



M1 E2-CMD

Travaux Pratiques
de
TRANSFERTS THERMIQUES

RECOMMANDATIONS

De la préparation sérieuse d'un T.P. dépend sa bonne compréhension, donc sa réussite. Les bases théoriques qui précèdent les parties expérimentales ne dispensent pas de revoir les cours correspondants.

Résultats

- Donner un minimum d'explication sur les calculs (pas seulement les résultats numériques).
- Un résultat numérique sans unité n'a aucune signification.
- Préciser les unités, de préférence dans le système international, ou, au moins, en unités cohérentes entre elles pour une même manipulation.
- Respecter les notations du cahier.
- Comparer veut dire expliquer pourquoi deux résultats sont égaux ou différents.
- Avant de comparer des valeurs, il est indispensable d'évaluer l'incertitude de mesures.
- Les résultats sont à commenter en fonction des éléments théoriques vus en cours.

Courbes

- Donner un titre.
- Graduer les axes avec des intervalles réguliers.
- Toujours marquer les points expérimentaux et tracez les courbes par dessus.
- Pas de courbe en "dents de scie". Utiliser les courbes "lissées".

DEFINITIONS ET RAPPELS DE THERMODYNAMIQUE

- **Système** : Corps ou ensemble de corps dont on envisage l'étude et pouvant subir des transformations.
- **Milieu extérieur** : Tout corps ne faisant pas partie du système étudié.

QUELQUES VALEURS DE CONSTANTES

- Capacité thermique massique de l'eau = $4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (1 cal = 4,18 J)
- Constante de Stephan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

MESURE DE TEMPERATURE

Dans notre environnement, la plage de variation des températures est très étendue et il n'existe pas de méthode unique permettant de couvrir toute la gamme. Il faut donc faire appel à différentes méthodes, chacune d'elles étant adaptée à un domaine particulier. En thermique quel que soient les phénomènes étudiés, la mesure de température est toujours indispensable. Au cours des différentes manipulations vous rencontrez toutes les méthodes de mesure.

La mesure de la température est directement liée aux phénomènes physiques qui en dépendent :

- dilatation (thermomètre à alcool, mercure, ...),
- variation de force électromotrice (thermocouple, ...),
- variation de résistance, etc.

Thermocouple :

Ce dispositif, très simple d'utilisation, permet de mesurer de manière très locale des températures pouvant aller de -272°C (1K) à plus de 1000°C , avec une précision pouvant atteindre 0.01°C .

Pyromètre optique monochromatique à disparition de filament :

Ce dispositif permet de déterminer la température d'un corps émettant un rayonnement dans le spectre visible. Il est utilisé pour des mesures de températures comprises entre 500 et 5000°C .

LE THERMOCOUPLE

L'un des dispositifs de mesure de température le plus utilisé est le thermocouple qui est l'application la plus courante de l'effet Seebeck. Un thermocouple est composé de deux matériaux A et B de natures chimiques différentes (métaux ou semi-conducteurs) qui sont liés entre eux par deux soudures S1 et S2 (cf. fig. 1). S'il existe une différence de température entre S1 et S2, il apparaît une différence de potentiel entre M et N (c'est-à-dire aux bornes des deux fils de même nature).

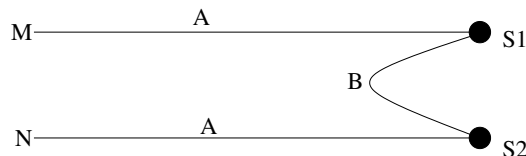


FIGURE 1 – Principe physique d'un thermocouple

La relation liant l'écart de température à la f.e.m. n'est pas linéaire sur une grande plage de températures. Sur un domaine restreint, on peut cependant écrire $dV = \alpha dT$ où α est le pouvoir thermoélectrique pouvant être considéré comme constant sur un petit domaine et dépend du domaine et du type de thermocouple utilisé.

Les matériaux les plus courants sont :

- fer / cuivre-nickel : thermocouple de type J,
- cuivre / cuivre-nickel : thermocouple de type T,
- nickel-chrome / nickel-aluminium : thermocouple de type K.

En général l'une des soudures est maintenue à température constante, elle est appelée jonction de référence, l'autre est plongée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La tension mesurée ΔV aux bornes est directement liée à $\Delta T = T_{mesure} - T_{référence}$ (cf. fig. 2).

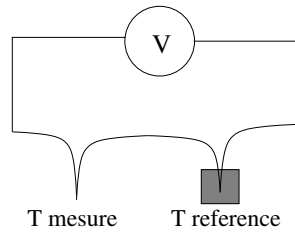


FIGURE 2 – Utilisation d'un thermocouple

Des tableaux de conversion sont en général donnés par les constructeurs, ils indiquent les valeurs (en mV) des tensions qui apparaissent pour des différences de température entre les deux jonctions. La jonction de référence étant le plus souvent maintenue à 0°C . En bas de chaque colonne, la valeur moyenne sur 10°C du pouvoir thermoélectrique α est donnée en $\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$. Cette valeur permet, par interpolation, de connaître, à 0.1°C près, les températures pour la colonne correspondante.

Si la jonction de référence n'est pas à 0°C , il faut ajouter à la tension mesurée V_{lue} la tension de correction de soudure froide V_{cor} correspondant à la température T_a de la jonction de référence, pour obtenir la tension $V_{corrigée}$ correspondant à la température cherchée.

T.P. I

MAQUETTE D'HABITATION

Le but de ce T.P. est de construire un modèle thermique d'une maquette d'habitation afin d'évaluer au régime stationnaire les flux de chaleur à travers des parois de natures diverses. Les éléments théoriques de base en transferts thermiques nécessaires à l'interprétation des observations sont rappelés dans la partie Rappels du TP ci-après.

1 RAPPELS SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR

La quantité d'énergie traversant, par unité de temps, une surface Σ définie par le *flux d'énergie sous forme calorifique* ou le *flux de chaleur* à travers Σ à l'instant t . La grandeur échangée étant de l'énergie, on parlera de la même manière de *puissance calorifique*. Ce flux est une fonction du temps notée $\Phi_{\Sigma}(t)$. Dans un milieu continu, on écrit le flux comme une intégrale de surface d'une grandeur locale, la densité surfacique de flux $\varphi(M, t)$, définie en un point M de la surface à l'instant t , soit :

$$\Phi_{\Sigma}(t) = \int_{\Sigma} \varphi(M, t) dS \quad (1)$$

La densité de flux est une grandeur qui reste attachée à une description du flux à travers une surface infinitésimale centrée en un point d'une surface et en ce-là, c'est une grandeur qui dépend de l'orientation de la surface considérée. Il est donc pratique de définir une grandeur locale permettant de quantifier le flux d'énergie quelque soit la surface considérée. Cette grandeur c'est le *vecteur densité surfacique de flux* notée $\vec{j}(M, t)$. La densité de flux est alors définie à partir de \vec{j} telle que, pour une surface infinitésimale dS centrée autour du point M et orientée suivant sa normale \vec{n} , elle s'écrit :

$$\varphi(M, t) = \vec{j}(M, t) \cdot \vec{n} \quad (2)$$

Les lois du transfert thermique donnent l'expression de la densité de flux (ou du vecteur densité surfacique de flux) en fonction de la température pour chaque mécanisme de la propagation de la chaleur. Ceux-ci sont au nombre de deux : **la conduction thermique (diffusion de la chaleur)** et **le rayonnement**. Cependant, on parle couramment d'une troisième voie de transfert de la chaleur, **la convection** même si en réalité, celle-ci correspond localement à un échange de chaleur par diffusion couplé au mouvement d'un fluide.

1.1 Conduction de la chaleur

L'hypothèse fondamentale de Fourier consiste à admettre qu'en tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux est proportionnelle à la conductivité λ du milieu et au gradient de T .

$$\vec{j}_c = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (3)$$

La conductivité thermique λ (en $W m^{-1} K^{-1}$) dépend de la nature du corps et peut varier avec la température. La densité de flux de chaleur par conduction en un point d'une surface est donnée par :

$$\varphi_c = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \cdot \vec{n}$$

1.2 Convection et Rayonnement

- **Les échanges par convection** ont lieu entre une paroi et le fluide environnant. Si la paroi est à la température T_p et le fluide à une température T_f , la densité de flux (définie ici positive dans le sens paroi \rightarrow fluide) est de la forme :

$$\varphi_{conv} = h_c (T_p - T_f)$$

T_f : la température du fluide est généralement la température du fluide loin de la paroi c'est à dire hors de la couche limite thermique se développant à la paroi. Cependant, pour des écoulements en espace confinés (tubes, canaux, etc) où l'on a des profils de températures, elle correspond généralement à la température moyenne de l'écoulement dans une section droite.

h_c : coefficient de convection déterminé le plus souvent de façon empirique. Il dépend de la structure géométrique de la paroi, de la nature du fluide, de sa vitesse et de sa température.

- **Les échanges par rayonnement** infrarouge ont lieu entre la paroi et les autres surfaces environnantes. Si toutes les surfaces sont supposées à la température T_s , la densité de flux échangé est de la forme

$$\varphi_R = \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_s^4) = h_r (T_p - T_s)$$

σ : constante de Stefan-Boltzmann

ε : émissivité de la surface

h_r : coefficient d'échange radiatif :

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_p^2 + T_s^2) (T_p + T_s)$$

- **Echange total entre une paroi et l'environnement** On fait l'hypothèse que le fluide et les parois environnantes sont à la même température :

$$T_f = T_s = T_e$$

On note alors les échanges avec le milieu extérieur sous la forme :

$$\varphi_{ext} = h (T_p - T_e)$$

$h = h_r + h_c$ coefficient d'échange surfacique (en $W m^{-2} K^{-1}$)

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Chaque binôme travaille sur une maquette de maison. Les deux maquettes sont identiques, mais orientées différemment. La figure 3 est une photo d'une maquette.



FIGURE 3 – Maquette de maison

Chaque dispositif possède les éléments suivants :

- 1 maquette d'habitation dont les quatre parois latérales sont constituées de matériaux différents (bois, polystyrène, double vitrage) et d'épaisseurs différentes,
- 1 "chauffage central électrique" constitué d'une ampoule à incandescence d'une puissance de 100 W dans une enceinte opaque,
- 1 unité d'alimentation avec thermostat permettant d'imposer la température intérieure de la maison,
- 11 thermocouples et 6 boîtiers de mesure,
- 2 chronomètres.

Afin de relever les températures de chaque paroi, des thermocouples ont été collés sur chacune des faces et isolées thermiquement vis à vis de contributions autres que celle de la paroi. D'autre part, le temps de réponse des thermocouples étant très petit devant les temps d'évolution de la manipulation, l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local est vérifiée y compris pendant le régime transitoire.

Le tableau 1 donne les types et épaisseurs des différentes parois.

Face 1	Face 2	Face 3	Face 4
Double vitrage	Bois (épicéa)	Bois (épicéa) + isolation extérieure (polystyrène extrudé)	Polystyrène extrudé
$e_{\text{verre}} = 0,005 \text{ m}$ $e_{\text{lame d'air}} = 0,008 \text{ m}$	$e_{\text{bois}} = 0,02 \text{ m}$	$e_{\text{bois}} = 0,01 \text{ m}$ $e_{\text{poly}} = 0,02 \text{ m}$	$e_{\text{poly}} = 0,02 \text{ m}$

TABLE 1 – Type et épaisseur des parois

Le tableau 2 donne les valeurs de la conductivité thermique λ , de la diffusivité a pour différents matériaux.

Matériaux	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Fibre de bois	0,04
Polystyrène extrudé	0,035 - 0,041
Bois sapin	0,14
Bois chêne	0,29
Brique pleine	0,74
Verre	1
Béton plein	1,8
Acier	50
Aluminium	230
Cuivre	380

TABLE 2 – Conductivités thermiques de différents matériaux

3 MANIPULATION

Retirer le couvercle de la maquette et vérifier que les thermocouples sont bien collés aux parois. Refermer la maquette sans trop serrer les vis de fixation.

Relever les températures initiales après avoir attendu qu'elles se soient stabilisées.

Régler la régulation entre la 4^{ème} et la 5^{ème} graduation afin que la température intérieure se stabilise à environ $\theta_{int} = 55^\circ\text{C}$. Lancer le chauffage et le chronomètre 1 qui ne devra pas être stoppé avant la fin de la première partie de manip (durée 2h).

1. Les mesures comprennent 2 opérations à réaliser **simultanément** :
 - (a) Durée de chauffage : en utilisant le chronomètre n°2, déterminer, à partir de l'instant initial et sur une période de 3 min (de 5 min après 1h de manip), le temps cumulé où la lampe de chauffage est allumé. Remettre le chronomètre (n°2) à zéro puis répéter la procédure à $t_1 = 10 \text{ min}$, $t_2 = 20 \text{ min}$, $t_3 = 30 \text{ min}$, $t_4 = 40 \text{ min}$, $t_5 = 50 \text{ min}$, $t_6 = 60 \text{ min}$, $t_7 = 80 \text{ min}$, $t_8 = 100 \text{ min}$ et $t_9 = 120 \text{ min}$.
 - (b) Relever les valeurs des températures : toutes les 10 min jusqu'à 80 min et enfin toutes les 20 min jusqu'à 120 min.
2. Au fur et à mesure de l'expérience, tracer sur un même graphe la température de l'air à l'intérieur de la maquette ainsi que les températures intérieure et extérieure de la face en bois en fonction du temps.
3. Même chose pour la puissance moyenne dissipée par la lampe.

4 ANALYSE

Question : quel est au régime stationnaire, le flux de chaleur à travers la paroi constituée du double vitrage ?

Pour répondre à cette question, on vous propose de procéder en 3 étapes :

1. Etablir une description **qualitative** complète de la propagation de l'énergie dans la maquette : faire un ou des schémas, préciser les flux (prendre soin de bien définir les choix des notations) et les mécanismes associés.
2. En vous plaçant **au régime stationnaire**, proposer une méthode basée sur l'exploitation des données accessibles et de votre modèle, pour quantifier les flux traversant chacune des 3 parois autres que le double vitrage en précisant les hypothèses réalisées. Calculer ces flux. Préciser l'incertitude sur la valeur des flux.
3. Dédire des deux étapes précédentes, la réponse à la question posée ainsi que l'incertitude sur votre résultat.

T.P. II

ETUDE DU RAYONNEMENT

L'objectif de ce TP est de s'approprier quelques éléments de bases du transfert radiatif. La première partie propose une approche expérimentale pour retrouver la loi de Stefan-Boltzmann reliant le flux rayonné par un corps à sa température. D'autre part, la mesure de celle-ci est effectuée par une méthode sans contact basée sur les propriétés radiatives du corps noir et de notre capacité à percevoir le rayonnement dans la gamme de longueurs d'onde du visible. La deuxième partie se place alors dans la gamme de l'infrarouge (IR) que notre oeil ne sait pas voir. L'objectif est alors de discuter de la dépendance des propriétés radiatives de surfaces en fonction de la fréquence en comparant ce que notre oeil perçoit dans le visible avec ce que mesure un capteur IR.

1 Rappels sur la théorie du rayonnement

1.1 Grandeurs énergétiques du rayonnement

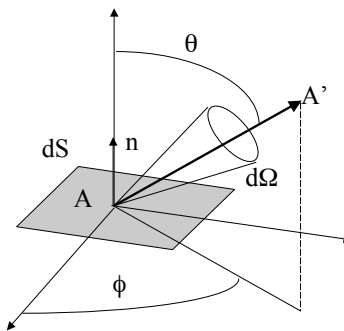
Tout corps émet des ondes électromagnétiques qui transportent de l'énergie du corps qui émet à celui qui reçoit. Ce rayonnement peut être mesuré expérimentalement par un récepteur approprié. Nous ne nous intéresserons ici qu'au rayonnement thermique, c'est à dire pour des longueurs d'ondes comprises entre 0,1 et 100 μm , le visible étant compris entre 0,4 et 0,8 μm .

Si dS est un élément émetteur à température T , le flux émis par dS dans une direction AA' pour des longueurs d'ondes comprises entre $\lambda - \frac{d\lambda}{2}$ et $\lambda + \frac{d\lambda}{2}$, est de la forme :

$$d^4\Phi = L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) d\Omega(\theta, \phi) dS d\lambda$$

$\Omega(\theta, \phi)$ est l'angle solide autour de la direction AA' : $d\Omega(\theta, \phi) = \sin(\theta) d\theta d\phi$ d'où

$$d^4\Phi = L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi dS d\lambda$$



On appelle alors :

- Luminance monochromatique directionnelle du corps, ou luminance spectrale angulaire :

$$L(\lambda, \theta, \phi, T)$$

- Luminance totale :

$$L(\theta, \phi, T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} L(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda$$

- Emittance monochromatique :

$$M(\lambda, T) = \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) \sin(\theta) d\phi d\theta = \int_{\Omega} L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) d\Omega(\theta, \phi)$$

- Emittance totale ou flux émis par unité de surface :

$$M(T) = \int_{\Omega} \int_{\lambda=0}^{\infty} L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) d\lambda d\Omega(\theta, \phi)$$

1.2 Corps noirs - Formules de Planck et de Wien

Par définition, un corps noir absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit. S'il n'échange de l'énergie avec le milieu extérieur que par rayonnement, à l'équilibre thermodynamique, il émet forcément autant qu'il reçoit. Le corps noir n'a pas de direction de propagation préférentielle, il s'agit d'une émission diffuse obéissant à la loi de Lambert. L'émission monochromatique du corps noir à température T est donc :

$$M^0(\lambda, T) = \int_{\Omega} L(\lambda, \theta, \phi, T) \cos(\theta) d\Omega(\theta, \phi) = \pi L^0(\lambda, T)$$

car $\int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos(\theta) \sin(\theta) d\phi d\theta = \int_{\Omega} d\Omega(\theta, \phi) = \pi$.

La luminance spectrale énergétique d'un corps noir à une température T est donc indépendante de la direction d'émission et est donnée par la formule de Planck :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1}$$

C_1 et C_2 étant des constantes : $C_1 = 2hc^2 = 1,19 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$ et $C_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$.

Cette formule, écrite par Planck en 1900 permet d'expliquer 2 lois phénoménologiques : celle de Wien (1896) et de Rayleigh-Jeans (1900). La figure 4 donne les différents domaines de validité de ces lois.

Pour les longueurs d'onde du visible et à température inférieure à 3000 K, le terme 1 au dénominateur est négligeable et l'on peut alors utiliser sans inconvénient une expression simplifiée qui constitue la loi de Wien :

$$L^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right)} \quad (1)$$

La figure montre la courbe de luminance du corps noir qui passe par un maximum pour λ_{max} . De l'expression de Planck, on montre alors que le produit de λ_{max} par T est une constante égale à $\lambda_{max} T = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m.K}$.

L'émission totale du corps noir à température T correspond à la densité de puissance émise par rayonnement :

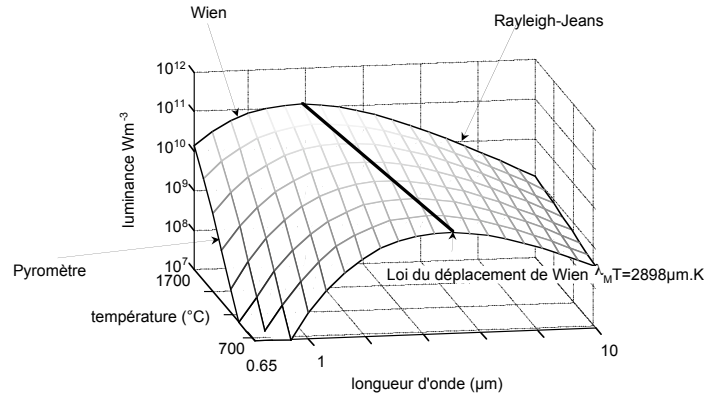


FIGURE 4 – représentation en échelles logarithmiques de la luminance $L(\lambda, T)$ selon la formule de Planck. Le domaine spectral du pyromètre ($0.65 \mu m$) est sur la gauche.

$$M^0(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} \pi L^0(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\infty} M^0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$M^0(T)$ étant en $W.m^{-2}$ et $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ (constante de Stephan-Boltzman).

Cette loi fut découverte expérimentalement par Stefan en 1879. Elle permet par exemple d'expliquer l'effet de serre.

Effet de serre : Le flux solaire ϕ arrivant à la surface de la terre est typiquement de $1 kW/m^2$. Si ce flux arrive sur un corps noir, l'absorption complète de tout le rayonnement conduit à une température de $91^{\circ}C$ ($T = \sqrt[4]{\phi/\sigma}$), température correspondant à une émission dans l'IR. Si l'on interpose une vitre (voir fig. 3), le verre transparent dans le visible devient corps noir dans l'infrarouge, il absorbe complètement le rayonnement IR et le réémet par ses 2 faces. Une partie du flux émis par le corps noir visible-IR retourne sur celui-ci. Un bilan radiatif conduit à :

$$\phi_0 + \phi_{vitre} = \phi_{CN} \text{ et } \phi_{CN} = 2\phi_{vitre}$$

d'où on trouve que :

$$\phi_{CN} = 2\phi_0 \text{ et } \phi_{vitre} = \phi_0$$

La température de la vitre est maintenant de $91^{\circ}C$ alors que celle du corps noir atteint $160^{\circ}C$. En été, la température à la surface du tableau de bord d'une voiture atteint parfois $110^{\circ}C$.

1.3 Corps non noirs

Dans la réalité, les objets sont des corps non noirs, c'est à dire qu'ils n'absorbent pas tout le rayonnement qu'ils reçoivent. Ce rayonnement incident peut être absorbé, réfléchi ou transmis :

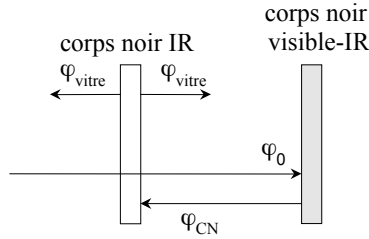
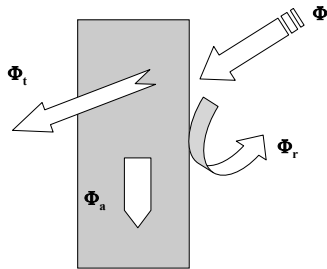


FIGURE 5 – Effet de serre.



On définit les grandeurs suivantes, chacune pouvant être spectrale et directionnelle :

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \text{ absorptivité}$$

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \text{ transmittivité}$$

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \text{ réflectivité}$$

- Absorption : on définit alors le facteur d'absorption monochromatique directionnel $\alpha(\lambda, \theta, \phi)$ du récepteur pour le rayonnement considéré, dans la direction où il est reçu, comme le rapport du flux énergétique absorbé $\Phi_a(\lambda, \theta, \phi)$ au flux incident $\Phi_i(\lambda, \theta, \phi)$:

$$\alpha(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\Phi_a(\lambda, \theta, \phi)}{\Phi_i(\lambda, \theta, \phi)} \quad \alpha(\lambda, \theta, \phi) \geq 1$$

Pour les corps noirs, il est égal à 1 pour toutes les longueurs d'onde. Nous ferons ici l'hypothèse simplificatrice selon laquelle le facteur d'absorption est indépendant de la température.

- Emission : En général, les corps sont des forts absorbants aux fréquences pour lesquels ils sont de forts émetteurs (et inversement). En particulier, si on définit l'émissivité monochromatique directionnelle $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi)$ de la façon suivante :

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi) = \frac{L(\lambda, \theta, \phi, T)}{L^0(\lambda, T)} \quad (2)$$

Dans la plupart des cas, l'émissivité est égale à l'absorptivité (en particulier ici sous nos hypothèses, elle est indépendante de la température) :

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi) = \alpha(\lambda, \theta, \phi)$$

On note $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_\lambda$, l'émissivité hémisphérique :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \varepsilon(\lambda, \theta, \phi) \cos(\theta) d\Omega(\theta, \phi)$$

- une surface est grise (corps gris) si $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi)$ est indépendant de λ ;
- une surface est diffuse si $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi)$ est indépendant de la direction : $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_\lambda$;
- une surface est grise et diffuse si $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi)$ est indépendant de λ et de la direction : $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon$;

Remarques :

- pour un corps gris et diffus, toutes les propriétés sont indépendantes de λ et de la direction, d'où :

$$\varepsilon = \alpha \text{ et } \alpha + \rho + \tau = 1$$

- pour un corps gris, diffus et opaque :

$$\varepsilon = \alpha \text{ et } \tau = 0$$

d'où :

$$\rho = 1 - \varepsilon$$

1.4 Température de luminance

Pour une longueur d'onde λ , la température de luminance ou température apparente S_λ de la surface d'un corps quelconque est définie comme la température thermodynamique de la surface d'un corps noir qui aurait la même luminance que le corps considéré. Elle est donc définie telle que :

$$L^0(\lambda, S_\lambda) = L(\lambda, \theta, \phi, T)$$

2 PYROMETRE MONOCHROMATIQUE A DISPARITION DE FILAMENT

Cette partie propose une approche expérimentale pour retrouver la loi de Stefan-Boltzmann qui fait le lien entre le flux émis par rayonnement par un corps et sa température. L'objectif est de déterminer la température du filament pour différentes valeurs de puissance électrique d'alimentation de la lampe.

2.1 Principe de l'appareil

Le principe de détermination de la température de la surface d'un objet à l'aide du pyromètre à disparition de filament consiste à **égaliser** la luminance d'un *corps noir étalon* placé à l'intérieur du pyromètre avec la luminance de l'objet dont on souhaite déterminer la température.

On se place donc en **lumière monochromatique rouge** ($\lambda = 0,65 \mu m$). L'utilisateur doit alors ajuster le rayonnement du corps noir interne afin que la couleur de celui-ci se confonde avec la couleur de l'objet dont on veut déterminer la température. **Lorsque l'image du corps noir étalon disparaît dans l'image du corps visé, on a réalisé l'égalité des luminances des deux objets.**

On relève alors la valeur de température T_{mes} affichée par le pyromètre. Celle-ci correspond à la fois à la température effective du corps noir mais aussi à la *température de luminance* de la surface visée.

En exprimant dans un deuxième temps la luminance émise par le filament qui est transmise au pyromètre $L^p(\lambda, T)$ en fonction de la température T de l'objet, de la longueur d'onde λ et des propriétés radiatives de la surface radiative visée, on peut en déduire la température T sachant que (cf. part 1.4) :

$$L^p(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_{mes}) \quad (3)$$

2.2 Description du pyromètre

L'appareil (Fig.6) comporte :

- un dispositif de réglage optique permettant de voir nettement la source interne (le corps noir étalon) dont la forme est un V renversé.
- un dispositif de réglage optique permettant de voir nettement la source externe (le filament de la lampe à incandescence placée à distance).
- un bouton de réglage de la gamme de mesure (I-VI).
- un potentiomètre permettant d'ajuster finement la brillance de la source étalon.

Le principe de mesure étant basé sur une superposition de deux images, les réglages optiques du pyromètre sont indispensables pour parvenir à une détermination fiable de la température. Notons que l'oeil est capable de détecter des flux surfaciques de $10^{-10} W.m^{-2}$ tout en supportant avant éblouissement des flux surfaciques de plusieurs $W.m^{-2}$. C'est un "capteur" plus performant que la plupart des détecteurs électroniques. Cependant, afin d'éviter les erreurs dues aux différences de sensibilités de nos yeux, il est conseillé de plusieurs fois la mesure et de retenir la moyenne en excluant les deux valeurs extrêmes.

Gammes de mesure :

I	700°C – 800°C
II	780°C – 950°C
III	900°C – 1100°C
IV	1050°C – 1500°C
V	1450°C – 2100°C

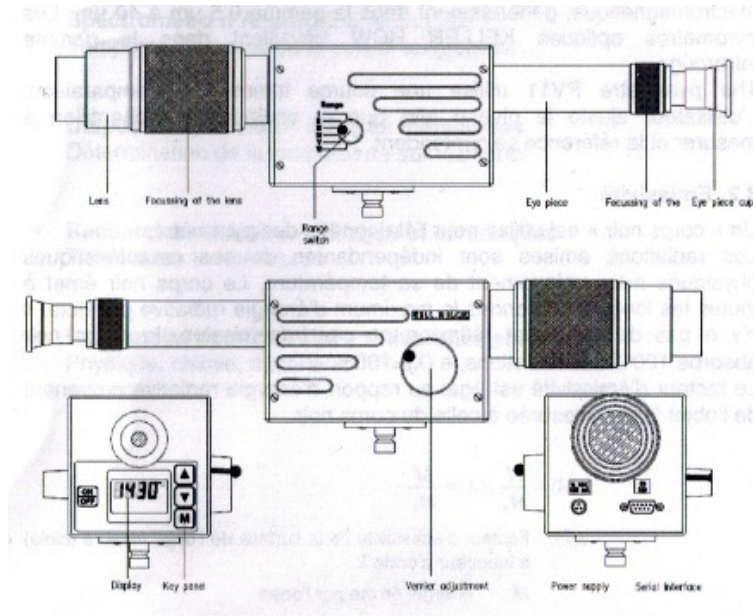


FIGURE 6 – Schéma du pyromètre.

VI

2000°C – 3000°C

S'il s'avère impossible de faire la correspondance ou si la valeur affichée clignote, cela signifie que vous êtes hors de la gamme adéquate, il faut donc changer de calibre et de nouveau, faire la correspondance avec le potentiomètre.

Incertitudes de mesure :

1,5% de la valeur lue	700°C – 800°C
0,6% de la valeur lue	800°C – 2000°C
2% de la valeur lue	2000°C – 3500°C

2.3 Etude expérimentale

L'objectif est de déterminer la température du filament pour différentes valeurs de puissance électrique d'alimentation de la lampe. Pour faire varier la puissance électrique, la lampe est alimentée sous très basse tension à l'aide d'un alternostat et d'un transformateur d'isolement abaisseur. La lampe comporte outre les deux gros fils d'alimentation, deux fils fins soudés sur son culot pour une mesure de la différence de potentiel.

1. *Faire le montage et le faire vérifier.*
2. *Détermination de la gamme opératoire de courant :*

On cherche à déterminer la puissance minimale d'alimentation de la lampe à incandescence qui nous permette de détecter le filament. Pour cela, en vous plaçant sur la gamme de mesure des températures les plus basses (calibre I), vous allez baisser la tension d'alimentation de la lampe jusqu'à la limite de détection de l'image du filament avec vos yeux. Vérifiez alors que vous êtes toujours en

capacité d'égaliser la luminance du filament avec celle de la source interne. Relevez alors la valeur de l'intensité du courant I_{MIN} .

3. Mesures des températures de luminance du filament de la lampe pour différentes puissances électriques :

Faire une dizaine de relevés de la température de luminance T_{mes} pour des valeurs croissantes de l'intensité comprises entre I_{MIN} et $I_{MAX} = 10 A$ en choisissant un pas régulier. Relever également pour chaque point de mesure, la tension aux bornes de la lampe et l'intensité du courant.

4. Facteur de transmission de l'ampoule de verre :

Pour déterminer la température T du filament de la lampe à partir de T_{mes} , il faut connaître l'expression de la luminance émise par le filament et transmise au pyromètre $L^P(\lambda, T)$ en fonction de la température, de la longueur d'onde et des propriétés radiatives d'émission de la surface du filament (cf. equation 3).

Sachant que l'on connaît l'émissivité ε de la surface du filament pour la longueur d'onde du rouge ($\varepsilon = 0,45$), il est aisé de déterminer l'expression de la totalité de la luminance émise par la surface du filament $L(\lambda, T)$ en fonction de la température du filament à partir des équations (1) et (2) :

$$L(\lambda, T) = \varepsilon L^0(\lambda, T) = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} e \left(-\frac{C_2}{\lambda T} \right) \quad (4)$$

Cependant, le filament étant enfermé dans une ampoule de verre, cette luminance n'est pas totalement transmise au pyromètre car le verre réfléchit une partie des photons émis (voir Fig.7). Il est donc nécessaire de déterminer le coefficient de transmission du verre τ pour faire le lien entre $L^P(\lambda, T)$ et $L(\lambda, T)$ soit :

$$L^P(\lambda, T) = \tau L(\lambda, T) \quad (5)$$

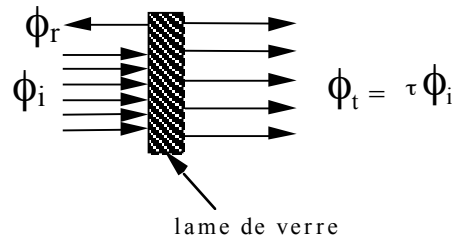


FIGURE 7 – Rôle d'une lame de verre.

Voici la procédure pour déterminer expérimentalement ce coefficient :

- (i) placer vous à I_{MAX} et égaliser les luminances. vérifier que vous retrouvez bien la valeur de la température de luminance trouvée lors de la partie précédente. on notera cette température $T_{mes,1}$.
- (ii) pour la même intensité, interposer entre la lampe et le pyromètre une lame d'un verre identique à celui de l'ampoule,
- (iii) relever la nouvelle valeur de la température de luminance notée $T_{mes,2}$.
- (iv) écrire l'égalité des luminances entre le filament et le corps étalon dans le cas où on a $T_{mes,1}$ en faisant intervenir la luminance d'émission $L(\lambda, T)$ et le coefficient τ .
- (v) écrire l'égalité des luminances entre le filament et le corps étalon dans le cas où on a $T_{mes,2}$ en faisant intervenir la luminance d'émission $L(\lambda, T)$ et le coefficient τ .

- (vi) en déduire que :

$$\tau = \frac{L^0(\lambda, T_{mes,2})}{L^0(\lambda, T_{mes,1})} \quad (6)$$

Utiliser la relation précédente et l'équation (1) pour déterminer la valeur du facteur de transmission τ .

5. A partir des équations 1, 4, 5 montrer que le principe de mesure du pyromètre aboutit à la relation suivante entre la température du filament et sa température de luminance :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{mes}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(\tau \varepsilon) \quad (7)$$

avec : $\lambda = 0,65\mu m$, $C_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^{-2} m.K$ et $\varepsilon = 0,45$.

6. Déterminer alors la série de température T du filament pour chaque point de puissances électriques imposées $P_{elec} = UI$ (valeurs que l'on confinera dans un tableau).
7. Tracer le graphe $(\ln P_{elec})$ en fonction de $(\ln T)$. Déterminer la pente du graphe. Commenter.
8. Tracer le graphe $R(T)$ où R est la résistance du filament. Comment varie la résistance du conducteur avec la température ? Peut-on utiliser cette propriété comme une méthode alternative de mesure de température ?

3 THERMOMETRE INFRAROUGE

Dans cette seconde partie, il s'agit de mettre en évidence le rôle de l'émissivité d'une surface et sa dépendance à la fréquence du rayonnement. Vous utiliserez un capteur sensible au rayonnement infrarouge.

3.1 Avant de commencer

- Régler la température de consigne du thermostat à environ 50°C et attendre la mise en température de la plaque avant de démarrer les mesures.
- Noter la température ambiante T_a .
- Discuter de la valeur de l'émissivité dans la gamme de longueurs d'onde du visible.

3.2 Mesure des émissivités - Plaque quadrillée

- En pointant successivement le thermomètre infrarouge vers chacun des quatre revêtements de la plaque quadrillée, noter les températures indiquées.
- Estimer les émissivités des différents revêtements. Pour cela, vous comparerez la température affichée (en ayant réglé l'émissivité à 1) à la température de surface de la plaque mesurée à l'aide du thermomètre de contact. Pour interpréter cette différence en termes d'émissivité, vous avez besoin de la connaissance du rayonnement ambiant que vous supposerez égal au rayonnement du corps noir à la température ambiante T_a .
- Comparer les valeurs de l'émissivité de chacune des surface dans la gamme de longueurs d'onde IR et du visible. Conclusion.

T.P. III

EFFETS THERMOELECTRIQUES

Les phénomènes thermoélectriques résultent du couplage de deux phénomènes de transport se produisant simultanément : le transport de chaleur et celui de charges électriques. Ils dépendent du sens du courant. Trois effets thermoélectriques ont été établis expérimentalement : l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson :

- **L'effet Seebeck (1823)** concerne l'apparition d'une différence de potentiel dans un circuit ouvert constitué de conducteurs de nature différente, lorsque les jonctions sont à des températures différentes. C'est le principe qui est à la base de la mesure de température par un thermocouple.
- **L'effet Peltier (1834)** a trait à la production (ou absorption) de chaleur au niveau de la jonction de deux conducteurs de nature différente quand une quantité d'électricité les parcourt. La puissance produite est : $\phi = \Pi I$ où Π est le coefficient Peltier.
- **L'effet Thomson (1857)** se rapporte à la production (ou à l'absorption) de chaleur provoquée par le passage d'un courant dans une portion de conducteur soumise à une différence de température.

Explication succincte des effets thermoélectriques : Deux conducteurs ou semi-conducteurs différents ont pour une même température d'équilibre, des porteurs mobiles de charge (électrons ou trous) d'énergie moyenne distincte. Dans le cas de l'effet Peltier, imposer par une différence de potentiel la circulation des porteurs au travers d'une jonction constituée de deux matériaux différents revient à imposer aux porteurs de charge de changer d'énergie moyenne au passage de l'interface. Ainsi, selon le type de matériau et le sens imposé au courant, les porteurs qui traversent l'interface perdent ou gagnent de l'énergie et génèrent donc un échauffement ou au contraire un refroidissement de l'interface qu'ils franchissent. Dans le cas de l'effet Seebeck, imposer une différence de température ΔT entre deux jonctions permet de fournir l'énergie nécessaire aux porteurs de charge pour qu'ils puissent franchir la barrière énergétique constituée par la différence d'énergie moyenne des porteurs qu'il y a entre les deux matériaux. La circulation de charges ainsi créée entraîne donc l'apparition d'une d.d.p., dont le signe dépend du signe de ΔT et des matériaux mis en contact.

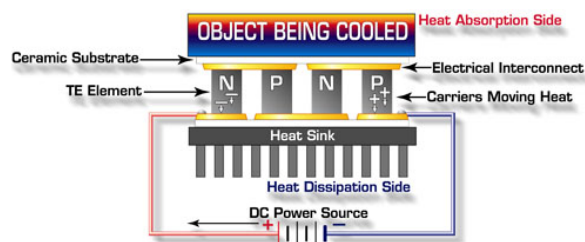


FIGURE 8 – Refroidissement d'un composant électronique à partir de l'utilisation d'un module Peltier.

Contrairement à ce que laisserait penser cette introduction, ce TP n'est pas dédié à l'étude des phénomènes thermo-électriques mais plutôt d'un système thermique mettant à profit l'effet Peltier (cellule

Peltier) pour faire de la gestion thermique de composant de l'électronique (cf. figure 8). L'idée est donc de faire une caractérisation des performances d'une cellule de Peltier. Pour cela, on cherchera à déterminer les flux dissipée par chacune des faces de la cellule en fonction de l'intensité du courant électrique que l'on fait circuler dans le semi-conducteur.

1 L'EFFET PELTIER

En 1834, le physicien français Jean Peltier (1785-1845) publie un article sur les anomalies de température observées au voisinage des jonctions entre deux conducteurs parcourus par un courant. L'essentiel du phénomène peut se résumer brièvement comme suit : lorsqu'un courant traverse un système formé de conducteurs de natures différentes, il apparaît à chaque jonction une quantité de chaleur proportionnelle à l'intensité du courant. Cette chaleur est soit absorbée, soit dégagée selon le sens du courant à travers la jonction.

1.1 Rappels Théoriques

1.1.1 Cas d'une seule jonction

Soit une portion de circuit composée de deux conducteurs distincts A et B en contact suivant la surface S (figure 9).

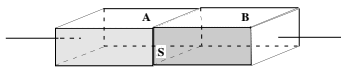


FIGURE 9 – Jonction de deux conducteurs distincts

Si l'on fait passer un courant électrique à travers la jonction, la loi de Joule (1841) conduit à énoncer que la quantité de chaleur dégagée est indépendante du sens du courant. Des mesures calorimétriques précises montrent qu'il ne s'agit là que d'une première approximation, un écart systématique des quantités de chaleur dégagées pouvant être décelé lorsque le courant est inversé.

Appelons Q_{AB} et Q_{BA} les quantités de chaleur mises en jeu lorsque le courant va respectivement de A vers B et de B vers A. On définit l'écart local à la loi de Joule par la quantité Q_1 telle que :

$$Q_1 = \frac{Q_{AB} - Q_{BA}}{2}$$

De même, on peut définir la quantité Q_2 telle que :

$$Q_2 = \frac{Q_{AB} + Q_{BA}}{2}$$

Ainsi, on peut écrire que :

$$Q_{AB} = Q_1 + Q_2 \text{ et } Q_{BA} = Q_2 - Q_1$$

- La quantité Q_2 est indépendante du sens du courant : elle représente la chaleur reçue par effet Joule : elle est proportionnelle au carré de l'intensité du courant qui lui a donné naissance.
- La quantité Q_1 est liée au sens du courant ; elle est localisée à la surface S de séparation des deux matériaux. L'écart Q_1 , qui est la manifestation de l'effet Peltier, est proportionnel à l'intensité du courant qui lui a donné naissance. La puissance mise en jeu est : $P_1 = \Pi I$, où I est le courant qui traverse la jonction et Π le coefficient Peltier dont la valeur dépend des matériaux utilisés.

1.1.2 Cas de deux jonctions

Supposons qu'entre les matériaux A et B, l'on ait réalisé deux jonctions S_1 et S_2 en série (figure 10).

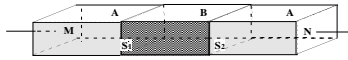


FIGURE 10 – Double jonctions de conducteurs

Les jonctions S_1 et S_2 sont de même nature, mais si le courant va de A vers B à travers S_1 , il va de B vers A à travers S_2 . D'après ce qui précède, l'effet Peltier est caractérisé par $+Q_1$ en S_1 et $-Q_1$ en S_2 , ce qui correspond, par exemple, à un dégagement de chaleur en S_1 et à une absorption de la même quantité de chaleur (et donc un refroidissement) en S_2 : tout se passe comme s'il y avait transfert de chaleur de S_2 vers S_1 . On a donc le principe d'un moyen de réfrigération.

1.1.3 Cas d'une jonction métal-semiconducteur : application à la réfrigération

Rappelons que l'on désigne par semi-conducteur de type n des matériaux dont la conduction principale est assurée par des électrons et semi-conducteurs de type p, ceux dont la conduction prépondérante est effectuée par "trous".

Si un des matériaux est un semi-conducteur et l'autre un métal, le signe de la quantité de chaleur caractéristique de l'effet Peltier, dépend du type n ou p du semi-conducteur. Le type de jonction métal/semi-conducteur donne naissance à un effet Peltier plus important que celui d'une jonction métal-métal. Le tellurure de bismuth est ainsi couramment utilisé pour fabriquer les thermo-éléments des réfrigérateurs à effet Peltier (cf. manipulation). Le coefficient d'efficacité de tels dispositifs de réfrigération est inférieur à celui des dispositifs utilisant l'évaporation de liquides tels que le fréon (réfrigérateurs à compresseur). Néanmoins, pour les problèmes de faible puissance, de réfrigération très locale et de régulation fine, l'effet Peltier est employé.

Notons aussi qu'il existe des réfrigérateurs portables utilisant l'effet Peltier et qui, branchés sur une batterie d'automobile, permettent de maintenir à des températures voisines de 4°C un volume d'environ 30 litres.

1.1.4 Cellule Peltier

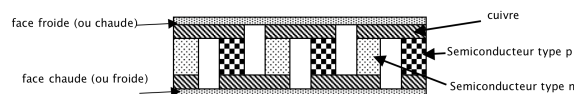


FIGURE 11 – Schéma de la cellule Peltier utilisée

On remarquera l'utilisation de semi-conducteurs alternativement de type n et p. Les semi-conducteurs utilisés sont : du tellurure de bismuth Bi_2Te_3 , avec un excès de Bi (pour le type p) et du CuI dopé (pour le type n) : lors du passage du courant, le dispositif se comporte électriquement comme un montage en série mais thermiquement comme un montage en parallèle. Cette association groupe en effet sur la même face les jonctions "chaudes" et sur la face opposée les jonctions à absorption de chaleur (face froide) : le vérifier sur

le schéma.

La cellule est alimentée en courant continu. Une face prend en cours de fonctionnement une température d'équilibre chaude θ_c tandis que l'autre prend de même une température d'équilibre froide θ_f . Considérons par exemple la face chaude. Lors du passage du courant dans la cellule, trois phénomènes apparaissent simultanément :

- **L'effet Peltier** : La face chaude reçoit la puissance thermique :

$$P_1 = \Pi I$$

où I est l'intensité du courant, et Π le coefficient Peltier, caractéristique de la cellule.

- **L'effet Joule** : Si on admet que l'effet Joule se répartit également sur les deux faces. R est la résistance électrique de la cellule. La face chaude reçoit la puissance électrique :

$$P_2 = I^2 R$$

- **La conduction thermique** : Il y aura également transfert de chaleur par conduction thermique à l'intérieur de la cellule, de la face chaude vers la face froide. Au cours de ce transfert, la puissance thermique perdue par la face chaude au profit de la face froide est :

$$P_3 = K(\theta_c - \theta_f)$$

où K est la conductivité thermique de la cellule.

1.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Pour avoir accès aux puissances mises en jeu dans cette expérience, on établit autour de la cellule une circulation d'eau, à faible débit, le long de chaque face (fig.12). En mesurant la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de chaque face, on peut calculer les puissances thermiques transportées par l'eau. En régime permanent, il est possible de corréler la puissance thermique évacuée par chacune des faces à celle transportées par l'eau. Un tel dispositif permet ainsi de déterminer une valeur mesurable du coefficient de Peltier même pour de faibles intensités de courant ce qui est un des objectifs du TP.

On notera, cependant, que la cellule (semi-conducteur) est positionnée entre deux plaques métalliques (en acier inoxydable dont la conductivité thermique vaut $\lambda_a = 45 W.K^{-1}m^{-1}$) d'épaisseur e supérieure à quelques millimètres. En conséquence de quoi, on parlera de face interne pour la surface de contact entre le semi-conducteur et la plaque et de face externe pour la surface de contact entre l'acier et l'eau.

Remarque : Puisque la circulation d'eau transporte la quantité de chaleur évacuée à la face externe chaude vers la face externe froide, $\theta_{c,ext} - \theta_{f,ext}$ est faible (quelques degrés), et donc la conduction thermique est minimisée, (mais non nulle attention K est grand).

1.3 MANIPULATION

On notera :

- θ_1 : la température de l'eau à l'entrée de la cellule,
- θ_2 : la température de l'eau entre les deux faces,
- θ_3 : la température de l'eau à la sortie de la cellule.

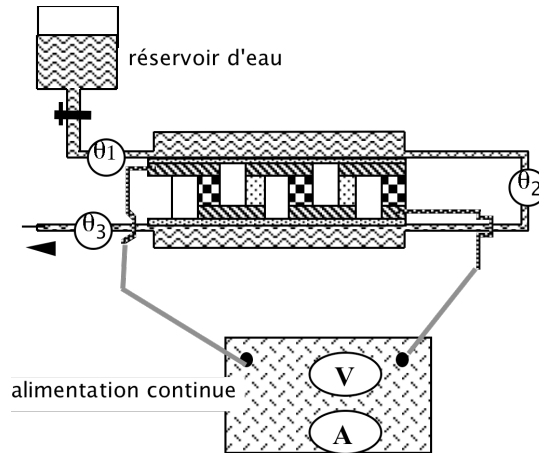


FIGURE 12 – Schéma du dispositif expérimental

1. Faire le montage électrique et le faire vérifier.
2. Régler le débit d'eau, par exemple à la valeur de $40 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.
3. Avant de faire passer le courant dans la cellule, repérez les valeurs des trois températures θ_1 , θ_2 et θ_3 sur le circuit d'eau.

Remarque : Les écarts entre θ_1 , θ_2 et θ_3 pour $I = 0$ indiquent les corrections à apporter à la lecture des thermomètres.

4. Pour plusieurs valeurs de l'intensité I comprises entre 0 et 2,4 A, **relevez les trois températures et le débit d'eau** que vous pourrez reporter dans un tableau de mesure, ainsi que les corrections éventuelles. On fera varier l'intensité de façon régulière dans le temps de 0,2 A en 0,2 A, l'expérience montrant que, pour un courant d'intensité 2 A, l'équilibre thermique du système est pratiquement atteint au bout de trois minutes.

1.4 ANALYSE

Question 1 : quel est, au régime stationnaire, le flux de chaleur respectivement dissipé par chacune des faces de la cellule en fonction de l'intensité ?

Question 2 : pouvez vous déterminer le coefficient de Peltier Π de la cellule ?

Question 3 : Déterminer les coefficients d'efficacité calorifique et frigorifique de la cellule.

Pour répondre à ces questions, on vous propose de procéder en plusieurs étapes :

1. Etablir une description **qualitative** complète de la propagation de l'énergie dans la cellule : faire un ou des schémas, découper/raccorder en sous-systèmes (semi-conducteur, plaques métalliques, échangeurs à eau), préciser les flux en prenant soin de bien définir les choix des notations et les mécanismes associés.
2. En déduire :

- (a) l'expression des puissances P_c et P_f échangées au régime stationnaire par chaque face métallique avec l'eau (C : face chaude et F : face froide) en fonction des grandeurs mesurées en précisant les hypothèses faites. Calculer ces flux pour chaque valeur de I . Préciser l'incertitude sur la valeur des flux.
- (b) le lien formel entre P_c et la puissance dissipée par effet Peltier ainsi que les autres phénomènes thermiques présents au sein du semi-conducteur (soit P_1 , P_2 et P_3). Idem pour P_f .
3. Tracer sur la même feuille de papier millimétré les courbes des variations de $P_{tot,1} = P_c - P_f$ et $P_{tot,2} = P_c + P_f$ en fonction du courant I . Analyser les courbes obtenues pour répondre à la question 2 et 3.

Remarque : On rappelle que pour un système ouvert échangeant, en régime stationnaire, avec le milieu extérieur, une puissance calorifique \dot{q} et une puissance mécanique utile \dot{w}_u , le premier principe de la thermodynamique peut s'écrire :

$$\dot{m}\Delta\left(h + \frac{v^2}{2} + gz\right) = \dot{q} + \dot{w}_u$$

où \dot{m} est le débit massique de fluide traversant le système, $\frac{v^2}{2}$ l'énergie cinétique massique et gz l'énergie potentielle massique,

et où Δ signifie la différence entre les grandeurs prises dans une section droite localisée à la sortie de l'échangeur moins celles prises dans une section droite située à l'entrée de l'échangeur.

D'autre part, on rappelle que pour un liquide incompressible, la variation d'enthalpie massique Δh entre deux états d'équilibre est liée à ΔT la variation de température et à Δp de pression du fluide selon la relation :

$$\Delta h = c_p \Delta T + \frac{1}{\rho} \Delta p$$

où c_p est la capacité calorifique massique et où ρ est la masse volumique du liquide. Pour l'eau on a $c_p = 4180 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.