT_c + P_{méta} dt - \frac{T_c(t) - T_b}{R_{th}} dt = \delta Q$

ça c'est δQ

$\leftrightarrow m_{main} C_{corps} dT_c = - \frac{T_c(t) - T_b}{R_{th}} dt + P_{méta} dt$

$\leftrightarrow m_{main} C_{corps} \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c(t)}{R_{th}} = \frac{T_b}{R_{th}} + P_{méta}$

$\leftrightarrow \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c(t)}{\tau} = \frac{T_b + P_{méta} R_{th}}{\tau}$ Avec $\tau = R_{th} m_{main} C_{corps}$

- [1] Septembre-Octobre: Échange avec un proche pratiquant la plongée afin d'en connaître plus sur la plongée.
- [2] Octobre-Décembre: Recherche et mise en place du modèle théorique.
- [3] Octobre-Janvier: Modélisation Python permettant de déterminer le temps de relaxation τ à partir des données expérimentales et calculs d'incertitudes avec la méthode de Monte-Carlo.
- [4] Janvier-Février: Série de tests afin de trouver la meilleure façon de relever les températures avec le moins d'incertitudes possibles.
- [5] Février-Mai: Prise des mesures de températures de l'eau dans le gant et de la main dans le gant, comparaison des valeurs expérimentales et théoriques.