

Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau quantifie la capacité de celui-ci à transmettre la chaleur. Cette propriété varie en fonction de la température et de la composition du matériau. Par exemple la conductivité peut varier de $237 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'aluminium pur à $130 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un alliage faiblement allié. C'est pour cela que dans des applications critiques il est nécessaire de mesurer cette propriété sur les matériaux réellement utilisés.

Les trois méthodes les plus couramment utilisées dans l'industrie et la recherche sont :

- La méthode de la plaque chaude gardée
- La méthode flash
- La méthode du fil chaud

Ces trois méthodes font l'objet d'un grand nombre de publications et de normes (ISO NF-EN et ASTM).

Définition de la conductivité

La conductivité est une propriété thermique qui est définie comme étant le coefficient de proportionnalité entre le flux thermique et le gradient de température :

$$\vec{\phi} = \lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (1)$$

Quand les transferts de chaleur sont dans une seule direction le choix est de transcrire en 1D ces transferts de chaleur. L'équation de la chaleur s'écrit donc sous la forme suivante :

$$\phi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

ϕ est le flux de chaleur en W.m^{-2}

λ la conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T la température en K

x la direction de propagation du flux de chaleur.

Si la source de chaleur est une puissance P uniformément répartie sur une surface S on a :

$$\phi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

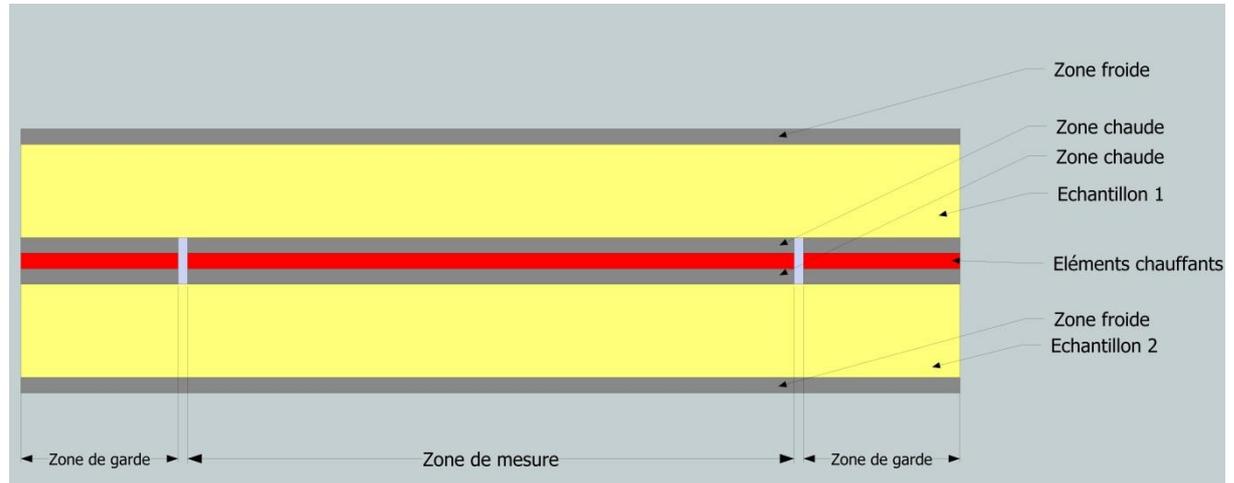
On a donc :

$$\lambda = \left| \frac{P}{S \cdot \frac{dT}{dx}} \right| \quad (4)$$

Mesure de la conductivité en régime stationnaire :

La méthode la plus communément utilisée est de créer un flux unidirectionnel. Cela est possible en plaçant l'échantillon entre deux plans isothermes de températures différentes. Le problème de la mesure en régime stationnaire est les pertes thermiques. Pour éviter cela on réduit les pertes soit en utilisant un échantillon fin pour que les pertes soient négligeable, soit en utilisant une garde

Méthode de la plaque chaude gardée



Plaque chaude gardée : Le principe est d'utiliser 2 échantillons identiques et de les soumettre à un flux 1D dans une zone de mesure entourée d'une zone de garde. Les échantillons sont généralement carrés. L'avantage d'avoir 2 échantillons identiques est d'éviter une garde thermique à l'arrière du plan chaud. Avec la méthode fluxmétrique on peut utiliser qu'un seul échantillon.

Les zones de mesure et de garde sont séparées par un déjoint. Un tableau issu de la norme NF EN 12664 donne un ordre de grandeur du dimensionnement du dispositif de mesure.

Zone de mesure	Largeur de garde	Épaisseur maximum en fonction des effets de bord			Ecart de planéité (%)	Épaisseur minimale liée à la tolérance de planéité	Largeur maximale du déjoint	Épaisseur minimale liée à la largeur du déjoint
100	50	30	35	40	0.05	10	1.25	12.5
200	50	35	40	45	0.08	15	2.5	25
150	75	45	55	65	0.08	15	1.88	18.8
200	100	60	70	85	0.1	20	2.5	25
100	150	80	95	110	0.1	20	1.25	12.5
300	100	65	80	90	0.13	25	3.75	37.5
250	125	75	90	100	0.13	25	3.13	31.3
200	150	85	100	120	0.13	25	2.5	25
300	150	90	110	130	0.15	30	3.75	37.5
500	150	100	120	150	0.2	40	6.25	62.5
400	200	120	140	170	0.2	40	5	50
500	250	150	180	210	0.25	50	6.25	62

Tableau 1 : dimensionnement de la plaque chaude gardée selon NF EN 12664

Cette méthode possède une variante qui s'appelle la **méthode fluxmétrique** qui consiste à mesurer le flux 1D. Cette méthode permet d'éviter les zones de gardes et permet de n'avoir qu'un seul échantillon.

Normes concernant la méthode de la plaque chaude gardée :

NF EN 12939 : Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits épais de haute et moyenne résistance thermique

XP CEN/TS 15548-1 : Produits isolants thermiques pour les équipements de bâtiments et les installations industrielles - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée - Partie 1 : mesurages à haute température entre 100 °C et 850 °C

NF EN 12664 : Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique

NF EN 12667 (2001-07-01) : Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique

NF X10-021 (1972-12-01) : Matériaux faiblement conducteurs - Détermination de la conductivité thermique Méthode de la plaque chaude gardée avec échantillons symétriques

EN 12939 (2001-03-01) : Titre : Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits épais de haute et moyenne résistance thermique

ISO 10291:1994 (1994-09-15): Verre dans la construction. Détermination du coefficient de transmission thermique U, en régime stationnaire des vitrages multiples. Méthode de la plaque chaude gardée.

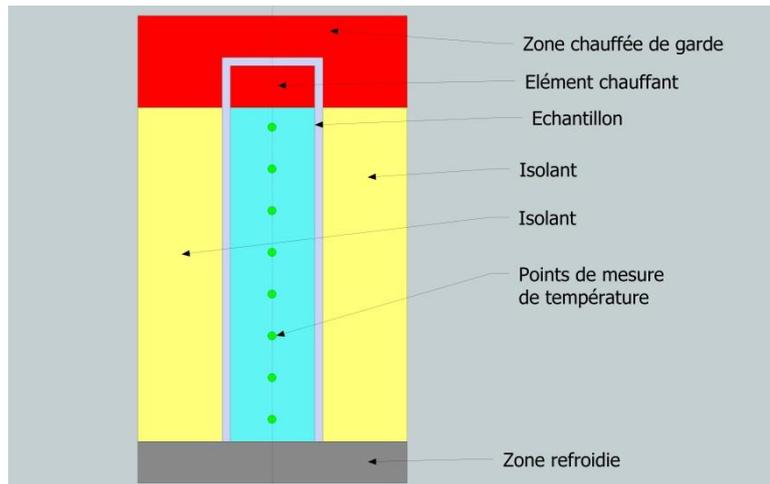
ISO 8302:1991 (1991-08-01): Isolation thermique. Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire. Méthode de la plaque chaude gardée.

Méthode du barreau gardée

Le dispositif est identique sur le principe à la méthode de la plaque chaude gardée. Seule la géométrie diffère.

Cette méthode est adaptée aux matériaux fortement conducteurs comme les métaux. La figure suivante présente ce type de dispositif. Le barreau est chauffé par un élément chauffant. Sa puissance est mesurée avec précision. Le flux thermique est donc connu précisément. Les échanges thermiques latéraux sont limités par un matériau isolant subissant le même gradient de température. A chaque altitude du barreau l'isolant est à la même température que l'échantillon. Cette méthode est utilisée même à haute température. Cela reste une méthode de référence dans les laboratoires de métrologie comme les NMI (National Metrologic Institute). On mesure la température sur plusieurs points. L'intérêt est double :

- On peut avoir la conductivité à plusieurs températures si le gradient est grand.
- On peut corriger le modèle thermique si toutefois il y a des pertes latérales.



Mesure de la conductivité en régime instationnaire :

Le principe est de se mettre en régime instationnaire c'est-à-dire en régime transitoire. Dans ces méthodes on peut être amené à ne plus mesurer la conductivité seule mais plutôt la diffusivité. Cela oblige à mesurer par ailleurs la chaleur massique par une autre méthode.

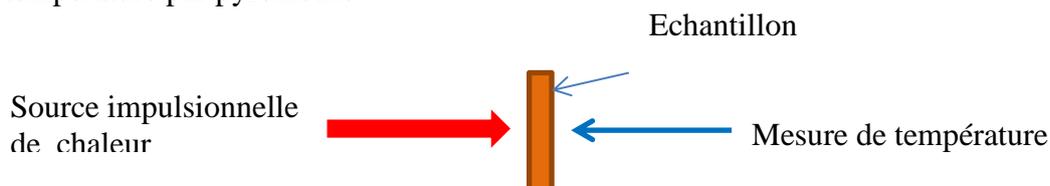
Méthode flash :

Cette méthode est très utile pour mesurer la conductivité thermique sur de petits échantillons. Elle est incontournable pour mesurer la conductivité thermique à haute température où la mesure de température par pyrométrie de contact est inopérante. Cette méthode ne nécessite pas de mesurer précisément la température. Cependant on ne peut mesurer que la diffusivité :

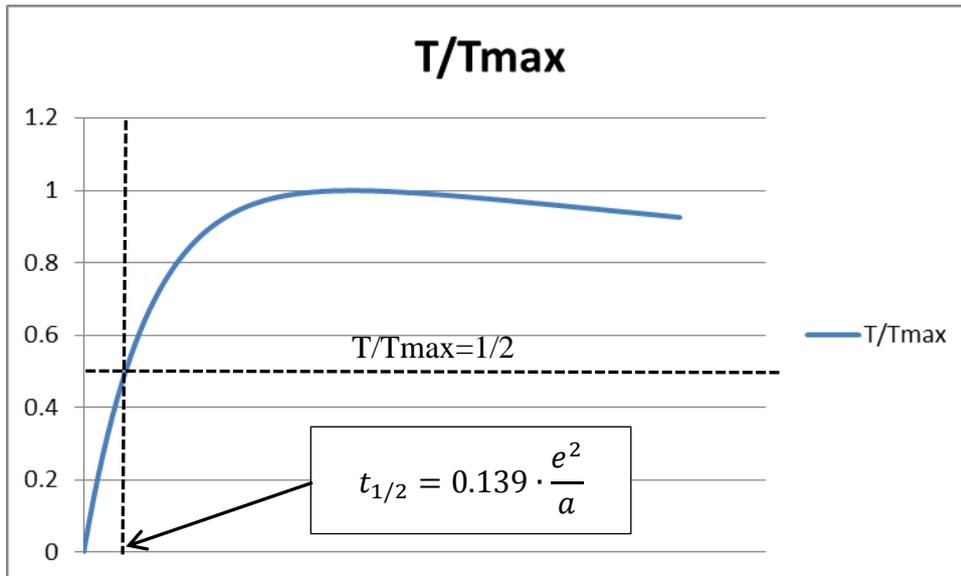
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

Où λ est la conductivité, a la diffusivité, ρ la masse volumique et c la chaleur massique.

Le schéma du dispositif expérimental est présenté ci-dessous. On chauffe par un flash lumineux, un laser ou un bombardement ionique. On mesure sur l'autre face l'élévation de température par pyrométrie.



Le principe consiste ensuite à analyser le thermogramme (montée en température sur la face arrière) pour déterminer la diffusivité :



Thermogramme en face arrière en fonction du temps :

La décroissance après l'obtention de Tmax est due au caractère non adiabatique de l'expérience.

La méthode la plus simple est de déterminer le temps nécessaire $t_{1/2}$ pour obtenir une élévation de la moitié de l'élévation maximale de température (dans le cas d'un système adiabatique). On obtient la diffusivité ainsi :

$$a = 0.139 \cdot \frac{e^2}{t_{1/2}}$$

e est l'épaisseur de l'échantillon

Les difficultés de cette méthode sont le dimensionnement correct de l'épaisseur de l'échantillon et le choix de la puissance du flash.

Une autre difficulté est de mettre en œuvre le bon modèle dans le cas d'échanges thermique à haute température empêchant d'utiliser le modèle simplifié ci-dessus.

Point bibliographique :

[Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash \(technique de l'ingénieur\)](#)

Auteur(s) : Bruno HAY, Jean-Rémy FILTZ, Jean-Christophe BATSALE

Résumé :

La méthode flash est la méthode de mesure de la diffusivité thermique la plus connue et la plus utilisée. Depuis sa mise au point en 1961, elle a fait l'objet de nombreux développements. Méthode de laboratoire, elle est de plus en plus envisagée comme outil de contrôle industriel, de par sa simplicité de mise en œuvre. Cet article présente les différents aspects de cette méthode, de la modélisation et l'estimation des paramètres jusqu'à la mesure, en passant par quelques exemples de réalisations industrielles et de laboratoire.

Normes concernant la méthode flash :

NF EN ISO 22007-4 (2017-08-02): Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 4 : méthode flash laser

NF EN 821-2 (1997-08-01) : Céramiques techniques avancées - Céramiques monolithiques - Propriétés thermo-physiques. Partie 2 : détermination de la diffusivité thermique par la méthode Flash laser (ou impulsion de chaleur)

ISO 13826:2013 (2013-01-15) : Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques - Détermination de la diffusité thermique des revêtements céramiques obtenus par projection thermique par la méthode flash laser

ISO 18755:2005 (2005-03-15) : Céramiques techniques - Détermination de la diffusivité thermique des céramiques monolithiques par la méthode flash laser

ISO 19629:2018 (2018-08-01) : Céramiques techniques - Propriétés thermophysiques des composites céramiques - Détermination de la diffusivité thermique unidimensionnelle par la méthode flash

Méthode du fil chaud :

Cette méthode est surtout utilisée pour mesurer la conductivité thermique des fluides, des matériaux réfractaires isolants à haute température et les matériaux isolant en vrac.

Un fil résistif est utilisé comme source de chauffage. Le fil généralement en platine sert aussi de capteur de température. Celui-ci est soumis à un échelon de puissance et l'étude du thermogramme permet de déterminer la conductivité. Le dispositif est schématisé ci-dessous : Le fil (C) est chauffé par un système 4 fils qui permet de contrôler la puissance et mesurer sa résistance. On enregistre la tension et le courant qui lui est appliqué. à partir de cela on peut déterminer la température du fil.

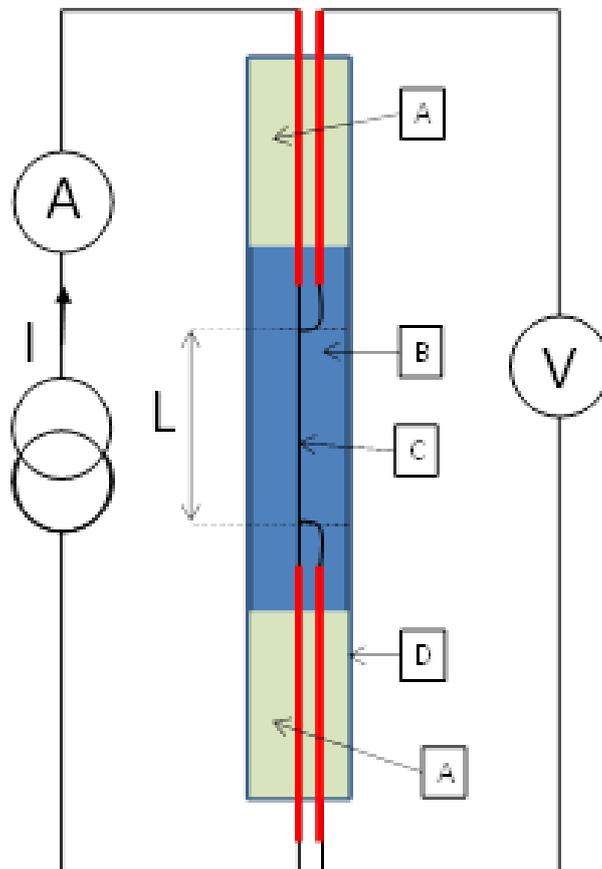


Schéma de la cellule de mesure

On suppose un transfert de chaleur dans le fluide en géométrie cylindrique dans un milieu semi-infini. La mesure doit être effectuée sur une durée courte dans les fluides afin de ne pas subir les effets de la convection. On considère également que la température initiale du fil $T(0)$ et la puissance électrique P d'alimentation sont constantes. La résolution de l'équation de la chaleur pour ces conditions permet d'obtenir une expression analytique de l'évolution temporelle $T(t)$ de la température du fil chauffant. Si l'on utilise un fil chauffant très fin, son inertie n'a de manifestation mesurable sur la courbe de température qu'à des temps très courts. On obtient une expression simplifiée de la variation de température du fil :

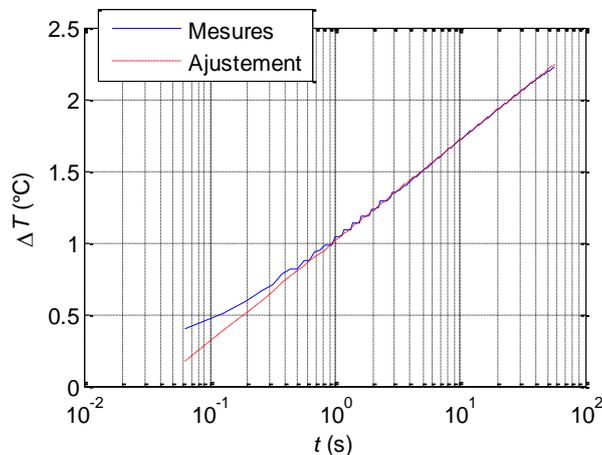
$$T(t) - T(0) = \alpha \times \ln(t) + C \quad (1)$$

Où α est la pente de la portion linéaire du tracé de la température par rapport au logarithme du temps :

$$\alpha = \frac{P}{4\pi\lambda L} \Leftrightarrow \lambda = \frac{P}{4\pi\alpha L} \quad (2)$$

La valeur de α est obtenue par régression linéaire. L'équation (2) permet donc le calcul de la conductivité thermique du liquide λ à partir de la valeur de α déterminée expérimentalement et de la connaissance de la longueur du fil L et de la puissance électrique d'alimentation P . Le paramètre constant C de l'équation (1) dépend en outre de la résistance de contact entre le fil et le liquide, du rayon du fil et de la diffusivité thermique du liquide. Les valeurs de ce paramètre ne sont généralement pas analysées.

Une méthode similaire a été utilisée par le NIST pour des mesures de conductivité thermique de liquides. Cette méthode utilise deux fils de longueurs différentes placés sur deux branches d'un pont de Wheatstone afin d'éliminer les effets de bord.



Exemple de thermogramme enregistré permettant d'obtenir la conductivité thermique

Point bibliographique :

- [1] B. Le Neindre, Mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz, *Techniques de l'ingénieur*, R2920-V2 (1996).
- [2] Norme ASTM D 5930, Standard test method for thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique (janvier 2009).
- [3] H-M. Roder, A transient hot-wire thermal conductivity apparatus for fluids, *Journal of research of the National Bureau of Standards*, Vol. 86, No 5, pp. 457-493 (1981).

Normes concernant la méthode du fil chaud :

NF EN 993-15 (2005-10-01): Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)

NF EN ISO 8894-1 (2010-08-01) : Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance")

ISO 8894-2:2007 (2007-12-15) : Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 2 : méthode du fil chaud (parallèle)

EN ISO 8894-1 (2010-08-01) : Matériaux réfractaires - Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance")

NF EN 993-15 (2005-10-01) : Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)

XP CEN/TS 15658 (2007-11-01) : Céramiques techniques avancées - Propriétés mécaniques des fibres céramiques à haute température sous environnement non réactif - Détermination du comportement au fluage par la méthode des mors chauds