

Examen de Thermique

Mardi 31 octobre 2023, durée 3h

I - Dimensionnement d'un thermocouple

Un thermocouple dont la forme peut être approchée par une sphère est utilisé pour mesurer la température d'un gaz (vapeur). Le coefficient d'échange entre le gaz et la jonction est $h = 400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Le thermocouple a une conductivité thermique $\lambda = 20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, une capacité calorifique $C = 400 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ et une masse volumique $\rho = 8500 \text{ kg/m}^3$.

1. Rappeler l'équation déterminant l'évolution de la température dans le thermocouple ainsi que la condition de frontière à la surface du thermocouple.
2. Adimensionner cette équation et en déduire une condition sur le diamètre pour que le système puisse être considéré comme mince. Quelle conséquence cela a-t-il sur la distribution de température à l'intérieur du thermocouple?
3. Déterminer le diamètre du thermocouple pour que son temps de réponse soit de 10^{-3} s . Vous considérerez que la température dans la sphère est homogène à chaque instant. Cette hypothèse est-elle bien vérifiée?
4. Le thermocouple initialement à 25°C est placé dans un gaz à 200°C . Après combien de temps le thermocouple donnera une température de 199°C ?

II - Détermination de l'épaisseur d'une combinaison de survie en mer

Afin d'augmenter leur chance de survie lors d'un naufrage ou d'une chute à la mer, les marins sont équipés de combinaison de survie leur permettant de flotter sur le dos et de rester 6 heures dans l'eau sans que leur température corporelle ne baisse de plus de 2°C . Les conditions extrêmes sont une eau à $T_\infty = 0^\circ \text{C}$ (l'eau salée solidifie à une température inférieure) avec un courant relatif de vitesse $U_e = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de l'air à la même température avec un vent de vitesse $U_a = 10 \text{ km/h}$.

Le but du problème est de déterminer l'épaisseur d'une combinaison de survie en néoprène.

Dans la suite du problème on considérera un humain de masse $m = 80 \text{ kg}$ et de hauteur $h = 2 \text{ m}$ ayant une surface corporelle $S = 2 \text{ m}^2$. Naturellement le corps produit de l'énergie thermique pour maintenir sa température intérieure à $T_i = 37^\circ \text{C}$. La partie isolante du corps humain est constituée d'une couche de graisse et de la peau l'ensemble ayant une épaisseur $p = 3 \text{ mm}$ et une conductivité thermique $\lambda_h = 0,083 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Puissance thermique perdue par un humain dans des conditions normales.

Déterminer l'énergie thermique perdue par unité de temps ainsi que la température de la surface extérieure de la peau quand le corps est immergé dans de l'air au repos à la température $T_{air} = 20^\circ \text{C}$. Le coefficient d'échange thermique de la peau avec l'air $h = 3,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$.

Pour cela vous pourrez procéder par analogie électrique, mais vous êtes libre de la méthode. Dans le cas de l'analogie électrique:

- (a) Faire un schéma électrique équivalent
- (b) Déterminer la résistance thermique équivalent et en déduire \dot{Q} la puissance thermique perdue.
- (c) Déterminer T_s la température de la surface extérieur de la peau.

2. Puissance maximale perdue avec une combinaison

- Déterminer la puissance maximale perdue \dot{Q}_{max} pour que la température corporelle s'abaisse de $2^\circ C$ après 6 heures d'immersion. On considérera \dot{Q}_{max} constant au cours du temps et que la capacité calorifique d'un humain C_h est un peu inférieure à celle de l'eau $C_h = 4 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- Quelle serait la température T_m de la surface extérieure de la combinaison si elle était parfaitement isolante?

3. Coefficients d'échanges thermiques.

Pour les échanges thermiques, on modélise le corps humain par un parallélépipède rectangle très fin. La combinaison assurant une flotabilité dorsale, on considérera qu'une surface rectangulaire $S_a = 1 \times 0.5 \text{ m}^2$ est exposée au vent et que la partie en contact avec l'eau est constituée de 2 surfaces rectangulaires $S_{e1} = 2 \times 0.5 \text{ m}^2$ et $S_{e2} = 1 \times 0.5 \text{ m}^2$.

- Quelle est l'orientation du courant par rapport aux surfaces qui maximise les échanges thermiques?
- Déterminer le coefficient d'échange thermique de la combinaison avec l'air, dans les conditions d'écoulement les plus favorables aux échanges thermiques.
- Déterminer le coefficient d'échange thermique de la combinaison avec l'eau, dans les conditions d'écoulement les plus favorables aux échanges thermiques.

On donne : $\rho_{air} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\eta_{air} = 16.7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda_{air} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $Pr_{air} = 0,713$, $\rho_{eau} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\eta_{eau} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ et $\lambda_{eau} = 0.574 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $Pr_{eau} = 12,6$.

4. Propriétés d'une combinaison de survie.

La combinaison de survie est en néoprène de conductivité thermique $\lambda_c = 0.076 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Faire un schéma électrique équivalent aux échanges thermiques du marin avec l'extérieur.
- Déterminer la résistance thermique totale.
- En déduire l'épaisseur de la combinaison. Commenter.

III Échangeur thermique

On souhaite refroidir l'huile d'une turbine à gaz par de l'eau. Pour cela on utilise un échangeur à plaques constitué d'un empilement N plaques métalliques très fines séparées d'une distance a , entre lesquelles s'écoulent les fluides de façon alternée et en sens opposés. Pour des raisons d'insertion de l'échangeur dans l'installation thermique on souhaite que l'échangeur soit cubique de côté L .

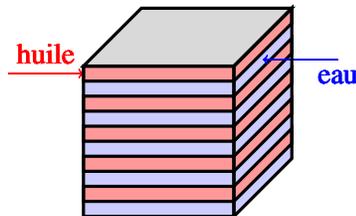


FIGURE 1 – Schéma de l'échangeur

L'huile de viscosité $\eta = 3.25 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ arrive dans l'échangeur à une température $T_h^e = 100^\circ C$ et en sort à la température $T_h^s = 60^\circ C$ avec un débit massique $\dot{m}_h = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et l'eau à une température d'entrée $T_e^e = 30^\circ C$ et un débit massique $\dot{m}_e = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le but de l'exercice est de dimensionner l'échangeur par la méthode DTLM.

1. Calcul de la dimension L de l'échangeur.

- (a) Déterminer la surface d'échange en fonction de L et N .
- (b) Déterminer la puissance thermique échangée.
- (c) Calculer la température de sortie de l'eau T_e^s .
- (d) Calculer l'écart à la température logarithmique moyenne DT_{LM}

On considère que les écoulements entre les plaques sont laminaire ce qui conduit à un nombre de Nusselt $Nu = 7.54$ pour les deux écoulements (eau ou huile).

- (e) Déterminer, en fonction de N et L , le coefficient d'échange \bar{h}_e entre l'eau et les plaques métalliques.
- (f) Déterminer, en fonction de N et L , le coefficient d'échange \bar{h}_h entre l'huile et les plaques.
- (g) En déduire le coefficient d'échange global de l'échangeur à plaques.
- (h) En déduire la longueur L de l'échangeur en fonction de N .
- (i) On suppose que $N = 60$, calculer L .

2. Justification des hypothèses

- (a) L'hypothèse d'écoulement laminaire était-elle bien justifiée?
- (b) L'hypothèse de température uniforme des plaques est-elle justifiée.

3. En TD avec le même problème en utilisant un échangeur à tube cylindrique de diamètre extérieur $D = 45$ mm, on avait trouvé une longueur de tube $L_T = 66$ m. Comparer les volumes occupés par les 2 types d'échangeurs.

4. **Hors barème :** En supposant un écoulement de Poiseuille à 2 dimensions entre les plaques, déterminer l'écart de pression entre l'entrée et la sortie de l'échangeur pour le circuit d'huile.

On donne :

Propriétés physique de l'huile

T (K)	ρ (kg · m ⁻³)	C (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	η (Pa · s)	λ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Pr
300	884	1900	0.486	0.145	6400
320	872	1993	0.141	0.143	1965
340	860	2076	0.053	0.139	793
360	848	2161	0.025	0.138	395
380	836	2250	0.014	0.136	233
400	825	2337	0.008	0.134	152

Propriétés physique de l'eau

T (K)	ρ (kg · m ⁻³)	C (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	$\eta \cdot 10^3$ (Pa · s)	λ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Pr
300	1003	4179	0.855	0.613	5.83
305	1005	4178	0.769	0.620	5.20
310	1007	4178	0.695	0.628	4.62
315	1009	4179	0.631	0.634	4.16
320	1011	4180	0.577	0.640	3.77
325	1013	4182	0.528	0.645	3.42
330	1016	4184	0.489	0.650	3.15