

# CONDUCTION THERMIQUE

## MESURE DES CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX

Les caractéristiques thermophysiques des matériaux conditionnent les échanges de chaleur à l'intérieur et à la périphérie de ceux-ci. Tout bilan thermique nécessite leur connaissance. L'objet de ce TP est de déterminer les propriétés thermophysiques qui interviennent dans les problèmes de conduction.

### 1. Rappels de notion élémentaires

Les caractéristiques thermophysiques peuvent être classées arbitrairement en caractéristiques de surface et caractéristiques internes.

#### 1.1. Rayonnement et propriétés des surfaces

Un corps solide qui reçoit un rayonnement incident, de nature spectrale quelconque, absorbe une partie de l'énergie incidente en la transformant en chaleur, en réfléchit une autre partie et transmet le reste.

Tout corps à la température  $T$  émet à sa périphérie une quantité d'énergie qui dépend de sa température et des caractéristiques de la surface du matériau.

#### 1.2. Convection et coefficient d'échange surfacique

Un corps solide en contact avec un fluide en mouvement échange avec celui-ci une certaine quantité de chaleur  $Q = hS\Delta T$  où  $h$  est le coefficient d'échange convectif,  $S$  la surface d'échange et  $\Delta T$  la différence de température entre la surface du corps et le fluide en dehors de la couche limite thermique.

#### 1.3. Conductivité, diffusivité, chaleur massique

La faculté qu'a la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps ou d'y être stockée dépend des propriétés internes du corps : conductivité, capacité calorifique, diffusivité et densité.

### 1.3.1. Conductivité thermique

La notion de conductivité thermique est abordée en régime permanent, dans le cas le plus simple de la propagation unidimensionnelle de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur  $e$  et de températures uniformes  $T_1$  et  $T_2$  sur les faces, Figure 1.

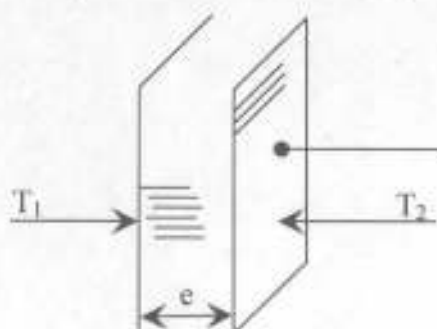


Figure 1: Exemple d'un mur homogène

### 1.3.2. Chaleur massique $C_p$

L'équation calorimétrique  $Q = mC_p(T_2 - T_1)$  montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse  $m$  quand sa température augmente de  $T_1$  à  $T_2$  est proportionnelle à  $C_p$ , chaleur massique du solide considéré.

## 2. Mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique

La conductivité et la diffusivité thermiques sont les caractéristiques thermiques les plus importantes à prendre en compte pour le choix d'un matériau échangeur de chaleur. Cependant, en pratique, il faut distinguer les cas où l'on cherche à transférer le maximum de chaleur (échangeurs thermiques industriels), et les cas où l'on veut minimiser ce transfert (isolation thermique de l'habitat).

### 2.1. Mesure de la conductivité thermique

#### 2.1.1. Description de l'installation, figures 2, 3 et 4

L'installation est composée des éléments suivants (Figure 2):

- capacité isotherme A de  $1,81 \times 0,74 \times 0,26$  m pourvue à sa base d'un échangeur thermique R ;
- deux boîtes en Styrodur™, pourvue chacune d'un émetteur de chaleur de faible puissance ;

- un régulateur de température de fluide alimentant l'échangeur R (cryostat à bain de circulation).

L'émetteur de chaleur est constitué d'une plaque chauffante qui dispense un flux thermique tel que, sur la face supérieure de l'échantillon, nous ayons les caractéristiques suivantes :

- la densité de flux est constante en tout point ;
- les lignes de flux sont normales au plan d'essai.

Les capteurs de température, thermosondes à résistance de platine (PT100), sont des sondes de surface et d'ambiance réparties en divers endroits de l'appareil et, essentiellement, sur les deux faces de l'échantillon E (Figure 4).

Chaque plaque chauffante est alimentée en courant variable à l'aide d'un variateur de puissance. Un contrôleur utilisant la logique floue permet de réguler cette puissance en fonction des températures d'ambiance mesurées. Le pilotage du banc expérimental est assuré par un micro-ordinateur (Figure 2) doté d'une application développée sous Labview. Le pilotage consiste en l'acquisition des différentes températures, le calcul des puissances nécessaires (contrôle flu) et l'envoi des ordres aux actionneurs (Sorties sur châssis SCXI).

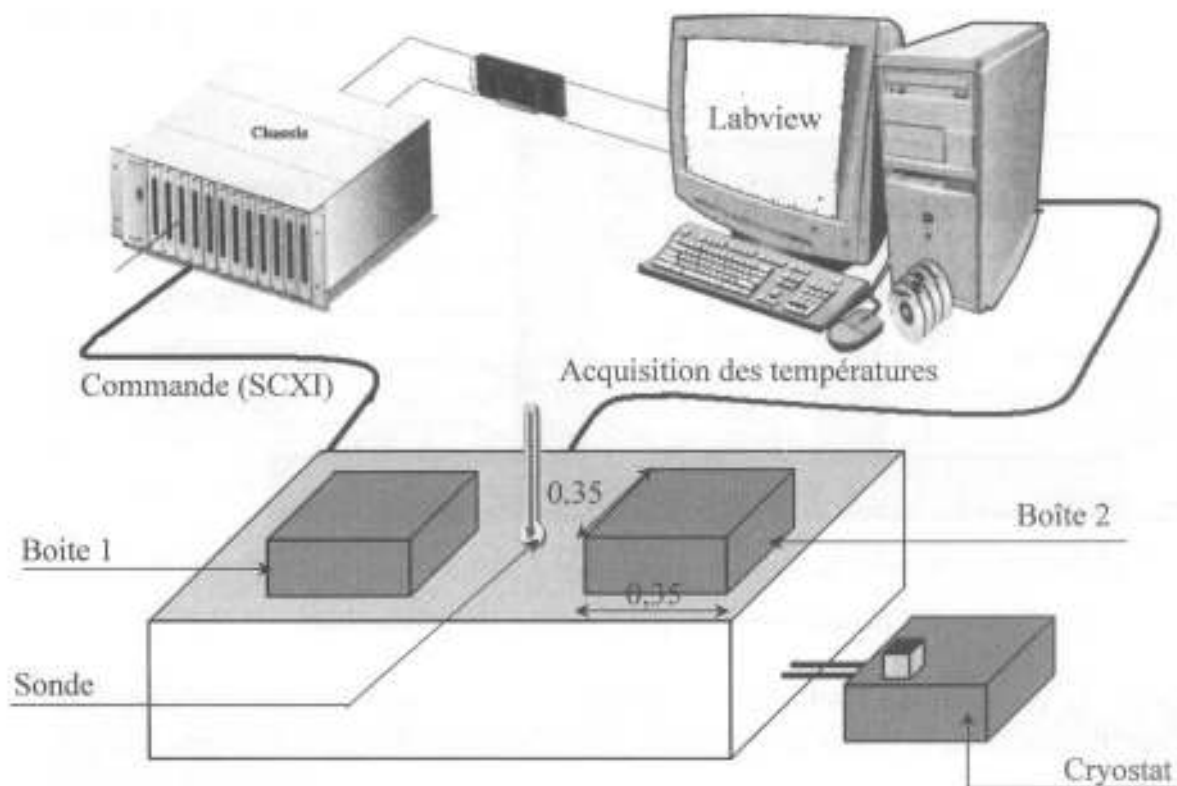


Figure 2 : Représentation en perspective du dispositif de la méthode des boîtes

Les échantillons utilisés sont des parallélépipèdes de 27cm de côté. L'épaisseur peut varier de 3 à 7 cm. En ajustant cette épaisseur, on peut effectuer des mesures sur des matériaux dont les conductivités sont comprises entre 0,02 et 3,5  $W.m^{-1}.K^{-1}$ , c'est-à-dire en fait tous les matériaux utilisés dans le bâtiment, à l'exception des métaux.

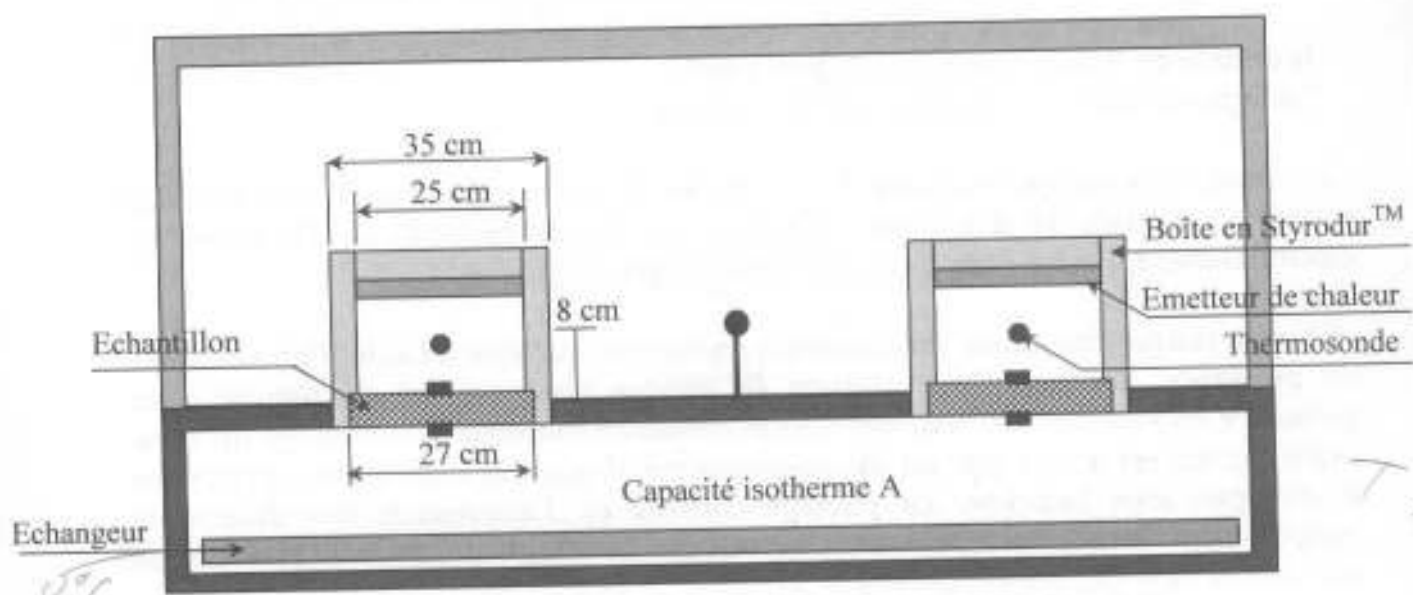


Figure 3 : Représentation en coupe du dispositif

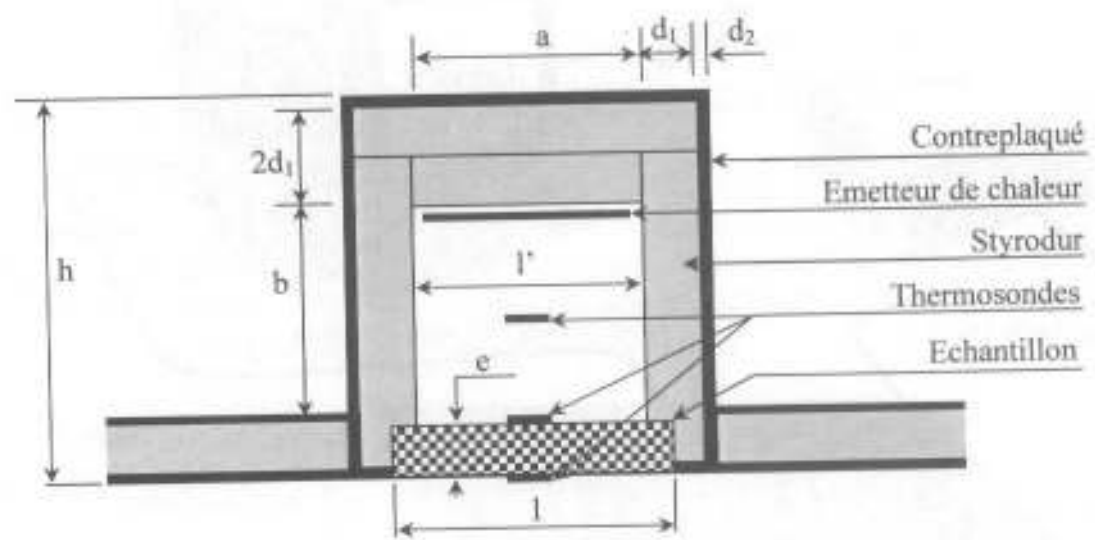


Figure 4: Coupe d'une boîte pour mesure de conductivité

Du fait de la position de l'échantillon intégré dans la boîte, la surface utile est légèrement inférieure à  $l^2$ . Dans les calculs, c'est la surface corrigée suivante qui est utilisée, fig. 4.

$$S = \left( \frac{l+f}{2} \right)^2$$

Les épaisseurs des échantillons testés sont les suivantes :

Boîte 1	$e = 4,7$ cm (béton cellulaire)
Boîte 2	$e = 3,7$ cm (isolant thermique)

**Question 1 :**

En partant de l'équation de la chaleur, déterminer l'expression du champ de température en régime permanent dans la situation de la figure 1 dans le cas d'une conductivité  $\lambda$  constante.

**Question 2 :**

A l'aide d'un bilan radiatif entre trois corps gris (émetteur de chaleur, échantillon, parois latérales de la boîte), montrer que le flux échangé entre l'émetteur et l'échantillon ne dépend pas de l'émissivité des parois supposées adiabatiques. On s'aidera d'une analogie électrique.

**Question 3 :**

L'expression de la conductivité moyenne sur l'intervalle de température ( $T_c - T_f$ ) est donnée par la relation :

$$\lambda_m = \frac{1}{T_c - T_f} \int_{T_f}^{T_c} \lambda(T) dT$$

avec :  $T_c$  = température côté chaud  
 $T_f$  = température côté froid

La variation de la conductivité en fonction de la température est approximativement linéaire dans l'intervalle de température des conditions de nos expériences. En appelant  $\lambda_v$  le coefficient de conductivité vrai à la température  $T_m$ , on a alors  $\lambda_m \approx \lambda_v$ .

Si  $\lambda$  est une fonction linéaire de  $T$ , à quelle température  $T_m$  correspond  $\lambda_m$  ?

**Question 4 :**

Montrer schématiquement à quels endroits sont situées les déperditions dans le dispositif (figure 4).

**Question 5a :**

Enumérer les flux à la surface supérieure de l'échantillon, en remarquant que les températures d'ambiance et extérieure sont sensiblement identiques. Ecrire le bilan à l'équilibre thermique.

**Question 5b :**

Déterminer la relation qui existe entre le flux de rayonnement échangé entre l'émetteur et l'échantillon, le flux de convection à la surface supérieure de l'échantillon et la puissance de l'émetteur?

**Question 6 :**

Expliquer pourquoi nous pouvons considérer le problème unidirectionnel. Donner l'expression du flux de conduction dans l'échantillon. En déduire l'expression de la conductivité thermique  $\lambda$ .

On a effectué les mesures pour un autre matériau. Application numérique : calculer la valeur de  $\lambda$  pour l'exemple ci-dessous.

	e (cm)	U (V)	R (k $\Omega$ )	T <sub>sup</sub> (°C)	T <sub>inf</sub> (°C)
Matériau pour A.N	4,2	165	4,53	16,1	11,4

**Question 7 :**

Les résultats pour les deux matériaux testés durant ce TP sont enregistrés dans un fichier de données formaté comme suit :

Temps	T <sub>salle</sub>	T <sub>boite1</sub>	T <sub>sup1</sub>	T <sub>inf1</sub>	Puissance1	T <sub>boite2</sub>	T <sub>sup2</sub>	T <sub>inf2</sub>	Puissance2
-------	--------------------	---------------------	-------------------	-------------------	------------	---------------------	-------------------	-------------------	------------

- a- Pour chaque échantillon, tracer sur un même graphique les courbes correspondantes à T<sub>salle</sub>, T<sub>boite</sub>, T<sub>sup</sub>, T<sub>inf</sub> et Puissance en fonction du temps.
- b- Déterminer la plage de données à prendre en compte. En déduire la conductivité  $\lambda$  de l'échantillon. *ech 2 : 74 ech 34*
- c- Quelle erreur commet-on en prenant en compte l'ensemble de la plage de mesure. *transparence  $\Delta_1 = 0,153$   $\Delta_2 = 0,0577$*
- d- Discuter l'influence de l'écart de température entre T<sub>salle</sub> et T<sub>boite</sub> sur la détermination de la conductivité  $\lambda$ .

**Question 8 :**

De quelles propriétés liées à la surface du matériau dépend le coefficient d'échange convectif h ? Expliquez pourquoi. Le coefficient h est-il intrinsèque au matériau ? De quelles autres variables dépend-il ?

### Question 9:

Dessiner le cheminement de l'air et les isothermes dans la boîte supérieure. En déduire le coefficient d'échanges convectifs en face supérieure de l'échantillon. Application numérique ( $\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

### 3. Diffusivité thermique $a$

La propagation de la chaleur en régime transitoire permet de mettre en évidence le rôle joué concrètement par la diffusivité thermique,  $a = \lambda / \rho C_p$ .

#### Exemple introductif :

Lors de la trempe d'un mur d'épaisseur  $e$  initialement chaud (température  $T_0$ ), en imposant pour  $t > 0$  une température froide sur chaque face, le profil de température s'écrit :

$$T(x,t) = \frac{4T_0}{\pi} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{2p+1} \sin \frac{(2p+1)\pi x}{e} \exp\left(-a \frac{(2p+1)^2 \pi^2 t}{e^2}\right)$$

La première harmonique est associée à  $\exp \frac{-a\pi^2 t}{e^2}$

#### 3.1. Mesure de la diffusivité thermique

La nécessité de mesures nombreuses et de plus en plus précises des constantes thermophysiques a entraîné le développement des techniques expérimentales dites "impulsionnelles". En effet, ces méthodes présentent quelques avantages dont les principaux sont la rapidité et la simplicité de mise en œuvre.

#### 3.2. Définition de la méthode dite du « signal bref »

La méthode du « signal bref » consiste à produire une impulsion thermique d'une source de rayonnement à flux constant constituée d'une lampe à incandescence d'une puissance  $P$  (lampe à iode à simple enveloppe en quartz et filament de tungstène rectiligne) de courte durée sur une face d'un échantillon et à observer l'évolution de la température sur l'autre face.

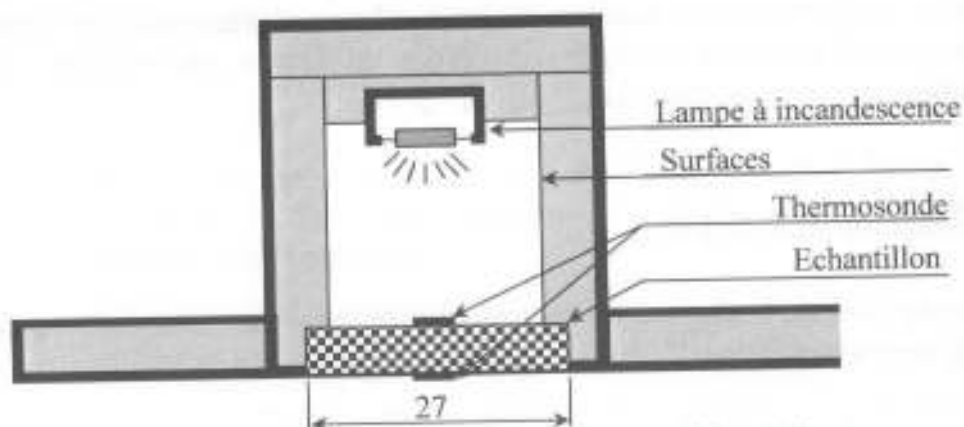


Figure 5 : Coupe d'une boîte pour mesure de diffusivité

Un minuteur permet de régler avec précision le temps d'excitation selon les besoins. La détection des températures est réalisée par des thermosondes de platine.

Le thermomètre de la face recevant l'impulsion permet de vérifier si nous restons dans le domaine où les caractéristiques thermiques du matériau et les coefficients d'échanges sont considérés comme étant constants. Il permet aussi de déterminer la température moyenne à laquelle est mesurée la diffusivité.

### 3.3. Modèle théorique

Les hypothèses de base retenues sont les suivantes :

- l'une des faces de l'échantillon est soumise au rayonnement thermique d'une source pendant un temps  $t_0$ .
- le modèle est supposé linéaire : les grandeurs thermophysiques seront considérées comme indépendantes de la température. Cela suppose que les élévations de température maximales restent de l'ordre de quelques degrés au-delà de la température d'équilibre.
- les transferts seront supposés unidirectionnels. Les dimensions choisies pour les échantillons (épaisseur notamment) permettent pratiquement la réalisation de cette condition.
- les faces latérales de l'échantillon seront isolées.
- l'échantillon représente un milieu homogène, isotrope et dont la conductivité thermique est indépendante de la température.

Il s'agit maintenant de déterminer la valeur de la diffusivité  $a$  par la formule :



$$a = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left( 1,15 - 1,25 \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right) [m^2/s]$$

avec

$\Delta T = f(t)$  : variation de la température de la face froide entre  $t_0$ , impulsion du flash, et l'instant  $t$ .

$\Delta T_M$  : variation maximale de la température froide = 3,6°

$t_{5/6}$  : temps correspondant à 5/6 de  $\Delta T_M$

$t_{2/3}$  : temps correspondant à 2/3 de  $\Delta T_M$

$e$  : épaisseur de l'échantillon

**Question 10 :**

Établir l'équation aux dérivées partielles qui régit le transfert de chaleur dans l'échantillon et poser la condition initiale sans résoudre l'équation.

**Question 11 :**

Quelle est l'expression du temps caractéristique des phénomènes de conduction ? Application numérique pour un échantillon de béton d'épaisseur  $e = 5$  cm, et de diffusivité thermique  $a = 7 \cdot 10^{-7} m^2/s$ .

$$361,9s$$

$$\frac{e^2}{a \pi^2}$$

**Question 12 :**

A partir d'une mesure des températures, tracer la courbe expérimentale  $\Delta T = f(t)$ . En déduire la valeur de la diffusivité thermique de l'échantillon

$$\frac{\partial T}{\partial x}$$

**Question 13 :**

Enumérer les différentes sources d'erreurs liées au dispositif expérimental.

$$\Delta T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

