

Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction selon le principe du capteur de flux thermique

Relevé et exploitation avec CASSY

Objectifs expérimentaux

- Relevé de l'évolution de la température d'une plaque de matériau en fonction du temps.
- Observation qualitative de l'établissement de l'équilibre thermique.
- Détermination de la conductivité d'une plaque de matériau.

Notions de base

La conductivité thermique λ est définie comme étant la constante de proportionnalité dans la relation entre le flux de chaleur $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ qui traverse l'échantillon et la différence de température $\Delta \vartheta$ qui s'établit sur les deux faces de l'échantillon :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta \vartheta$$

avec d : épaisseur de l'échantillon
 A : surface de l'échantillon.

Contrairement à ce qu'il en est pour les flux électriques, il n'existe pas d'isolants parfaits pour les flux thermiques si bien que des « fuites de chaleur » rendent difficile une mesure exacte du flux thermique. Celui-ci ne correspond pas exactement à l'énergie qui circule dans le système.

Dans cette expérience, la conductivité thermique est déterminée selon le principe du capteur de flux thermique, une méthode relative. Avec cette méthode, deux plaques sont superposées et traversées par le même flux de chaleur. La conductivité thermique λ_x d'une plaque de matériau inconnu (échantillon) peut alors être calculée à l'aide de la valeur de conductivité connue λ_R d'une plaque de référence. La plaque de référence est aussi caractérisée de « capteur de flux thermique ».

On a :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda_x \cdot \left(\frac{A_x}{d_x}\right) \cdot \Delta \vartheta_x = \lambda_R \cdot \left(\frac{A_R}{d_R}\right) \cdot \Delta \vartheta_R .$$

$\Delta \vartheta_R$ correspond au gradient de température de la plaque de référence et $\Delta \vartheta_x$ au gradient de température de la plaque de matériau inconnu.

Dans les expériences, les deux plaques sont de même épaisseur $d_x = d_R$ et de même surface $A_x = A_R$. On a donc dans ce cas particulier :

$$\lambda_x = \lambda_R \cdot \left(\frac{\Delta \vartheta_R}{\Delta \vartheta_x}\right).$$

Les températures mesurées sont les suivantes :

- ϑ_0 : sur la face extérieure de la plaque de matériau placée dessus (ici, recouverte de glace),
- ϑ_m : entre les deux plaques de matériau et
- ϑ_u : sur le dessous de la plaque de matériau inférieure, c.-à-d. la température à l'intérieur de la chambre.



Fig. 1 Montage expérimental pour la détermination de la conductivité thermique selon le principe du capteur de flux thermique.

Matériel

1 chambre calorimétrique.....	389 29
1 jeu d'échantillons de matériaux de construction pour la chambre calorimétrique .	389 30
1 transformateur 2...12 V, 120 W	521 25
1 Sensor-CASSY 2	524 013
1 CASSY Lab 2.....	524 220
2 adaptateurs NiCr-Ni S, type K.....	524 0673
3 sondes de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K.....	529 676
2 câbles d'expérimentation 32 A, 100 cm, noirs	501 33
Glace	
Mince feuille de plastique	
1 PC avec Windows XP/Vista/7/8	

Il convient ici de distinguer deux cas.

Si la plaque de référence est dessous, on a

$$\Delta\vartheta_R = \vartheta_u - \vartheta_m \text{ et } \Delta\vartheta_x = \vartheta_m - \vartheta_o.$$

La conductivité thermique de la plaque de matériau inconnu est ainsi définie comme suit :

$$\lambda_x = \lambda_r \cdot \left(\frac{\vartheta_u - \vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_o} \right).$$

Si la plaque de référence est dessus, on a :

$$\lambda_x = \lambda_r \cdot \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_o}{\vartheta_u - \vartheta_m} \right).$$

Les formules utilisées sont valables en équilibre thermique, c.-à-d. dans des conditions stationnaires de température en tous points et en régime permanent.

Le système n'est pas tout de suite en équilibre thermique après la mise en service du chauffe-plaques. Pour obtenir la différence de température à l'état d'équilibre thermique, l'évolution temporelle de la température intérieure doit être enregistrée sur une période suffisamment longue (environ une heure et demie). La variation temporelle de la température est proportionnelle à cette température plus une constante :

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = a \cdot \vartheta + b.$$

La résolution de cette équation pour la température en fonction du temps $\vartheta(t)$ est ramenée à :

$$\vartheta(t) = \vartheta_{TG} - \vartheta_{diff} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

avec :

- ϑ_{ET} : température en équilibre thermique
- $\vartheta_{diff} = \vartheta_{TG} - \vartheta_{initiale}$: différence de température
- τ : constante de temps.

La température en équilibre thermique de la face chauffée de l'échantillon de matériau ou entre les deux plaques résulte de l'adaptation de la fonction de la forme

$$f(x) = A - B \cdot \exp(-x/C)$$

aux valeurs relevées dans l'expérience. Le paramètre A obtenu du fait de l'adaptation correspond alors exactement à la température souhaitée ϑ_{ET} . Celle-ci est alors égale à ϑ_u ou ϑ_m .

Grâce à la glace, la température extérieure de la face supérieure de l'échantillon de matériau est maintenue faible et surtout constante. Comme il peut malgré tout survenir de faibles variations de température, on calcule la moyenne des valeurs de la température extérieure et on utilise cette valeur moyenne ϑ_o pour calculer la différence de température.

Montage expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 1.



N.B. : la plaque en bois aggloméré ainsi que la plaque en mousse Rohacell sont posées vers l'intérieur, c.-à-d. vers le chauffe-plaques. Par contre, la plaque en Fermacell doit être placée vers l'extérieur, c.-à-d. vers la glace.

- Installer le chauffe-plaques dans la chambre calorimétrique.
- Préparer deux plaques de matériau de façon à les assembler « en sandwich » puis à les installer dans la chambre calorimétrique :
- Mettre une pastille de contact en aluminium dans l'évidement circulaire prévu à cet effet sur la plaque de matériau posée à l'intérieur au bout de la rainure et appliquer la pâte thermoconductrice. La pastille de contact doit être positionnée de façon à ce que le trou soit dans le prolongement de la rainure.
- Appliquer la pâte thermoconductrice seulement sur la pastille de contact.
- Poser avec précaution, c.-à-d. sans la déformer, une fine plaque en aluminium (de 0,3 mm d'épaisseur) avec la face noire tournée vers l'extérieur sur la face badigeonnée de pâte de cet échantillon de matériau puis presser les deux plaques l'une contre l'autre.
- Recommencer la procédure pour l'autre face mais cette fois-ci, utiliser une plaque en aluminium non laquée (de 0,5 mm d'épaisseur). Celle-ci sera ensuite intercalée entre les deux plaques de matériau.
- Poser maintenant une fine plaque en aluminium sur la plaque de matériau extérieure et presser les plaques l'une contre l'autre.
- À présent, placer la plaque doublée d'aluminium de chaque côté dans l'enceinte de mesure de la chambre calorimétrique avec la face laquée noir vers le bas. Veiller ce faisant à ce que les endroits pour introduire les capteurs de température (les extrémités de la rainure) soient tournés vers le côté de la chambre calorimétrique avec deux orifices.
- Poser ensuite la plaque doublée d'aluminium sur une seule face sur la plaque déjà dans la chambre calorimétrique avec la face noire tournée vers le haut.
- Il importe de veiller à ce que la plaque en aluminium non laquée soit entre les plaques de matériau et que les endroits pour introduire les capteurs de température (les extrémités de la rainure) des deux plaques de matériau soient décalés de 180°.
- À présent, d'abord insérer la pointe des sondes de température dans le trou des bouchons (diamètre : 1,5 mm) en faisant attention de ne pas la déformer. Ne pas mettre les sondes tout de suite dans la chambre calorimétrique !
- Introduire les sondes de température sur le dessus et le dessous ainsi qu'entre les plaques de matériau. Au besoin, légèrement soulever l'échantillon de matériau avec le crochet de montage.
- Brancher les sondes de température au Sensor-Cassy à l'aide de l'adaptateur NiCr-Ni S, conformément à la fig. 1.
- Brancher le transformateur aux raccords du chauffe-plaques. Attendre pour mettre le transformateur en marche !
- Étendre une feuille de plastique mince mais parfaitement étanche (par ex. un film alimentaire étirable) par-dessus la chambre calorimétrique. Poser un sac rempli de glace sur la plaque en aluminium supérieure. Veiller à ce qu'il n'y ait aucune infiltration d'eau dans la chambre ni sur les câbles.

Remarques : le sac ne doit pas être trop petit. La glace doit avoir un contact le meilleur possible avec la plaque en aluminium. Plus les morceaux de glace sont petits, mieux ils se répartissent sur l'échantillon de matériau. L'idéal est de poser en plus un objet lourd sur le sac, sans pour autant abîmer ce dernier.

Réalisation

Remarque de sécurité
Ne pas chauffer la chambre calorimétrique, les parois et les échantillons de matériaux à plus de 60 °C !

- [Charger les paramètres dans CASSY Lab 2.](#)
- N.B. : éventuellement amener les sondes de température à la même température – par ex. dans un bain marie – avant de les introduire dans l'enceinte de mesure et corriger les valeurs dans CASSY Lab 2 de façon à ce que la température affichée soit la même pour les deux sondes.
- Mettre le transformateur en marche. Attendre pour lancer la mesure.
- Observer les températures ϑ_{A11} , ϑ_{A12} et ϑ_{B11} .
- N.B. : suivant le cas, il est fort possible que la température de la glace soit nettement inférieure à 0 °C. Afin de maintenir cette température la plus constante possible durant la mesure, il est conseillé d'avoir une température entre -2 °C et +4 °C.
- Attendre que la température la plus basse ne change plus.
- Lancer la mesure avec .
- La température de la face intérieure augmente alors que la température extérieure sous la glace reste constante. L'espace entre les deux plaques de matériau est soumis à ces deux effets. Par expérience, nous savons que la température au centre baisse d'abord pour finalement augmenter à la fin de la mesure.
- Si la température extérieure se mettait à augmenter (déjà pour une différence de 0,5 °C), optimiser avec précaution le contact avec la glace et ce, plusieurs fois si nécessaire, tout au long de la mesure.
- Si la température intérieure atteint une température de 60 °C, arrêter le transformateur et recommencer l'expérience avec une tension et une puissance plus faibles.
- Si la température intérieure ne varie plus que lentement voire même plus du tout (soit jusqu'à environ 0,15 °C par minute), la mesure peut alors être arrêtée avec .
- Arrêter le transformateur !

N.B. : pour le démontage, il faut commencer par enlever les sondes de température. Les plaques de matériau pourront ensuite être enlevées à l'aide du crochet de montage.

Exemple de mesure

Les figures 2 à 5 illustrent l'évolution de la température pour chacune des plaques de matériau. Les températures ϑ_u et ϑ_m en équilibre thermique sont déterminées par adaptation à partir des courbes de la température intérieure (la courbe supérieure) et de la température au centre (la courbe du milieu). La ligne continue est justement la fonction issue de cette adaptation. La valeur moyenne de la température extérieure (la courbe inférieure, plaque recouverte de glace) donne la température ϑ_o . Les différences de température $\Delta\vartheta_R$ et $\Delta\vartheta_x$ sont calculées à partir de ces valeurs.

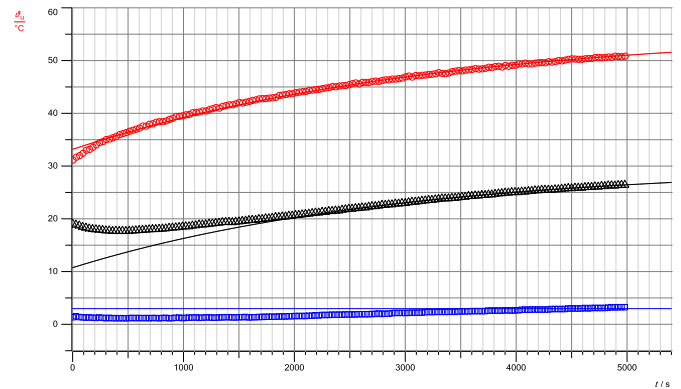


Fig. 2 Les deux échantillons de matériaux sont en polystyrène

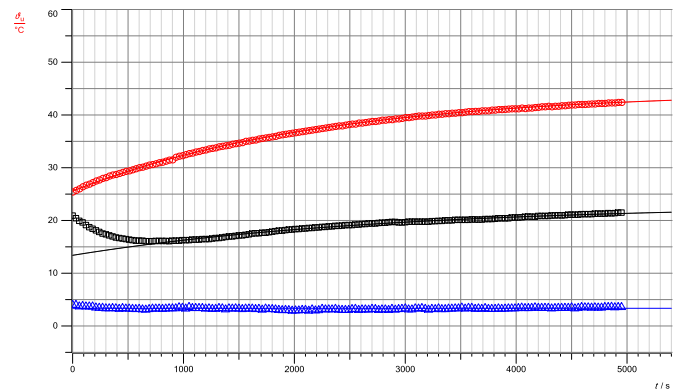


Fig. 3 Échantillon de matériau inférieur en bois aggloméré

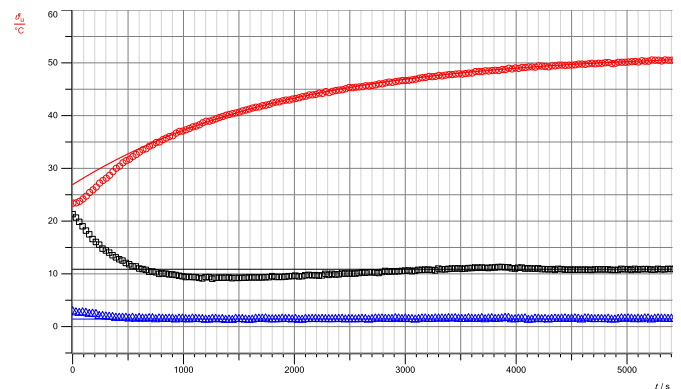


Fig. 4 Échantillon de matériau inférieur en Rohacell (mousse isolante)

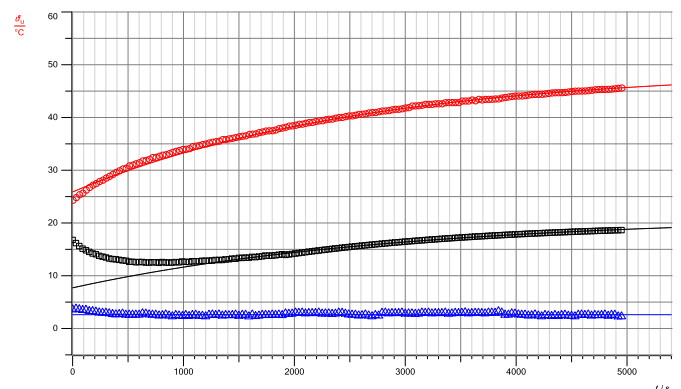


Fig. 5 Échantillon de matériau supérieur en Fermacell (plâtre de construction)

Exploitation

Dans les expériences, le capteur de flux thermique est à chaque fois en polystyrène de conductivité thermique

$$\lambda_r = 0,17 \frac{W}{m \cdot K}$$

Tab. 1 : résultats des mesures avec les températures finales obtenues par extrapolation des courbes

Plaque de matériau inconnu	Polystyrène	Bois aggloméré	Rohacell	Fermacell
$\frac{U}{V}$	8	8	6	8
Extérieur	Glace			
ϑ_o °C	3	3	1	3
Plaque supérieure	Polystyrène	Polystyrène	Polystyrène	Fermacell
ϑ_m °C	30	23	11	21
Plaque inférieure	Polystyrène	Bois aggloméré	Rohacell	Polystyrène
ϑ_u °C	56	45	52	49
Intérieur	Chambre calorimétrique avec chauffe-plaques			

Tab. 2 : calcul des conductivités thermiques

$\frac{A}{m^2}$	0,0225			
$\frac{d}{m}$	0,01			
$\frac{\lambda_r}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,17 (polystyrène)			
$\frac{\Delta\vartheta_R}{K}$	27 (26)*	20	10	28
$\frac{\Delta\vartheta_x}{K}$	26 (27)*	22	41	18
	<i>Polystyrène</i>	<i>Bois aggloméré</i>	<i>Rohacell</i>	<i>Fermacell</i>
$\frac{\lambda_x}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,18 (0,16)*	0,15	0,04	0,26
$\frac{\lambda_H}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,16 ... 0,18	0,07 ... 0,17	0,02 ... 0,05	0,23 ... 0,28

* Les valeurs indiquées entre parenthèses sont celles obtenues lorsque la plaque de polystyrène inférieure sert de plaque de référence.

Les valeurs de λ_H sont les données du fabricant.

Remarque

La formule $\lambda_x = \lambda_r \cdot \left(\frac{\Delta\vartheta_R}{\Delta\vartheta_x}\right)$ est déduite dans l'hypothèse où les deux plaques de matériau sont traversées par la même quantité de chaleur. Mais comme il se produit inévitablement de faibles pertes de chaleur entre les deux plaques, la conductivité thermique effective λ_t est donnée par :

$$\lambda_t = \lambda_r \cdot \left(\frac{\Delta\vartheta_R}{\Delta\vartheta_x}\right) \left(\frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}_x}\right) = \lambda_x \left(\frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}_x}\right)$$

\dot{Q}_R est la chaleur qui circule à travers la plaque de référence et \dot{Q}_x la chaleur qui circule à travers la plaque de matériau inconnu. La conductivité thermique λ_x est la conductivité thermique calculée (tableau 2) exprimée comme suit :

$$\lambda_x = \lambda_t \left(\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_R}\right)$$

Comme la chaleur vient de l'intérieur de la chambre calorimétrique, la chaleur qui traverse la plaque de matériau placée à l'intérieur est plus grande que celle de la plaque de matériau placée en haut.

Si la plaque de référence est en haut (c.-à-d. ici, dans le cas des plaques de Rohacell et de bois aggloméré), on a alors $\dot{Q}_x > \dot{Q}_R$ et la conductivité thermique mesurée λ_x est supérieure à la conductivité thermique effective λ_t .

La conductivité thermique mesurée est par contre légèrement moins grande que la conductivité thermique effective si la plaque de référence est à l'intérieur (ici, dans le cas de la plaque de Fermacell).