

# RAYONNEMENT ET CONVECTION NATURELLE

## But du T.P. - Objectifs

On se propose de mettre en évidence le transfert de puissance par rayonnement thermique et par convection naturelle. On déterminera l'exposant de la loi de Stefan, la valeur de la constante de Stefan ou l'émissivité d'un corps gris ainsi que la valeur du coefficient d'échange de surface par convection.

Le petit dessin ( $\Rightarrow$  ) signifie « Allez consultez le document annexe ».

## 1 - Modes de transfert de chaleur

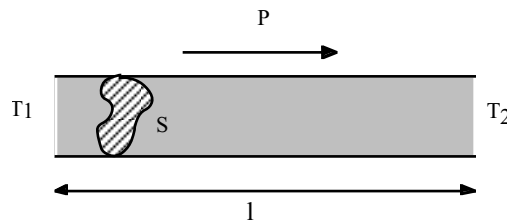
Les échanges thermiques sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils peuvent se faire selon 3 modes : la conduction, la convection et le rayonnement. Seules les notions fondamentales nécessaires à ce TP seront présentées. Pour plus de détails, consulter le document "Modes de transmission de la chaleur".

### **1.1 - Transfert de chaleur par conduction**

La conduction est un transfert de chaleur dans un milieu matériel (solide ou fluide) sans mouvement de matière. C'est le seul mode de transfert de chaleur à l'intérieur d'un solide.

Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier  $\vec{\varphi} = -k \text{grad} T$  qui relie la densité de puissance (unité  $\text{Wm}^{-2}$ ) et le gradient local de température.  $k$  est la conductivité thermique du matériau considéré (unité  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

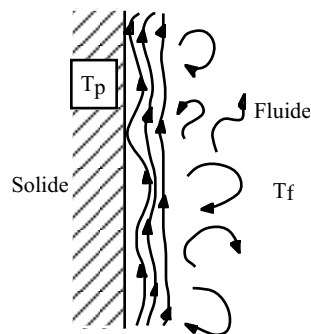
En faisant le bilan thermique sur un volume  $dV$  d'un solide, on obtient l'équation de la chaleur  $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \text{grad} T) + q_v$ . Dans le cas simple où le milieu est homogène ( $\text{grad} k = 0$ ), isotrope ( $k_x = k_y = k_z = k$ ) et sans source volumique de chaleur ( $q_v = 0$ ), on est ramené à l'équation de Laplace  $\Delta T = 0$ .



Si l'on peut considérer le problème comme unidimensionnel ("écoulement" de la chaleur dans une seule direction), on alors en coordonnées cartésiennes  $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$  ce qui conduit à une répartition linéaire de la température en fonction de la distance  $T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{l} x$ . On obtient ainsi une relation simple  $P = k \frac{S}{l} (T_1 - T_2)$  qui relie la puissance transférée par conduction à la différence de température entre les extrémités du solide.

## 1.2 - Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide.



Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide, la puissance transférée par convection est donnée par la relation  $P = h S (T_p - T_f)$  où  $T_p$  est la température de la paroi du solide,  $T_f$  la température du fluide loin de la paroi et  $h$  le coefficient d'échange de surface.

On distingue la convection libre (ou naturelle) dans laquelle les mouvements du fluide sont dus aux variations de masse volumique et la convection forcée dans laquelle les mouvements du fluide sont imposés par un moyen extérieur (pompe ou ventilateur). La détermination de  $h$  fait intervenir des relations de corrélations entre des nombres sans dimension, déterminés à partir des propriétés thermophysiques du fluide, qui sont hors de propos dans ce résumé.

## 1.3 - Transfert de chaleur par rayonnement

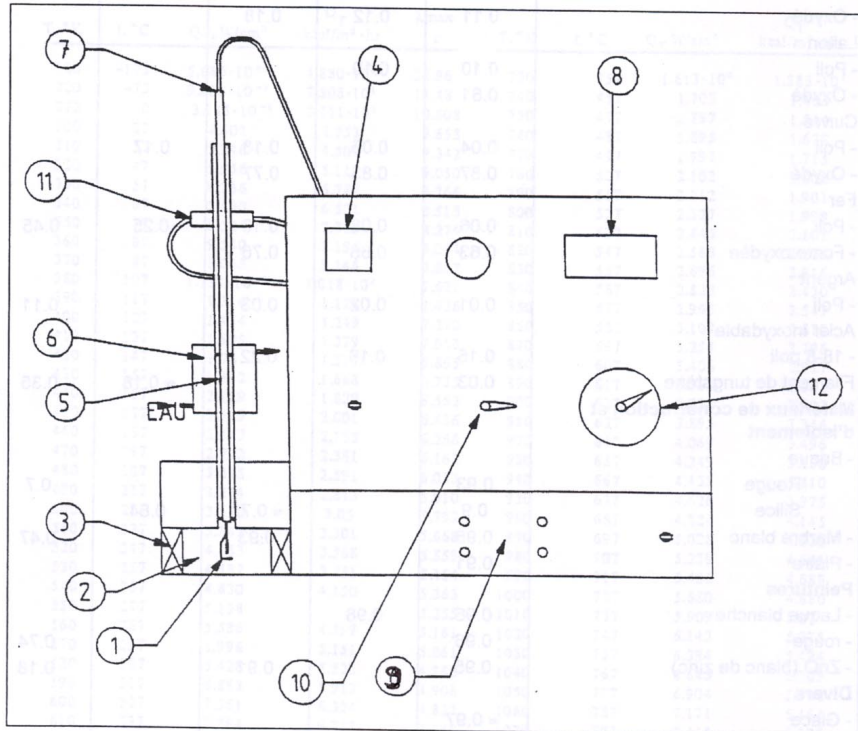
Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou un milieu transparent, par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Nous ne considérerons que les corps solides opaques au rayonnement.

Pour l'étude du rayonnement, on définit un corps de référence appelé le corps noir (équivalent au gaz parfait en thermodynamique classique) dont on peut déterminer les propriétés. La seule qui nous intéressera par la suite est l'émittance  $M$  définie comme la puissance émise par unité de surface sur toute la gamme de longueur d'ondes (entre 0 et  $\infty$ ) dans tout le demi-espace supérieur. On démontre que  $M = \sigma T^4$  où  $T$  est la température absolue (en Kelvin) du corps considéré et  $\sigma$  la constante de Stefan.

Les propriétés des corps réels sont définies par rapport à celles du corps noir. On ne considérera par la suite que l'approximation du corps gris diffusant. Dans ce cas, les propriétés du corps réel sont déduites de celles du corps noir par simple multiplication par l'émissivité  $\epsilon$ . L'émissivité est un nombre strictement inférieur à 1.

La puissance échangée entre deux corps (respectivement de surface  $S_1$ , température  $T_1$  et de surface  $S_2$ , température  $T_2$ ) se met sous la forme  $P = S_1 F_{1,2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$  où  $F_{1,2}$  est un nombre sans dimension appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des 2 corps. Dans le cas qui nous intéressera par la suite (corps placé à l'intérieur d'une enceinte dont les dimensions sont grandes par rapport à celles du corps) cette relation devient simplement  $P = \epsilon_1 S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$ ,  $\epsilon_1$  et  $S_1$  étant l'émissivité et la surface du corps placé à l'intérieur de l'enceinte.

## **2 - Dispositif expérimental**



Une pastille métallique (1), placée à l'extrémité d'une tige (7), peut être placée

- soit dans la partie haute température d'une enceinte (2), maintenue à température élevée et constante grâce à un collier chauffant (3) et une régulation (4)
- soit dans la partie basse température de l'enceinte (5), maintenue à température ambiante grâce à un échangeur à eau (6)

La température de la pastille est mesurée à l'aide d'un thermocouple. On peut afficher directement cette température en °C sur le thermomètre digital (8). On peut également enregistrer la tension délivrée par ce thermocouple ainsi que la dérivée par rapport au temps de cette tension en (9).

En plaçant au départ la pastille au niveau de l'échangeur à eau, la température de cette dernière se stabilise rapidement à une valeur proche de la température ambiante. Si l'on déplace la pastille dans l'enceinte chauffée, sa température s'élève par échange par rayonnement (et convection selon le cas).

Les mesures peuvent être faites sous vide grâce à une pompe à vide connectée en (11). La pression est lue sur le manomètre (12). On peut ainsi faire les mesures avec ou sans convection naturelle suivant que l'on soit sous atmosphère ou sous vide.


## **3 - Mesures et exploitations des résultats**

### **3.1 - Mesures**

Les mesures à effectuer sont les mêmes quelle que soit la pastille utilisée.

Commencer par ouvrir l'eau de refroidissement pour stabiliser la température de l'échangeur froid.

Régler la consigne de la régulation du four à une température comprise entre 200 et 250 °C (en aucun cas le collier chauffant ne doit dépasser une température de 350 °C) et s'assurer que la puissance de sortie est bien activée.

Placer la pastille en position haute au niveau de l'échangeur froid. Faire ou non le vide dans l'enceinte suivant le type de mesures désirées. Après la mise en route, il est nécessaire d'attendre une vingtaine de minutes pour que la température de l'ensemble se stabilise. Profitez de ce laps de temps pour effectuer les réglages de l'enregistreur ( $\Rightarrow$  ).


Une fois tous les réglages effectués et la température d'équilibre atteinte, descendre la pastille dans l'enceinte chauffée et procéder à l'enregistrement de T et de dT/dt jusqu'à l'équilibre à haute température. Refaire la mesure en sens inverse en remontant la pastille au niveau de l'échangeur froid.

### 3.2 - Corps noir


On considérera que la pastille se comporte comme un corps presque noir en prenant une émissivité de 0,95.

a) Tracer les courbes d'échauffement et de refroidissement du corps noir sous vide.

b) Etalonner le dérivateur c'est-à-dire trouver le facteur permettant de passer de la valeur mesurée en mV à la vitesse de variation de la température en  $Ks^{-1}$ .

c) On négligera les pertes par conduction dans cette partie. Etablir la relation donnant la variation de la température de la pastille au cours du temps. En considérant que l'enceinte chauffée se comporte comme un corps noir ( $\Rightarrow$  ) , trouver le bon diagramme pour déterminer l'exposant de la loi de Stefan ainsi que la valeur de la constante de Stefan. Conclusions.

d) Tracer les courbes d'échauffement et de refroidissement du corps noir sous atmosphère

On négligera également les pertes par conduction dans cette partie. Etablir la relation donnant la variation de la température de la pastille au cours du temps. En considérant que l'enceinte chauffée se comporte comme un corps noir ( $\Rightarrow$  ) et que l'air dans l'enceinte est à la même température que l'enceinte, trouver le bon diagramme pour déterminer le coefficient d'échange par convection  $h$ . Conclusions.


e) Comparer les puissances échangées par convection et par rayonnement. Conclusions

f) On a négligé jusqu'à présent les pertes par conduction. Comment se manifestent-elles et à quoi sont-elles dues ? Déduire de vos mesures la valeur de la conductivité thermique de la gaine du thermocouple sachant qu'elle a une longueur de  $xx$  cm et une section de  $xx$   $cm^2$ .


### 3.3 - Corps gris

a) Tracer les courbes d'échauffement et de refroidissement du corps gris sous vide

b) Etalonner le dérivateur c'est-à-dire trouver le facteur permettant de passer de la valeur mesurée en mV à la vitesse de variation de la température en  $Ks^{-1}$ .

c) On négligera les pertes par conduction dans cette partie. Etablir la relation donnant la variation de la température de la pastille au cours du temps. En considérant que l'enceinte chauffée se comporte comme un corps noir ( $\Rightarrow$  ) , trouver le bon diagramme pour déterminer l'exposant de la loi de Stefan ainsi que la valeur de l'émissivité connaissant la constante de Stefan  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Conclusions.

d) Tracer les courbes d'échauffement et de refroidissement du corps gris sous atmosphère

On négligera également les pertes par conduction dans cette partie. Etablir la relation donnant la variation de la température de la pastille au cours du temps. En considérant que l'enceinte chauffée se comporte comme un corps noir ( $\Rightarrow$  ) et que l'air dans l'enceinte est à la même température que l'enceinte, trouver le bon diagramme pour déterminer le coefficient d'échange par convection  $h$ . Conclusions.

e) Comparer les puissances échangées par convection et par rayonnement. Conclusions

f) On a négligé jusqu'à présent les pertes par conduction. Comment se manifestent-elles et à quoi sont-elles dues ? Déduire des vos mesures la valeur de la conductivité thermique de la gaine du thermocouple sachant qu'elle a une longueur de  $xx$  cm et une section de  $xx$   $cm^2$ .