

Mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée sur des structures en nid d'abeille en aluminium

L'objectif de l'étude était de mesurer la conductivité thermique apparente d'une structure en nid d'abeille en aluminium servant au transport de combustible nucléaire.

L'aluminium est très conducteur ($\lambda=110$ à $180 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ selon les nuances d'aluminium) mais la structure collée par de la colle époxy ne permet pas de prédire la valeur de la conductivité effective en fonction du procédé de fabrication et de collage. Le choix a été de mettre au point une méthode inspiré de la plaque chaude gardée capable de s'adapter à un four tubulaire.

Principe de mesure :

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. La méthode de référence est la méthode de la plaque chaude gardée.

La conductivité est une propriété thermique qui est défini 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 chaleurs sont dans une seule direction le choix est de transcrire en 1D ces transferts ce 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 :

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

La méthode consiste à 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 (figure 1) :



Figure 1 : Schéma de principe de la plaque chaude gardée

On utilise 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 identique est d'éviter une garde thermique à l'arrière du plan chaud. On peut aussi n'utiliser qu'un seul échantillon quand les échantillons ne sont pas thermiquement identiques. 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. D'autres dispositions géométriques sont possibles pour de plus petits échantillons. Le dispositif utilisé doit pouvoir rentrer dans un four tubulaire.

Zone de mesure	Largeur de garde	Epaisseur maximum en fonction des effets de bord			Ecart de planéité (%)	Epaisseur minimale liée à la tolérance de planéité	Largeur maximale du déjoint	Épaisseur minimale liée à la largeur du déjoint
		30	35	40				
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

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.

Dispositif expérimental

Les figures 2 et 3 montrent le dispositif mécanique. La figure 2 montre le dispositif à 2 échantillons et la figure 3 la modification pour un seul échantillon.

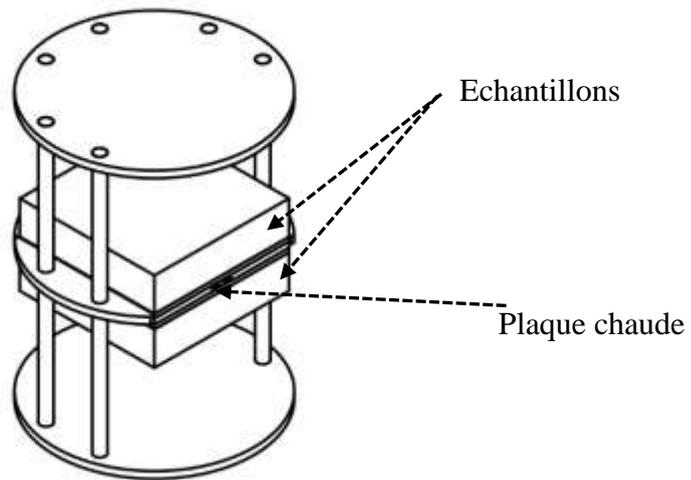


Figure 2 : Vue du dispositif de mesure avec ces 2 échantillons.

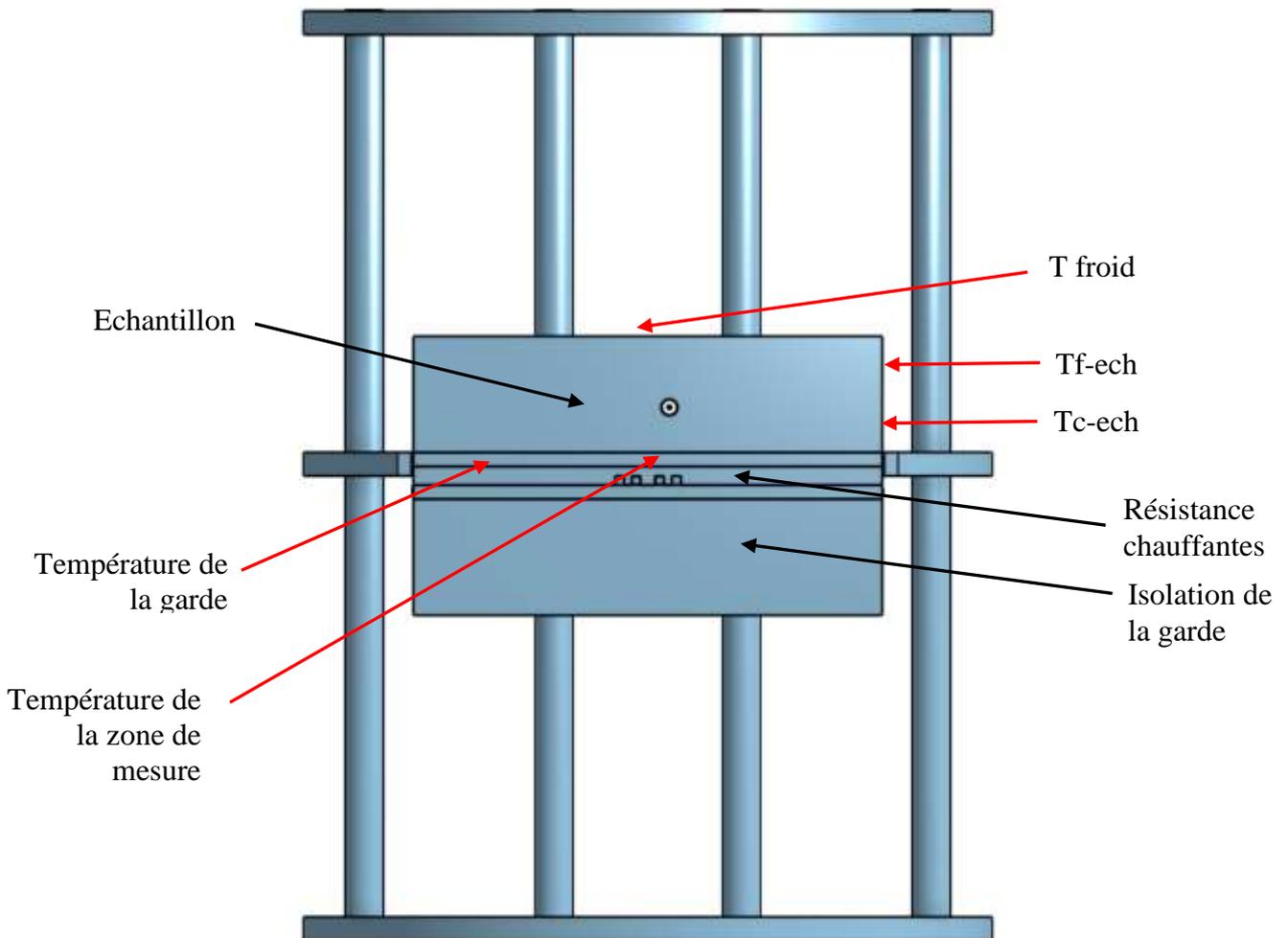


Figure 3 vue de côté du dispositif. L'échantillon du bas a été remplacé par un isolant qui limite la puissance de garde.

Pour permettre une meilleure mesure la plaque chaude gardée a été modifié afin de permettre la mesure avec un seul échantillon. En rouge les points de mesure de température (figure 2).

En effet, les échantillons ont des résistances thermiques différentes de plus de 5%. Dans ce cas il n'est pas possible de mesurer dans la configuration avec deux échantillons. Une pièce supplémentaire en cuivre permet de réaliser une garde arrière sous la plaque chaude gardée. De cette manière c'est la régulation qui permet de maintenir une garde efficace. Un isolant a été ajouté derrière la garde afin de limiter la puissance de la garde thermique.

Les échantillons ayant une forte conductivité, les résistances de contact représentent un important biais de mesure. Pour s'en affranchir le choix a été fait de percer les échantillons afin de mesurer la température dans l'épaisseur de l'échantillon. Cela diffère notablement de la méthode de la plaque chaude gardée mais assure une mesure beaucoup plus fiable.

Les résistances chauffante de la plaque chaude sont réalisé avec du fil résistif. Celui-ci est placé dans une plaque de céramique usiné en commande numérique et assure le chauffage de la zone de mesure et de la zone de garde (figure 4). La figure 5 montre les plaques de cuivre assurant le maintien de la résistance chauffante et une transmission optimale de la chaleur. La mesure de la puissance se fait par un dispositif 4 fils. La mesure de tension se fait par un voltmètre Keithley, le courant un multimètre FLUKE 179. L'acquisition de température est faite par un transmetteur de température FLUKE 54-2B avec certificat d'étalonnage. Les marges d'incertitudes de ces appareils sont négligeables par rapport aux autres sources d'incertitudes. La puissance de la résistance chauffante est choisie manuellement. En effet une régulation sur la température introduirait des variations permanentes qui empêcheraient d'être en régime stationnaire. Un régulateur PID assure la régulation de la garde. La figure 6 montre le dispositif à 1 et 2 échantillons. Pour les échantillons non écrasés on a mis une feuille d'aluminium autour de ceux-ci afin d'empêcher la convection à travers la structure en nid d'abeille.

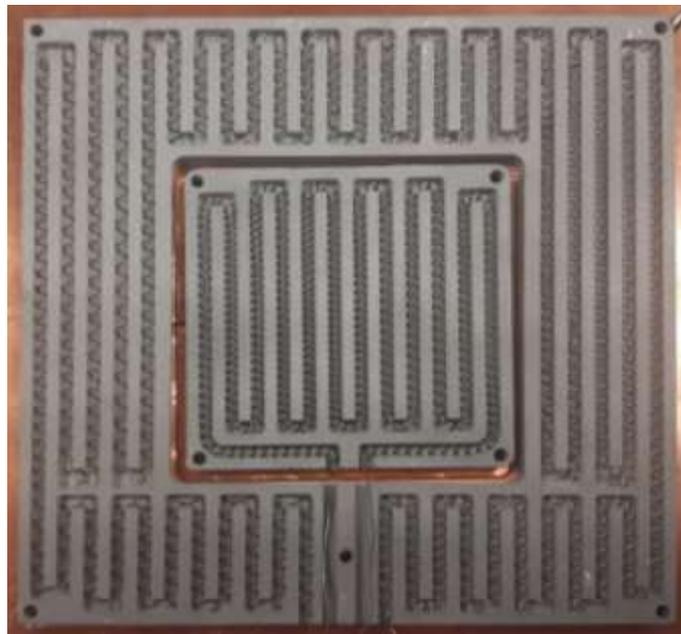


Figure 4 : résistances chauffantes incluses dans des céramiques usinées en commandes numériques



Figure 5 : résistances chauffantes dans son boîtier en cuivre.

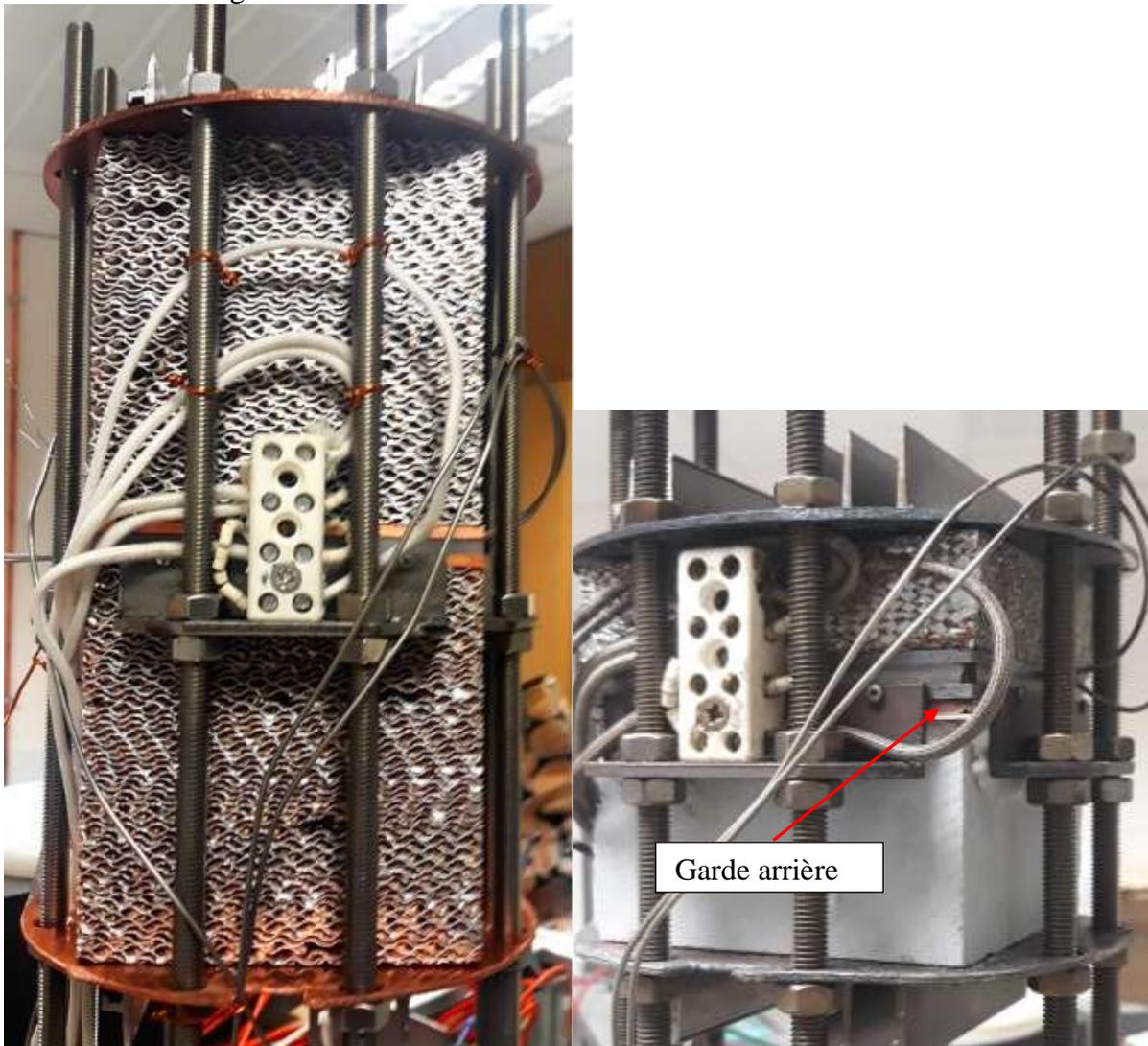


Figure 6 : A gauche, photo du dispositif à 2 échantillons en nid d'abeille. A droite dispositif à 1 échantillon et garde arrière.

Dans la mesure où l'échantillon ne répond à aucun cahier des charge d'aucune norme en vigueur de manière absolu, l'objectif a été de respecter au mieux les normes en vigueur, notamment la norme XP CEN/TS 15548 qui est la seule à couvrir la plage de température demandé. Les

incertitudes avec un échantillon conforme ne peuvent être en dessous de 14%. Avec un échantillon inhomogène, anisotrope et d'épaisseur trop importante par rapport à ses dimensions latérales, il ne faut pas envisager une incertitude inférieure à 20%.

Conclusion :

Les mesures ont été faites à l'air libre et dans un four tubulaire. La surface de la zone de garde est 3 fois supérieure à la zone de mesure.

Les mesures ont confirmé une forte anisotropie de conductivité thermique : facteur 15 entre la conduction parallèlement et perpendiculairement aux feuilles d'aluminium.