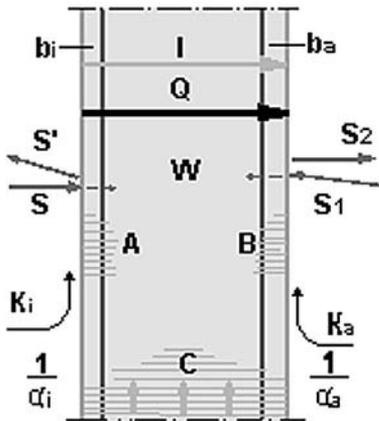


## 3.2. Capteurs pour la physique du bâtiment

### 3.2.1 Notions fondamentales de mesure de flux thermique

La transmission thermique d'un composant se caractérise par des relations complexes et dépend entre autres des conductivités thermiques des matériaux employés, de leurs épaisseurs de couche, de la géométrie du composant (cloison plate, paroi de tube cylindrique courbe etc.) ainsi que des conditions d'échange à la surface des composants.

Facteurs influant le flux thermique dans une cloison:



$Q$  = flux thermique à travers la cloison

$I$  = flux de diffusion de vapeur d'eau

$\lambda$  = conductivité thermique

$1/\alpha$  = résistance thermique d'échange superficiel (intérieure et extérieure)

$b$  = effusivité thermique (1 à 2 cm, intérieure et extérieure)

$S$  = rayonnement thermique vers et depuis la cloison (1 à 2 mm)

$A$  = eau condensée de l'intérieur

$B$  = humidité de l'extérieur (par ex. pluie)

$C$  = humidité dans la maçonnerie (capillarité et diffusion)

$W$  = capacité thermique surfacique

$K$  = convection (intérieure et extérieure)

3

### 3.2.2 Coefficient de transmission thermique ( $U$ ) - unité physiques et corrélations

Le coefficient de transmission thermique ( $U$ ) [coefficient  $U$ , anciennement valeur  $k$ ] décrit la quantité de chaleur s'écoulant en une seconde à travers une surface de 1 m<sup>2</sup> de matériau mono ou multicouche, lorsque les températures de l'air appliquées des deux côtés diffèrent de 1 K en régime stationnaire.

Par rapport à la conductivité thermique ( $\lambda$ ) la valeur  $U$  tient compte des coefficients d'échange ( $\alpha_i$ ;  $\alpha_e$ ), c'est-à-dire les intensités des échanges thermiques aux surfaces de séparation intérieure et extérieure.

Le coefficient de transmission thermique ( $U$ ) est l'inverse du coefficient d'isolation thermique ( $R_K$ ), lequel est constitué de la somme des résistances thermiques ( $R$ ) de chacune des couches successives jointives du matériau ainsi que des résistances d'échange ( $R_i$ ;  $R_e$ ) avec les couches environnantes (air etc.) des deux côtés:

$$U = \frac{1}{R_K} = \frac{1}{(R_i + R + R_e)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}\right)}$$

- $U$  = Coefficient de transmission thermique en  $[W/m^2K]$
- $R_k$  = résistance de transmission thermique globale en  $[m^2K/W]$
- $R_i$  = résistance thermique d'échange superficiel en face intérieure du composant en  $[m^2K/W]$
- $R_e$  = résistance thermique d'échange superficiel en face extérieure du composant en  $[m^2K/W]$
- $R$  = résistance de transfert thermique en  $[m^2K/W]$  (de chacune des couches)
- $\alpha_i$  = coefficient d'échange thermique intérieur en  $[W/m^2K]$
- $\alpha_e$  = coefficient d'échange thermique extérieur en  $[W/m^2K]$
- $\Lambda$  = conductivité thermique  $[W/m^2K]$

Résistance de transmission thermique	=	résistances de transfert thermique de chacune des couches + résistances d'échange superficiel	$R_k = R + R_i + R_a$
Résistance de transfert thermique	=	1 / conductivité thermique	$R = 1 / \Lambda$
Résistance d'échange superficiel	=	1 / coefficient d'échange thermique superficiel	$R_i = 1 / \alpha_i$ , $R_a = 1 / \alpha_a$
Résistance de transmission thermique	=	1 / coefficient de transmission thermique	$R_k = 1 / U$

### 3.2.3 Densité de flux thermique (q) - unités physiques et corrélations

A travers une paroi extérieure, ayant d'un côté de l'air intérieur à la température ( $T_{ai}$ ) et de l'autre côté de l'air extérieur à la température ( $T_{ae}$ ), s'écoule à l'équilibre un flux thermique de densité q. La densité de flux thermique se calcule selon la formule suivante :

$$q = U(T_{Li} - T_{La})$$

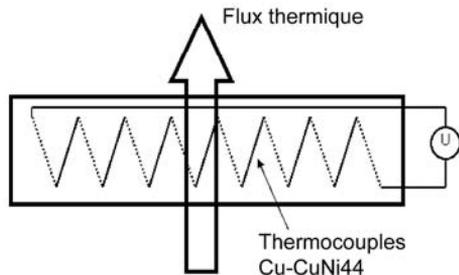
- $U$  = Coefficient de transmission thermique en  $[W/m^2K]$
- $q$  = densité de flux thermique en  $[W/m^2]$
- $T_{Li}$  ,  $T_{Le}$  = température air intérieur, température air extérieur en  $[^{\circ}C]$

### 3.2.4 Principe de mesure des capteurs de flux thermique (cloison auxiliaire pour la mesure de la valeur U)

Les capteurs de flux thermique sont des capteurs sensibles permettant de mesurer avec précision les densités de flux thermique (q) [énergie en fonction du temps et de la surface].

Lorsque l'on pose un capteur de flux thermique sur le point de mesure à vérifier, il représente une résistance thermique placée sur le chemin du flux thermique. Sur l'épaisseur de la plaque se forme au passage du flux thermique un gradient de température qui est proportionnel à la densité du flux thermique.

Les capteurs de flux thermique sont constitués d'un méandre de nom-



breux thermocouples connectés en alternance, incorporé dans un matériau porteur.

Sur les matériaux porteurs épais, les capteurs sont construits de telle sorte que se trouve à côté du méandre une zone de bordure suffisante (entourage de protection) pour empêcher tout contournement périphérique par le flux thermique. Les flux thermiques se réfèrent toujours à la surface couverte par le méandre et en constituent la valeur moyenne.

Ces capteurs actifs délivrent des signaux simples à exploiter, dans l'étendue millivolt. La densité de flux thermique ( $q$ ) recherchée se déduit par multiplication de la tension continue mesurée ( $U_{th}$ ) avec une constante d'étalonnage ( $C$ ) définie individuellement, généralement déterminée à l'aide d'un appareillage monoplaque selon la relation:

$$q = C U_{th}$$

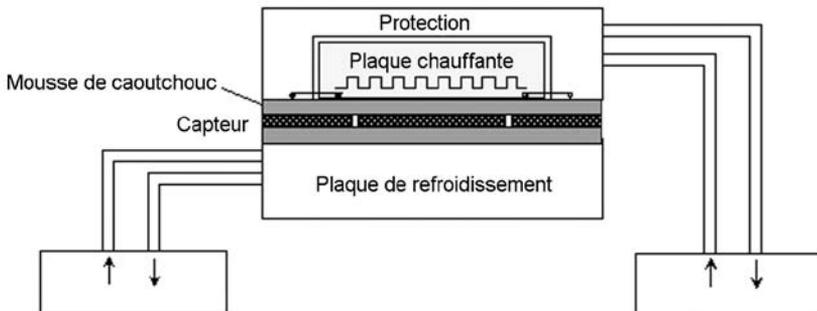
$q$  = densité de flux thermique en  $[W/m^2]$   
 $C$  = constante d'étalonnage en  $[W/m^2mV]$   
 $U_{th}$  = tension de mesure en  $[mV]$

3

### L'étalonnage

L'étalonnage s'effectue à une température moyenne de 25 °C et pour une densité de flux thermique de 100 W/m<sup>2</sup> env. Le capteur est alors intégré entre deux plaques de mousse de caoutchouc.

Structure schématique de l'appareillage à plaque



Sur demande du client, il est possible de procéder à l'étalonnage également à d'autres températures médianes dans la plage de 10°C à 50°C. La reproductibilité de l'étalonnage effectué est supérieure à 1%. Concernant l'incertitude de la valeur d'étalonnage des capteurs, une valeur de 5% est garantie pendant un an.



**Les valeurs d'étalonnage pouvant être influencées par vieillissement, sollicitation thermique et diffusion de gaz toxiques et d'eau, il est recommandé de prévoir le réétalonnage des capteurs à intervalles réguliers (env. 1 an).**

Le résultat de l'étalonnage est documenté par un rapport d'essai et le tout est fourni à la livraison de chaque capteur de flux thermique.

### 3.2.4.1 Exécution



#### Capteurs de flux thermique ALMEMO®

La valeur d'étalonnage sur les capteurs de flux thermique ALMEMO® FQ A0xx est déjà mémorisée dans le connecteur ALMEMO® en usine, de sorte à ce que sur les appareils ALMEMO®, la densité de flux thermique actuelle s'affiche tout de suite en  $W/m^2$  ( voir Fig. )

Mais vous pouvez également effectuer vous-même la mise à l'échelle de la valeur d'étalonnage selon le tableau suivant:

Etendue max. densité de flux thermique [ $W/m^2$ ]	Valeur d'étalonnage [ $W/m^2mV$ ]	Etendue de mesure	Facteur	Exp.
0.0 à 5200.0	1.0...20.0	260 mV	0.100-2.000	1
0.0 à 5200.0	10.0...200.0	26 mV	0.100-2.000	2

### 3.2.4.2 Emploi des capteurs de flux thermique

Dans de nombreux domaines des sciences naturelles et de la technique on utilise des capteurs de flux thermique:

1. Détermination des déperditions thermiques à travers les murs de bâtiments, les tubes, entrepôts frigorifiques, accumulateurs de chaleur
2. Calorimétrie et mesure des paramètres thermiques des matériaux
3. Applications techniques pour lesquelles la différence de température sert de grandeur réglée

### 3.2.5 Principe de mesure de détermination du coefficient thermique (valeur U)

Le principe de mesure pour effectuer l'acquisition quantitative de déperditions par transmission thermique sur les cloisons de séparation telles que les murs de maison, les installations de réchauffage etc. repose sur la méthode dite de la cloison auxiliaire, pour laquelle on installe un capteur (de flux thermique) directement sur le passage du flux thermique. La densité (q) du flux de déperdition thermique se détermine à l'aide des propriétés thermiques bien connues du capteur et de la différence de température thermoélectrique mesurée.

En effectuant en plus l'acquisition des températures de surface ainsi que des températures de l'air dans la zone d'échange d'un composant, il est possible de calculer par déduction tous les coefficients thermiques significatifs.

En pratique, l'application des formules citées se heurte à des difficultés car celles-ci ne sont valables qu'à l'équilibre (c.-à-d. rapport de température constant dans le temps, la paroi émet autant de chaleur qu'elle en reçoit, la capacité calorifique de la paroi étant ici sans importance) !

De plus, les températures doivent être définies avec exactitude !

C'est pourquoi le calcul se base sur l'acquisition cyclique des valeurs moyennes des températures et des valeurs moyennes de densité de flux thermique.

Lorsque la durée de mesure est suffisante, l'incidence de la capacité thermique du composant est négligeable pour le calcul, par ex. de la valeur U et la valeur moyenne atteint la valeur U effective, par ex. de la paroi.

Selon la disposition des capteurs de température, le quotient  $q/T_1-T_0$  correspond au coefficient d'échange thermique superficiel ( $\alpha_i$  ;  $\alpha_e$ ), à la conductivité thermique ( $\Lambda$ ) ou au coefficient de transmission thermique ( $U$ ) ou à leurs valeurs inverses (voir tableau 3.2.2):

$$\text{coefficient d'échange thermique intérieur } \alpha_i = \frac{\text{densité de flux thermique } q}{(\text{températ. de surface interne } T_{wi} - \text{températ. de l'air intérieur } T_{Li})}$$

$$\text{coefficient d'échange thermique extérieur } \alpha_e = \frac{\text{densité de flux thermique } q}{(\text{températ. de surface externe } T_{we} - \text{températ. de l'air extérieur } T_{La})}$$

$$\text{conductivité thermique } \Lambda = \frac{\text{densité de flux thermique } q}{(\text{températ. de surface interne } T_{wi} - \text{températ. de surface externe } T_{we})}$$

Valeur U expérimentale:

$$\text{coefficient de transmission thermique } U = \frac{\text{densité de flux thermique } q}{(\text{températ. de l'air intérieur } T_{Li} - \text{températ. de l'air extérieur } T_{La})}$$

*Exemple 1:*

*Il est possible de déterminer la résistance de transfert thermique ( $R$ ) décisive pour les propriétés isolantes d'une cloison à partir de mesures des températures intérieure et extérieure des parois ainsi que la densité de flux thermique (q)*

$$q = \frac{1}{R} (T_{wi} - T_{we})$$

Exemple 2:

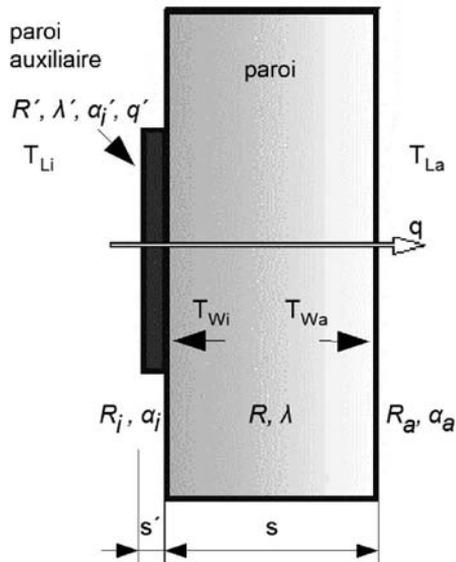
Lorsque la valeur  $U$  est connue ou mesurée, il est possible de calculer la résistance de transfert thermique ( $R$ ) à partir de la valeur  $U$ :

$$R = \frac{1}{U} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a}$$

Dans ce cas, il faut que les coefficients d'échange thermique superficiels ( $\alpha_i$  ;  $\alpha_a$ ) soient connus ou bien l'on utilise les valeurs issues de la norme DIN :

$$\alpha_i = 7,69 \text{ [W/m}^2\text{K]} ; \alpha_a = 25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Paroi avec capteur de flux thermique surimposé (paroi auxiliaire):



$T_{Li}$  = température de l'air intérieur en [°C]

$T_{Le}$  = température de l'air extérieur en [°C]

$T_{wi}$  = température de surface interne de paroi en [°C]

$T_{wa}$  = température de surface externe de paroi en [°C]

$q$  = densité de flux thermique en [W/m<sup>2</sup>]

$R$  = résistance de transfert thermique de la ou des couche(s) de paroi en [m<sup>2</sup>K/W]

$R_i$  = résistance thermique d'échange superficiel en face intérieure du composant en [m<sup>2</sup>K/W]

$R_a$  = résistance thermique d'échange superficiel en face extérieure du composant en [m<sup>2</sup>K/W]

$\alpha_i$  = coefficient d'échange thermique intérieur en [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_a$  = coefficient d'échange thermique extérieur en [W/m<sup>2</sup>K]

$\lambda$  = conductivité thermique de la ou des couche(s) de paroi en [W/mK]

$s$  = épaisseur de la ou des couche(s) de paroi en [m]

$R'$  = résistance de transfert thermique de capteur de flux thermique [m<sup>2</sup>K/W]

- $q'$  = densité de flux thermique du capteur de flux thermique en  $[W/m^2]$   
 $\lambda'$  = conductivité thermique du capteur de flux thermique en  $[W/mK]$   
 $\alpha_i'$  = coefficient d'échange thermique du capteur de flux thermique en  $[W/m^2K]$   
 $s'$  = épaisseur du capteur de flux thermique en  $[m]$

### 3.2.6 Mise en œuvre du procédé de mesure pour déterminer la valeur $U$

Le coefficient de transmission thermique ( $U$ ) est une grandeur essentielle en bâtiment, puisqu'il sert à déterminer les déperditions de chaleur par transmission à travers les matériaux.

La déperdition thermique par transmission permet de décrire la qualité énergétique de l'enveloppe thermique (isolation du toit, des murs extérieurs, fenêtres et sol) d'un bâtiment. Pour chaque bâtiment d'habitation, une valeur maximum admissible est prescrite en fonction de la surface enveloppante et de son volume, selon le décret sur les économies d'énergies dans la version actuelle respective.

En raison du déphasage entre la densité de flux thermique et les différences de température, la mesure ne doit être effectuée que dans les conditions suivantes:

1. La différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur doit être suffisamment grande (valeur indicative avec une isolation normale  $\Delta T : > 10K$ , valeur indicative avec une forte isolation  $\Delta T : > 20K$ )
2. Les variations de ces températures (entre autres jour/nuit) devraient être aussi faibles que possible pendant la durée de la mesure.
3. Les mesures doivent être enregistrées sur place sur une période de temps suffisante (env. 2 à plusieurs jours) et les paramètres être ensuite calculés par des moyennes.
4. mesure uniquement lorsque la température intérieure du bâtiment est équilibrée (valeur indicative env.  $20\text{ }^\circ\text{C}$ )
5. la plus faible incidence possible des facteurs donnés en 3.2.1 tels que le rayonnement solaire direct et l'humidité (par ex. mesure de nuit, mesure par temps sec et sur des surfaces sèches)

### 3.2.7 Normalisation

Le calcul du coefficient de transmission thermique est défini dans la norme internationale ISO 6946.

Il n'existe pas de prescription normalisée de mesure pour déterminer la valeur  $U$ . La mesure pratique s'effectue en s'appuyant sur les formules de calcul de la norme DIN 4108 sur l'isolation thermique des bâtiments. Le principe de mesure décrit en 3.2.5 s'effectue donc en prenant appui sur la DIN 4108, mais pas conformément à la DIN 4108.

### 3.2.8 Exécution de la mesure des coefficients thermiques avec l'instrumentation ALMEMO®

Pour l'homme de l'art:



*Une grande valeur d'isolation s'obtient par une grande résistance de transfert thermique et une faible conductivité thermique.*

*Plus le coefficient de transmission thermique est fort, plus les pertes thermiques survenant à travers la paroi sont élevées.*

*Plus la résistance de transmission thermique est élevée, meilleure est la capacité d'isolation thermique.*

#### 3.2.8.1 Disposition et programmation des capteurs

ainsi que calcul dans l'appareil ALMEMO®

Les appareils ALMEMO® 2690-8 et 2890-9 mettent à disposition un menu Assistant, à l'aide duquel, selon l'observation des capteurs de température, on calcule un coefficient thermique (voir 3.2.5) d'après une série de mesure à long terme. (notice de l'appareil, mot clé "coefficient thermique").

Si l'on effectue l'acquisition des températures d'air intérieur et extérieur en plus de la densité de flux thermique, il s'agit, pour le coefficient thermique calculé, de la valeur U.

Exemple ALMEMO® 2890-9 :

Pour déterminer le coefficient thermique,  $\bar{q}/(T_1 - T_0)$  on branche les deux capteurs de température en fonction de l'application sur le canal M0 et M1 et le capteur de flux thermique sur M2. La différence de température  $T(M1) - T(M0)$  est automatiquement acquise sur le canal M5. Pour mesurer, il suffit de procéder aux programmations suivantes:

Mode moyenne de M9:     **CONT**  
 Mode moyenne de M2:     **CONT**  
 Plage de M12:           **q/dt**  
 Saisir cycle avec:       **Tempo cycle**  
 Lancer la mesure avec:   **<START>**  
 Arrêter la mesure avec:  **<STOP>**

Menu Assistant  
coefficient thermique

Températ. interne	Canal:	00
00: 21.67°C NiCr		
Temp. extérieure	Canal:	01
01: 11.42°C NiCr		
Différence dt	Canal:	05
05: 10.25°C Diff		
Mode moyenne:		CONT
Flux thermique q	Canal:	02:
02: 103.6 W/m²		
Mode moyenne:		CONT
Coeff. thermique	Canal:	12
12: 193. W/mK		
1 Plage:		q/dt
Tempo cycle:		00:30:00 \$n
<b>START MANU</b>		<b>ESC</b>

#### 3.2.8.2 Disposition et programmation des capteurs

dans l'appareil ALMEMO® et calcul à l'aide d'AMR-WIN-CONTROL

Pour calculer les valeurs de mesure enregistrées à l'aide d'un appareil ALMEMO®, le logiciel AMR-WIN-CONTROL offre un assistant de valeur U (voir cata-

logue 06.10 et 14.03), assurant par menus le calcul et l'affichage graphique de la valeur U.

Pour cette méthode, nul besoin d'affecter un mode moyenne aux capteurs car la moyenne et le calcul s'effectuent par logiciel.

Même l'ordre des canaux des capteurs de densité de flux thermique et pour la température de l'air intérieur et de l'air extérieur peut être choisi à volonté sur l'appareil ALMEMO®.

L'affectation correcte des capteurs est également demandée dans l'assistant de valeur U.

Pour effectuer la mesure et l'acquisition, **tous** les appareils ALMEMO® **V5**, **V6** ALMEMO 2590, 2690, 2890, 8590, 8690, 5690 à mémoire interne ou externe conviennent.

En outre, il est également possible d'utiliser l'assistant de valeur U pour calculer, selon l'affectation des capteurs de température (température de l'air ou de surface), un autre coefficient thermique (définition voir 3.2.5). Cependant il faut tenir compte qu'il ne s'agit alors plus de la valeur U.

3

### 3.2.8.3 Montage de mesure sur place pour mesurer la valeur U

Le **capteur de flux thermique** s'installe de préférence sur la cloison côté intérieur. La sous-face doit être reliée de façon la plus homogène possible avec le point de mesure, par ex. à l'aide de:

- Collage par bande PVC ou tissu double face.
- N'utilisez pas de bande papier, le capteur de flux thermique pouvant éventuellement être difficilement détachable ultérieurement.
- Enduction de la sous-face avec de la pâte thermoconductrice et fixation avec du ruban adhésif ou des éléments de support mécanique en bordure de plaque.
- Éviter autant que possible la proximité des corps de chauffe et les baies de fenêtre.

Conviennent comme **capteurs de température** les thermocouples à fils nus, soudés à la pointe, du type FT 390-0, dans différentes longueurs.

Pour mesurer la **température de l'air intérieur** ( $T_{Li}$ ), il faut disposer la pointe de mesure à une distance d'au moins 10 cm au-dessus du capteur de flux thermique et dépasser d'env. 10 cm dans la pièce (la coudrer).

Pour mesurer la température de l'air extérieur ( $T_{La}$ ), il faut placer la pointe de mesure également à env. 10 cm du mur extérieur, en passant à travers un passage approprié du mur ou de la fenêtre.

### 3.2.8.4 Montage de mesure local pour mesurer d'autres coefficients thermiques

S'il faut déterminer d'autres coefficients thermiques (voir 3.2.5), il faut également mesurer les températures intérieure et extérieure en surface de paroi.

Convient comme capteurs de température également les thermocouples à fils nus, soudés à la pointe, du type FT 390-0, dans différentes longueurs.

Pour mesurer la **température intérieure en surface de paroi** ( $T_{wi}$ ), on fixe la pointe de mesure directement à côté du capteur de flux thermique, à l'aide de ruban adhésif appropriée.

Pour mesurer la **température extérieure en surface de paroi** ( $T_{wa}$ ), il faut fixer la pointe de mesure en surface du mur extérieur à l'aide d'un ruban adhésif adapté, en passant à travers un passage approprié du mur ou de la fenêtre.



***Z*Afin de minimiser les incidences perturbatrices, les capteurs de température extérieure peuvent être protégés par un déflecteur prépositionné (protection contre le rayonnement solaire direct ou l'humidité)**

Vous trouverez un récapitulatif des systèmes de mesure au catalogue Ahlborn 2011, page 14.03..