



2022–2023

## Transferts Thermiques Fascicule de Travaux Pratiques



D. Chibouti  
dahia.chibouti@univ-eiffel.fr

### Notes

Les comptes rendus de Travaux Pratiques sont à rendre **au plus tard** une semaine après chaque séance :

- en version électronique (en format pdf) sur la plateforme e-learning de l'UGE (cours: Introduction aux transferts thermiques)
- Il est fortement conseillé d'amener votre ordinateur portable personnel afin de pouvoir traiter les résultats en cours de séance

Afin de ne pas perdre de temps pendant les séances, **vous êtes fortement encouragés à préparer les TP à l'avance** (lecture des protocoles, réflexion sur les parties théoriques, tableurs excel ...)

### Remarques

- Dans le TP de conduction stationnaire et instationnaire, la partie 2.5.3 (évolution du coefficient d'échange) ne sera pas traitée.
- La solution analytique (5) est longue (mais pas difficile à obtenir). En cas de difficultés, passez cette étape.

# Conduction stationnaire et instationnaire dans des barres métalliques

## IMPORTANT :

- Les TP doivent être préparés avant de venir en séance : les protocoles de TP doivent être lus attentivement, les calculs théoriques doivent être faits (ou au moins cherchés) et les feuilles de calcul Excel peuvent être préparées (réalisation des tableaux et entrée des formules de calcul).
- Pour récupérer et exploiter sous Excel les mesures expérimentales enregistrées par le système d'acquisition de données (400 Ko environ), **munissez-vous d'une clé USB** pour la séance de TP.

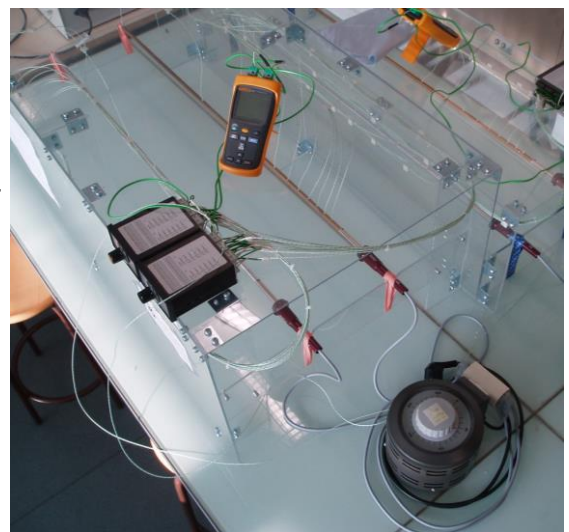
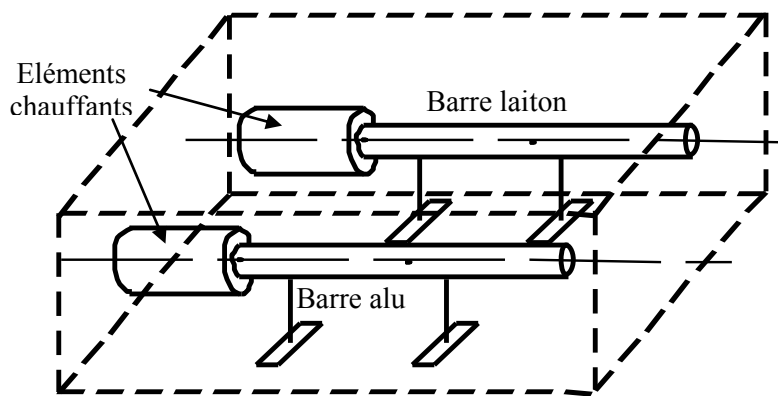
## 1. Introduction

Après le fer, l'aluminium est le métal le plus utilisé dans notre environnement quotidien. On le trouve dans les industries alimentaire, aéronautique, automobile, électronique, optique, dans le bâtiment, l'électroménager, ... Il est cependant rarement utilisé pur car ses propriétés mécaniques le rendent peu usinable : il n'est pas assez dur. En fonction des propriétés que l'on souhaite lui conférer, on l'emploie sous la forme d'alliages, avec du cuivre, du manganèse, du silicium, du magnésium, du zinc, ... Ces différents alliages sont normalisés et classés. On les nomme avec un numéro de série à 4 chiffres. Dans le tableau 1, on donne certaines propriétés thermo-physiques de quelques alliages d'aluminium. Vous pouvez constater que ces propriétés varient beaucoup selon la nature de l'alliage.

L'objet de ce TP est de trouver les propriétés thermiques (la conductivité  $k$ , la diffusivité thermique  $\alpha = k/(\rho C)$  et la chaleur spécifique  $C$ ) d'une barre faite dans un alliage d'aluminium indéterminé. Dans la suite, pour simplifier, on nomme cette barre « la barre d'aluminium » et on note avec l'indice « alu » toutes les grandeurs qui s'y rattachent. On procède en deux étapes pour déterminer les propriétés thermiques de cette barre. Dans la première étape, on détermine sa conductivité thermique  $k_{\text{alu}}$ . Pour cela, on utilise deux barres cylindriques chauffées à l'une de leurs extrémités de manière constante dans le temps (cf. figure 1). La première barre est faite dans l'alliage d'aluminium inconnu ; la deuxième est en laiton et on connaît sa conductivité thermique  $k_{\text{laiton}}$ . La conductivité  $k_{\text{alu}}$  est obtenue en mesurant, à l'aide de 22 thermocouples, la répartition spatiale de la température le long des deux barres. Dans la seconde étape, on détermine  $\alpha_{\text{alu}}$  et  $C_{p\text{-alu}}$  en mesurant, à l'aide de 2 thermocouples, l'évolution temporelle de la température en deux positions d'une barre d'aluminium, identique à la précédente, mais chauffée périodiquement en temps à l'une de ses extrémités. Dans les deux étapes, on utilise le modèle de l'ailette pour identifier les propriétés thermiques des barres d'aluminium.

Série	Elément principal de l'alliage	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique k (W/m.K)	Chaleur spécifique $C_p$ (J/kg.K)	Applications	Remarques
1xxx	aluminium à plus de 99%	2700	230	945	électronique optique	ce ne sont pas des alliages
2xxx	cuivre	2770-2790	120-135	920	aéronautique mécanique	nom: dural ou duraluminium se corrode
3xxx	manganèse	2720-2730	160-180	935	emballage chaudronnerie électroménager bâtiment	mise en forme aisée (canettes, boîtes de conserve)
4xxx	silicium				soudure	rare
5xxx	magnésium	2660-2700	130-200	945	chaudronnerie marine	se soude bien
6xxx	magnésium silicium	2700-2710	170-200	935-945	pylônes charpentes menuiserie métallique	très utilisé : résiste à la corrosion, se file bien
7xxx	zinc (+cuivre)	2780-2800	130-140	915-920	aéronautique armement sport	Très bonne résistance mécanique

**Tableau 1** : Propriétés physiques à température ambiante et caractéristiques des principaux alliages d'aluminium (pour plus d'informations, se référer à l'encyclopédie Wikipédia sur internet : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Alliages\\_d'aluminium\\_pour\\_corroyage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alliages_d'aluminium_pour_corroyage))



**Figure 1** : schéma et photo du dispositif expérimental complet de conduction stationnaire

## 2. 1<sup>ère</sup> étape : détermination de $k_{\text{alu}}$ par conduction stationnaire

### 2.1 Dispositif et conditions expérimentales

Le dispositif expérimental est présenté sur les figures 1 et 2. Il est constitué d'une barre d'aluminium et d'une barre de laiton, de diamètre  $D=10,1\pm0,5$  mm et de longueur  $L=1$  m. La conductivité du laiton est  $k_{\text{laiton}}=125\pm5$  W/m.K pour des températures comprises entre 20 et 70°C. Les deux barres sont placées sous un boîtier transparent, en plexiglas, pour maintenir les conditions

ambiantes à peu près constantes durant toute l'expérience. On donne les propriétés de l'air à température ambiante dans le tableau 2. Les barres reposent sur des supports en Plexiglas, de conductivité largement inférieure à celle des métaux qui les constituent, de façon à pouvoir négliger les pertes de chaleur dans ces supports. Les deux barres sont chauffées à l'une de leurs extrémités, à puissance électrique constante, par un fer à souder dont on peut contrôler la puissance de chauffe. Elles sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour ignorer leur influence mutuelle. La répartition de température le long de chaque barre est mesurée par 11 thermocouples de type K (cuivre - constantan), logés au cœur des barres à des distances  $x_i$  ( $i=1$  à 11) de la section chauffée, données dans le tableau 3. On dispose d'un 12<sup>ème</sup> thermocouple K pour mesurer la température ambiante  $T_\infty$  loin des éléments chauffants. Un thermomètre digital, relié à un sélecteur, permet de relever facilement les valeurs de température de tous les thermocouples.

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\beta=1/T$ (K <sup>-1</sup> )	k (W/m.K)	$C_p$ (J/kg.K)	$\alpha=k/\rho.C_p$ (m <sup>2</sup> /s)	$\nu=\mu/\rho$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr=\nu/\alpha$
300	1,1614	0,00333	0,0263	1007	$22,5 \times 10^{-6}$	$15,89 \times 10^{-6}$	0,707

Tableau 2 : Propriétés physiques de l'air à température ambiante

Barre	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
aluminium	0	3,2	6,8	10,8	15,5	21	27,8	36,5	48,8	69,8	91,3
laiton	0	2,2	4,8	7,6	10,9	14,8	19,6	25,8	34,5	49,3	90,3

Tableau 3 : Positions axiales, en cm, des thermocouples des barres de conduction stationnaire.  
L'incertitude sur la position est  $\delta x_i = \pm 0,5$  mm

## 2.2 Modèle théorique : approximation de l'ailette en régime stationnaire

On peut montrer, et vous le vérifierez (cf. §2.5), que le modèle stationnaire de l'ailette semi infinie qui a été établi en cours peut s'appliquer pour étudier la répartition de température dans les barres d'aluminium et de laiton utilisées dans cette première partie du TP.

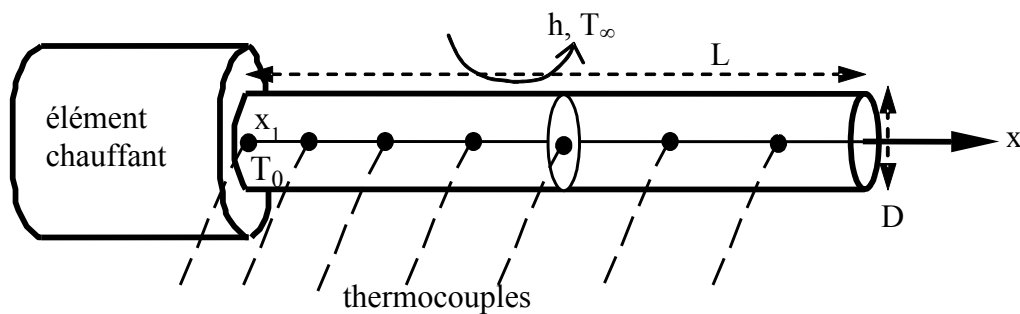


Figure 2 : Schéma et photo d'une des deux barres de conduction stationnaire équipée de thermocouples

En référence à la figure 2, on note :

- $x$  la coordonnée axiale le long de la barre,
- $T_0$  la température en  $x=x_1=0$  à la base de l'ailette,
- $T_\infty$  la température de l'air ambiant,
- $h$  le coefficient d'échange global par convection et rayonnement dans l'air,
- $D$  le diamètre de la barre,
- $k$  sa conductivité thermique et
- $\alpha$  sa diffusivité thermique.

On rappelle ci-dessous l'équation, les conditions aux limites et la répartition de température dans une ailette semi infinie (ou longue) chauffée en régime permanent :

$$\text{Equation :} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{4h}{kD}(T - T_\infty) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{4h}{kD}\theta = 0 \quad (1)$$

$$\text{Conditions aux limites :} \quad \begin{cases} \text{en } x = 0, T = T_0 \\ \text{en } x \rightarrow \infty, T = T_\infty \end{cases} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} \text{en } x = 0, \theta = \theta_0 \\ \text{en } x \rightarrow \infty, \theta = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Solution :} \quad \boxed{\begin{aligned} T_{\text{ail-longue}}(x) &= T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{-\sqrt{\frac{4h}{kD}}x} \\ \Leftrightarrow \theta_{\text{ail-longue}}(x) &= \theta_0 e^{-Bx} \end{aligned}} \quad (3)$$

où  $\theta(x)=T(x)-T_\infty$ ,  $\theta_0=T_0-T_\infty$ , et  $B^2=4h/(kD)$ .

## 2.3 Protocole expérimental

### 2.3.1 Mise en route et attente du régime permanent

Imposez une tension de 60 volts environ au transformateur, de manière à ce que la température en  $x_1=0$  ne dépasse pas 60 à 70°C, ceci pour éviter que le coefficient d'échange global  $h$  varie trop le long de la barre (cf. § 2.5.3). **Attendez plus d'une heure que la répartition de température atteigne un régime stationnaire** en surveillant régulièrement les températures mesurées par les thermocouples. Ces températures ne doivent plus évoluer dans le temps, en particulier pour les thermocouples éloignés de l'élément chauffant, en  $x_{10}$  et  $x_{11}$ . En effet, un modèle de milieu semi infini appliqué à l'aluminium pur ( $\alpha_{\text{alu}} \approx 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et au laiton ( $\alpha_{\text{laiton}} \approx 3,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) indique que, pour que l'élévation de la température imposée en  $x=0$  soit perçue en  $x=1 \text{ m}$ , il faut environ 15 minutes pour l'aluminium et 40 minutes pour le laiton (cf. cours).

### 2.3.2 Relevé des températures à l'état stationnaire

Une fois le régime permanent atteint, relevez les 22 températures mesurées par les thermocouples n° 1 à 11 de chacune des 2 barres et mesurez la température ambiante à l'aide des 2 thermocouples n°12. On recherchera dans quelle mesure la température ambiante varie autour des barres et on réfléchira à l'endroit le plus adéquat pour mesurer cette température par rapport à l'analyse proposée. On estimera également la précision,  $\delta T$ , avec laquelle les thermocouples donnent la température. **Il sera judicieux d'évaluer  $\delta T$  tant que les barres sont isothermes, avant de mettre en chauffe les deux fers à souder.**

## 2.4 Exploitation des mesures

**Vous exploiterez les mesures expérimentales (tracé des graphes avec les droites de régression et les barres d'incertitude) en utilisant le tableur Excel mis à votre disposition sur les ordinateurs de la salle de TP ou dans les salles d'informatique en accès libre.**

#### 2.4.1 Détermination du coefficient d'échange global h

Comme la répartition de la température dans les barres est donnée par la relation (3) et comme le diamètre et la conductivité thermique de la barre de laiton sont connus (cf. §2.1), il est possible, en traçant le graphe de la fonction  $\ln[T_{\text{laiton}}(x) - T_{\infty}]$ , de déterminer le coefficient d'échange global moyen h. Tracez ce graphe. Calculez h et estimez l'incertitude  $\delta h$  faite sur h, en fonction de l'incertitude  $\delta x$  sur la position des thermocouples ( $\delta x = \pm 0,5$  mm) et de l'incertitude  $\delta T$  sur la mesure de la température. Expliquez votre démarche. (Remarque : pour effectuer les régressions linéaires, conservez uniquement les points nécessaires du graphe).

#### 2.4.2 Détermination de la conductivité de l'aluminium $k_{\text{alu}}$

Les barres de laiton et d'aluminium ayant la même géométrie, étant chauffées au même niveau de température et ayant le même état de surface (barres polies), on peut considérer que les coefficients d'échange par convection et rayonnement ont à peu près la même valeur pour les deux barres et donc que le coefficient d'échange moyen global est le même :  $h_{\text{alu}} \approx h_{\text{laiton}} \approx h$ . Ainsi, h et D étant connus dans la relation (3), il est possible, en traçant le graphe de la fonction  $\ln[T_{\text{alu}}(x) - T_{\infty}]$ , de déterminer la conductivité  $k_{\text{alu}}$ . Tracez ce graphe, calculez  $k_{\text{alu}}$  et estimez l'incertitude  $\delta k_{\text{alu}}$ , en fonction des incertitudes  $\delta x$ ,  $\delta T$  et  $\delta h$ . Expliquez votre démarche et commentez.

### 2.5 Analyse théorique (Bonus)

Le modèle utilisé pour exploiter les mesures est celui de l'ailette longue ou semi infinie utilisant un coefficient d'échange global moyen h pour toute l'ailette. L'objet de cette partie est de vérifier la validité de ce modèle théorique. Pour cela, on procède en trois étapes :

#### 2.5.1 Vérification de la validité du modèle d'ailette :

Calculez les nombres de Biot pour les deux barres. Qu'en déduisez-vous pour la validité du modèle ?

#### 2.5.2 Vérification de l'hypothèse d'ailette longue :

Pour une ailette réelle, de longueur finie, on considère que son extrémité libre en  $x=L$  est soumise à un échange de chaleur global de même coefficient h que le reste de sa surface. Ainsi, le modèle d'une ailette réelle est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{Equation : } \quad & \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{4h}{kD}(T - T_{\infty}) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{4h}{kD}\theta = 0 \quad (1) \\ \text{Conditions aux limites : } \quad & \begin{cases} \text{en } x = 0, T(0) = T_0 \\ \text{en } x = L, -k \frac{dT}{dx} \Big|_L = h(T(L) - T_{\infty}) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{en } x = 0, \theta(0) = \theta_0 \\ \text{en } x = L, \frac{d\theta}{dx} \Big|_L = -\frac{h}{k}\theta(L) \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

Sachant que  $\theta_{\text{ail-longue}}(x)$  est donnée par la relation (3), montrer que la solution de ce problème de valeurs aux limites s'écrit :

$$\begin{aligned} & \boxed{\begin{aligned} T_{\text{ail-réelle}}(x) &= T_{\text{ail-longue}}(x) + \Delta T(x) \\ \Leftrightarrow \theta_{\text{ail-réelle}}(x) &= \theta_{\text{ail-longue}}(x) + \Delta T(x) \\ \Leftrightarrow \theta_{\text{ail-réelle}}(x) &= \theta_0 e^{-Bx} + \Delta T(x) \end{aligned}} \\ & \text{avec } \boxed{\Delta T(x) = \theta_0 \frac{(A-1)e^{-BL}}{\text{sh}(BL) + A \text{ch}(BL)} \text{sh}(Bx)}, \quad A = \sqrt{4k/hD} \quad \text{et} \quad B = \sqrt{4h/kD} \end{aligned} \quad (5)$$

Expliquer pourquoi l'écart maximum entre les températures des modèles d'ailettes réelle et longue est obtenu en  $x=L$  et est donc donné par  $\Delta T(L)$ . Calculer cet écart pour les barres d'aluminium et de

laiton. En déduire que la solution de l'ailette longue donnée par la relation (3) est satisfaisante pour mener l'étude proposée dans ce TP.

### 2.5.3 Evaluation de la variation de $h$ le long de l'ailette ( $h(x)$ ) :

Le coefficient d'échange global  $h$  est la somme des coefficients d'échange par convection  $h_{\text{conv}}$  et par rayonnement  $h_{\text{ray}}$ . Pour une géométrie et un milieu ambiant donnés, ces différents coefficients d'échange varient uniquement en fonction de la température  $T_p$  de la paroi. Par conséquent, ils varient en fonction de la position sur cette paroi si la température de la paroi n'est pas uniforme. C'est le cas dans ce TP puisque la température décroît le long des barres : on a donc  $T_p = T_p(x)$  et  $h = h(x)$ . L'objectif de cette question est donc d'évaluer (approximativement) comment  $h$  varie avec  $x$  et de comparer cette fonction à la valeur moyenne de  $h$  qui a été mesurée au §2.4.1.

Tout d'abord, pour déterminer  $h_{\text{conv}}(x)$ , on se sert d'une corrélation semi empirique trouvée dans la littérature<sup>1</sup>. Cette corrélation donne  $h_{\text{conv}}$  dans le cas d'un cylindre long horizontal. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$h_{\text{conv}} = k_{\text{air}} \text{Nu} / D \quad (6)$$

$$\text{avec } \text{Nu} = [\text{Nu}_l^{10} + \text{Nu}_t^{10}]^{1/10}, \quad \text{Nu}_l = \frac{1,6}{\ln(1 + 4,024 \text{Ra}^{-1/4})} \quad \text{et} \quad \text{Nu}_t = 0,103 \text{Ra}^{1/3}$$

Elle est valable pour de l'air (pour un nombre de Prandtl  $\text{Pr} = \nu/\alpha = 0,71$ ) et pour un nombre de Rayleigh  $\text{Ra} = g\beta_{\text{air}}(T_p(x) - T_{\infty})D^3/(\nu_{\text{air}}\alpha_{\text{air}}) > 10^{-4}$ . Dans cette corrélation, le nombre de Nusselt  $\text{Nu}$  représente le rapport entre le flux de chaleur total perdu par la paroi dans l'air par conduction et convection et le flux perdu dans l'air par conduction seulement.  $\text{Nu}$  dépend du régime d'écoulement de convection naturelle (laminaire ou turbulent) et du nombre de Rayleigh  $\text{Ra}$ .  $\text{Ra}$  est un nombre adimensionnel qui représente le rapport entre la force de poussée d'Archimède, à l'origine de la convection naturelle, et les forces qui s'y opposent : les forces de viscosité et de diffusion de la chaleur. La variation de  $\text{Nu}$  en fonction de  $\text{Ra}$ , donnée sous la relation (6), est tracée sur la figure (3), où elle est comparée avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature.

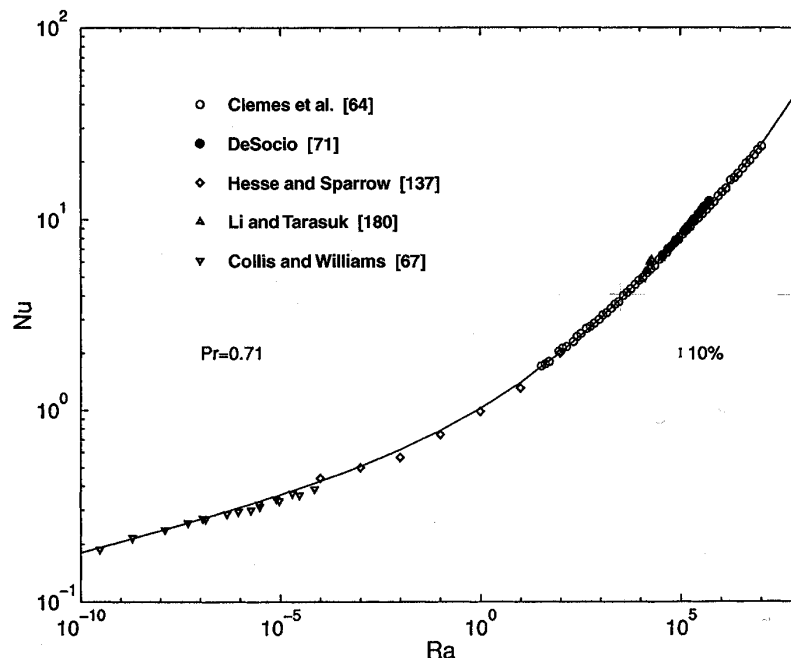


Figure 3 : Comparaison de la variation de  $\text{Nu}$  en fonction de  $\text{Ra}$  donnée par la corrélation (6) avec des résultats expérimentaux, pour un cylindre horizontal, long, isotherme, plongé dans l'air.

<sup>1</sup> Chapitre 4 du "Handbook of Heat Transfer" par W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho chez Mac Graw-Hill.



La détermination de  $h_{\text{ray}}(x)$  est beaucoup plus difficile à établir. Nous allons en faire une approximation en utilisant le résultat du cours donnant  $h_{\text{ray}}$  sur une paroi plane isotherme à température  $T_p$  et d'émissivité  $\varepsilon$ , vers un milieu ambiant hémisphérique à température  $T_\infty$  :

$$\boxed{h_{\text{ray}} = \varepsilon \sigma (T_p + T_\infty)(T_p^2 + T_\infty^2) \approx 4 \varepsilon \sigma T_m^3} \quad (7)$$

avec  $T_m = (T_p + T_\infty)/2$  et  $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Bien sûr, cette relation s'applique pour une configuration géométrique éloignée de celle du TP. Elle suffira cependant pour obtenir un ordre de grandeur convenable de  $h(x)$  sur les barres car le coefficient  $h_{\text{ray}}$  est faible par rapport à  $h_{\text{conv}}$ . En effet, on a vu en cours que l'émissivité d'un métal poli est très faible :  $0,05 < \varepsilon < 0,1$ . On utilisera donc la relation (7), en considérant que  $T_p = T_p(x)$ , pour évaluer  $h_{\text{ray}}(x)$  sur les barres d'aluminium et de laiton.

En vous servant d'Excel, vous pourrez donc évaluer et tracer la variation axiale des coefficients  $h_{\text{conv}}(x)$  et  $h_{\text{ray}}(x)$ , à partir des relations (6) et (7), puisque pour chaque coordonnée  $x$  des thermocouples vous connaissez la température  $T_p(x)$ . Vous en déduirez et tracerez  $h(x)$  et vous comparerez cette fonction avec la valeur moyenne de  $h$  mesurée au §2.4.1. Enfin, vous commenterez le résultat.

Notez que vous pouvez déjà programmer dans un tableur de type Excel, avant la séance de TP, les formules (6) et (7) permettant de calculer  $h_{\text{conv}}(x)$ ,  $h_{\text{ray}}(x)$  et  $h(x)$ .

Notez également que, pour alléger un peu le travail, le calcul des incertitudes sur  $h_{\text{conv}}(x)$ ,  $h_{\text{ray}}(x)$  et  $h(x)$  n'est pas demandé dans cette partie.

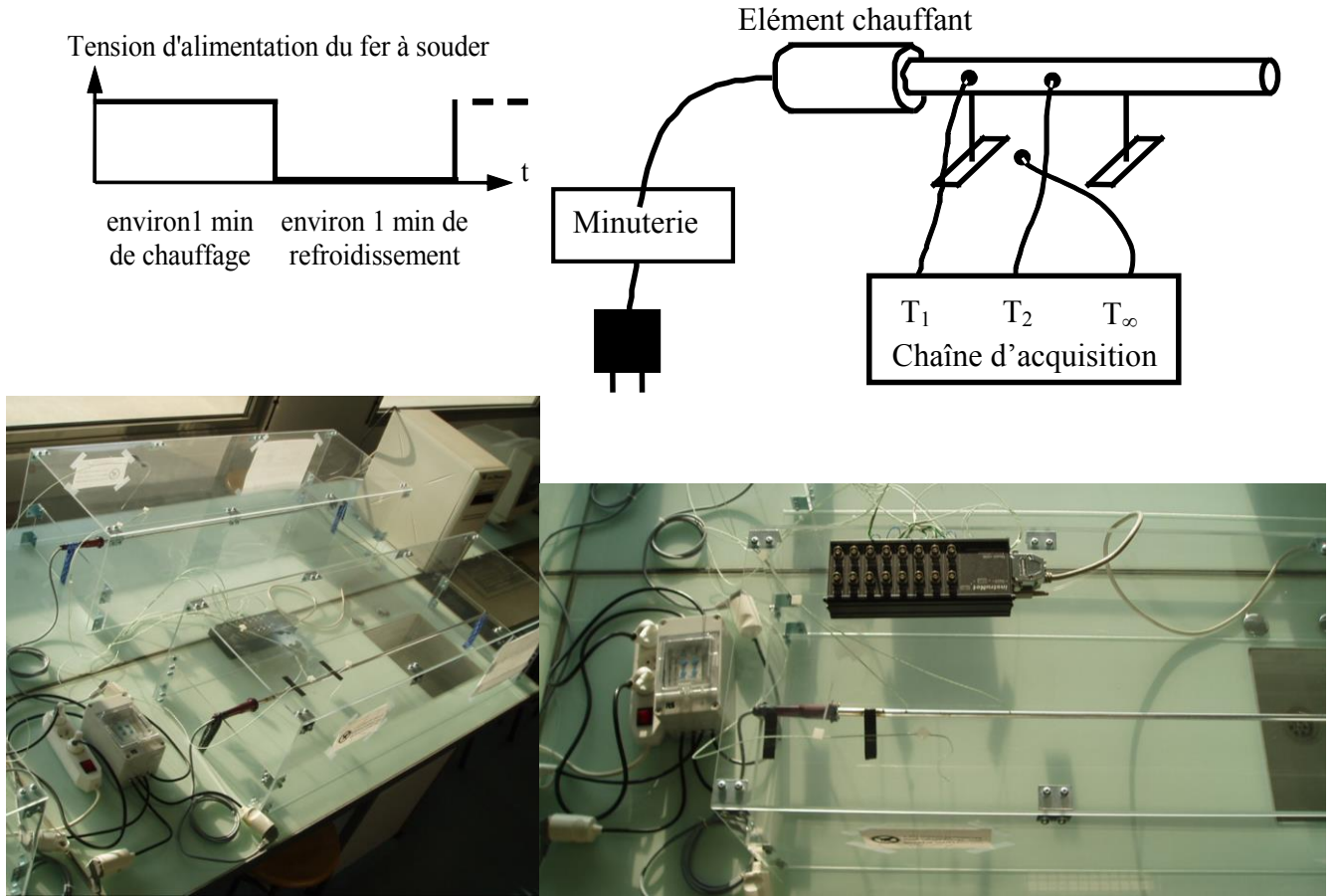
### 3. 2<sup>ème</sup> étape : détermination de $\alpha_{\text{alu}}$ et $C_{p\text{-alu}}$ par conduction instationnaire

#### 3.1 Dispositif et conditions expérimentales

Le dispositif expérimental est très similaire à celui présenté au §2.1 pour la conduction stationnaire, sauf qu'ici le boîtier en plexiglas ne contient qu'une seule barre : une barre d'aluminium de mêmes caractéristiques géométriques et physiques que celle utilisée dans la première partie du TP (cf. tableau 4). De plus, le fer à souder utilisé comme système de chauffage est commandé par une minuterie préprogrammée, branchée sur le secteur 220 volts alternatif, qui délivre un signal périodique continu : sur une **période qui dure un peu plus de 2 minutes**, le fer est mis sous tension pendant 1 minute environ, puis coupé pendant 1 minute environ (cf. figure 4). L'évolution de la température de la barre au cours du temps est mesurée par deux thermocouples ( $T_1$  et  $T_2$ ), de coordonnées  $x_1$  et  $x_2$ , placés sur l'axe et distants de 15 cm (cf. tableau 4). Un troisième thermocouple permet de mesurer la température ambiante ( $T_\infty$ ). Un système d'acquisition de données Instrunet, composé d'une carte et d'un logiciel d'acquisition, permet d'enregistrer l'évolution temporelle des températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_\infty$  et de traiter les mesures sous Excel. L'utilisation du logiciel Instrunet vous sera expliquée lors de la séance de TP par l'enseignant.

Matière	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	D (cm)	$x_1 \text{ (cm)}$	$x_2 \text{ (cm)}$
Aluminium	$2770 \pm 30$	1	$10 \pm 0,05$	$25 \pm 0,05$

Tableau 4 : Caractéristiques géométriques et physiques de la barre d'aluminium de conduction instationnaire et positions axiales, en cm, des deux thermocouples.



**Figure 4** : Schéma et photos du dispositif expérimental de conduction instationnaire

### 3.2 Modèle théorique : approximation de l'ailette en régime instationnaire

Pour identifier la diffusivité thermique  $\alpha_{\text{alu}}$  et la chaleur spécifique  $C_{p\text{-alu}}$  à partir des mesures expérimentales, on considère que la répartition spatio-temporelle de la température dans la barre d'aluminium est correctement approchée par un modèle d'ailette semi infinie instationnaire (cf. cours). Avec les notations introduites au §2.2 et en notant  $\theta(x, t) = T(x, t) - T_{\infty}$ , ce modèle s'écrit  $\forall (x, t) \in [0, +\infty[^2$  :

$$\text{Equation : } \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{4h}{kD} \theta - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\text{Conditions aux limites et initiale : } \begin{cases} \forall t \in [0, +\infty[, \theta(0, t) = T_0(t) - T_{\infty} = \theta_0(t) \\ \forall t \in [0, +\infty[, \lim_{x \rightarrow +\infty} \theta(x, t) = 0 \\ \forall x \in [0, +\infty[, \theta(x, 0) = T'_0(x) - T_{\infty} = \theta'_0(x) \end{cases} \quad (9)$$

où  $T_0(t)$  et  $T'_0(x)$  sont deux fonctions connues de  $t$  et de  $x$ . Dans le cas de ce TP, la température  $T_0(t)$  imposée en  $x=0$  est une fonction continue, périodique en temps, quasi sinusoïdale. Comme on s'intéresse uniquement au régime de chauffage périodique établi, autrement dit, comme la condition initiale  $T'_0(x)$  et le régime transitoire n'influence pas le régime établi auquel on s'intéresse dans ce TP, on peut rechercher la température dans la barre sous la forme :

$$\theta(x, t) = \theta_{m0} \exp(-lx) + A \exp(-mx) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \beta x - \Phi\right) \quad (10)$$

où  $\theta_{m0}$ =cste est la température moyenne du signal en  $x=0$ ,  $l$  est le taux de décroissance spatiale de la température moyenne le long de la barre,  $A$  est l'amplitude des oscillations du signal en  $x=0$ ,  $m$  est le taux de décroissance spatiale de l'amplitude du signal le long de la barre,  $\tau$  est la période temporelle du signal,  $\beta=2\pi/\lambda$  est le nombre d'ondes du signal de longueur d'onde  $\lambda$  et  $\Phi$  est le déphasage (inconnu) du signal, en  $x=0$ , à  $t=0$ , l'instant auquel vous avez déclenché l'acquisition des données.

La solution (10) vérifie donc les conditions aux limites et initiale suivantes :

$$\forall t \in [0, +\infty[, \theta(0, t) = \theta_{m0} + A \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \Phi\right) \quad (11)$$

$$\forall t \in [0, +\infty[, \lim_{x \rightarrow +\infty} \theta(x, t) = 0 \quad (12)$$

$$\forall x \in [0, +\infty[, \theta(x, 0) = \theta_{m0} \exp(-lx) + A \exp(-mx) \cos(-\beta x - \Phi) \quad (13)$$

### 3.3 Protocole expérimental

Brancher l'alimentation du fer à souder. Attendez **environ une heure** que la répartition de température atteigne un régime périodique établi. **Pendant ce temps, répondez aux questions théoriques du TP.** Avec l'aide de l'enseignant, lancez et configurez le logiciel Instrunet pour visualiser l'évolution temporelle des températures. Quand vous vous êtes assurés que le régime périodique établi est atteint, utilisez une fonction du logiciel Instrunet pour **enregistrer, toute les secondes, pendant 15 minutes environ (~ 1000 s), les valeurs des températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_\infty$  directement dans le tableur Excel.** Vous exploiterez uniquement la période de mesure la plus régulière.

### 3.4 Analyse théorique

#### 3.4.1 Analyse de la solution des ailettes instationnaires :

Expliquez comment se décompose la solution (10) des ailettes instationnaires. Pour cela, vous pouvez représenter graphiquement, la solution (13) à l'instant  $t=0$ . Pour vous aider, remarquez que  $\theta_{m0} \exp(-lx) = \theta_m(x) = T_m(x) - T_\infty$  représente la différence entre  $T_m(x)$ , la moyenne temporelle de la température à l'abscisse  $x$ , et  $T_\infty$ , la température ambiante.

En expliquant toutes les étapes de votre calcul et en considérant que le diamètre  $D$ , la masse volumique  $\rho$ , la période  $\tau$  et la conductivité  $k$  sont connus, montrez que les paramètres  $h$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $\beta$ , et  $\alpha$  vérifient les relations (14), (15) et (16) suivantes :

$$(m^2 - \beta^2 - \frac{4h}{kD}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\pi}{\alpha\tau} = m\beta \quad (15)$$

$$l^2 = \frac{4h}{kD} \quad (16)$$

Notez que, par la relation (15), si on arrive à déterminer  $m$  et  $\beta$ , alors on pourra évaluer la diffusivité  $\alpha$ , puisque la période  $\tau$  de chauffage est connue.

#### 3.4.2 Détermination de $m$ et $\beta$ par analyse de Fourier des signaux expérimentaux :

En remarquant que la fonction  $\theta(x, t)$  est une fonction continue et périodique **en temps** et en utilisant les résultats sur les séries de Fourier, on sait que la fonction  $\theta(x, t)$  peut se décomposer

sur une base de fonctions harmoniques :  $\theta(x, t)$  est égale à un développement infini de fonctions sinus et cosinus en temps. On a :

$$\theta(x, t) = \frac{a_0(x)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n(x) \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau} t\right) + b_n(x) \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau} t\right) \right) \quad (17)$$

$$\text{avec: } a_0(x) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) dt \quad (18)$$

$$a_n(x) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau} t\right) dt \quad (19)$$

$$b_n(x) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau} t\right) dt \quad (20)$$

D'autre part, en développant le cosinus dans la relation (10), on a:

$$\theta(x, t) = \theta_{m0} \exp(-lx) + p(x) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) + q(x) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) \quad (21)$$

$$\text{avec: } p(x) = A \exp(-mx) \cos(\beta x + \Phi) \quad (22)$$

$$q(x) = A \exp(-mx) \sin(\beta x + \Phi) \quad (23)$$

En identifiant les relations (17) et (21), on établit des relations reliant  $p(x)$  et  $q(x)$  à des intégrales de  $\theta(x, t)$  sur une période temporelle. On a :

$$\theta_{m0} \exp(-lx) = \frac{a_0(x)}{2} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) dt \quad (24)$$

$$p(x) = a_1(x) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) dt \quad (25)$$

$$q(x) = b_1(x) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \theta(x, t) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) dt \quad (26)$$

$$a_n = b_n = 0 \text{ pour } n > 1 \quad (27)$$

Grâce à l'enregistrement, toutes les secondes, de l'évolution des températures par le système d'acquisition de données, on dispose d'un échantillonnage discret, mais précis, des températures  $T_1(x_1, t)$ ,  $T_2(x_2, t)$  et  $T_{\infty}(t)$  et donc de  $\theta_1(x_1, t) = T_1 - T_{\infty}$  et  $\theta_2(x_2, t) = T_2 - T_{\infty}$ . On connaît donc  $\theta_1(x_1, t_i)$  et  $\theta_2(x_2, t_i)$ , où  $t_i = i \times \Delta t$  est le temps de la  $i$ -ème acquisition ( $i=1, \dots, N$ ), où  $\Delta t$  est le pas de temps de l'échantillonnage ( $\Delta t = 1$  s) et où  $N$  est le nombre total de valeurs de température acquises durant une période de chauffage  $\tau$ . Grâce à ces signaux discrets, en utilisant la méthode des trapèzes, on peut évaluer de manière discrète les intégrales des relations (25) et (26) et obtenir des expressions approchées et relativement précises de  $p(x)$  et  $q(x)$  :

$$p(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left[ \theta(x, t_i) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t_i\right) + \theta(x, t_{i+1}) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t_{i+1}\right) \right] \quad (28)$$

$$q(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left[ \theta(x, t_i) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t_i\right) + \theta(x, t_{i+1}) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t_{i+1}\right) \right] \quad (29)$$

A partir des mesures de températures en  $x_1$  et  $x_2$  et en utilisant un tableur tel qu'Excel, le calcul des sommes ci-dessus est aisé et permet d'obtenir  $p(x_1)$ ,  $q(x_1)$ ,  $p(x_2)$  et  $q(x_2)$ . D'après les définitions de

$p(x)$  et de  $q(x)$  données par les relations (22) et (23), on pourra alors en déduire les valeurs recherchées de  $m$  et  $\beta$  et donc de  $\alpha$  (cf. §3.5 ci-dessous).

### 3.5 Exploitation des mesures

1- Évaluez avec précision, en vous servant d'Excel, la valeur de la période  $\tau$  des signaux de température enregistrés. **Donnez les instants  $t_1$  et  $t_N$  de début et de fin de la période du signal que vous allez exploiter et donnez la valeur de  $N$ .**

2- Utilisez Excel pour calculer  $p(x_1)$ ,  $q(x_1)$ ,  $p(x_2)$  et  $q(x_2)$  tel que c'est décrit ci-dessus au §3.4.2.

3- En déduire les valeurs de  $\beta x_i + \Phi$  ( $i=1, 2$ ) en prenant l'arc-tangente du rapport  $q(x_i)/p(x_i)$ . Cependant, comme  $\forall x \in \mathbb{R}, \arctg(x) \in ]-\pi/2, \pi/2[$ , la valeur de l'arc (de l'angle) dont la tangente vaut  $\tg(x)$  est défini à  $\pm k\pi$  près (où  $k \in \mathbb{N}$ ). Ainsi, les valeurs de  $\beta x_i + \Phi$  seront définies à  $\pm k\pi$  près. Comme  $\beta x_i + \Phi$  représente le déphasage du signal de température en  $x_i$  par rapport à l'instant  $t=0$  du début de la mesure,  $\beta x_i + \Phi$  est un nombre positif. On supposera également que  $0 \leq \beta x_2 - \beta x_1 \leq 2\pi$ . Par conséquent, en vous servant des signes de  $p(x_1)$ ,  $q(x_1)$ ,  $p(x_2)$  et  $q(x_2)$ , qui sont reliés aux signes de  $\cos(\beta x_i + \Phi)$  et  $\sin(\beta x_i + \Phi)$  (cf. relations (22) et (23)), reportez sur le cercle trigonométrique de la figure 5, dans les secteurs qui leur correspondent, les points  $\beta x_1 + \Phi$  et  $\beta x_2 + \Phi$ , et rajoutez  $\pm k\pi$  aux valeurs obtenues pour satisfaire les conditions de signe ci-dessus.

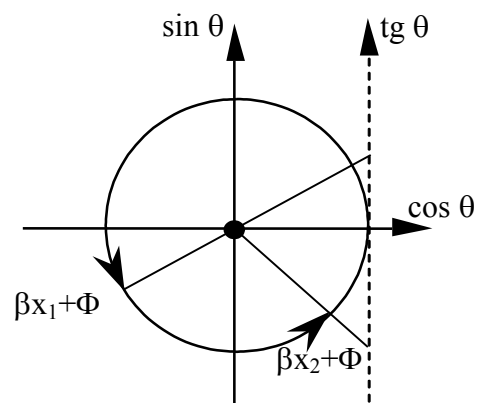
4- Donnez les expressions littérales de  $\beta$  et de  $m$  et calculez leurs valeurs avec Excel.

5- En expliquant votre démarche, en déduire les valeurs de  $\alpha_{\text{alu}}$  et du coefficient d'échange global moyen  $h$ . Analysez cette dernière valeur à la perspective des valeurs de  $h$  mesurées dans la première partie du TP (§2.4.1 et §2.5.3).

6- La valeur de  $k_{\text{alu}}$  a été déterminée au §2.4.2, en conduction stationnaire, avec une température maximale à la base de la barre de l'ordre de  $60$  à  $70^\circ\text{C}$  et une température moyenne de la barre de l'ordre de  $50^\circ\text{C}$ . En conduction instationnaire, la température maximale est de l'ordre de  $200^\circ\text{C}$  et la température moyenne de l'ordre de  $150^\circ\text{C}$ . Sachant que la conductivité des alliages d'aluminium augmente de  $10$  à  $20 \text{ W/m.K}$  environ quand la température augmente de  $100^\circ\text{C}$  et en utilisant la valeur de  $\rho_{\text{alu}}$  donnée dans le tableau 4, en déduire la valeur de  $C_{p\text{-alu}}$ .

7- Synthétisez dans un tableau les valeurs de toutes les propriétés thermophysiques des barres d'aluminium ( $\rho_{\text{alu}}$ ,  $k_{\text{alu}}$ ,  $\alpha_{\text{alu}}$ ,  $C_{p\text{-alu}}$ ) et précisez, pour chaque propriété, quand c'est possible, les incertitudes avec lesquelles elles ont été évaluées. Ce TP permet-il finalement de déterminer le type d'alliage d'aluminium dont les barres sont faites (cf. tableau 1) ? Critiquez le TP et concluez.

Figure 5 : Cercle trigonométrique et exemple de placement des "angles"  $\beta x_i + \Phi$ .



Pour aider à améliorer ce texte, merci de signaler à l'enseignant qui encadrera les séances de TP toutes les erreurs que vous relèverez ainsi que tout ce qui ne vous paraît pas clair.

# Détermination de champs de température par la méthode de l'analogie électrique

Cette séance de travaux pratiques a pour objectif de mettre en oeuvre la méthode de l'analogie électrique pour déterminer les champs de température dans deux problèmes de conduction en régime stationnaire. Le premier problème concerne la conduction monodimensionnelle dans un mur et le deuxième la conduction bidimensionnelle dans une ailette rectangulaire. Les résultats mesurés par l'analogie électrique seront comparés aux résultats calculés par l'analyse théorique.

## 1 Principe de l'analogie électrique

L'analogie électrique est utilisée pour analyser des phénomènes dont l'étude théorique ou expérimentale s'avère difficile. Elle permet une simulation du phénomène auquel on s'intéresse en le transposant sur un phénomène obéissant à des lois électriques analogues mais pour lequel l'expérimentation est plus facile.

Dans l'exposé qui va suivre, nous expliquons brièvement le principe de l'analogie électrique appliquée à la détermination des champs de conduction thermique<sup>1</sup>. Les bases théoriques de la méthode de l'analogie électrique reposent sur la similitude des processus de conduction thermique et électrique, en régime permanent ( $\partial/\partial t = 0$ ), sans source volumique de chaleur et de courant ( $\varpi = 0$ ) et avec des conductivités thermiques,  $k$ , et électriques,  $\frac{1}{r}$ , constantes (ici,  $r$  est la résistivité électrique)<sup>2</sup>. En effet, dans ce cas, les densités de flux de chaleur,  $\vec{q}$ , et de courant électrique,  $\vec{j}$ , dérivent toutes les deux d'un potentiel scalaire qui sont, respectivement, la température  $T$  et le potentiel électrique  $V$ . On a :

- $\vec{q} = -k \vec{\text{grad}} T$  (loi de Fourier),
- $\vec{j} = -\frac{1}{r} \vec{\text{grad}} V$  (la loi d'Ohm).

Les équations phénoménologiques des deux processus sont alors identiques :

- $\nabla^2 T = 0$  (conservation du flux de chaleur par conduction en régime stationnaire, sans terme de source et avec  $k = \text{cste}$ ),
- $\nabla^2 V = 0$  (conservation du courant électrique en régime stationnaire, ...).

L'analogie électrique consiste à concevoir, dans du papier graphité, bon conducteur électrique, une maquette équivalente du problème thermique que l'on souhaite étudier, à appliquer correctement les conditions aux limites (cf. §2) et à relever les équipotentielles électriques ( $V = \text{cste}$ ). La similitude des processus thermique et électrique permet alors de faire l'analogie entre les équipotentielles électriques et les isothermes.

## 2 Représentation des conditions aux limites

---

1. Le principe de l'analogie électrique peut s'appliquer à de nombreux autres phénomènes comme, par exemple, l'étude des écoulements en milieu poreux ou autour d'un profil d'aile.

2. On considérera que les hypothèses  $\partial/\partial t = 0$ ,  $\varpi = 0$ ,  $k = \text{cste}$  et  $r = \text{cste}$  sont vérifiées dans toute la suite du TP.

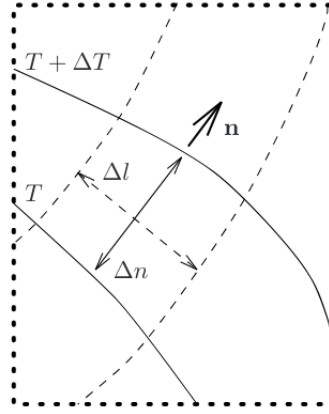


FIGURE 1 – Exemple de positionnement des lignes de flux (lignes pointillées) par rapport aux isothermes (lignes continues)

Dans ce TP, trois types de conditions aux limites thermiques interviennent :

**Les faces adiabatiques** sont les surfaces de flux nuls (isolées thermiquement).

Dans le problème électrique équivalent, ces faces ne sont pas traversées par un courant électrique. Elles sont obtenues par un découpage aux ciseaux du papier conducteur.

**Les faces isothermes** à la température  $T_p$  sont portées, dans le problème électrique équivalent, au potentiel  $V_p$  tel que :

$$\frac{T_p - T_m}{T_M - T_m} = \frac{V_p - V_m}{V_M - V_m},$$

où les indices  $m$  et  $M$  désignent des valeurs de références connues. Dans ce TP,  $m$  correspondra à la valeur minimale et  $M$  à la valeur maximale de  $T$  ou de  $V$ .

**Les faces solides soumises à un échange par convection** avec le milieu ambiant sont plus complexes à traiter. Dans cette situation, la température de la frontière est inconnue et il faut utiliser le concept de résistance thermique équivalente pour modéliser ce type de condition aux limites. Pour les problèmes de conduction/convection 1D, stationnaires, sans production de chaleur, on a vu en cours que la résistance de conduction est égale à  $e/(kS)$  et que la résistance par convection est égale à  $1/(hS)$ . Il s'agit alors de substituer, sur le papier graphité conducteur, cette résistance de convection par une résistance de conduction de même valeur. Cette résistance est modélisée en ajoutant à la maquette une *épaisseur supplémentaire de conduction*  $e_s$  telle que :

$$\frac{e_s}{k} = \frac{1}{h}.$$

### 3 Détermination du flux de chaleur

Pour un matériau homogène et isotrope, les lignes de flux thermique sont perpendiculaires aux lignes isothermes (cf. figure 1). Soit un tube de flux de section  $\Delta S = H \times \Delta l$ , où  $\Delta l$  est la largeur du tube (on considérera que  $\Delta l$  est petite) et où  $H$  est la profondeur du matériau dans la direction orthogonale au plan de la figure 1.

Alors, le flux de chaleur  $Q$  traversant ce tube de flux dans la direction du vecteur unitaire  $\vec{n}$  est :

$$Q = \int_{\Delta S} -k(\nabla T \cdot \vec{n}) dS.$$

Si on suppose que le gradient thermique est uniforme sur la section  $\Delta S$ , alors le flux de chaleur s'écrit :

$$Q = -k H \Delta l (\nabla T \cdot \vec{n}).$$

Si, de plus, la distance  $\Delta n$  entre les deux isothermes de valeurs  $T$  et  $T + \Delta T$  est suffisamment faible, le vecteur  $\vec{n}$  est un vecteur constant, normal aux isothermes  $T$  et  $T + \Delta T$ . On peut alors approcher le produit scalaire  $\nabla T \cdot \vec{n}$  par le quotient  $((T + \Delta T) - T)/\Delta n$ . Le flux de chaleur s'exprime finalement de la façon suivante :

$$Q = -k H \Delta l \frac{\Delta T}{\Delta n},$$

ou encore, si on suppose que  $H$  est de longueur unité :

$$Q = -k \Delta T \frac{\Delta l}{\Delta n}.$$

Il faut noter que les approximations utilisées pour calculer  $Q$  sont basées sur une discrétisation du problème par une méthode aux différences finies. Autrement dit, si le gradient thermique est non uniforme, les résultats seront d'autant plus précis que les mailles  $\Delta l$  et  $\Delta n$  seront petites.

Pour un matériau donné, si on trace un tube de flux qui traverse des isothermes séparées par un écart de température  $\Delta T$  constant alors, forcément, pour chaque maille de ce tube, le rapport  $\Delta l/\Delta n$  reste constant puisque le flux de chaleur traversant le tube doit se conserver.

Dans ce TP, pour tracer les lignes de flux, on commencera par tracer des isothermes régulièrement espacées de  $\Delta T$ . Puis on construira les tubes de flux en dessinant des courbes perpendiculaires aux lignes isothermes, distantes de  $\Delta l$  en moyenne. On vérifiera que le rapport  $\Delta l/\Delta n$  reste constant sur l'ensemble d'un même tube.

## 4 Montage expérimental

### 4.1 Description de l'appareil

L'appareil à analogie électrique est un appareil qui permet à la fois d'imposer et de mesurer des tensions électriques (potentiels électriques). L'appareil à votre disposition comporte 24 ou 40 voies. Ces voies sont réglables sur une plage de 0 à 20 V par des potentiomètres indépendants les uns des autres. La mesure des tensions est assurée par un voltmètre.

La maquette géométriquement semblable à la pièce du problème thermique étudié est découpée dans du papier conducteur graphité. Elle est soumise à différents potentiels électriques par l'application de tensions proportionnelles aux conditions aux limites thermiques souhaitées. Les conditions aux limites nécessitant un potentiel constant (conditions isothermes) sont établies par application d'un vernis conducteur (peinture d'argent).



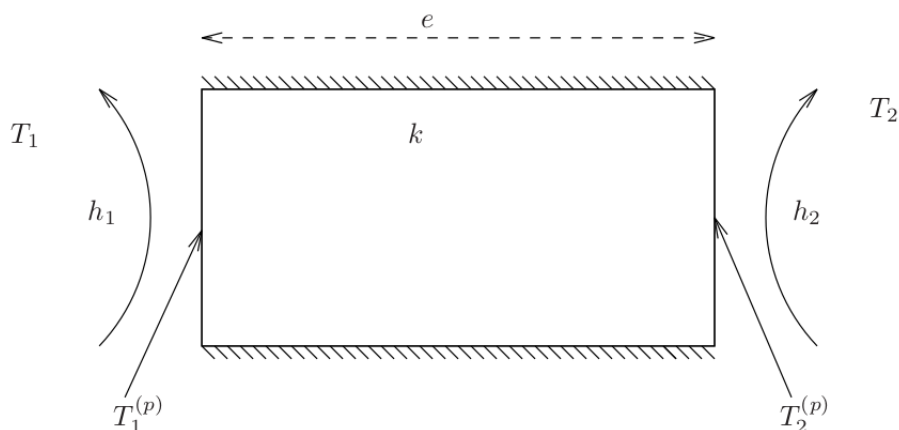


FIGURE 2 – Schéma du problème de conduction monodimensionnelle stationnaire dans un mur

## 4.2 Fabrication de la maquette

La conception de la maquette doit tenir compte de la forme de l'objet étudié mais aussi des éventuelles épaisseurs liées à la présence d'échange convectif (voir §2). Pour imposer un potentiel électrique sur un côté de la maquette, il faut prévoir une bande supplémentaire de  $5\text{ mm}$  de large en dehors du domaine à étudier sur laquelle de la peinture conductrice sera déposée.

## 4.3 Mesures

La mesure des potentiels électriques sur la maquette est réalisée par une pointe métallique reliée à un voltmètre. Pour déterminer les lignes isothermes, il faut relever un certain nombre de points appartenant à l'équipotentielle correspondant à la température désirée puis les marquer **à l'aide d'un crayon à papier bien aiguisé (éviter de trouser le papier graphité car cela déforme les lignes de potentiel)**.

Une fois que toutes les valeurs ont été relevées, réalisez une copie de la maquette sur du papier millimétré puis placez-la sous celle en papier conducteur et percez à chaque endroit marqué par le crayon : on obtiendra alors la trace des isothermes sur la maquette en papier millimétré ce qui permettra une meilleure lisibilité des résultats, aussi bien des isothermes que des tubes de flux.

# 5 Problèmes physiques étudiés et analyses demandées

## 5.1 Conduction dans un mur

Afin de se familiariser avec l'appareil à analogie électrique, on étudie dans un premier temps un problème de conduction monodimensionnelle dans un mur d'épaisseur  $e = 20\text{ cm}$  et de conductivité thermique  $k = 2\text{ W/mK}$  (cf. figure 2). Les deux faces de ce mur sont soumises à des échanges par convection ( $h_1 = 25\text{ W/m}^2\text{K}$  et  $h_2 = 10\text{ W/m}^2\text{K}$ ) avec des ambiances aux températures  $T_1 = 15^\circ\text{C}$  et  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  de part et d'autre du mur.

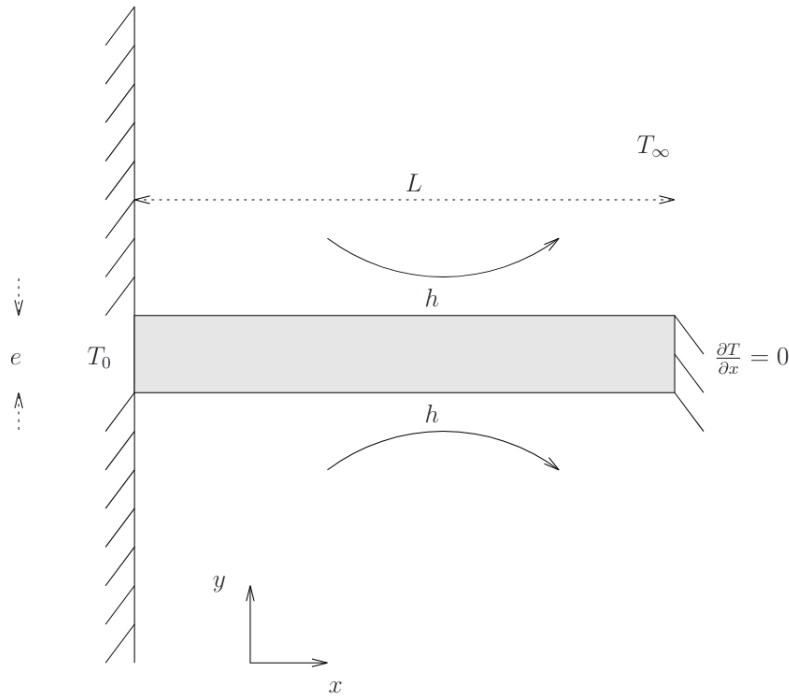


FIGURE 3 – Schéma du problème de conduction bidimensionnelle stationnaire dans une ailette

1. Réalisez la maquette à l'échelle 1/4 de ce premier problème.
2. Mesurer les tensions électriques en plusieurs points le long des parois du mur et dans les sections transverses du mur situées tous les centimètres. En déduire les valeurs de température correspondantes. Que constatez-vous ? Donnez les valeurs mesurées des températures  $T_1^{(p)}$  et  $T_2^{(p)}$  des parois 1 et 2 du mur (cf. figure 2). Bien sûr, vous tiendrez compte des incertitudes de mesure dans toutes vos analyses.
3. Représentez graphiquement la variation de la température à travers le mur et comparez la à celle déterminée théoriquement. On prendra garde d'effectuer tous les calculs et toutes les représentations graphiques en échelle réelle.
4. Déterminez la densité de flux conductif traversant le mur par la méthode de l'analogie électrique et comparez la à la valeur théorique.
5. A partir des températures  $T_1^{(p)}$  et  $T_2^{(p)}$  mesurées à la question 2., calculez les valeurs des densités de flux convectif  $h_1(T_1^{(p)} - T_1)$  et  $h_2(T_2^{(p)} - T_2)$ . Comparez ces valeurs avec les densités de flux conductif déterminées à la question précédente.

Analysez et commentez chacun de ces résultats.

## 5.2 Conduction de la chaleur dans une ailette

On s'intéresse au problème de conduction dans une ailette à profil rectangulaire, d'épaisseur  $e = 2 \text{ cm}$ , de longueur  $L = 10 \text{ cm}$ , de conductivité  $k = 60 \text{ W/mK}$ , isolée à son extrémité libre et dont la base est maintenue à la température constante  $T_0 = 200^\circ\text{C}$  (cf. figure 3). L'ailette baigne dans un fluide à température  $T_\infty = 30^\circ\text{C}$  et le coefficient d'échange par convection est noté  $h$ .

1. En tenant compte des symétries, réalisez deux maquettes à l'échelle 1 de ce deuxième problème, correspondant à deux coefficients de convection :  $h_1 = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour la maquette 1 et  $h_2 = 3000 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour la maquette 2.
2. Ces deux cas correspondent à deux nombres de Biot ( $Bi = \frac{he}{2k}$ ) différents, notés  $Bi_1$  et  $Bi_2$ . On rappelle que ce nombre caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction thermique transverse, ou encore, le rapport entre la résistance transverse par conduction de l'ailette sur la résistance par convection. Donnez les valeurs de ces deux nombres de Biot. Dans la suite, vous exploiterez en parallèle les résultats des deux maquettes en tenant compte de la valeur du nombre de Biot dans votre analyse. Lorsque c'est possible, vous pourrez tracer les courbes des deux cas sur le même graphe.
3. Sur les deux maquettes, tracez les isothermes de  $10^\circ\text{C}$  en  $10^\circ\text{C}$  qui passent par l'ailette et prolongez ces isothermes de 3 à 5 cm dans la zone d'échange convectif.
4. Relevez dans deux tableaux (un pour chaque cas), pour toutes les sections droites de l'ailette comprises entre  $x = 1 \text{ cm}$  et  $x = 10 \text{ cm}$  et distantes de 1 cm, les températures minimales  $T_{\min}(=T_p)$  et maximales  $T_{\max}$ . Complétez ces tableaux en calculant les températures moyennes  $T_{\text{moy}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$ , la différence de température  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ , le rapport  $\Delta T/T_{\text{moy}}$ , la température adimensionnelle expérimentale  $\left(\frac{T_{\text{moy}} - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right)_{\text{exp}}$  et la température adimensionnelle théorique pour une ailette mince (cf. cours) :

$$\left(\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right)_{\text{th}} = \frac{\cosh\left[m L \left(1 - \frac{x}{L}\right)\right]}{\cosh(mL)},$$

où  $m = \sqrt{\frac{hP}{kA}}$  et où  $P$  et  $A$  sont respectivement le périmètre et l'aire de la section transverse de l'ailette d'envergure infinie. Vous donnerez l'expression littérale de  $P/A$  en fonction de l'épaisseur  $e$  de l'ailette et les valeurs numériques de  $m_1$  et  $m_2$ .

5. Tracez graphiquement  $\Delta T/T_{\text{moy}}$  en fonction de  $x$  et expliquez vos résultats.
6. Représenter sur un même graphe  $\left(\frac{T_{\text{moy}} - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right)_{\text{exp}}$  et  $\left(\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}\right)_{\text{th}}$  en fonction de la distance relative à la base de l'ailette  $x/L$  et expliquez vos résultats.
7. Évaluez, à partir des isothermes tracées à la question 3., en utilisant la technique décrite au §3, le flux de chaleur  $Q_{\text{exp}}$  évacué à la base de l'ailette pour une unité d'envergure. Comparez  $Q_{\text{exp}}$  avec  $Q_{\text{th}} = -ke \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0}$  obtenu par la théorie des ailettes minces. Expliquez votre démarche et commentez vos résultats.
8. Relevez, aussi finement que possible, les tensions données par l'analogie électrique dans la section droite située à une distance  $x = 2 \text{ cm}$  de la base de l'ailette, en prolongeant les mesures de 2 ou 3 cm dans la zone d'échange convectif.
  - En déduire et représentez graphiquement l'évolution de la température en fonction de  $y$  en  $x = 2 \text{ cm}$ .
  - Déduire du graphique la densité de flux thermique pariétale  $-k \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p$ .
  - Calculez  $h(T_p - T_\infty)$  en  $x = 2 \text{ cm}$  et comparez la valeur obtenue avec la densité de flux thermique calculée au point précédent.
  - Commentez les résultats.
9. Critiquez le TP et concluez.

# TP de Rayonnement Thermique

## CUBE DE LESLIE

Cette séance de travaux pratiques a pour objectif d'étudier le rayonnement thermique de surfaces de différentes émissivités en fonction de la température en réalisant des mesures de flux radiatifs à l'aide d'une thermopile et d'un microvoltmètre.

### 1 Rappels théoriques

Tout corps à température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement thermique. L'intensité de ce rayonnement dépend non seulement de la température mais aussi de la nature et de la couleur de la surface et augmente au fur et à mesure que la température du corps solide augmente.

**Emittance d'un corps noir :** Un corps noir est un corps qui absorbe toutes les radiations électromagnétiques qu'il reçoit. De plus, à une température donnée et pour une longueur d'onde donnée, aucune surface ne peut émettre plus d'énergie qu'un corps noir.

La densité de flux de rayonnement émise par un corps noir de température uniforme  $T$ , s'appelle l'émittance du corps noir. Elle est notée  $M^0$  et est régie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M^0 = \sigma T^4 \quad (W/m^2)$$

où  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

**Emittance d'un corps réel :** Dans la pratique, une surface réelle émet moins d'énergie que la surface idéale du corps noir. L'émittance d'un corps réel à la température  $T$  est :

$$M = \varepsilon M^0 = \varepsilon \sigma T^4 \quad (W/m^2)$$

où  $\varepsilon$  est l'émissivité du corps. Sa valeur est égale à 1 pour la surface idéale dite "noire" et est comprise entre 0 et 1 pour les corps réels. Le tableau (Tab. 1) regroupe les valeurs des émissivités pour divers matériaux.

**Bilan radiatif sur une surface :** Le bilan radiatif sur une surface est l'évaluation de son flux de rayonnement "net", ou de sa densité de flux de rayonnement "nette"  $q_{net}$  (en  $W/m^2$ ).  $q_{net}$  est la différence entre  $q_e$ , la densité de flux radiatif émise par cette surface à la température  $T$  (qui représente une énergie perdue par rayonnement), et  $q_a$ , la part de la densité de flux radiatif incident qui est absorbée par cette surface

Métaux	
Acier poli	0,066 à 400K
Acier oxydé	0,79 de 500 à 900 K
Fer très poli	0,052 à 450 K
Feuille d'aluminium ordinaire	0,39 à 500 K
Aluminium très poli	0,039 à 500 K
Oxyde d'aluminium	0,63 à 500K
Argent pur et poli	0,02 à 500 K
Chrome poli	0,08 à 300K
Cuivre poli à l'émeri	0,03 à 300K
Or pur poli	0,018 à 500K
Peintures	
Laques brillantes	0,85-0,95 à 300K
Laque noire terne	0,96 à 300K
Laque d'aluminium	0,39 à 300K

TAB. 1 – Valeurs de l'émissivité  $\varepsilon$  de matériaux divers

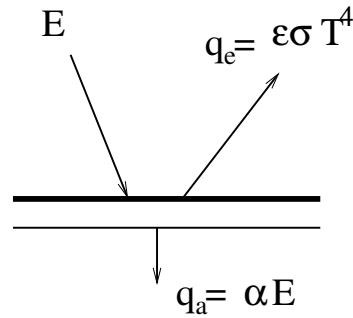


FIG. 1 – Bilan radiatif sur une surface

(qui représente un gain d'énergie). Les densités de flux  $q_e$  et  $q_a$  (exprimées en  $W/m^2$ ) sont définies de la manière suivante (voir Fig. 1) :

- la densité de flux perdue par une surface à la température  $T$  est la densité de flux émise par rayonnement :  $q_e = M = \varepsilon \sigma T^4$ .
- si cette surface reçoit une densité de flux de rayonnement  $E$ , encore appelée “éclairage” (exprimé en  $W/m^2$ ), alors la densité de flux absorbée par cette surface est  $q_a = \alpha E$ , où  $\alpha$  est l'absorptivité du corps. Sa valeur est comprise entre 0 et 1 pour un corps réel et est égale à 1 pour le corps noir. On note que pour de nombreuses surfaces, dites surfaces grises, l'absorptivité est égale à l'émissivité, c'est à dire  $\alpha = \varepsilon$ .

Ainsi, le bilan radiatif net sur une surface, supposée grise, est :

$$q_{net} = q_e - q_a = \varepsilon(\sigma T^4 - E)$$

Si l'éclairage  $E$  d'une surface provient de l'ensemble de l'environnement à la température  $T_\infty$ , on montre que l'éclairage est égal, dans ce cas, à la densité de flux émise par un corps noir à la température  $T_\infty$  :  $E = \sigma T_\infty^4$ . Ainsi, la densité de flux

radiatif nette perdue par une surface à la température  $T$  vers son environnement à la température  $T_\infty$  est :

$$q_{net} = q_e - q_a = \varepsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4)$$

**Flux échangé entre deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  :** On montre que la puissance rayonnée par le corps 1 et reçue par le corps 2 s'écrit :

$$Q_{1 \rightarrow 2} = S_1 F_{12} M_1$$

et que la puissance rayonnée par le corps 2 et reçue par le corps 1 s'écrit :

$$Q_{2 \rightarrow 1} = S_2 F_{21} M_2$$

où  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $M_1$  et  $M_2$  sont respectivement les surfaces et les émittances des corps 1 et 2 et où  $F_{ij}$  ( $i, j=1, 2$ ) est le facteur de forme entre les deux surfaces pour un flux partant de  $S_i$  et reçu par  $S_j$ . Le facteur de forme  $F_{ij}$  ne dépend que de la géométrie des deux corps et il représente la fraction de rayonnement émise par le corps  $i$  et reçue par le corps  $j$ . On rappelle la relation de réciprocité :

$$S_1 F_{12} = S_2 F_{21}$$

Ainsi, le flux échangé entre deux surfaces 1 et 2 s'écrit :

$$Q_{1-2} = S_1 F_{12} (M_1 - M_2) \quad (1)$$

Si les surfaces sont deux disques de rayon  $r_1$  et  $r_2$  situés dans deux plans parallèles distants de  $r_{12}$  et centrés sur le même axe, l'expression du facteur de forme est :

$$F_{12} = \frac{1}{2} (Z - \sqrt{Z^2 - 4 * X^2 Y^2})$$

avec

$$X = r_2/r_{12}, \quad Y = r_{12}/r_1, \quad Z = 1 + (1 + X^2)Y^2$$

## 2 Équipements

Comme le montre la photo de la Fig. 2, le banc d'essai est composé de trois parties principales :

- le cube de Leslie,
- la pile thermoélectrique,
- le microvoltmètre.

### 2.1 Le cube

Le cube de Leslie est pourvu de 4 surfaces verticales de nature différente, c'est à dire d'émissivité différente. Une face est métallique mate, une métallique polie, une laquée blanche et la dernière est laquée noire.

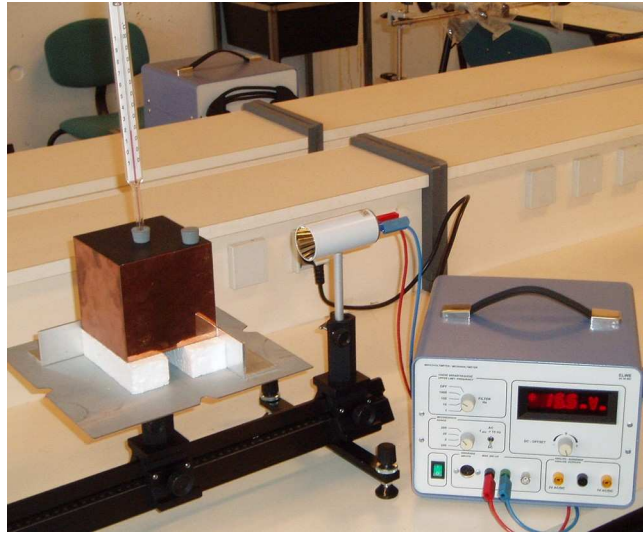


Figure 2: Photo du banc expérimental

## 2.2 La pile thermoélectrique

La pile thermoélectrique (ou thermopile) se présente comme un cylindre métallique ayant une ouverture en forme d'entonnoir poli au fond duquel est fixée une surface noire de 15 mm de diamètre à laquelle sont reliés plusieurs thermocouples branchés en série. La distance entre l'ouverture du cylindre de la thermopile, de diamètre  $D = 40$  mm, et la surface noire au fond de l'entonnoir est égale à  $3,3 \pm 0,1$  cm. Le rayonnement thermique incident reçu par la surface noire produit, au sein des thermocouples, une tension thermoélectrique  $U$ , proportionnelle à l'intensité du rayonnement thermique émis par le corps visé par la thermopile. Le temps de réponse de la thermopile est de 40 s pour 95% de la valeur du flux mesurée et sa sensibilité est d'environ  $2,8 \pm 0,3$  mV/mW.

## 2.3 Le microvoltmètre

La tension circulant dans les thermocouples de la pile thermoélectrique étant très faible, on utilise un microvoltmètre pour la mesurer. Son utilisation est la suivante. Le microvoltmètre se met en marche en activant l'interrupteur secteur situé au dos de l'appareil. Il faut le laisser chauffer pendant au moins 10 min avant de commencer les mesures. Il faut également procéder à un réglage précis du "zéro" de l'appareil à l'aide du potentiomètre. Pour cela, avec un câble électrique, il faut court-circuiter l'entrée et le neutre de l'appareil, avec l'offset sur CC, et utiliser le potentiomètre pour amener l'affichage numérique de la tension à zéro. Ensuite, on élimine le court-circuit et on connecte la pile thermoélectrique au microvoltmètre pour pouvoir effectuer les mesures de flux radiatif.

# 3 Manipulation

### Précautions importantes de manipulation :

- *Le cube étant rempli avec de l'eau initialement bouillante, il faut veiller à ne pas se brûler. En particulier, il ne faut vider le cube que lorsque l'eau a refroidi.*

- *Le cube de Leslie est posé sur un support rotatif. Cependant, comme le cube n'est pas fixé sur ce support, il faut veiller à ne pas le toucher durant la mesure pour ne pas le déplacer (ce qui fausserait la mesure), ni le faire tomber lorsque vous faites tourner le support.*

- *Le flux radiatif émis par le cube étant relativement faible, la mesure est très sensible aux influences environnantes (rayonnement thermique du soleil ou des personnes qui réalisent le TP). Pour cela, il faut impérativement éviter de toucher la pile thermoélectrique ou d'évoluer à proximité de celle-ci durant la mesure.*

- Placer la pile thermoélectrique de telle sorte que sa distance avec la face noire soit la plus petite possible. Mesurer cette distance précisément (elle est environ égale à  $2 \pm 0,1$  cm) et relever la température ambiante de la salle.
- Remplir le cube avec de l'eau préalablement chauffée dans la bouilloire. Placer la sonde de température dans l'ouverture centrale sur la face supérieure du cube.
- Relever la température de la face noire (pour cela tenir la pointe de la sonde de température sur la face intérieure correspondante) et la tension thermoélectrique  $U$  associée.
- Faire tourner le cube de Leslie sur son support pour que la face blanche se trouve face à la pile thermoélectrique. De même, relever la température de cette face et la tension thermoélectrique associée.
- Procéder de la même manière avec les faces métalliques polie et mate.
- Recommencer les mesures après une baisse de température d'environ  $5^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que la température du cube atteigne  $50^\circ\text{C}$ .
- Pour finir, relever de nouveau la température ambiante.

### 3.1 Exploitation des résultats

- Vérifier que la tension thermoélectrique mesurée varie approximativement avec la puissance quatrième de la température des faces du cube. Pour cela, tracer sur un même graphique les courbes  $U = f(T^4)$  associées aux 4 faces du cube et analyser ces courbes.
- En supposant que la face peinte en noire est une surface noire (au sens radiatif), évaluer les émissivités des faces blanche, polie et mate à partir de ces courbes, puis comparer ces valeurs avec celles données dans le tableau (Tab.1).
- Comparer le flux mesuré et le flux théorique  $Q_{12}$  donné par le calcul (équation (1)). Détailler votre raisonnement, justifier et analyser.
- Commenter l'ensemble des résultats. Dénombrer les principales causes d'incertitude sur les mesures et proposer des solutions pour les réduire.



# RAYONNEMENT SOLAIRE ET EFFET DE SERRE

T.P. est composé de deux manipulations. Le kit solaire va permettre de réaliser des expériences sur l'emploi de l'énergie solaire. Quant à la 2<sup>ème</sup> manipulation, elle permettra de démontrer l'effet de serre de l'atmosphère terrestre.

## I- Notions sur le rayonnement solaire et le mécanisme de l'effet de serre.

### 1. Rayonnement solaire et rayonnement tellurique

L'effet de serre fait intervenir à la fois le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge. Même si le premier nous est familier, le second a souvent un côté mystérieux. Pourtant ils sont de même nature physique : ce sont des rayonnements électromagnétiques qui ne se distinguent que par leur longueur d'onde.

Tout corps émet un rayonnement dont la puissance totale et le spectre (c'est-à-dire la répartition de la puissance émise en fonction de la longueur d'onde) dépend de la température de ce corps. Cette dépendance fut expérimentalement mise en évidence dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Puis Max Planck, au début du XX<sup>ème</sup> siècle, introduit la notion de quantum d'énergie pour établir la théorie de l'émission de ce rayonnement. Cette loi de Planck fut à l'origine de la théorie quantique, théorie qui bouleversa profondément la physique du début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K.

A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3  $\mu\text{m}$  (violet-bleu) à 0,7  $\mu\text{m}$  (rouge).

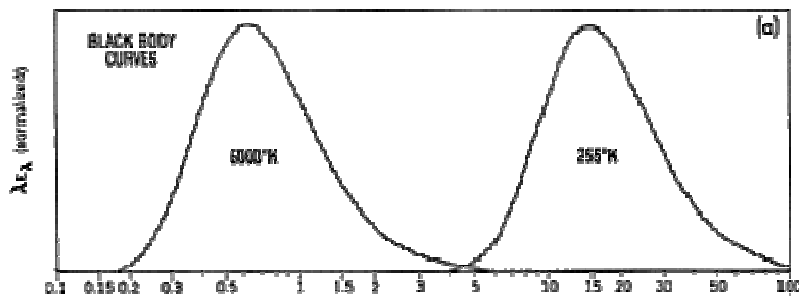
La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre, ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde.

Vers 1800, William Herschell qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au delà du rouge.

Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet).

Longueurs d'onde constituant le rayonnement solaire température 6 000 K		
domaine ultraviolet inférieure à 0,3 $\mu\text{m}$ (violet-bleu)	domaine visible de 0,3 $\mu\text{m}$ (violet-bleu) à 0,7 $\mu\text{m}$ (rouge)	domaine infrarouge au delà de 0,7 $\mu\text{m}$ (rouge)
10%	40%	50%

Un corps à température ambiante (255 K) émet un rayonnement dont le spectre est très différent de celui du Soleil.

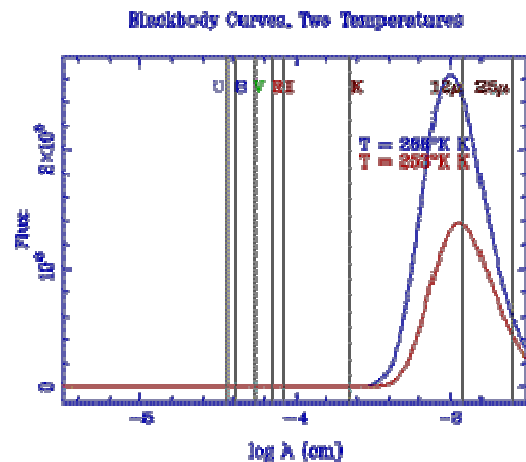
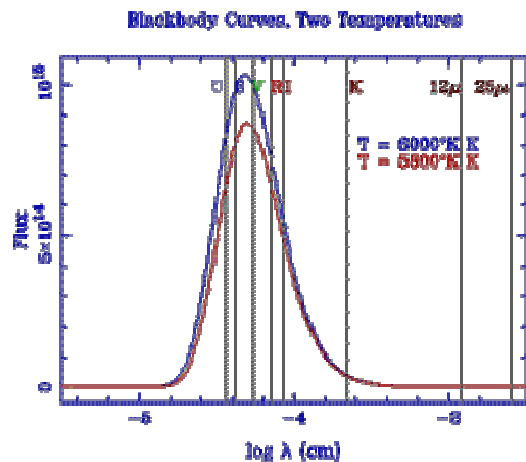


Spectres d'émission d'un corps noir à la température du Soleil (6 000 K) et à une température de 255 K.

### ATTENTION !!

Les deux spectres à gauche sont normalisés : leurs maxima sont identiques.

Ce n'est pas le cas pour les spectres ci-dessous. L'amplitude du spectre à 6 000 K est 107 fois plus importante que pour le spectre à 253 K.



La quasi totalité de l'énergie est émise dans l'infrarouge lointain (de 4  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$ ). C'est pour cela que, dans le noir, un corps à température ambiante n'est pas vu par notre œil. C'est seulement lorsque l'on dépasse 700 °C environ qu'un objet commence à être visible (un morceau de fer incandescent par exemple). Dans les lampes classiques la température du filament de tungstène est d'environ 2700 °C. Les spectres du rayonnement solaire et du rayonnement infrarouge des corps à température ambiante appartiennent ainsi à deux domaines spectraux séparés par une frontière vers 4  $\mu\text{m}$ .

## 2. Le mécanisme de l'effet de serre, analogie avec la serre

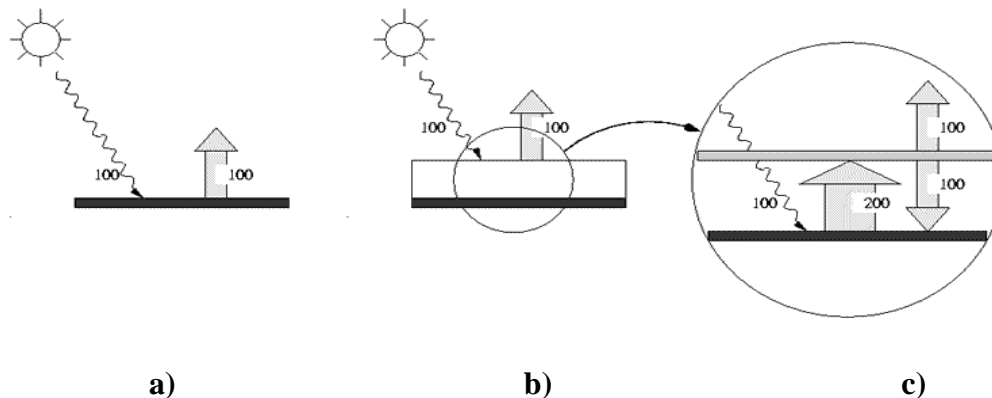
L'effet de serre repose sur le fait que certains matériaux ont des propriétés très différentes dans ces deux domaines spectraux. C'est notamment le cas des matériaux utilisés pour les vitres (verre, plexiglas, polycarbonate...) qui sont transparents au rayonnement solaire mais qui absorbent le rayonnement infrarouge.

**Illustration :** Prenons une plaque noire dont la face arrière est isolée thermiquement. On ne considère que les échanges radiatifs (les échanges par convection et conduction sont supposés négligeables).

(a) : si la plaque est seule, elle reçoit et absorbe le rayonnement solaire. Cette puissance absorbée vaut 100 dans une unité arbitraire. A l'équilibre thermique, les puissances reçues et perdues par la plaque sont égales, et la puissance du rayonnement infrarouge émis par la plaque vaut également 100 dans nos unités.

(b) : on recouvre la plaque par une vitre parfaitement transparente au rayonnement solaire et parfaitement opaque au rayonnement infrarouge lointain. A l'équilibre thermique, le système "vitre-plaque" perd comme précédemment autant d'énergie qu'il en gagne. La seule différence est que

maintenant c'est la vitre qui a émis le rayonnement infrarouge car, comme elle est parfaitement opaque à ce rayonnement, aucun rayonnement émis par la plaque ne peut être reçu à l'extérieur.



(c) : regardons maintenant les échanges à l'intérieur du système "vitre-plaque". Si la vitre émet 100 vers l'extérieur, par raison de symétrie elle émet également 100 vers la plaque. Celle-ci reçoit donc en plus du rayonnement solaire le rayonnement infrarouge émis par la vitre. A l'équilibre thermique, la plaque doit perdre par rayonnement infrarouge autant d'énergie qu'elle en gagne, c'est à dire 200 dans nos unités.

On peut vérifier que la vitre est alors aussi en équilibre : elle reçoit 200 et émet 200 (100 vers l'extérieur, 100 vers la plaque).

Ainsi un observateur qui regarde de loin n'est pas capable de savoir si notre plaque est recouverte ou non par une vitre car dans les deux cas il reçoit un même rayonnement infrarouge. La situation de la plaque est très différente puisque dans le cas (a), elle émet 100 alors que dans le cas (b), elle émet 200. Et cette émission plus importante se fait via une augmentation de la température de la plaque.

### 3. Les gaz atmosphériques et l'effet de serre

Sur Terre, les constituants qui interviennent dans l'effet de serre naturel sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, méthane...

Le rayonnement solaire, essentiellement visible, est réfléchi à 30% par l'atmosphère et le sol, 20% de ce rayonnement solaire est absorbé par l'ozone et la vapeur d'eau.

Il reste alors 50% du rayonnement solaire, qui est absorbé par la surface puis réémis sous forme de rayonnement infrarouge. Certains auteurs parlent de rayonnement infrarouge tellurique.

L'atmosphère terrestre absorbe alors 95% de ce rayonnement infrarouge tellurique (50% par la vapeur d'eau, 25% par le dioxyde de carbone, le reste par le méthane, l'ozone (qui a une bande d'absorption centrée à 11,4 microns), les nuages...) puis réémet toujours dans l'infrarouge un rayonnement contribuant à l'échauffement du sol.

Lorsqu'un corps absorbe à une fréquence donnée, il émet aussi et son émissivité est monochromatique et égale à son absorption. Donc pour un corps à une température donnée, le spectre d'émission est égal au spectre d'absorption.

Cet effet de serre est important car il permet à la température de surface de la Terre d'être environ 30 °C plus élevée que si l'atmosphère n'était pas présente.

On estime que la vapeur d'eau est responsable d'un effet de serre naturel de + 20°C alors que le CO<sub>2</sub> contribue à une élévation de la température d'équilibre à la surface de la Terre de + 10°C.

Les gaz atmosphériques qui interviennent dans l'effet de serre sont très minoritaires : ils constituent moins de 1 % de l'atmosphère.

	H2O		CO2	CH4	N2O	O3			CFCs
	troposphère	stratosphère				troposphère non polluée	troposphère polluée	stratosphère	
Concentration dans l'atmosphère des Gaz à effet de serre	0 à 3 %	quelques ppmv	365 ppmv	1,7 ppmv	0,3 ppmv	0,05 ppmv	0,4 ppmv	0,1 à 6 ppmv	760 pptv

Actuellement, les hommes, de par leurs activités, augmentent notablement la concentration des gaz à effet de serre, ce qui fait craindre un réchauffement significatif de la température moyenne de notre planète.

Quelques gaz à effet de serre d'origine anthropique	CO2	CH4	N2O	CFCs
Sources anthropiques principales	Combustibles fossiles déforestation	Rizières élevage marais combustibles fossiles	Engrais azotés déforestation biomasse	Aérosols gaz réfrigérants mousses
Pouvoir relatif d'absorption du rayonnement INFRAROUGE (par unité de volume, ramené à celui du CO2)	1	32	160	16 000
Contribution à l'intensification de l'effet de serre ('effet de serre <b>additif</b> ) entre 1980 et 1990 d'après Houghton et al., 1990, Dautray, 1991.	55 %	15 %	4 %	19 %

Quelques gaz à effet de serre d'origine anthropique	CO2	CH4	N2O	CFCs
Unités	ppmv 10-6 en volume	ppmv 10-6 en volume	ppbv 10-9 en volume	pptv 10-12 en volume
Avant la période industrielle (1850)	280	0,8	288	0
Actuellement	365	1,7	310	800
<b>Accroissement annuel de la concentration</b>	<b>0,5 %</b>	<b>0,5 %</b>	<b>0,25 %</b>	<b>4 % jusqu'en 1990</b> <b>0% actuellement</b>
Concentration estimée en 2030	400 à 450	2,2 à 2,5	330 à 350	700
Durée de séjour dans l'atmosphère	50-200 ans (1)	10 ans	150 ans	60 à 120 ans

(1) La durée du cycle bio géochimique du carbone explique les incertitudes sur la durée de séjour du CO2 dans l'atmosphère.

Estimation de la production mondiale anthropique annuelle	CO2		CH4		CFCs
Unités	GtC/an Milliards de tonnes		Mt/an Millions de tonnes		kt/an Milliers de tonnes / an
Total Incertitudes de l'ordre de 30 %	<b>8,6</b>		<b>550</b>		<b>1 000 jusqu'en 1991</b> <b>actuellement,</b> <b>quaquement nulle</b>
	déforestation	2,8	élevage	76	
	pétrole	2,3	rizières	66	
	charbon	2,3	fuite gaz	53	
	gaz	0,95	déchets	44	
	ciment	0,14	mine	16	
<b>Reste dans l'atmosphère et contribuent à intensifier l'effet de serre</b>	<b>3,5 GtC/an</b>		<b>43 Mt/an</b>		<b>771 kt/an</b>

Si des incertitudes demeurent quand à l'effet précis de ces perturbations, il n'en reste pas moins que l'homme est en train de modifier le climat à l'échelle globale ...

## **II- EXPERIENCE 1 : LE KIT SOLAIRE**

Le kit solaire est constitué de 4 corps de mesure solaires avec différents revêtements superficiels, 4 thermomètres, 2 boîtiers isolants thermiques et un couvercle servant à démontrer l'effet de serre. Quatre séries de mesure démontrent de façon impressionnante l'évolution de la température maximale des corps de mesure.

### **PRECAUTIONS**

Les thermomètres sont des ustensiles en verre. Ils risquent de se briser ! ne pas les exposer à des charges mécaniques ; ne les laissez pas tomber.

### **MATERIEL UTILISE**

#### **4 corps de mesure solaire :**

Matériau : cuivre  
Dimensions : 60mm x 60mm  
Couleur : 1 blanc ; 3 noirs

#### **2 boîtiers isolants :**

Matériau : mousse  
Dimensions : 12 x 12 x 5 cm<sup>3</sup>

**1 plaque de verre acrylique :** 10cm x 10cm

**4 thermomètres :** -10°C - + 100°C

### **1. Réalisation de l'expérience**

- . Montez la lampe à halogène à environ 25 cm devant les corps de mesure. L'éclairage correspond au rayonnement solaire estival.
- . Avant l'expérience, lisez et notez la valeur du thermomètre.
- . Allumez la lampe.
- . Lisez la température toutes les minutes et notez les valeurs dans un tableau.

Les différents corps de mesure atteignent leur température maximale à différents moments. Lorsque celle-ci est atteinte, vous pouvez interrompre l'expérience.

### **2. Exploitation des résultats**

- Afin de vous aidez dans vos commentaires, tracez l'augmentation de la température en fonction du temps pour les 4 corps de mesure.
- Qu'observez-vous sur ces courbes ?
- A quoi sert le boîtier isolant ?
- Quel est le rôle de la plaque acrylique ?
- Autres commentaires et conclusion.

### **III- EXPERIENCE 2 : Appareil de démonstration de l'effet de serre**

Cet appareil permet une démonstration de l'effet de gaz propulseurs sur l'absorption du rayonnement infrarouge.

#### **PRECAUTIONS**

Le gaz butane utilisé lors de l'expérience est **inflammable**. Un soin particulier sera apporté lors du remplissage des tubes métalliques avec du butane.

La pile thermoélectrique est un appareil **ultrasensible** de mesure de rayonnement.

#### **MATERIEL UTILISE**

1 lampe à incandescence à réflecteur 60 W

1 cuvette sur manche

1 disque métallique noir sur manche

1 tube plastique simple, obturé par une feuille de cellophane

1 tube métallique avec des robinets, obturé par une feuille de cellophane

1 thermopile : Dans un boîtier métallique avec entonnoir poli, la pile thermoélectrique contient une surface noire de 15 mm de diamètre à laquelle sont reliés 17 thermocouples. Le rayonnement thermique incident produit sur les thermocouples une tension thermique  $U$  proportionnelle à l'intensité du rayonnement thermique.

1 appareil de mesure pour millivolts.

#### **1. Réalisation de l'expérience**

- Visser la lampe à incandescence à réflecteur de 60 W dans la douille et orienter son flux lumineux le long de la plaque d'assise.
- Puis, remplir d'eau la cuvette en plastique.
- Placer le tube d'air ou de gaz de telle sorte qu'il se trouve à à environ 1 cm de la cuvette ou du disque métallique. Les ouvertures des deux tubes sont obturées par une feuille de cellophane. Le tube de gaz est doté de deux robinets.
- Placer la thermopile de telle sorte que son ouverture fait face au rayonnement arrivant et la relier au microvoltmètre.
- Comme gaz on se sert du butane qui est disponible à l'état liquide dans un flacon. Pour remplir le tube métallique, relier le flacon de butane à un robinet à l'aide du tuyau mince. Ouvrir les deux robinets. Puis, appuyer sur la soupape pour permettre au gaz de pénétrer dans le tube. Ne pas toucher le tube métallique, ne pas approcher l'appareil d'une flamme nue.

#### **2. Principe de fonctionnement**

La lampe à incandescence à réflecteur génère une lumière visible et un rayonnement infrarouge. En raison de la température relativement basse du filament par rapport à celle du soleil, le seuil maximum du rayonnement se situe dans la gamme infrarouge. Par conséquent, le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde est bien plus important que celui du soleil. Pour affaiblir cette partie du rayonnement, on place la cuvette remplie d'eau dans la marche du rayonnement. La lumière, tout comme le rayonnement solaire, est alors constituée essentiellement de lumière visible et de rayons infrarouges de faible longueur d'onde. Maintenant, ce rayonnement traverse le gaz dans le tube métallique, l'absorption de la fine feuille de cellophane étant négligeable. La thermopile enregistre le rayonnement arrivant.

Si la cuvette remplie d'eau est remplacée par la tôle métallique noircie, la tôle est réchauffée par l'absorption du rayonnement incident. Suite à la température relativement faible comparée à celle du filament, la tôle émet un rayonnement infrarouge de très grande longueur d'onde. Ce rayonnement, traversant également le gaz dans le tube métallique, est mesuré par la thermopile.

### 3. Manipulation

La suite d'expériences réalisées va permettre de démontrer l'effet de serre en simulant les processus physiques que déclenche en permanence le rayonnement solaire dans l'air et à la surface de la Terre.

*Remarques préliminaires :*

- *Vérifier que tous les appareils nécessaires sont bien centrés les uns avec les autres.*
- *Avant toutes mesures sur le microvoltmètre, court-circuiter l'entrée et ajuster le point neutre avec l'offset CC.*
- *Éliminer le court-circuit et connecter le microvoltmètre à la thermopile.*
- *Une fois le montage de l'expérience réalisé, attendre quelques minutes avant de procéder à la saisie des valeurs de mesure.*
- *La valeur de mesure peut être faussée par la chaleur du corps ou d'autres influences extérieures.*
- *Ne pas toucher l'appareil pendant la mesure.*
- *Éviter tout rayonnement solaire direct.*

**Pour chaque expérience, mesurer la tension électrique.**

**a)** Allumer la lampe à incandescence à réflecteur et placer la cuvette remplie d'eau dans la marche du rayonnement, le tube d'absorption contenant de l'air.

**b)** Avec le même montage que précédemment, remplacer le tube métallique rempli d'air par le tube contenant le gaz butane.

**c)** A présent, remplacer la cuvette remplie d'eau par le disque métallique noir. Attendre environ 2 minutes puis placer le tube métallique contenant l'air devant la thermopile.

**d)** Avec le même montage, remplacer le tube contenant de l'air par le tube rempli de butane.

### 4. Exploitations des résultats

- Regrouper dans un tableau l'ensemble de vos résultats et commenter.
  - Le gaz butane absorbe-t-il le rayonnement à onde courte dans les mêmes quantités que l'air ? Quant est-il pour les grandes longueurs d'onde ?
  - Comment expliquer que la tension obtenue avec la tôle noire soit plus faible que celle obtenue avec la cuvette remplie d'eau ?
  - Est-ce le gaz butane ou l'air qui absorbe le mieux le rayonnement infrarouge ?
- A partir de l'ensemble de ces résultats et commentaires, présenter une synthèse sur le rayonnement solaire et le mécanisme de l'effet de serre.