TP 4B – Transferts Thermiques

Conductivité thermique et transfert conducto-convectif

Intro : La mesure de la conductivité thermique d'un matériau est très importante dans les contextes suivants :

- Isolation thermique d'un bâtiment : utilisation de matériaux de faible conductivité thermique i.e. isolants thermiques ;
- Evacuation d'énergie dégagée par un phénomène (effet Joule en électricité, réaction chimique exothermique…) afin de maintenir le dispositif en régime optimal de fonctionnement sans risquer sa détérioration par une élévation importante de sa température : utilisation de matériaux de conductivité thermique élevée i.e. bons conducteurs thermiques couplée à des transferts convectifs → ailette de refroidissement.

Problématique :

Comment déterminer expérimentalement la conductivité thermique d'un matériau et un coefficient de transfert conducto-convectif ?

Compétences expérimentales au programme :

Conduction, convection et rayonnement.	Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.
Loi de Fourier.	Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.

Objectifs :

- Exploiter des relevés de température au sein d'une barre pour déterminer la conductivité thermique du matériau ou un coefficient de transfert conducto-convectif.
- Obtenir un profil de température au sein d'une barre à l'aide d'une caméra thermique.
- Identifier les paramètres d'influence d'un coefficient de transfert conducto-convectif.

Organisation de la séance :

	Gpes i et i'	Gpes j et j'
14h-15h / 16h-17h	1e partie. Conductivité thermique	2e partie. Transfert conducto-convectif
15h-16h / 17h-18h	2e partie. Transfert conducto-convectif	1e partie. Conductivité thermique

A faire pour la séance de TP :

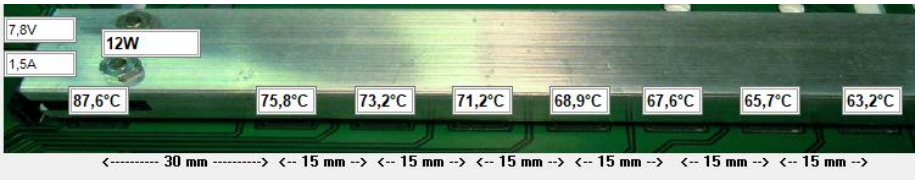
Lire entièrement le sujet et répondre aux questions ✎.

1e partie : Détermination expérimentale d'une conductivité thermique

1) Matériel

Une barre en aluminium de longueur $L = 19{,}5\ cm$, de section rectangulaire $\boldsymbol{S = 2\ cm^2}$, calorifugée latéralement, est chauffée par effet Joule à l'aide d'une résistance à l'une de ses extrémités. On note $\boldsymbol{P}$ **la puissance fournie à la barre en** $\boldsymbol{x = 0}$.

L'acquisition est réalisée avec le logiciel Conductoo via 8 sondes de température disposées sur la barre.



2) Protocole

Brancher le dispositif *(on n'utilisera pas la ventilation :* ***interrupteur OFF sur le côté du boîtier****)*.

Ouvrir le logiciel Conductoo et faire afficher les températures grâce à l'icône .Vérifier que tous les afficheurs donnent la même température sinon aller dans l'onglet « parameters » puis « uniformity » (la température affichée est alors la moyenne des 8 températures).

Dans l'onglet « parameters » puis « acquisition », spécifier la durée totale de l'acquisition : $800\ s$ et la période d'échantillonnage : $T_e = 1\ s$.

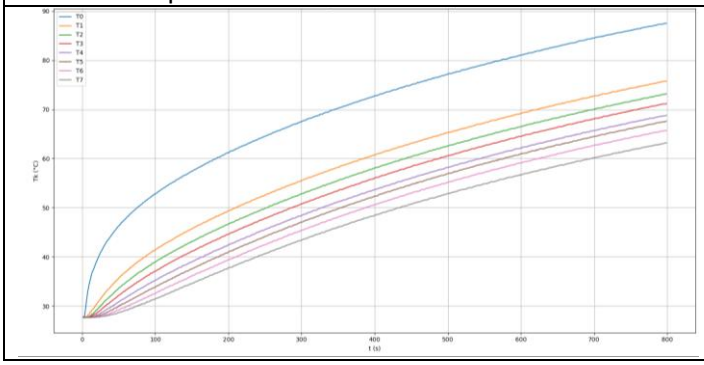
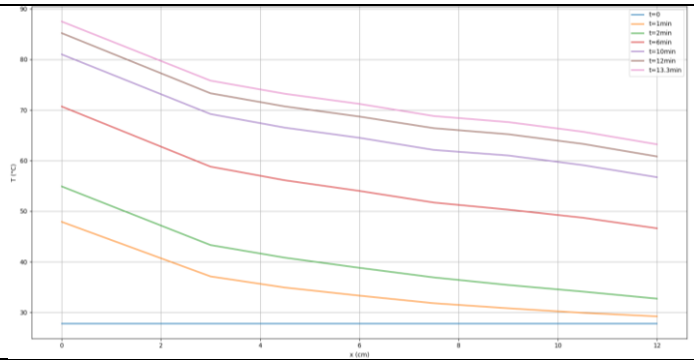
Lancer l'acquisition grâce à l'icône lancer le chauffage grâce à l'icône .

Une fois l'acquisition terminée, enregistrer le fichier Conductoo puis aller dans l'onglet « fichier » puis « export » puis « text file » puis mettre en marche la ventilation de la barre pour que les groupes suivants aient une barre avec une température (quasi-)uniforme.

Ouvrir le fichier texte, supprimer la 1e ligne (t = 0) et remplacer toutes les virgules par des points.

Vous exploiterez les mesures en complétant le fichier Python « TP4B_1 conductivité thermique_ à compléter » disponible sur Cahier de Prépa.

3) Modèle théorique et exploitation des résultats

Evolutions temporelles de la température au niveau des différents capteurs	Profils de température au sein de la barre à différents instants
	

Données : Pour la barre en **aluminium** de ce dispositif : la masse volumique est $\boldsymbol{\rho = 2700\ kg.m^{-3}}$, la capacité thermique massique est $\boldsymbol{c = 897\ J.K^{-1}.kg^{-1}}$ et on attend une conductivité thermique $\boldsymbol{\lambda = 190\ W.m^{-1}.K^{-1}}$.

On admet les résultats théoriques suivants :

On considère un **milieu semi-infini** le long de la demi-droite $[Ox)$ soumis à une puissance thermique surfacique φ constante en $x = 0$.

Le milieu est régi par l'équation de la diffusion thermique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Avec

$$D = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Initialement, on a :

$$T(x, t = 0) = T_i$$

La **condition à la limite** s'écrit :

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}(x = 0, t) = \varphi = \frac{P}{S}$$

La **solution** analytique de cette équation s'écrit :

$$T(x,t) = T_i + \frac{\varphi}{\lambda}\left(2\sqrt{\frac{D.t}{\pi}}.exp\left(-\frac{x^2}{4D.t}\right) - x.\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D.t}}\right)\right)\right)$$

Avec $erf(\chi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\chi} e^{-z^2}dz$ la fonction d'erreur de Gauss (en Python, elle est implémentée dans le module `scipy.special`, cf fichier Python et CCMP I MP 2023).

a) Analyse de l'évolution temporelle de la température en $x = 0$

✎➲ 1. Justifier que la température en $x = 0$ vérifie :

$$T(x = 0, t) = T0 = T_i + \frac{2\varphi}{\sqrt{\pi\lambda\rho c}} \cdot \sqrt{t}$$

✎➲ 2. Quelle courbe* doit-on tracer et exploiter pour déterminer la conductivité thermique λ ? **Identifier les coordonnées permettant d'obtenir une courbe modélisable par une droite via une régression linéaire.*

➲ 3. Compléter le fichier Python pour exploiter les résultats expérimentaux obtenus en $x = 0$. 💣 Pour la **puissance fournie à la barre**, on prendra $P = 7{,}5\ W$ *(et non la valeur* $12\ W$ *affichée par le logiciel)*. En déduire la valeur de la conductivité thermique λ de l'aluminium. Commenter.

➲ 4. La précision des capteurs de température vaut $\Delta T = 0{,}6\ °C$. En utilisant une simulation Monte-Carlo sous Python, évaluer l'incertitude sur la pente de la régression linéaire et en déduire l'incertitude sur la conductivité thermique λ de l'aluminium.

b) Analyse de l'évolution temporelle de la température en $x = 9\ cm$

➲ 5. Compléter le fichier Python pour exploiter les résultats expérimentaux obtenus en $x = 9\ cm$: $T(x = 9\ cm, t) = T5$. Pour la conductivité thermique, on prendra la valeur obtenue expérimentalement et 💣 pour la **puissance fournie à la barre**, on prendra $P = 7{,}5\ W$ *(et non la valeur* $12\ W$ *affichée par le logiciel)*.

➲ 6. Commenter les courbes expérimentales et théoriques obtenues.

2e partie : Détermination expérimentale d'un coefficient de transfert conducto-convectif

1) Avec plusieurs capteurs de températures (expérience à réaliser)

a) Matériel

Une barre en aluminium de section circulaire de rayon $\boldsymbol{R = 0,50\ cm}$ est chauffée par effet Joule à l'aide d'une résistance à l'une de ses extrémités. La conductivité thermique de la barre a été déterminée très précisément par le fabriquant et vaut : $\boldsymbol{\lambda = 134\ W.m^{-1}.K^{-1}}$.
L'acquisition est réalisée avec le logiciel CassyLab2 via 6 thermocouples disposés sur la barre tous les $\boldsymbol{4,0\ cm}$.



b) Protocole

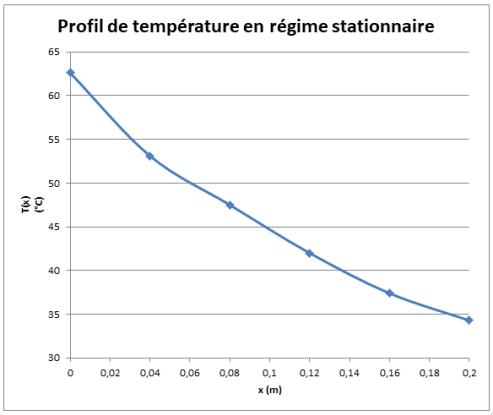
- Fermer la hotte.
- Télécharger le fichier « TP4B_cond-conv_cassy » disponible sur Cahier de Prépa. Ouvrir ce fichier et fermer la fenêtre *Module CASSY*.
- Relever la température donnée par les différents thermocouples pour avoir la valeur de la température moyenne de l'air T_a.
- Lancer la mesure pour suivre l'évolution des températures grâce à l'icône : Temps de mesure pas spécifié
- Mettre la résistance chauffante sous tension : la puissance de chauffe est normalement préréglée à environ $\boldsymbol{P = 8\ W}$ pour une tension d'environ $14\ V$.

➲ 7. Très rapidement : relever la fém et l'intensité débitée par l'alimentation, calculer la puissance fournie et vérifier que la valeur est conforme aux attentes. *Sinon, **sans dépasser** $\boldsymbol{15\ V}$, régler l'alimentation.*

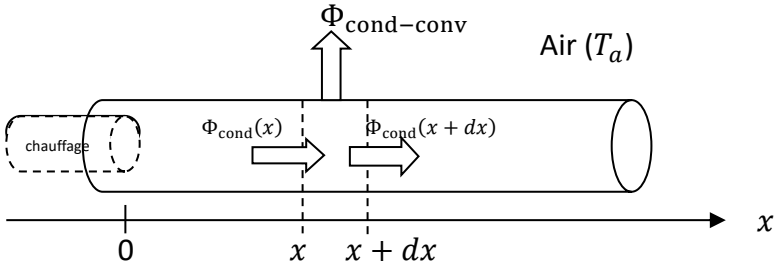
- Une fois l'acquisition terminée, enregistrer le fichier Cassy puis sélectionner tout le tableur (Ctrl+A), copier et coller sous Excel puis éteindre l'alimentation et mettre en marche la ventilation de la hotte pour que les groupes suivants aient une barre avec une température (quasi-)uniforme.

c) Profil théorique de température et exploitation des résultats *(cf TDT2/4 ex Ailette de refroidissement)*

Voici le profil de température en régime (quasi-)stationnaire :



Pour interpréter ce profil de température, il faut prendre en compte les transferts thermiques suivants :



- La barre est le siège de transferts purement conductifs en tout point M intérieur à la barre ;
- Sur ses parois, on a un transfert conducto-convectif : le flux surfacique fourni par la barre à l'air, au niveau de l'abscisse x, est donné par la loi de Newton :

$$\varphi = h.(T(x,t) - T_a)$$

Avec T_a la température de l'air et h le coefficient de transfert conducto-convectif que l'on veut évaluer

➲ 8. On se place en régime stationnaire : Faire un bilan thermique sur la tranche de barre comprise entre x et $x + dx$ pour montrer que l'équation différentielle vérifiée par $T(x)$ est :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{1}{\delta^2}T = -\frac{1}{\delta^2}T_a$$

Avec δ une grandeur homogène à une distance à exprimer en fonction de λ, h et R.

➲ 9. Donner la solution générale $T(x)$ de l'équation différentielle en introduisant deux constantes d'intégration. En considérant que la barre est « semi-infinie », montrer que le profil de température en régime stationnaire s'écrit :

$$T(x) = \alpha.\exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) + T_a$$

➲ 10. Quelle courbe* doit-on tracer et exploiter pour déterminer le coefficient de transfert conducto-convectif h ? **Identifier les coordonnées permettant d'obtenir une courbe modélisable par une droite via une régression linéaire.*

➲ 11. Comment repère-t-on le régime (quasi-)stationnaire ?

➲ 12. Créer les coordonnées de la courbe de la question 10 à partir des valeurs expérimentales. Tracer cette courbe et en déduire le coefficient de transfert conducto-convectif h. Commenter.

➲ 13. Ce coefficient change-t-il si on prend une autre puissance de chauffe ? si on met l'aspiration de la hotte en marche ? A quel type de convection a-t-on à faire dans ce dernier cas ?

➲ 14. La précision des capteurs de température vaut $\Delta T = 0{,}6\ °C$. En utilisant une simulation Monte-Carlo sous Python, évaluer l'incertitude sur la pente de la régression linéaire et en déduire l'incertitude sur le coefficient de transfert conducto-convectif h.

2) Avec une caméra thermique *(expérience présentée la semaine précédente)*

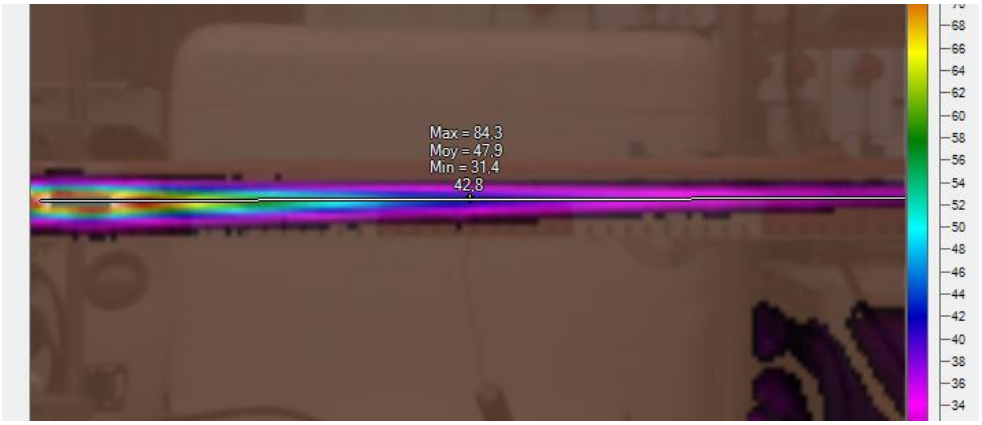
On peut réaliser la même expérience à l'aide d'une caméra thermique au lieu des 6 thermocouples (la barre en aluminium a été peinte pour éviter des problèmes d'étalonnage, cf plus loin « émissivité »).
On relève la température de l'air T_a, la fém et l'intensité débitée par l'alimentation pour en déduire la puissance fournie.

On réalise une seule acquisition en régime (quasi-)stationnaire. **Les alignements ont été réalisés au préalable, on prendra soin de ne pas les dérégler.**



✋ Insérer la carte SD dans la caméra, appuyer sur la gachette verte à l'avant puis enregistrer.

✋ Lire la carte SD sur l'ordinateur avec le logiciel SmartView.
Aller dans l'onglet « ouvrir », « modifier », « l'image ».
Faire pivoter l'image puis dans la partie « couleurs » choisir « contraste élevé », modifier « l'émissivité » de sorte que la température du point central de la barre corresponde à la température mesurée par le thermocouple.
L'émissivité est un nombre sans dimension qui mesure la capacité d'un système à émettre de l'énergie sous forme de rayonnement. La situation ε = 1 correspond au modèle théorique du corps noir. Ainsi, on peut associer quantité de rayonnement absorbée par la caméra et température de l'endroit envoyant ce rayonnement. La caméra infrarouge est, pour cette raison, appelée caméra thermique.
Le curseur situé sous l'image permet de choisir le mode de visualisation : IR à visible.
Visualiser en mode IR. Cliquer sur « Redimensionner niveau et sensibilité » et glisser les curseurs à gauche de l'image pour obtenir une image semblable à celle donnée ci-dessous.



La caméra thermique produit des images en fausses couleurs permettant de remonter à la valeur de la température de l'objet.

Pour mesurer la température en différents points le long de la barre :

✋ Repérer d'abord une droite : à l'extrémité gauche de la barre, repérer le point de température maximale, cliquer et maintenir jusqu'à l'extrémité droite de la barre, lâcher au point de température maximale. Sur cette droite, repérer des points espacés de 5 cm en exploitant l'étalon. Cliquer sur « appliquer » puis « OK ».

✋ Cliquer droit sur l'image, choisir « afficher les données ». Cliquer droit sur la fenêtre de données, choisir « copier » et coller dans un fichier Excel.

La 1^{e} colonne contient les lignes « L » et points « P » repérés, les températures sont contenues dans les colonnes « min », « avg » et « max » (pour un point, ces 3 valeurs sont égales).

Comme dans l'expérience précédente (2^{e} partie § 1), on peut exploiter les mesures pour déterminer le coefficient de transfert conducto-convectif.

Rotation TP4 :

	01-oct	08-oct	15-oct
Laura - Romain - Antony	C	B	A
Albin - Aubin - Nolann	C	B	A
Loane - Roman - Raphaël A.	B	A	C
Nathan - Max - Salahaddin	A	C	B
Eglantine - Nolan - Raphaël B.	A	C	B

	01-oct	08-oct	15-oct
Lazare - Antoine D.	C	B	A
Antoine V. - Stanislas	C	B	A
Zaccharie - Camille	B	A	C
Robin - Ilyès	A	C	B
Gabriel	A	C	B