

Travaux pratiques modes de transferts thermiques

Dahia Chibouti
dahia.chibouti@univ-eiffel.fr

2022 – 2023

Table des matières

1	Introduction et rappels théoriques	2
1.1	Transmission de chaleur par conduction	2
1.2	Transmission de chaleur par convection	3
1.2.1	Convection forcée	5
1.2.2	Convection libre (ou naturelle)	5
1.3	Transmission de chaleur par rayonnement	6
1.4	Mode de transfert simultané	7
1.4.1	En parallèle	8
1.4.2	En série	8
2	Description du dispositif expérimental	8
3	Prise en main du banc	9
4	Mode opératoire	12
4.1	Obtention d'une température stable de l'élément chauffant	12
4.2	Mesures sur un cycle de chauffe	12
4.3	Incertitudes et propagation	12
5	Manipulation	15
5.1	Étude de la conductivité thermique des matériaux du lot	15
5.2	Étude de l'influence de l'inclinaison de la résistance chauffante sur la conductance de convection naturelle	16
5.3	Étude de l'influence de l'inclinaison de la résistance chauffante sur la conductance de convection forcée	17
5.4	Étude de l'influence d'une cheminée sur la convection naturelle	18
5.5	Détermination de l'émissivité d'une surface	19

1 Introduction et rappels théoriques

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence et d'étudier les trois principaux modes de transfert de chaleur que sont :

- la conduction,
- la convection,
- le rayonnement.

La conduction thermique est un processus physique irréversible de transport de l'énergie interne. Pour les fluides, elle correspond à une variation de l'agitation moléculaire dans les fluides. Pour les solides, la conduction thermique est due aux inhomogénéités de vibration du réseau atomique et aux électrons de conduction (métaux). À l'échelle macroscopique, la chaleur se propage des régions chaudes vers les régions froides. La conduction est le principal mécanisme permettant à la chaleur de se transmettre au sein d'un solide.

Si la conduction est importante dans les fluides, elle s'accompagne souvent de transport de chaleur par convection, c'est-à-dire par le déplacement moyen de l'énergie interne par le mouvement du fluide. Le rayonnement thermique est le seul mode de transfert d'énergie qui ne nécessite pas de matière pour se propager. Tout corps porté à une température supérieure à 0 K émet un rayonnement thermique qui a pour effet de réduire son énergie interne et donc sa température. Réciproquement, tout corps recevant du rayonnement augmente son énergie interne, et donc sa température.

1.1 Transmission de chaleur par conduction

La théorie macroscopique de la conduction repose sur la loi de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température. Sous sa forme algébrique 1D, le flux total transmis à travers la surface S , dans la direction des x croissants, s'écrit :

$$\varphi = -S\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

avec

- φ le flux de chaleur (W)
- λ la conductivité thermique du milieu (W/m/K)
- x la variable d'espace dans la direction du flux (m)
- S l'aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

Si l'épaisseur du bloc de la Fig. 1 dans la direction du transfert thermique est e , le flux total transmis est :

$$\varphi = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{\lambda S}} \quad (2)$$

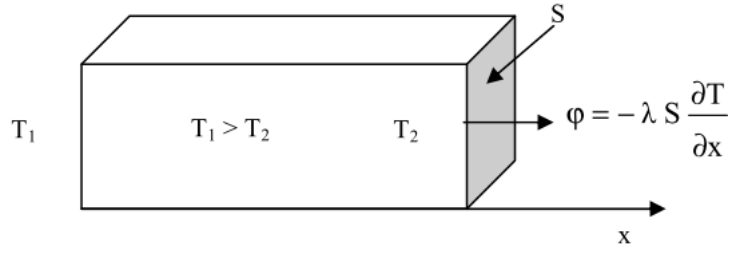


FIGURE 1 – Transfert de chaleur par conduction

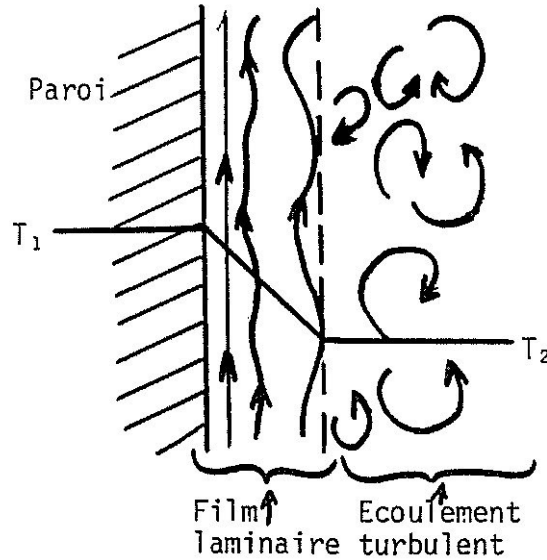


FIGURE 2 – Transfert de chaleur par convection (paroi chaude)

Par analogie à la loi d'Ohm ($I = (V_1 - V_2)/R$) pour laquelle la différence de potentiel $V_1 - V_2$ joue le rôle de la différence de température $T_1 - T_2$ et le flux de chaleur φ correspond au courant électrique I , on en déduit la résistance thermique de conduction pour un mur plan :

$$R_{th,cd} = \frac{e}{\lambda S} \quad (3)$$

1.2 Transmission de chaleur par convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide en mouvement, l'énergie étant transmise principalement par le déplacement du fluide. Le transfert thermique par convection est régi par la loi de Newton. Le flux de chaleur transmis de la paroi vers le fluide s'écrit

$$\varphi = hS(T_1 - T_2) \quad (4)$$

avec

- φ le flux de chaleur transmis par conduction par le mur (W)
- h le coefficient de transfert de chaleur par convection ou *conductance* de convection ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)

- T_1 la température de la surface solide (K)
- T_2 la température du fluide loin de la surface solide (K)
- S l'aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

L'expression précédente peut se réécrire sous la forme

$$\varphi = hS(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{hS}} \quad (5)$$

où $R_{th,cv} = 1/(hS)$ est la résistance thermique équivalente de convection.

Quel que soit le régime d'écoulement, y compris turbulent, il existe au voisinage immédiat de la paroi une zone d'écoulement laminaire appelée film laminaire (voir Fig. 2). Ce film est adjacent à la surface avec une vitesse nulle du fluide le long de la paroi immobile.

Ce film constitue la principale résistance thermique au transfert de chaleur entre la paroi et le fluide en mouvement. C'est pourquoi on parle souvent de coefficient de film pour désigner le coefficient de transfert convectif à la paroi. Lorsque la turbulence de l'écoulement augmente, l'épaisseur du film laminaire diminue, sa résistance thermique décroît. Le flux de chaleur, pour un écart de température donné, est donc d'autant plus important que le régime d'écoulement est turbulent. Dans la pratique, on détermine la valeur de h à partir d'expériences (objets du présent T.P). Les résultats de ces expériences sont traduits en matière de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles. Certains de ces paramètres sans dimension font apparaître la dimension caractéristique D . Dans le cas d'un cylindre par exemple, cette dimension caractéristique est son diamètre, mais lorsque la section n'est plus cylindrique, on parle alors de diamètre hydraulique D_h donné par : $D_h = 4S_o/P_m$ avec

- D_h le diamètre hydraulique (m)
- S_o la section occupée par le fluide (m^2)
- P_m le périmètre mouillé (m).

Parmi les grandeurs adimensionnelles, on peut citer :

Le nombre de Reynolds. C'est le rapport des forces d'inertie et des forces de viscosité. Il permet de déterminer le type d'écoulement (laminaire ou turbulent).

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{V D_h}{\nu} \quad (6)$$

avec

- V la vitesse caractéristique de l'écoulement (m/s)
- μ la viscosité dynamique (kg/m/s)
- ν la viscosité cinématique (m^2/s)

Le nombre de Prandtl. C'est une caractéristique intrinsèque du fluide qui mesure le rapport des vitesses de diffusion, de la quantité de mouvement (vitesse) et de température. Il est défini à l'aide des propriétés thermophysiques du fluide :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (7)$$

avec C_p la capacité calorifique (chaleur spécifique) à pression constante

Le nombre de Nusselt. C'est le rapport entre le flux de chaleur convectif à la paroi et le flux de conduction moyen équivalent dans le fluide entre les mêmes températures :

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (8)$$

avec

- λ la conductivité thermique du fluide (W/m/K)
- L l'échelle caractéristique de longueur pour le flux de conduction

L'analyse dimensionnelle montre que le nombre de Nusselt est fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl :

$$Nu = C Re^m Pr^n k \quad (9)$$

où C , m , n et k sont des constantes qui dépendent des configurations.

1.2.1 Convection forcée

Elle est imposée par des actions mécaniques extérieures (pompes, ventilateurs, etc, ...). L'écoulement est alors laminaire ou turbulent suivant la valeur du nombre de Reynolds.

1.2.2 Convection libre (ou naturelle)

Ce type de convection résulte des variations de masse volumique du fluide dues à des inhomogénéités de température. Il en résulte une convection laminaire ou turbulente, suivant la valeur du critère du nombre de Grashof Gr , ou de Rayleigh $Ra = Gr \cdot Pr$. Le nombre de Grashof en convection naturelle dans un fluide correspond au rapport des forces gravitationnelles par les forces visqueuses.

$$Gr = \beta g \frac{\Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \quad (10)$$

avec

- g l'accélération de la pesanteur (m/s²)
- β coefficient de dilatation, avec $\beta = -\rho^{-1}(\partial\rho/\partial T)_P$ ($\beta = 1/T$ pour un gaz parfait)
- ΔT la différence de température

— L la longueur caractéristique

Le flux de chaleur s'obtient par la loi de Newton, avec des corrélations appropriées aux géométries étudiées. L'expérience montre également que le nombre de Nusselt peut s'obtenir par la relation :

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = C(GrPr)^n k \quad (11)$$

Exemples des valeurs des constantes C , n et k pour des géométries standards de la Fig 3 :

- Cylindre vertical ouvert, de diamètre D (convection interne, cf. Fig. 3(a)) : $C = 0,01$, $n = 1/4$ et $k = (D/L)^3$
- Plaque horizontale chauffée (convection sur la face supérieure, cf. Fig. 3(b)), $L = 4A_s/P$.
 - Régime laminaire, $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$: $C = 0,54$, $n = 1/4$ et $k = 1$
 - Régime turbulent, $10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$: $C = 0,14$, $n = 1/3$ et $k = 1$
- Plaque verticale chauffée, $L = A_s/P$.
 - Régime laminaire, $Ra_L \leq 10^9$: $C = 2/5$, $n = 1/4$ et $k = [1 + (1 + 1/\sqrt{Pr})^2]^{-1/4}$
 - Régime turbulent, $Ra_L \geq 10^9$: $C = 0,0246$, $n = 2/5$ et $k = [Pr^{1/6}/(1 + 0,494Pr^{2/3})]^{2/5}$
- Plaque faiblement inclinée (cf. Fig. 3(c)), $L = A_s/P$.
 - Régime laminaire : $C = 0,8$, $n = 1/4$ et $k = [\cos \alpha / (1 + (1 + 1/\sqrt{Pr})^2)]^{1/4}$
 - Régime turbulent : $C = 0,8$, $n = 2/5$ et $k = [\cos \alpha / (1 + (1 + 1/\sqrt{Pr})^2)]^{1/4}$

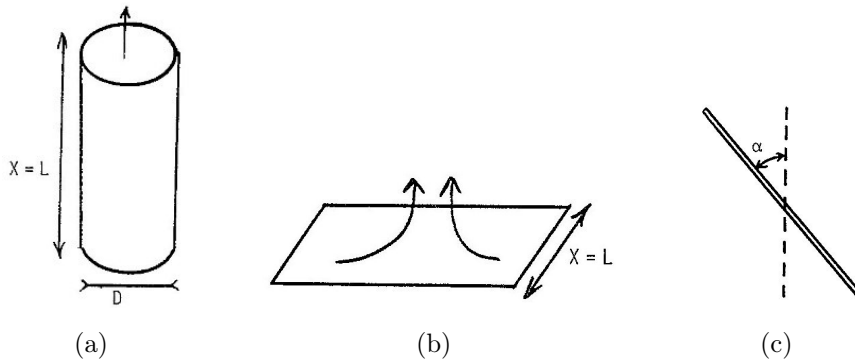


FIGURE 3 – Géométries standards utilisées pour définir les valeurs des constantes C , n et k . Attention, l'angle α est donné ici par rapport à la verticale.

1.3 Transmission de chaleur par rayonnement

Un corps à température non nulle émet de l'énergie par sa surface sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Inversement, soumis à un rayonnement thermique, il en absorbe une partie qui accroît son énergie interne (température). Si un corps émet un flux 1 et absorbe un flux 2 de son environnement, alors sa température augmente (resp. diminue) si $\varphi_1 < \varphi_2$ (resp. $\varphi_1 > \varphi_2$). L'émetteur ou l'absorbeur idéal est appelé corps noir. Il a la propriété d'émettre, à

température et longueur d'onde données, la plus grande quantité de rayonnement thermique. Il absorbe également tout le rayonnement qui lui parvient, il ne réfléchit rien. L'émittance énergétique M^0 (W/m²) du corps noir est proportionnelle à la puissance quatrième de la température absolue de la surface (loi de Stefan).

$$M^0(T) = \sigma T^4 \quad (12)$$

avec $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{K}^4/\text{m}^2$ (constante de Stefan-Boltzman). Pour un corps gris (propriétés radiatives indépendantes des longueurs d'onde), l'émittance est donnée par :

$$M = \varepsilon M^0 \quad (13)$$

où ε est l'émissivité de la surface. Ainsi, la quantité d'énergie émise par une surface grise S quelconque est :

$$\varphi = \varepsilon S \sigma T^4 \quad (14)$$

Entre deux surfaces grises, le flux radiatif net s'obtient par le bilan de ce qui est émis et absorbé par une surface, soit :

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (15)$$

où F_{12} est un facteur (sans unité) qui tient compte non seulement des émissivités 1 et 2, des surfaces S_1 et S_2 , mais aussi des positions respectives des surfaces l'une par rapport à l'autre.

Remarque : il est possible de définir un coefficient de transmission par rayonnement (ou conductance de rayonnement) en écrivant :

$$\begin{aligned} \varphi_{1 \rightarrow 2} &= F_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) \\ &= F_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \\ &= h_r (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (16)$$

avec $h_r = F_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$. Si les écarts de température ne sont pas trop importants, en notant $T_m = (T_1 + T_2)/2$, l'expression du flux d'échange radiatif se linéarise pour donner $h_r = 4T_m^3 F_{12}$. Il est ainsi possible de définir une résistance thermique équivalente de rayonnement $R_{th,ray} = 1/(h_r S)$.

1.4 Mode de transfert simultané

Quand plusieurs modes de transfert ont lieu simultanément, en parallèle (isothermes à l'entrée et à la sortie de toutes les résistances thermiques) ou en série (le même flux traverse toutes les résistances thermiques), l'analogie avec les lois d'association des résistances électriques (Fig. 4) permet d'écrire :

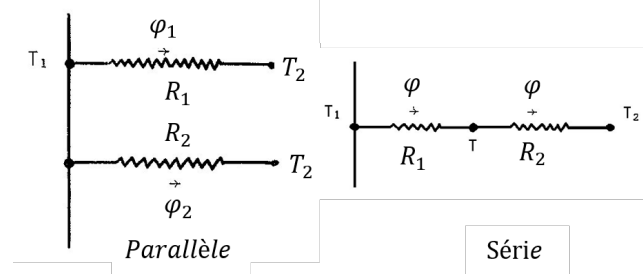


FIGURE 4 – Schématisation des résistances en parallèle et en série.

	20 °C	40 °C	60 °C
Masse volumique ρ en kg/m ³	1,205	1,137	1,06
Viscosité cinématique ν en cm ² /s	0,150	0,169	0,188
Viscosité dynamique μ en g/cm/s	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Diffusivité thermique D en m ² /s	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-5}$
Chaleur spécifique C_p en J/kg/K	1003	1003	1004
Conductibilité thermique λ en W/m/K	0,0255	0,0267	0,0279
Nombre de Prandtl Pr	0,71	0,72	0,72
$g\beta\rho^2/\mu^2$	$168 \cdot 10^6$	$112 \cdot 10^6$	$90 \cdot 10^6$

TABLEAU 1 – Propriétés physiques de l'air

1.4.1 En parallèle

$$\varphi_1 = \frac{T_1 - T_2}{R_1} \quad (17)$$

$$\varphi_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_2} \quad (18)$$

et

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) (T_1 - T_2) \quad (19)$$

1.4.2 En série

$$\varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} \quad (20)$$

2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental et ses accessoires sont présentés en Figs. 5 et 6. Il comprend :

- 2 plaques chauffantes souples, l'une ayant une face noire (corps noir) et une face brillante (aluminium), l'autre étant non revêtue. La résistance des plaques est réalisée à partir d'une peinture légèrement conductrice, permettant d'obtenir une répartition de température parfaitement homogène et une très faible inertie thermique.

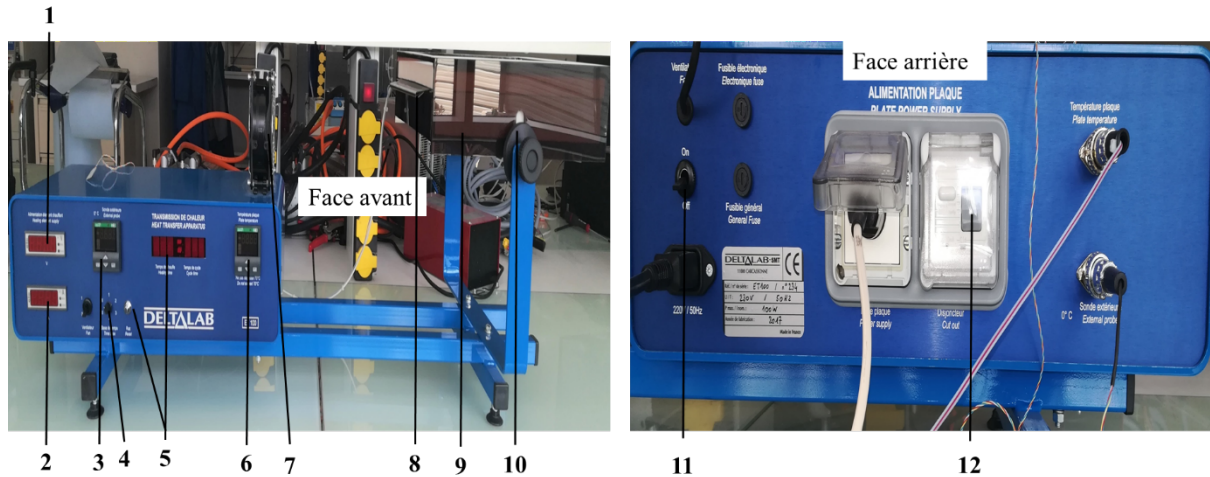


FIGURE 5 – Banc expérimental des modes de transmission de chaleur. La correspondance des numéros est donnée dans le tableau 2.

- 1 support de plaque permettant l'isolation parfaite d'une face de la plaque chauffante.
- 1 banc équipé d'un support orientable en inclinaison, destiné au montage de l'élément chauffant avec ou sans support isolant.
- 1 ventilateur
- 1 lot de plaques diverses de différents matériaux, destinées à l'étude de la conduction et du rayonnement, ainsi qu'un conduit circulaire pour des études de convection libre et forcée.
- 1 boîtier électronique comprenant :
 - 1 régulateur de température tout-ou-rien avec potentiomètre rotatif pour la sélection de la température de consigne ($< 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).
 - 2 compteurs de temps avec dispositif de remise à zéro et d'annulation.
 - 1 thermomètre digital avec sonde de platine pour la mesure de la température de surface et de la température ambiante.

Les dimensions sont les suivantes :

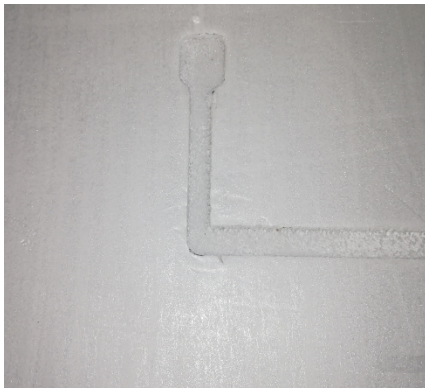
- plaque chauffante : $313\text{ mm} \times 232\text{ mm}$
- plaques de matériaux : $298\text{ mm} \times 298\text{ mm}$
- ouverture : $257,5\text{ mm} \times 216,68\text{ mm}$ (ce sont les dimensions de l'ouverture qui correspondent aux valeurs théoriques dans la partie conduction).

3 Prise en main du banc

Montage du banc :

1	Voltmètre	Pour mesurer la tension envoyée à la plaque chauffante
2	Ampèremètre	Pour l'intensité du courant envoyée à la plaque chauffante
3	Afficheur numérique (thermomètre digital)	Indique la température mesurée par la sonde extérieure (température ambiante)
4	Potentiomètre rotatif	Pour sélectionner la base de temps
5	Compteurs de temps avec dispositif de remise à zéro et d'annulation	Pour compter le temps de montée en température de la plaque et la durée du cycle de chauffe
6	Afficheur numérique (thermomètre digital)	Indique la température de la plaque chauffante; les flèches permettent de fixer une consigne de température
7	Ventilateur	Permet l'étude de la convection forcée
8	Une des plaques chauffantes montées de manière à étudier la conduction	Pour étudier les différents modes de transfert thermique
9	Caisson porte-résistance	Pour monter la plaque chauffante avec ou sans résistance et l'orienter suivant l'angle d'inclinaison désiré
10	Gros/petit Boutons moletés	Pour fixer le capot du caisson porte-résistance / orienter le caisson porte-résistance
11	Commutateur	Mets sous tension le système
12	Bouton du bloc disjoncteur différentiel	Pour la protection du banc d'éventuelles surtensions

TABLEAU 2 – Dispositif expérimental



(a) Support de plaque permettant l'isolation



(b) Cheminée pour l'étude de la convection



(c) Lot de 7 plaques (résistances thermiques)

FIGURE 6 – Accessoires liés au dispositif expérimental

- Desserrer les gros boutons moletés, situés de part et d'autre du caisson porte-résistance, pour pouvoir retirer la partie supérieure de celui-ci ; installer sur l'isolant la résistance chauffante (plaque chauffante), avec ou sans isolant dessus. Remettre le capot du caisson, et serrer les gros boutons moletés.
- Sur la face arrière du boîtier électronique, brancher suivant les indications :
 - Le cordon secteur
 - La prise d'alimentation de la résistance chauffante à la prise de courant différentiel ainsi que la sonde de la résistance utilisée à l'embase correspondante.
 - La sonde de température de surface.
- Enclencher le bouton du bloc disjoncteur différentiel.
- Basculer le commutateur sur la position ON.

Le banc est prêt pour utilisation.

Arrêt de l'installation :

- Basculer le commutateur sur la position OFF.
- Désarmer le bouton du bloc disjoncteur différentiel.
- Débrancher le câble d'alimentation électrique du banc.
- Laisser refroidir les plaques chauffantes ainsi que les résistances thermiques puis les ranger dans les bacs prévus à cet effet.

4 Mode opératoire

4.1 Obtention d'une température stable de l'élément chauffant

Après avoir vérifié le branchement de la sonde de régulation et de la résistance chauffante, régler la consigne sur la température de plaque désirée. La montée en température peut être suivie visuellement sur le thermomètre digital dédié.

4.2 Mesures sur un cycle de chauffe

Appuyez sur le bouton "RESET/RAZ" pour remettre les compteurs à zéro, la mesure démarrera automatiquement au cycle suivant.

À la fin d'une mesure, l'indicateur "TEMPS DE CHAUFFE" indique le temps pendant lequel la résistance a chauffé, et l'indicateur "TEMPS DE CYCLE" indique la durée entre deux cycles de chauffe. Si l'une ou l'autre des indications dépasse 99.9, il faut alors modifier la base de temps (bouton 6 positions, sur la face avant du boîtier électronique) : la position 1 correspond à la plus petite base de temps, et la position 6 à la plus longue.

Après avoir noté les différents affichages obtenus, relancer une autre expérience en appuyant sur le bouton " RESET /RAZ".

Faire plusieurs mesures pour vérifier que le régime permanent est atteint (5 à 10 cycles environ). Mesurer le courant électrique traversant l'élément chauffant et sa tension d'alimentation. La puissance maximum, susceptible d'être dissipée par l'élément chauffant, est alors :

$$P_{max} = U \times I \quad (21)$$

Connaissant la fraction de puissance dissipée α , on déduit la puissance P nécessaire, pour maintenir la plaque chauffante à la température de consigne.

$$\alpha = \frac{\text{temps de chauffe (s)}}{\text{temps de cycle (s)}} \quad (22)$$

et finalement la puissance s'écrit

$$P = \alpha P_{max} \quad (23)$$

Note : si la mise à 0 de l'appareil ne se fait pas correctement, pensez à retrancher la valeur initiale aux valeurs lues.

4.3 Incertitudes et propagation

Une donnée d'entrée incertaine donnera forcément un résultat incertain. Cette section montre par l'exemple comment quantifier l'incertitude liée à vos observations/mesures dans vos résultats. Prenons par exemple l'Eq. (2) qui permet d'exprimer la conductivité en fonction de la

puissance

$$\lambda = \frac{Pe}{S(T_1 - T_2)} \quad (24)$$

Ici, λ est une fonction de 5 variables P , e , S , T_1 et T_2 qui peuvent chacune être exprimée avec une incertitude. Pour une variable quelconque, on écrit $\phi = \bar{\phi} \pm \delta\phi$ où $\delta\phi$ représente l'incertitude associée à la variable ϕ et $\bar{\phi}$ sa valeur moyenne.

Pour une variable "brute" (directement lue), l'incertitude contient la somme des erreurs

- liées à l'appareil de mesure ou aux données constructeur. Elles sont généralement fournies par le fabricant ou le fournisseur.

Par exemple, pour l'épaisseur $\phi \equiv e$, le fournisseur nous dit que pour les deux plaques de 2 mm, $\bar{\phi} = \bar{e} = 2$ mm et $\delta\phi = \delta e = 0,01$ mm.

- de répétabilité (variation des mesures affichées). Elles sont estimées par l'utilisateur.

Par exemple, dans ce TP, les valeurs lues, entre deux cycles, seront différentes.

- erreurs de lecture liées à la précision des affichages ou des graduations. Elles aussi sont estimées par l'expérimentateur.

Les valeurs de températures affichées sont tronquées et ne sont pas constantes ; elles varient autour d'une valeur moyenne.

- erreurs systématiques, associés généralement à un biais de l'appareil. Il est impératif d'étalonner les appareils ou de faire des "Offset" afin de supprimer cette dernière.

Connaissant la relation entre λ et P (et avec les autres paramètres), on peut répercuter les incertitudes connues ou mesurées sur P dans l'évaluation de λ . Pour l'exemple, on supposera que λ varie uniquement en fonction de la puissance P et de la température T : $\lambda = \lambda(P, T_1, T_2)$. λ est une fonction de $N = 3$ variables $x_1 \equiv P$, $x_2 \equiv T_1$ et $x_3 \equiv T_2$. À partir de la différentielleⁱ on exprime l'incertitude $\delta\lambda$ par

$$\begin{aligned} \delta\lambda &= \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial\lambda}{\partial x_i} \right| \delta x_i \\ &= \left| \frac{\partial\lambda}{\partial P} \right| \delta P + \left| \frac{\partial\lambda}{\partial T_1} \right| \delta T_1 + \left| \frac{\partial\lambda}{\partial T_2} \right| \delta T_2 \\ &= \left| \frac{e}{S(T_1 - T_2)} \right| \delta P + \left| -\frac{Pe}{S(T_1 - T_2)^2} \right| \delta T_1 + \left| \frac{Pe}{S(T_1 - T_2)^2} \right| \delta T_2 \\ &= \left| \frac{e}{S(T_1 - T_2)} \right| \delta P + 2 \left| \frac{Pe}{S(T_1 - T_2)^2} \right| \delta T \quad (\text{si } \delta T_1 = \delta T_2 = \delta T) \end{aligned} \quad (25)$$

Les termes en valeurs absolues précédant δP et δT sont évalués avec les valeurs moyennes \bar{P} , \bar{T}_1 et \bar{T}_2 . La valeur calculée de la conductivité est alors

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \delta\lambda \quad (26)$$

i. La différentielle de la fonction f à N arguments x_i , $i = 1, \dots, N$ s'écrit $df(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i$

où $\bar{\lambda}$ est calculé par l'Eq. (24) dans laquelle on utilise les valeurs moyennes tandis que $\delta\lambda$ est donné par l'Eq. (25). Le rapport $\delta\lambda/\bar{\lambda}$ exprime le pourcentage de variation de la conductivité λ obtenue. On voit directement que si les données d'entrée sont certaines ($\delta P = \delta T_1 = \delta T_2 = 0$), l'incertitude sur λ est nulle.

Dans le cas où la fonction dépend de plus (ou moins) de variables, il faut ajouter (ou retirer) ces dernières de l'expression de la différentielle. Par exemple, si on veut ajouter l'incertitude liée à l'épaisseur de l'isolant dans le calcul de λ , il faut ajouter $\frac{\partial\lambda}{\partial e}de$ dans l'Eq. (25).

Il faut, avant de faire le développement complet, estimer quels paramètres vont être prépondérants. Par exemple, si l'incertitude relative sur e est $\delta e/e = 0,001\%$, il n'est peut-être pas nécessaire d'en tenir compte dans le calcul de $\delta\lambda$ car son poids sera faible par rapport aux autres termes. C'est à l'expérimentateur d'estimer et de choisir, après une réflexion sur la physique du phénomène observé, quelles sont les incertitudes dominantes à propager.

Les incertitudes se représentent généralement graphiquement sous forme de barre d'erreur. Elles peuvent être horizontales ou verticale. Par exemple, si on trace λ et fonction de T_1 les barres horizontales donneront l'incertitude sur T_1 tandis que les barres verticales donneront celle sur λ . **Elles sont indispensables pour analyser la tendance du phénomène observé.**

La Fig. 7 montre qu'une tendance d'une courbe ne peut être interprétée que si les incertitudes sont également présentées.

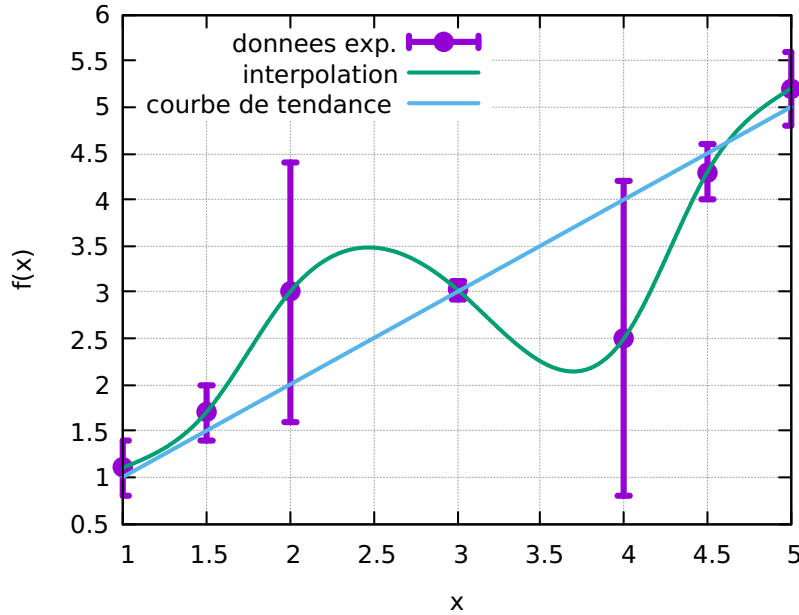


FIGURE 7 – Les données expérimentales sont présentées avec des barres d'erreurs symétriques autour de la valeur moyenne (rond plein). La courbe d'interpolation passant par tous les points n'est pas représentative; elle présente des optimums non fiables, car associés à de grandes incertitudes de mesures. En revanche, la courbe de tendance, ici linéaire, donne le "bon" comportement. Elle ne peut être tracée qu'avec la prise en compte des incertitudes qui permettent de donner moins de poids aux valeurs les moins précises lors du calcul de la courbe de tendance.

5 Manipulation

5.1 Étude de la conductivité thermique des matériaux du lot

Le but de cette manip est de déterminer expérimentalement les conductivités thermiques des matériaux du lot de plaques et de les comparer à celles données par le fabricant. La méthode consiste à déterminer la différence de température entre la plaque chauffante (dont la température a été réglée) et la surface de la résistance thermique dont on souhaite déterminer sa conductivité thermique (préalablement déposé sur la plaque chauffante).

Pour la plaque de liège de 2 mm d'épaisseur :

- Le banc étant à l'arrêt, monter la plaque chauffante (à deux faces noires) et la résistance thermique dont on souhaite déterminer sa conductivité dans le caisson comme indiqué au § 1 ; le caisson est orienté horizontalement et le ventilateur maintenu à l'arrêt pour une convection naturelle.
- Mettre le banc en marche comme indiqué en section 3 (ne pas brancher le ventilateur).
- À l'aide des flèches situées sur le clavier de l'afficheur numérique (N°3), fixez une consigne de température (T_s) de la plaque.
- Pour chaque valeur de la température T_s , laissez le système se stabiliser. (Les valeurs observées entre deux cycles successifs ne doivent pas changer de manière significative).
- Remplissez le tableau 3 pour les différentes valeurs (T_s) et pour chacune des plaques

La température externe (T_a) est mesurée à l'aide de la sonde portable sur la surface de la résistance isolante (ou de la résistance chauffante en cas de non-utilisation d'une résistance isolante). Le point de mesure de la température externe doit être le même pour toute l'expérience. De plus, on relèvera la température indiquée par cette sonde toujours à un même instant du cycle de chauffe.

- Référez-vous à la section 4.2. pour déterminer la puissance P nécessaire pour maintenir la plaque chauffante à la température de consigne et au § 1.2.2 pour déduire la conductivité thermique de la plaque considérée

$$\lambda = \frac{eP}{S(T_s - T_a)} \quad (27)$$

- Évaluer l'incertitude liée à λ en fonction de celles de P et T comme expliqué au § 4.3.
- La conductivité thermique varie-t-elle avec la température ? La résistance thermique équivalente varie-t-elle avec la température ?
- Pour les plaques de liège de 2 mm et le polystyrène extrudé de 2 mm, comparer la conductivité expérimentale à celle annoncée par le fabricant à 30 °C respectivement de 0,043 W/m/K et de 0,028 W/m/K.

Les données pourront être synthétisées dans le tableau 3 ainsi que dans des figures.

Température superficielle T_s	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Température T_s mesurée				
Température externe T_a				
Fraction de puissance dissipée α				
$\Delta T = T_s - T_a$				
Tension alimentation U				
Intensité de courant I				
Puissance maximale P_{max}				
Puissance dissipée P				
Résistance thermique R_{th}				
Conductivité thermique λ				
Incertitude $\delta\lambda$				

TABLEAU 3 – Table de résultats de calcul de la conductivité thermique

5.2 Étude de l'influence de l'inclinaison de la résistance chauffante sur la conductance de convection naturelle

Le but de cette manip est d'étudier expérimentalement l'impact de l'inclinaison (horizontale $\alpha = 0^\circ$, environ $\alpha = 45^\circ$ et verticale $\alpha = 90^\circ$) sur la conductance globale de convection puis de comparer les valeurs trouvées à la théorie.

- Le banc étant à l'arrêt, monter la plaque chauffante dans le caisson comme indiqué au § 3 sans résistance thermique dessus. La face noire (surface noire) doit être visible. Si vous choisissez la plaque avec une face brillante, cette dernière doit être en contact avec l'isolant. Fixer l'angle d'inclinaison désiré (horizontale $\alpha = 0^\circ$, environ 45° et verticale c.-à-d. $\alpha = 90^\circ$).
- Mettre le banc en marche comme indiqué au § 3. En convection naturelle, le ventilateur est à l'arrêt.
- À l'aide des flèches situées sur le clavier de l'afficheur numérique (N°3), fixez une consigne de température (T_s) de la résistance chauffante.
- Pour une inclinaison donnée et pour chaque valeur de la température T_s , laissez le système se stabiliser. (Les valeurs observées entre deux cycles successifs ne doivent pas changer de manière significative).
- Remplissez le tableau 4 pour les différentes valeurs (T_s). La température externe de l'air (T_a) est mesurée à l'aide de la sonde portable, loin de la surface chauffée.
- Reférez-vous à la section 4.2 pour déterminer la puissance P nécessaire pour maintenir la plaque chauffante à la température de consigne et au § 1.2 pour déduire la conductance expérimentale

$$h = \frac{P}{S(T_s - T_a)} \quad (28)$$

- Évaluer l'incertitude liée à h en vous inspirant de la méthode décrite au § 4.3. On supposera

que les incertitudes à propager viennent de P et T .

- En vous aidant de la théorie présentée au 1.2.2 au sujet de la convection naturelle, et des propriétés physiques de l'air données du tableau 1, calculer pour une inclinaison donnée et pour chaque température de consigne, la conductance théorique de convection h_c (L est la largeur de la résistance chauffante).
- Aidez-vous de la théorie présentée au § 1.3 pour déduire la conductance théorique de rayonnement ; le facteur de forme F_{12} de la résistance chauffante sera pris égal à 1.
- En déduire les conductances globales théoriques et comparez-les aux valeurs obtenues expérimentalement. Commentez.
- Comment varie la conductance expérimentale en fonction de la température et de l'angle d'inclinaison de la résistance chauffante ?

Température superficielle T_s	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Température T_s mesurée				
Température externe T_a				
Fraction de puissance dissipée α				
$\Delta T = T_s - T_a$				
Tension alimentation U				
Intensité de courant I				
Puissance maximale P_{max}				
Puissance dissipée P				
Conductance globale expérimentale h				
Incertitude δh				
Température moyenne $T_m = (T_a + T_s)/2$				
Conductivité thermique de l'air à T_m				
Gr à T_m				
Pr à T_m				
Conductance de convection $h_c = \frac{\lambda}{L} C (Gr Pr)^{1/4} k$				
Conductance de rayonnement $h_r = 4T_m^3 F_{12} \sigma$				
Conductance globale théorique $h_c + h_r$				

TABEAU 4 – Table des résultats de calcul de la conductance globale expérimentale et théorique en fonction de l'inclinaison (convection naturelle)

5.3 Étude de l'influence de l'inclinaison de la résistance chauffante sur la conductance de convection forcée

Reprendre l'expérience 2 cette fois-ci avec le ventilateur allumé en conservant les trois angles d'inclinaison précédents (horizontale $\alpha = 0^\circ$, environ $\alpha = 45^\circ$ et verticale $\alpha = 90^\circ$).

Compléter le tableau 5 en calculant les nouvelles valeurs de conductance de convection forcée expérimentale. Comment évoluent-elles ? (la comparaison théorique n'est pas demandée ici)

Température superficielle T_s	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Température T_s mesurée				
Température externe T_a				
Fraction de puissance dissipée α				
$\Delta T = T_s - T_a$				
Tension alimentation U				
Intensité de courant I				
Puissance maximale P_{max}				
Puissance dissipée P				
Conductance globale expérimentale h				
Incertitude δh				

TABLEAU 5 – Table des résultats de calcul de la conductance globale expérimentale et théorique en fonction de l’inclinaison (convection forcée)

5.4 Étude de l’influence d’une cheminée sur la convection naturelle

Le but de cette manip est d’observer l’influence d’une cheminée sur la convection naturelle. Les conductances de convection expérimentale seront par la suite comparées aux valeurs théoriques.

- Le banc étant à l’arrêt, introduire la résistance chauffante à 2 faces noires dans la cheminée orientée verticalement de sorte que l’air puisse **pénétrer par l’entrée inférieure**. Dans cette configuration, le diamètre d’enroulement de la résistance chauffante est de 95 mm et sa hauteur 290 mm.
- Mettre le banc en marche comme indiqué au § 3 (ne pas brancher le ventilateur).
- À l’aide des flèches situées sur le clavier de l’afficheur numérique (N°3), fixez la consigne de température (T_s) de la résistance chauffante.
- Laissez le système se stabiliser. (Les valeurs observées entre deux cycles successifs ne doivent pas changer de manière significative).
- Remplissez le tableau 6.
- Referez-vous au § 4.2. pour déterminer la puissance P nécessaire pour maintenir la plaque chauffante à la température de consigne et au § 1.2.2 pour déduire la conductance expérimentale

$$h = \frac{P}{S(T_s - T_a)} \quad (29)$$

où T_a est la température de l’air ambiant.

- Evaluer l’incertitude liée à h en vous inspirant de la méthode décrite au § 4.3. On supposera que les incertitudes à propager viennent de P et T .
- En vous aidant de la théorie présentée en section 1.2.2 au sujet de la convection naturelle, et des propriétés physiques de l’air données du tableau 1, calculer, pour une inclinaison donnée et pour chaque température de consigne, la conductance théorique de convection h_c (L est la hauteur et D le diamètre d’enroulement de la résistance chauffante).

- Aidez-vous de la théorie présentée en section 1.3 pour déduire la conductance théorique de rayonnement ; le facteur de forme F_{12} de la résistance chauffante sera pris égal à 0,32.
- En déduire les conductances globales théoriques. Comparez-les aux valeurs obtenues expérimentalement et commentez.
- Quel est, selon vos observations, le mode de transfert thermique prépondérant dans cette configuration ?

Température superficielle T_s	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Température T_s mesurée				
Température externe T_a				
Fraction de puissance dissipée α				
$\Delta T = T_s - T_a$				
Tension alimentation U				
Intensité de courant I				
Puissance maximale P_{max}				
Puissance dissipée P				
Conductance globale expérimentale h				
Incertitude δh				
Température moyenne $T_m = (T_a + T_s)/2$				
Conductivité thermique de l'air à T_m				
Gr à T_m				
Pr à T_m				
Conductance de convection $h_c = \frac{\lambda}{L} C (Gr Pr)^{1/4} k$				
Conductance de rayonnement $h_r = 4T_m^3 F_{12} \sigma$				
Conductance globale théorique $h_c + h_r$				

TABLEAU 6 – Table des résultats de l'effet cheminée

5.5 Détermination de l'émissivité d'une surface

Cette expérience permet la mesure de l'émissivité d'une surface d'aluminium (surface brillante), c'est-à-dire le rapport des puissances dissipées par rayonnement pour cette surface plane (P_{ray}) et une surface plane noire ($P_{ray,cn}$) par la relation

$$\varepsilon = \frac{P_{ray}}{P_{ray,cn}} \quad (30)$$

Le flux imposé est dissipé à la fois par convection et rayonnement. Il est donc nécessaire de supprimer la contribution de convection qui ne dépend pas de la nature de la surface.

$$\varepsilon = \frac{P - P_{conv}}{P_{cn} - P_{conv}} \quad (31)$$

Le flux de convection est calculé par la relation

$$P_{conv} = \frac{h_t - h_r}{h_r} P_{cn} \quad (32)$$

où P_{cn} désigne le flux total évacué par la surface noire, h_r le coefficient théorique de rayonnement pour la surface noire et h_t le coefficient global d'échange expérimental radiatif et convectif pour la surface noire. N'oubliez pas d'évaluer l'incertitude liée à ε en vous inspirant de la méthode décrite au § 4.3. Les valeurs trouvées sont à comparer aux valeurs connues (tableau 8) pour

Température de surface T_s	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Puissance du corps noir P_{cn}				
Puissance P				
Puissance de convection P_{conv}				
Puissance rayonnée P_{ray}				
Puissance rayonnée du corps noir $P_{ray,cn}$				
Émissivité ε				
Incertitude $\delta\varepsilon$				

TABLEAU 7 – Table de résultats de l'émissivité d'une surface

l'aluminium à 38 °C.

type	ε
aluminium poli	0,04
aluminium oxydé	0,01
Toiture neuve	0,22
Toiture usée	0,40
aluminium anodisé	0,94

TABLEAU 8 – Valeurs de référence de l'émissivité