

YACOUBI Oualid

N° 38556

en groupe avec : Hy Flavie



Combinaisons de plongée :
compromis entre élasticité et
isolation thermique

TIPE 2024 : Jeux et sports

Plan

- 1) Détermination de la conductivité thermique de la combinaison étudiée
- 2) Détermination du module de Young et le coefficient de Poisson
- 3) Détermination de l'intervalle d'épaisseur permettant de respecter le cahier de charges suivant :

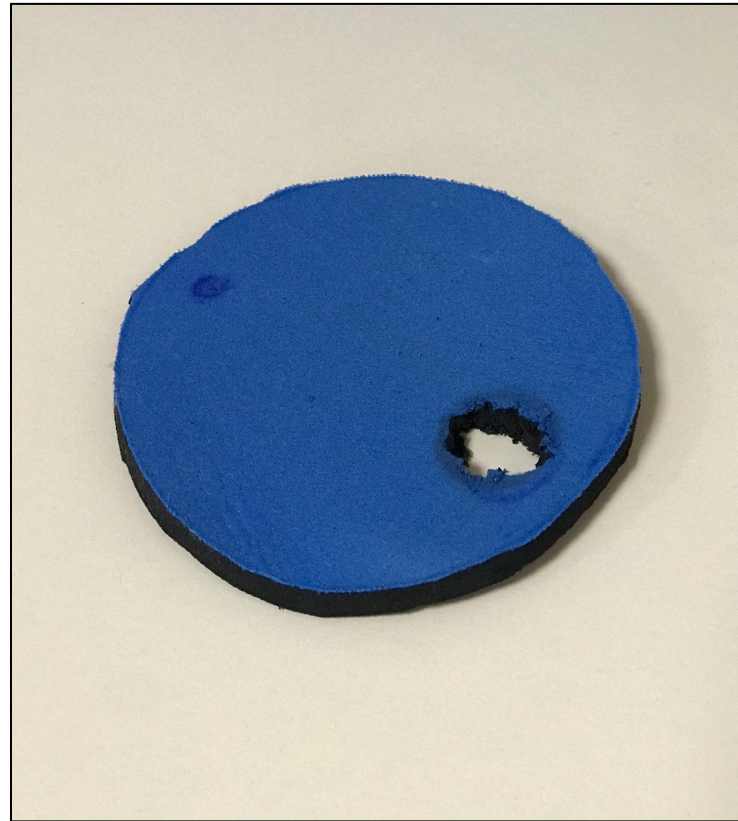
Durée d'atteinte d'hypothermie	$T_{hyp} \geq 2h$
Flèche pour une force $F \sim 10N$	$\varepsilon \in [1, 2]cm$

Système étudié

- D : diamètre du grand cercle
- d : diamètre du petit trou (va servir après)
- e : épaisseur de la combinaison
- $m_{\text{comb}} = 16\text{g}$

$D=11,4\text{cm}$

$e=0,7\text{cm}$



$d=0,6\text{cm}$

- 1) **Détermination de la conductivité thermique de la combinaison étudiée**

- 2) Détermination du module de Young et le coefficient de Poisson

- 3) Détermination de l'intervalle d'épaisseur permettant de respecter le cahier de charges suivant :

Détermination de la conductivité thermique

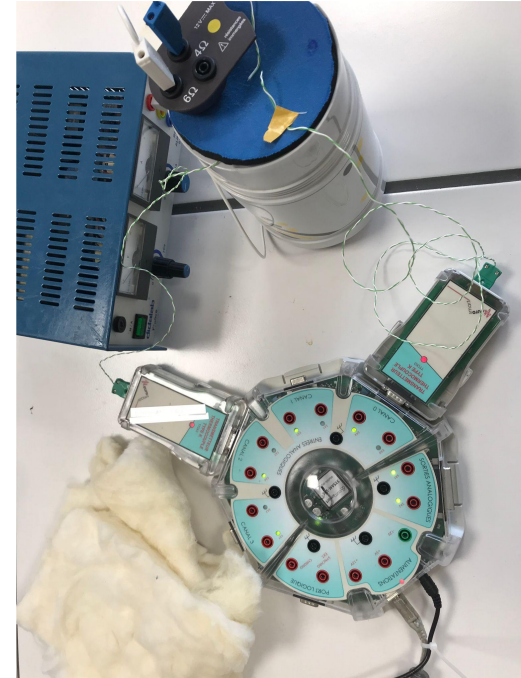
matériel utilisé :



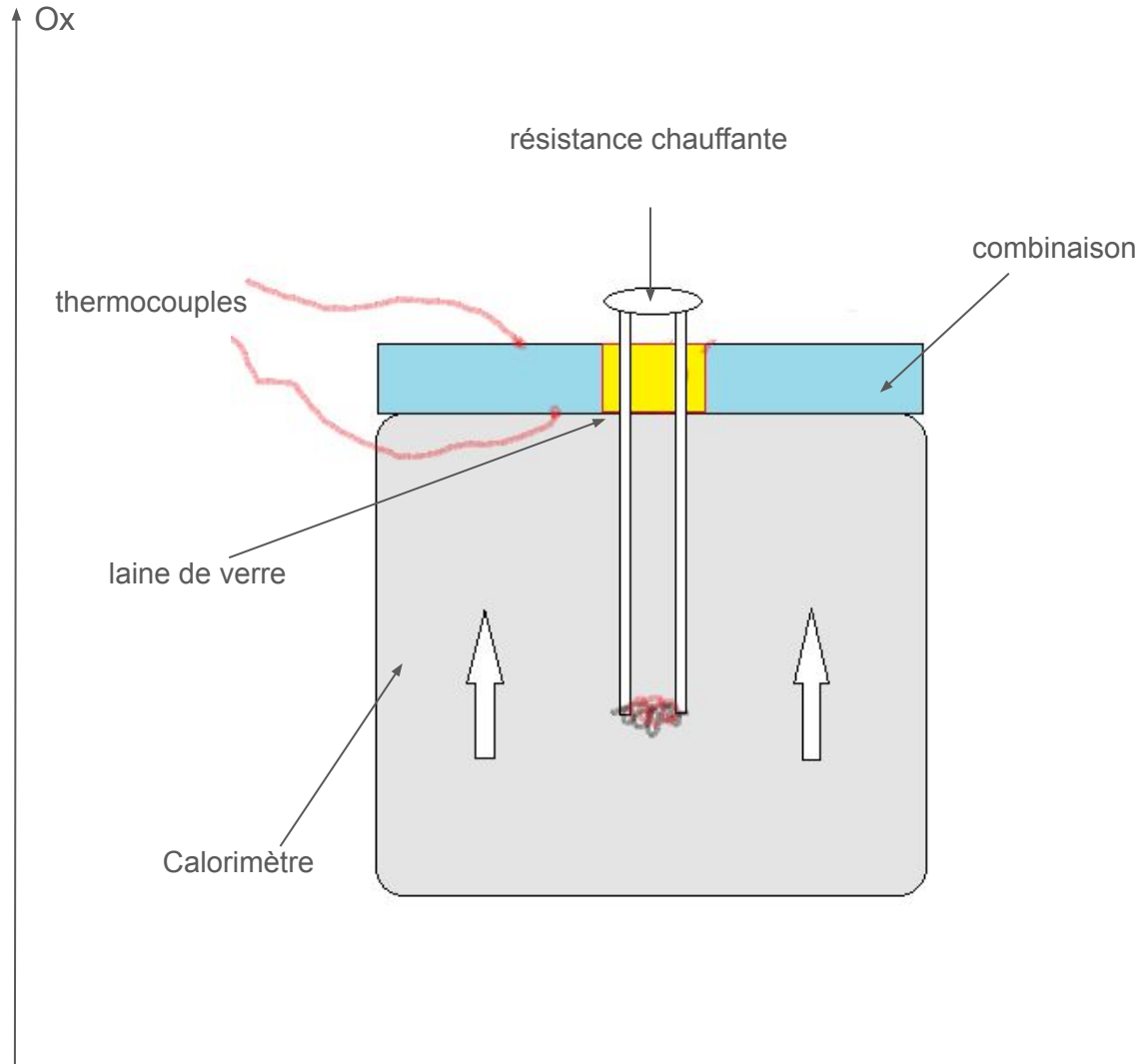
Thermocouple



Laine de verre
(d'épaisseur 0.7cm)



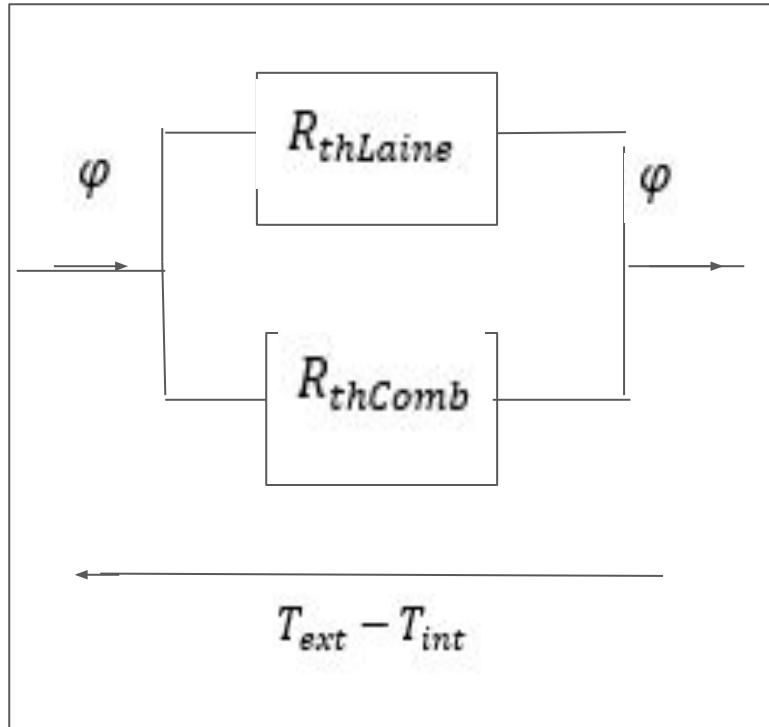
Protocole expérimental :



hypothèses :

- flux unidirectionnel (Ox)
- calorimètre parfaitement calorifugé
- trou parfaitement comblé par la laine de verre

Après un régime transitoire :



modèle électrocinétique

$$\Rightarrow R_{thEq} = \frac{R_{thComb} \cdot R_{thLaine}}{R_{thComb} + R_{thLaine}} = \frac{\Delta T}{\varphi} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{RI^2}$$

Or,
$$R_{th} = \frac{e}{\gamma \cdot \Sigma}$$

Il vient :
$$\gamma_{comb} = \frac{(R_{thLaine} - R_{thEq})}{R_{thEq} \cdot R_{thLaine}} \cdot \frac{e}{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}\right)}$$

Résultat expérimental :

$$R_{thEq} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{RI^2} \approx 3,78 \text{ K.W}^{-1}$$

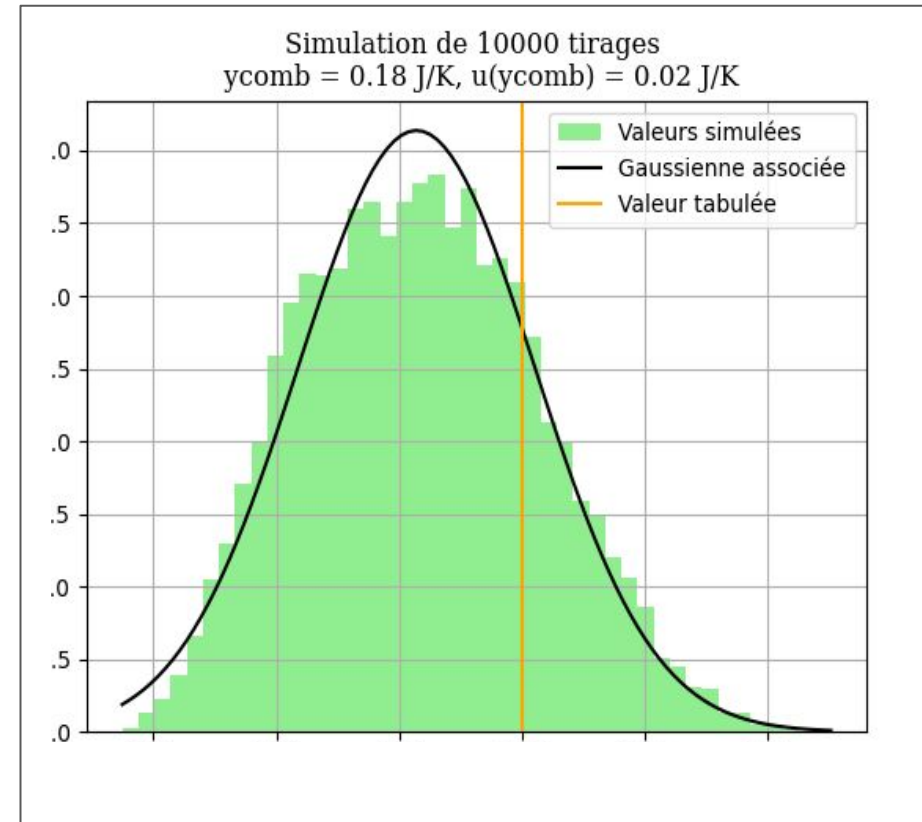
D'autre part :

$$\gamma_{laine} = 0,035 \pm 0,005 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Enfin,

$$\gamma_{comb} = \frac{(R_{thLaine} - R_{thEq})}{R_{thEq} \cdot R_{thLaine}} \cdot \frac{e}{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}\right)} \approx 0,18 \text{ W.K}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

(la valeur tabulée de $\gamma_{néoprène}$ étant de 0,20 (SI))



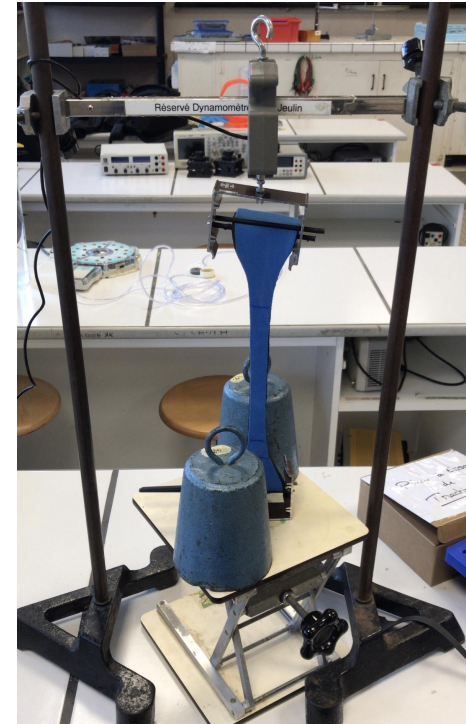
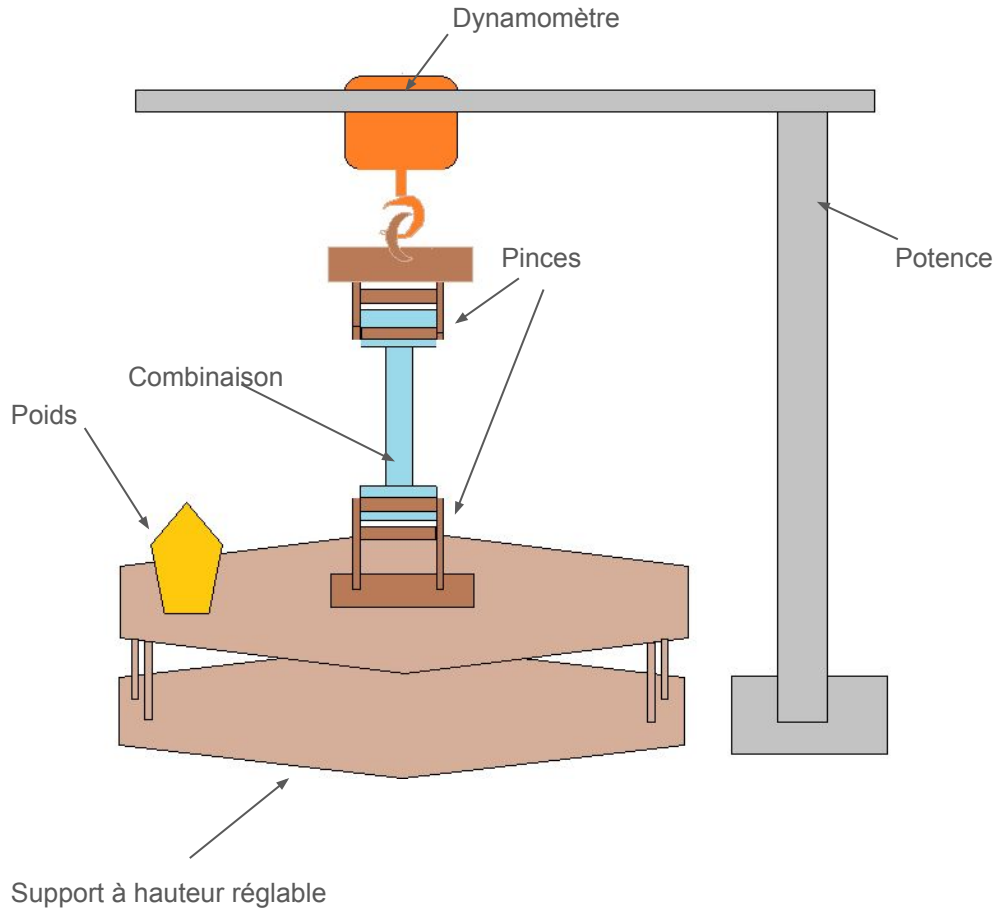
simulation Monte-Carlo

- 1) Détermination de la conductivité thermique de la combinaison étudiée

- 2) Détermination du module de Young et le coefficient de Poisson**

- 3) Détermination de l'intervalle d'épaisseur permettant de respecter le cahier de charges suivant :

Détermination du module de Young

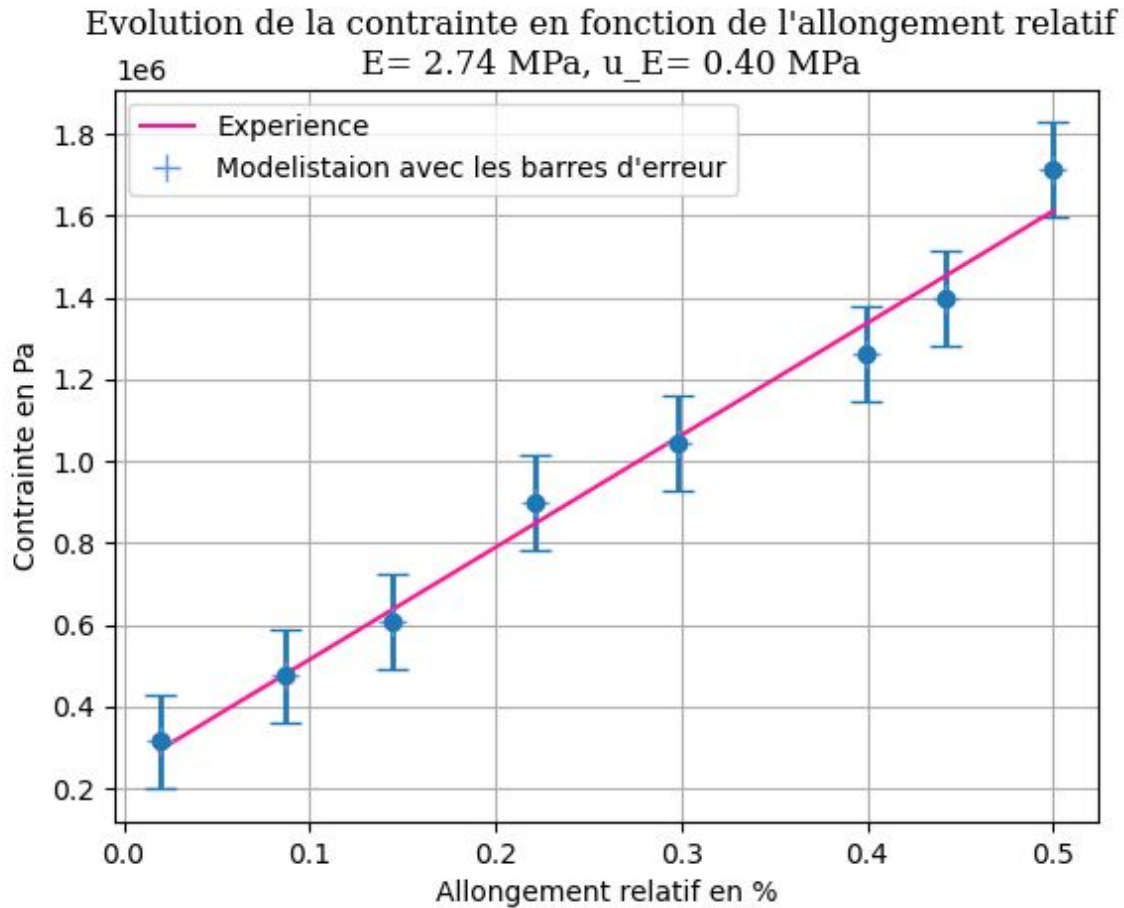


Loi de Hooke :

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \times \varepsilon$$

où

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} : \text{l'allongement relatif} \\ F = F_{mes} - 2m_{pince}g \end{array} \right.$$



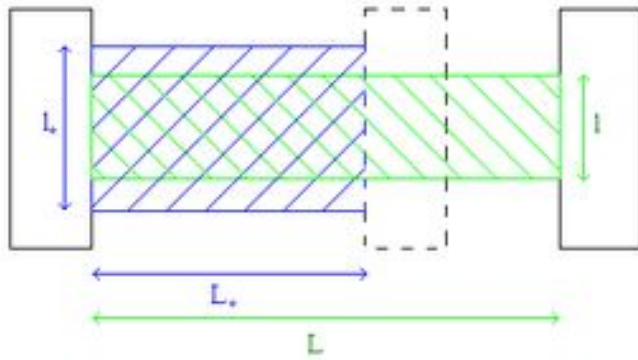
Résultat :

$$E = 2,7 \pm 0,4 \text{ MPa}$$

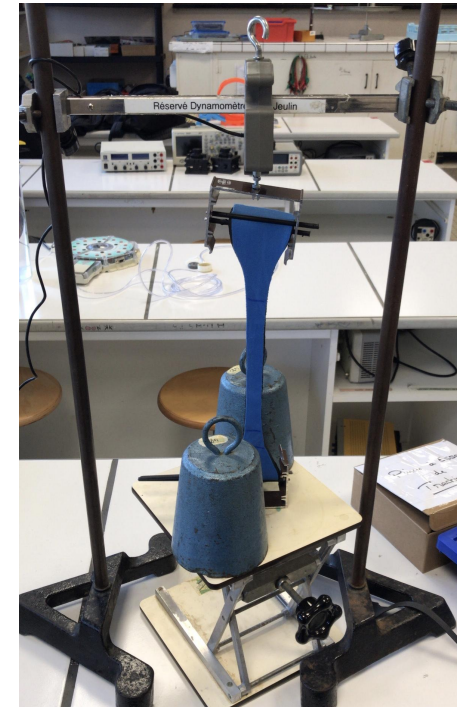
Régression linéaire avec barres d'erreurs

Coefficient de poisson

Schéma



$$\nu = \frac{\text{rétrécissement transversal relatif}}{\text{allongement longitudinal relatif}} = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L - L_0)/L_0} = \frac{1 - \frac{l}{l_0}}{\frac{L}{L_0} - 1}$$



même expérience

Résultat :

$$\nu = 0,27 \pm 0,05$$

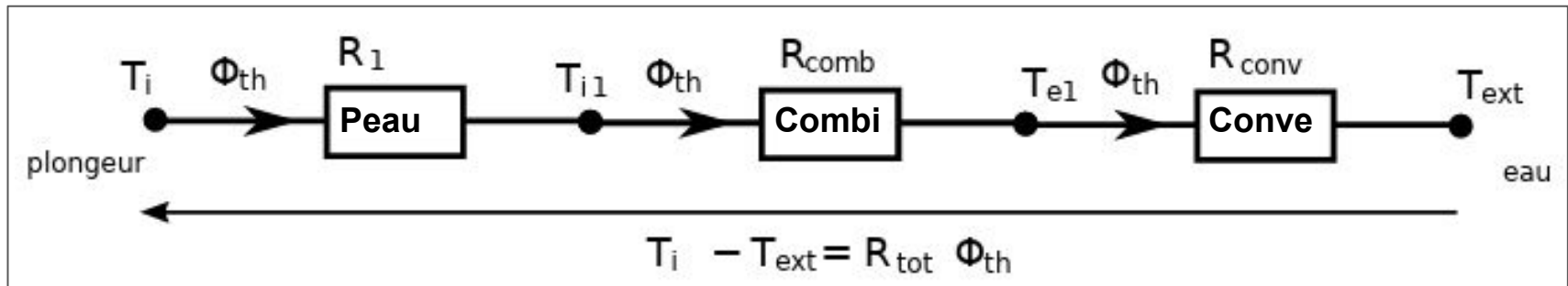
- 1) Détermination de la conductivité thermique de la combinaison étudiée
- 2) Détermination du module de Young et le coefficient de Poisson
- 3) Détermination de l'intervalle d'épaisseur permettant de respecter le cahier de charges suivant :**

Temps d'atteinte d'hypothermie	$T_{hyp} \geq 2h$
Flèche pour une force $F \sim 10N$	$\varepsilon \in [1, 2]cm$

Détermination de l'épaisseur minimale souhaitée :

Modélisation :

- Plongeur en immersion complète et régime stationnaire
- Transferts convectifs entre $\Phi_{conv} = hS\Delta T^e$ de la combinaison et l'eau modélisés par la loi de Newton tel que



Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} S: \text{Surface de la combinaison} \\ e: \text{épaisseur de la combinaison} \\ R_{comb}: \text{Resistance thermique de la peau, } R_{comb} = \frac{e}{\lambda_{comb} \cdot S} \\ R_1: \text{Resistance thermique de la peau, } R_1 = 3,2 \cdot 10^2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \\ R_{conv}: \text{Resistance des flux convectifs, } R_{conv} = \frac{1}{h \cdot S} \end{array} \right.$$

Bilan d'énergie :

→ Premier principe au système {corps du plongeur} :

$$dU = \delta Q$$

On peut écrire $dU = CdT_i$.

On a également $\delta Q = P_{\text{reçu}}dt - P_{\text{perdu}}dt$,

$$\text{Avec : } \begin{cases} P_{\text{reçu}} = P_{\text{th}} : \text{ la puissance produite par le corps du plongeur} \\ P_{\text{perdu}} = \varphi_{\text{th}} = \frac{(T_i(t) - T_{\text{ext}})}{R_{\text{tot}}} \text{ où } R_{\text{tot}} = R_{\text{conv}} + R_1 + R_{\text{comb}} \end{cases}$$

Il vient :

$$\frac{dT_i}{dt} + \frac{T_i(t)}{\tau} = \frac{P_{th}}{C} + \frac{T_{ext}}{\tau}, \quad \text{avec } \tau = C R_{tot}$$

puis :

$$T_i(t) = \left(T_{i0} - \frac{\tau P_{th}}{C} - T_{ext} \right) e^{-t/\tau} + \frac{\tau P_{th}}{C} + T_{ext}$$

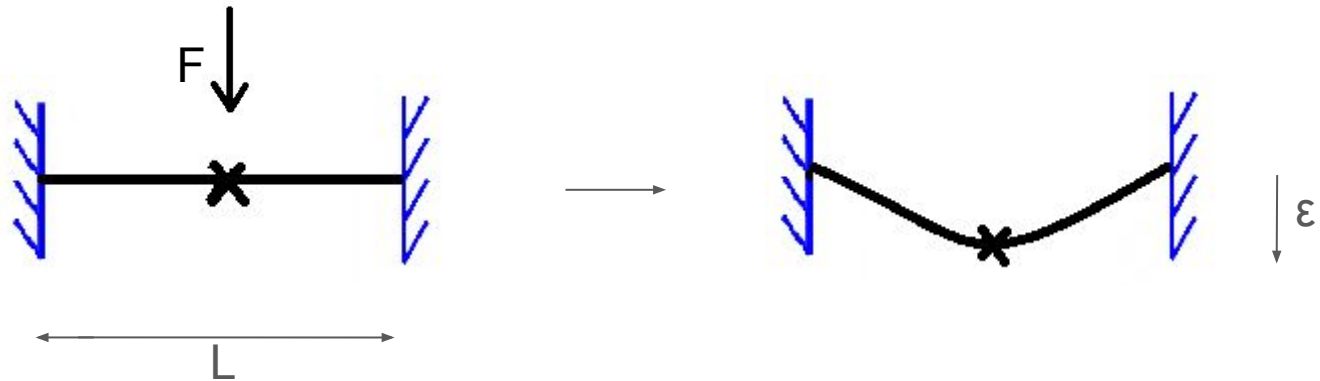
Enfin :

$$t_{hyp}(e) = C \cdot \left(\frac{e}{\lambda_{comb} \cdot S} + R_1 + R_{conv} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_{i0} - T_{ext} - P_{th} \cdot \left(\frac{e}{\lambda_{comb} \cdot S} + R_1 + R_{conv} \right)}{T_{hypothermie} - T_{ext} - P_{th} \cdot \left(\frac{e}{\lambda_{comb} \cdot S} + R_1 + R_{conv} \right)} \right)$$

Détermination de l'épaisseur maximale souhaitée

Modélisation :

- On se limite à un cas simple : flexion du coude du nageur.
- Force ponctuelle, de point de contact la pointe du coude.



Théorème énergétique de Clapeyron :

$$W_{ext} = E_{déf}$$
$$= F \cdot \varepsilon$$
$$= \frac{1}{2E \cdot I} \cdot \int_0^L (M_0(x))^2 dx$$

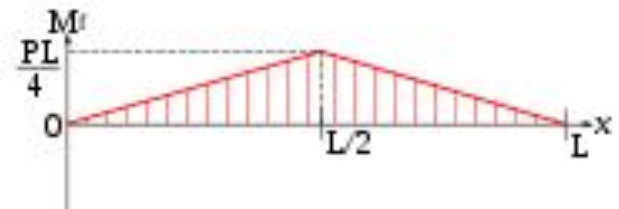
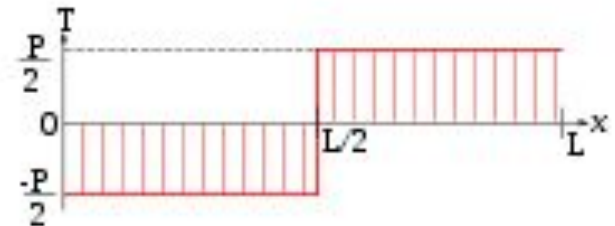
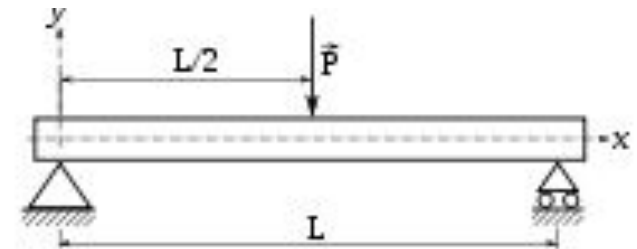
où $\left\{ \begin{array}{l} E : \text{module de Young} \\ M_0 : \text{moment fléchissant} \\ I : \text{moment quadratique en } O / \Delta \end{array} \right.$

Expression de la flèche en fonction de l'épaisseur

$$M_0(x) = \begin{cases} \frac{F}{2}x & , \quad \text{si } x \in \left[0, \frac{L}{2}\right] \\ \frac{F}{2}\left(\frac{L}{2} - x\right) & , \quad \text{si } x \in \left[\frac{L}{2}, L\right] \end{cases}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{F.E.I} \left(\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{(Fx)^2}{2} dx + \int_{\frac{L}{2}}^L \left(\frac{F}{2} \left(\frac{L}{2} - x \right) \right)^2 dx \right)$$

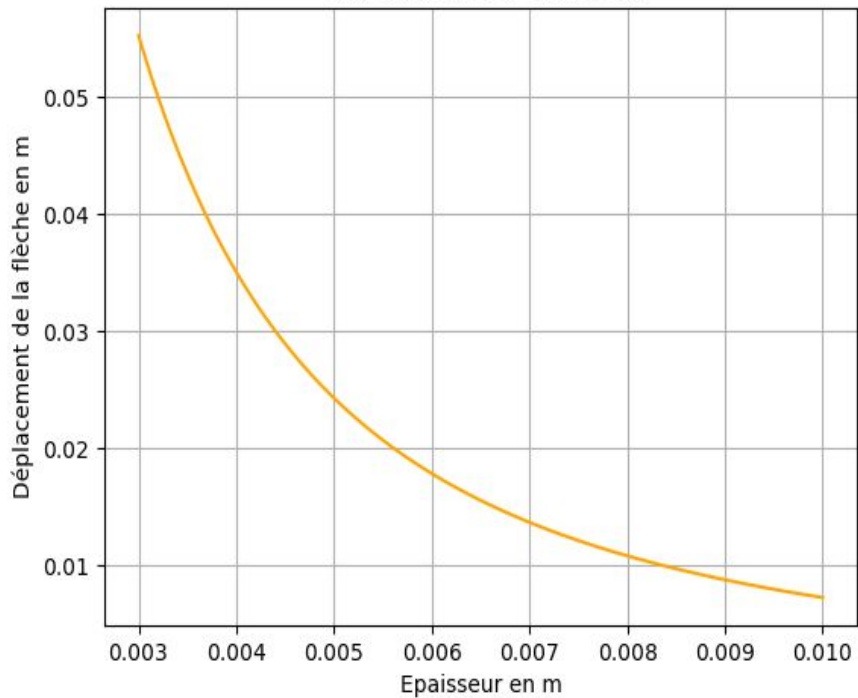
$$\varepsilon = \frac{F}{3ELe^3}$$



moment fléchissant en
fonction de x

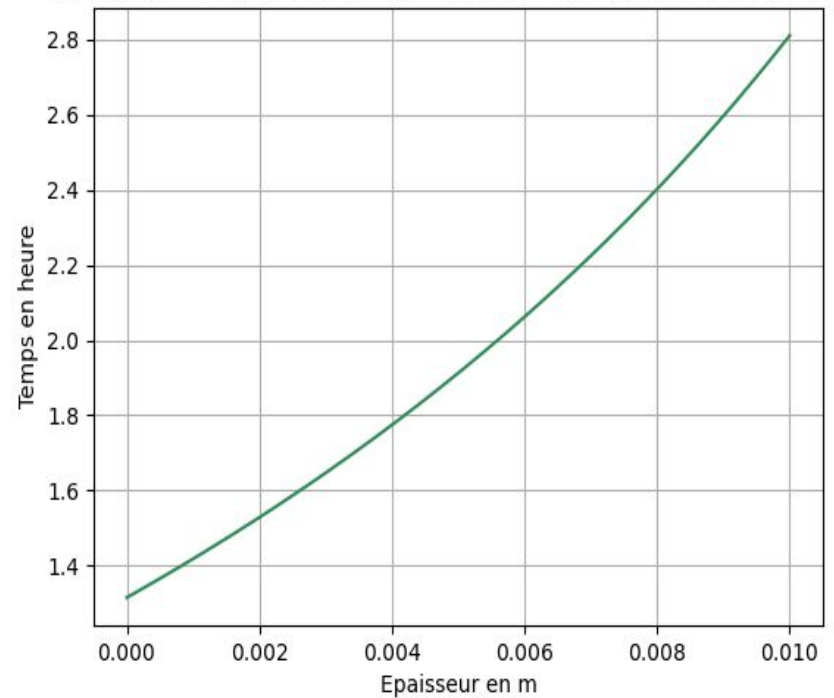
Résultat : courbes théoriques

Variation du déplacement
en fonction de l'épaisseur



aspect élastique

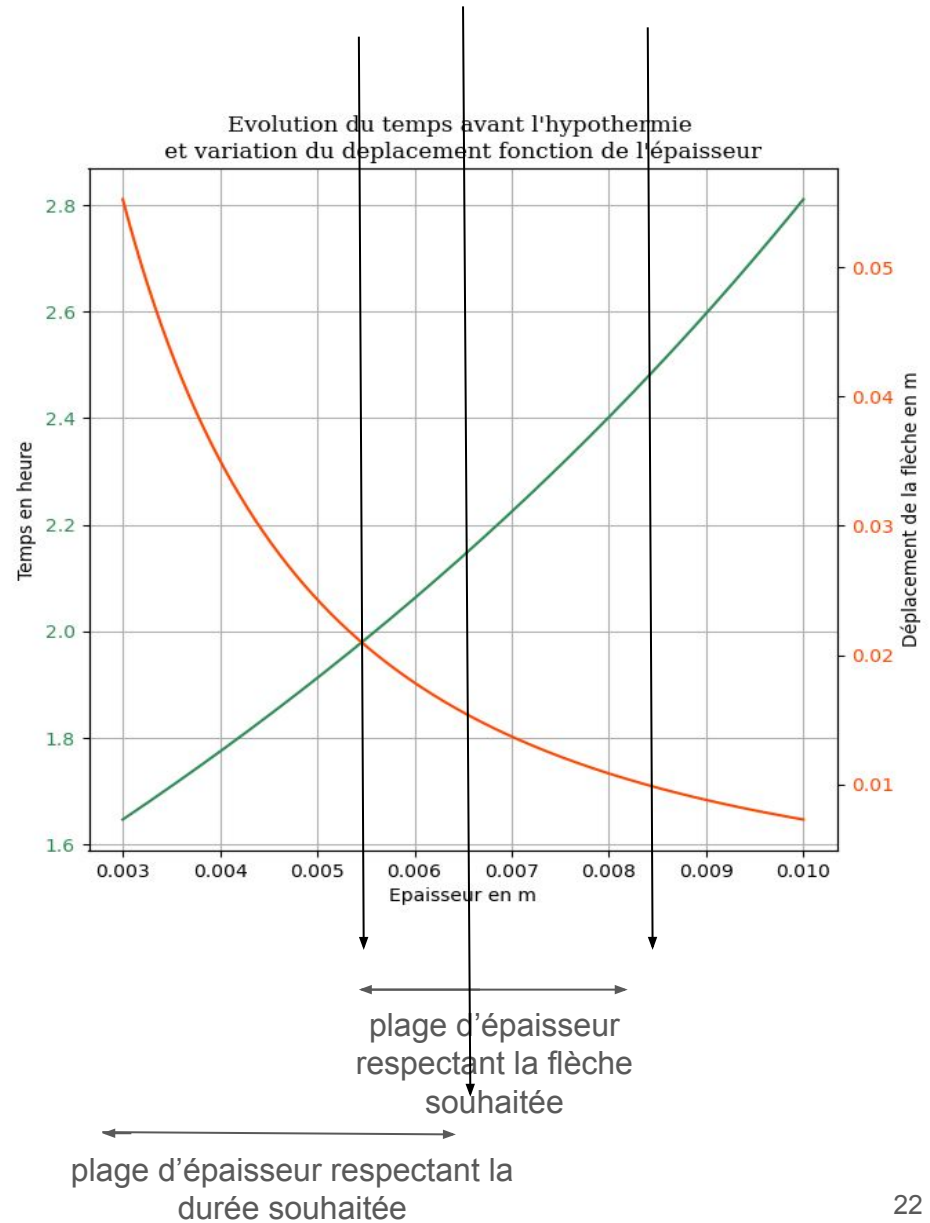
Evolution du temps avant l'hypothermie en fonction de l'épaisseur



aspect thermique

l'intervalle d'épaisseur optimal permettant de respecter le C.D.C. :

$$e \in [5, 6] \text{ mm}$$





néoprène



Impact écologique

Merci pour votre attention.



forme utilisée en traction

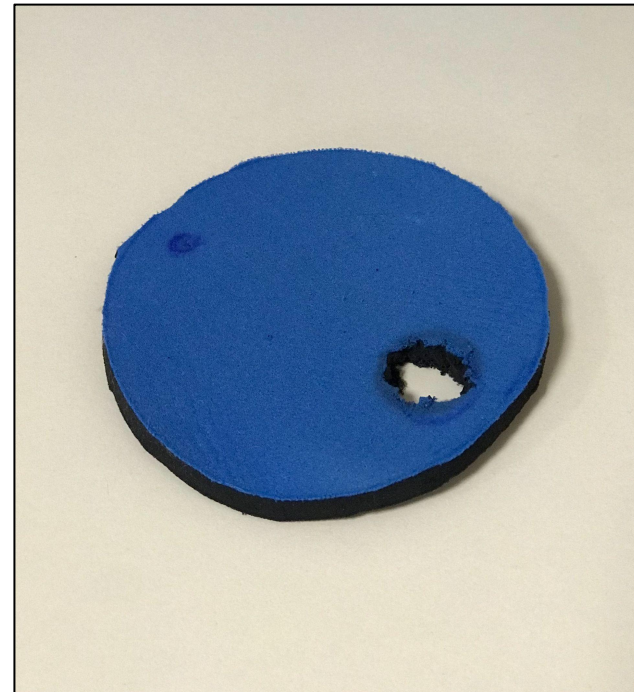


combinaison initiale

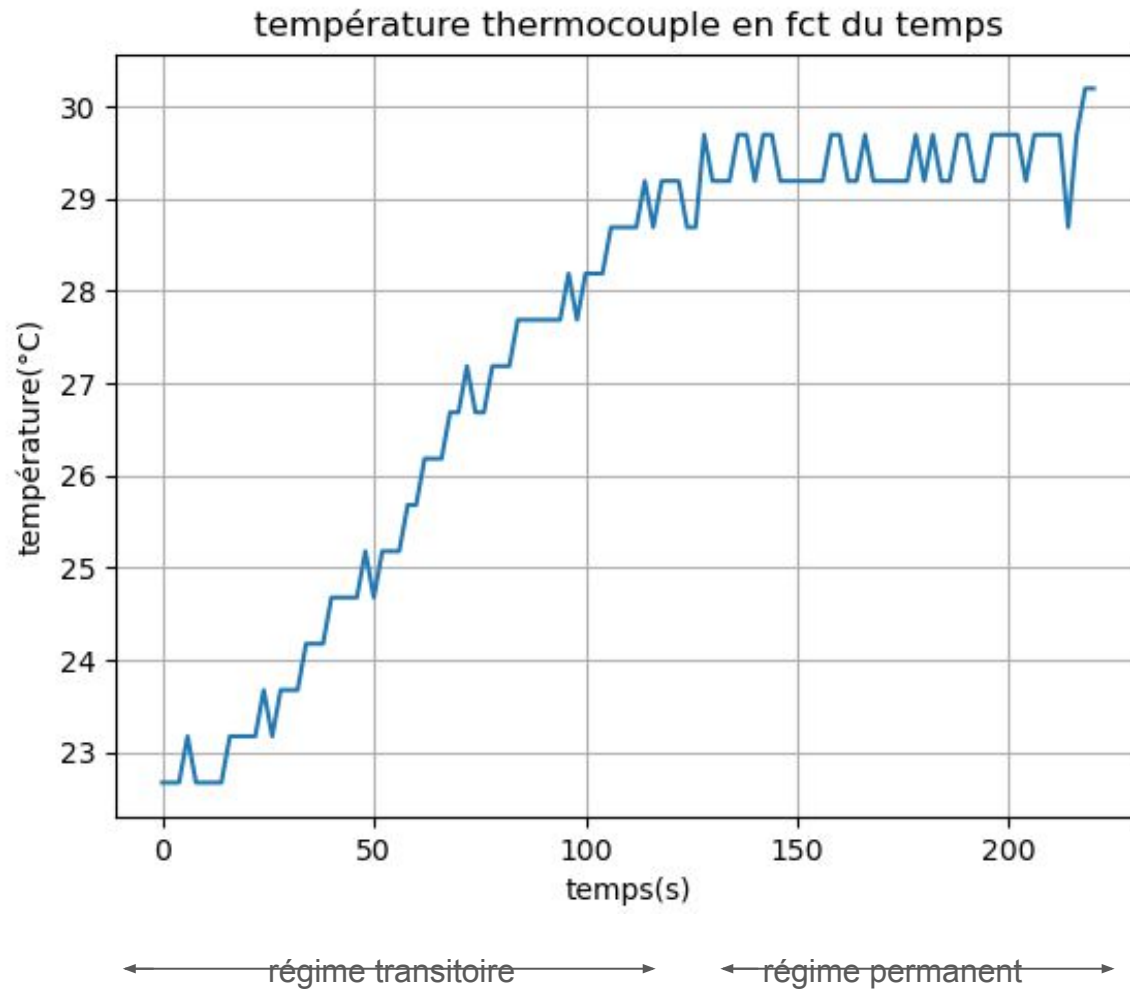
masse volumique :

(mesurée avant perforation)

$$\rho = 0.19 \text{ g.cm}^3$$
$$u(\rho) = 0.02 \text{ g.cm}^3$$

 $D=11,4\text{cm}$ $e=0,7\text{cm}$ 

Evolution temporelle de la température mesurée par un thermocouple :



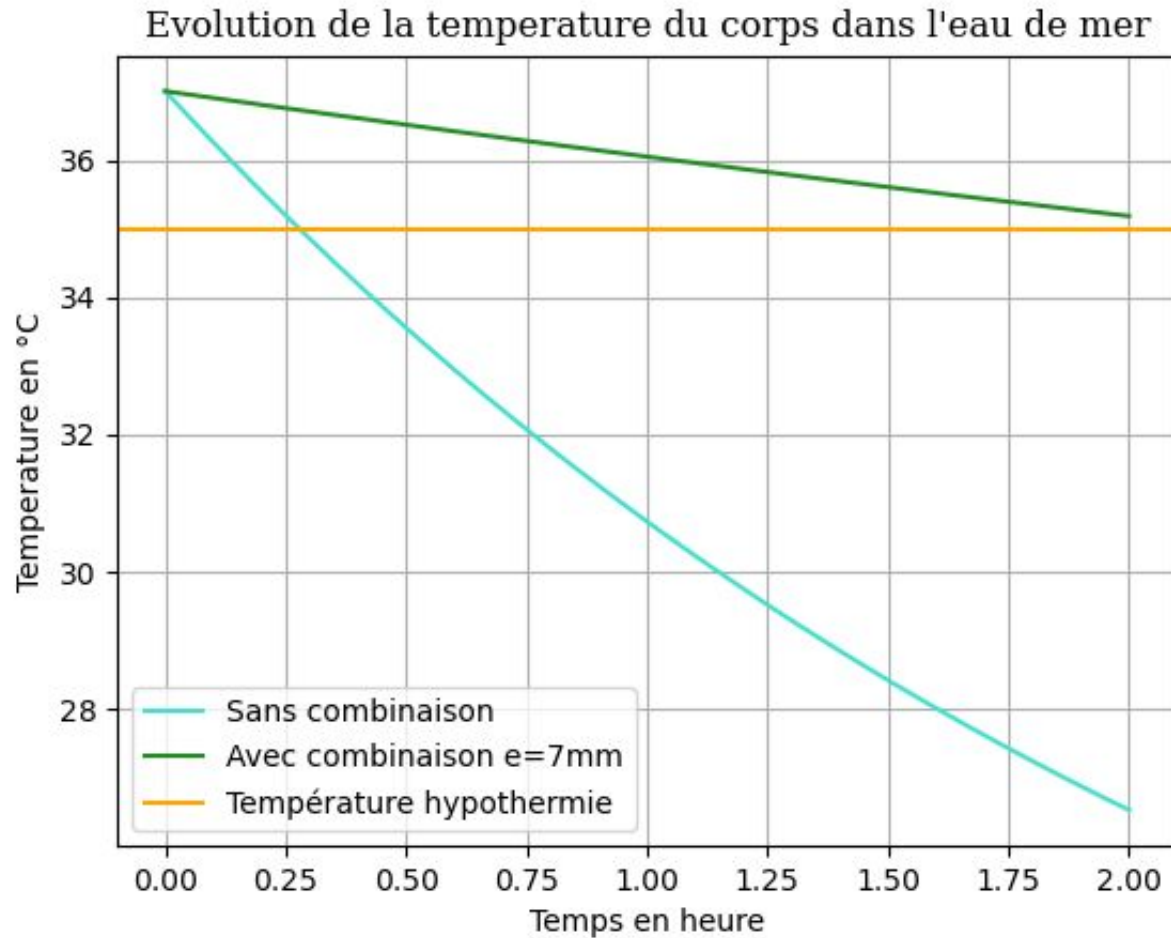
Comparaison des grandeurs théoriques et expérimentales

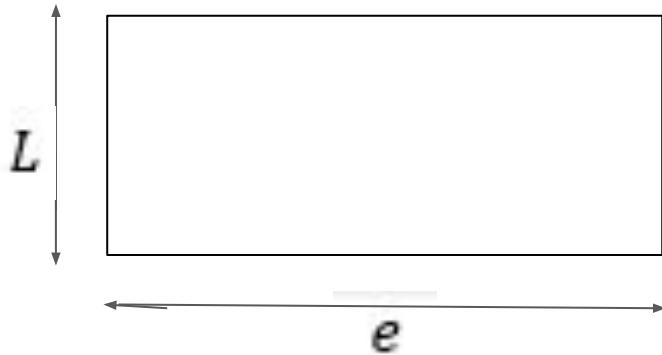
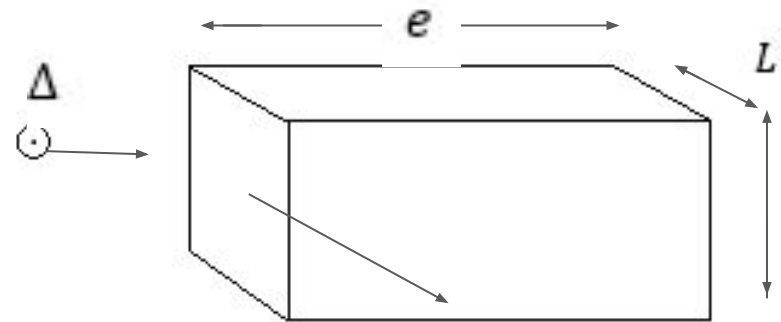
Grandeur	Valeur théorique	Valeur expérimentale	Ecart relatif
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	$1,2 \times 10^3$	190	84 %
Module de Young (GPa)	2,5	$2,74 \times 10^{-3}$	99 %
Coefficient de Poisson (sans unité)	0,5	0,27	46 %
Conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	0.20	0.18	20 %

source des valeurs théoriques

https://www.simulationmatériaux.com/ComportementMecanique/comportement_mecanique_Liste_modules_de_Young.php

Rôle de la combinaison dans l'isolation thermique



calcul du moment quadratique :Vue en 2DVue en 3D

Section rectangulaire :

$$I = \frac{Le^3}{12}$$

Code simulation Monte-Carlo :

```

## Incertitude sur ycomb par simulation Monte Carlo

# Taille de l'échantillon :
N = 10000

# Initialiser un tableau numpy eta_tab qui accueillera les valeurs de viscosité simulées :
ycomb_tab = np.zeros(N)

# Demie plage de variation des différents paramètres dont dépend la viscosité :
delta_L = 1e-3 # m
delta_D = 1e-3 # m
delta_d = 1e-3 # m
delta_Tc = 0.5 #K
delta_Te = 0.5
delta_R = 0.001
delta_i = 0.01
delta_yldv = 0.005

# Procéder à la simulation Mont Carlo :
for j in range(N):
    L_sim = L + delta_L * np.random.uniform(-1,1,1)
    D_sim = D + delta_D * np.random.uniform(-1,1,1)
    d_sim = d + delta_d * np.random.uniform(-1,1,1)
    Tc_sim = Tc + delta_Tc * np.random.uniform(-1,1,1)
    Te_sim = Te + delta_Te * np.random.uniform(-1,1,1)
    R_sim = R + delta_R * np.random.uniform(-1,1,1)
    i_sim = i + delta_i * np.random.uniform(-1,1,1)
    yldv_sim = yldv + delta_yldv * np.random.uniform(-1,1,1)
    Rtheq_sim = (Tc_sim - Te_sim) / (R_sim * i_sim ** 2)
    Rthldv_sim = L_sim / yldv_sim / (np.pi * (d_sim / 2) ** 2)
    ycomb_tab[j] = L_sim / (np.pi * ((D_sim / 2) ** 2 - (d_sim / 2) ** 2)) / (Rtheq_sim * Rthldv_sim) * (Rthldv_sim - Rtheq_sim)

# Calcul de l'incertitude sur ycomb:
u_ycomb = np.std(ycomb_tab, ddof=1)

```

Code régression linéaire :

```
Entrée[98]: l0=10.4 #cm
            Sp=0.7*0.5 #Surface en m2
            l=np.array([10.6,11.3,11.9,12.7,13.5,14.55,15,15.6]) #étirement en cm
            F=np.array([1.10,1.66,2.13,3.14,3.66,4.41,4.9,5.99]) #Force en N
            epsilon=(l-l0)/l0 #allongement relatifs
            sigma=(F)/Sp #Contrainte
```

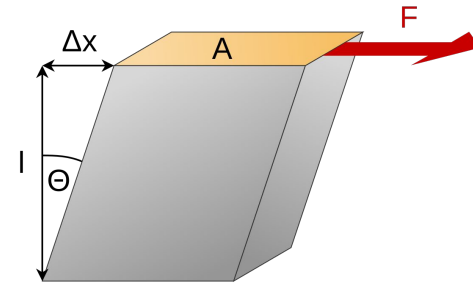
```
Entrée[99]: (a,b)=np.polyfit(eps, sigma, 1) #a Le coefficient directeur et b L'ordonné à L'origine

plt.close()
plt.figure()
plt.plot(eps, a*eps+b, color='deeppink', label='Modélisation')
plt.plot(eps, sigma, marker="+", label='Expérience', linestyle='None', color='cornflowerblue', markersize=10)
plt.title("Evolution de la contrainte en \n fonction de l'allongement relatif", **hfont)
plt.grid()
plt.xlabel('Allongement relatif en %')
plt.ylabel('Contrainte en Pa')
plt.legend()
plt.show()
```


Module de cisaillement (délaissé)

- Dans le cas d'un matériau isotrope :
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

- Expérimentalement :
$$G \stackrel{\text{df}}{=} \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F\ell}{A\Delta x}$$



- Protocole expérimental

