

# Résistance thermique selon la norme EN ISO 6946 de constructions avec des feuilles isolantes réfléchissant l'infrarouge (FIR)

K.Ghazi Wakili, Th. Frank

EMPA Dübendorf, Section Physique du bâtiment, CH-8600 Dübendorf

Depuis quelques temps une campagne publicitaire pour des feuilles isolantes réfléchissant l'infrarouge est menée dans l'espace européen. Certains fournisseurs distribuent des brochures contenant des indications incorrectes et équivoques sur la conductibilité thermique ou la résistance thermique de ces produits et sur la comparaison avec les isolants thermiques conventionnels. Le présent article a pour but d'éclaircir la situation sur les caractéristiques thermiques effectives de ces produits à l'aide de tableaux et d'exemples concrets reposant sur l'application de la nouvelle norme SIA 180 (édition 1999) et de la norme EN ISO 6946.

## Structure et caractéristiques physiques

Une construction avec des feuilles isolantes réfléchissant l'infrarouge (FIR) se compose de trois parties:

- une ou plusieurs feuilles ou voiles de matière plastique de 3 à 8 mm d'épaisseur (avec inclusion de bulles d'air),
- une couche réfléchissant l'infrarouge sur une ou sur les deux faces de la feuille de matière plastique
- une couche d'air sur une ou sur les deux faces de la feuille de matière plastique réfléchissant l'infrarouge.

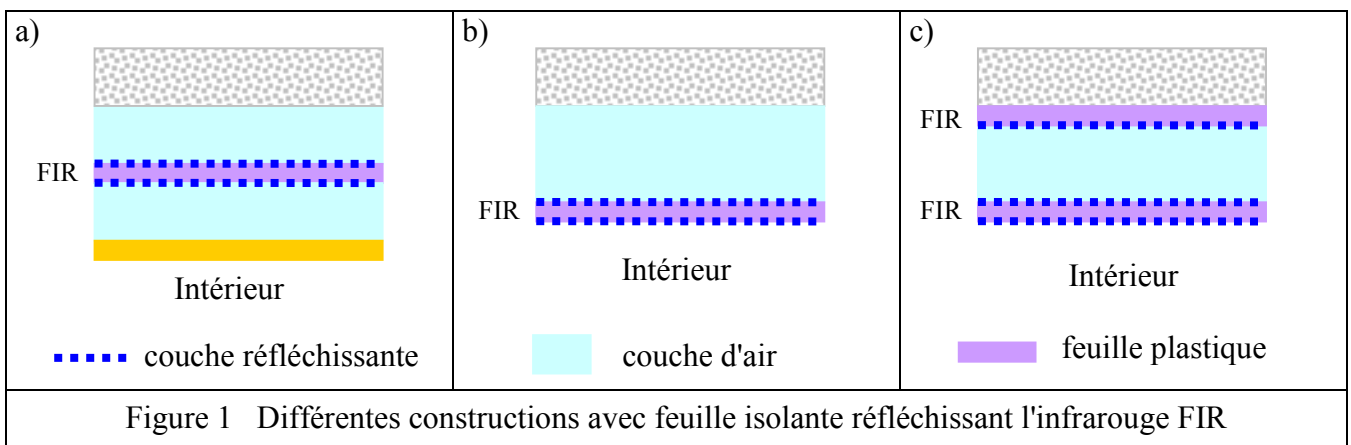


Figure 1 Différentes constructions avec feuille isolante réfléchissant l'infrarouge FIR

Il ressort de la structure de ces constructions FIR que le transfert de chaleur a lieu essentiellement par **rayonnement thermique** et par **convection dans les couches d'air**. Sur les produits d'isolation conventionnels c'est au contraire la **conduction** de chaleur qui est déterminante pour ce transfert.

Selon la norme EN ISO 6946, la résistance thermique  $R_g$  d'une couche d'air non ventilée se détermine à l'aide de la relation suivante:

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r}$$

où  $h_a$  et  $h_r$  sont les coefficients d'échange thermique superficiels par conduction/convection et par rayonnement.

$h_r$  est déterminé par l'émissivité de la surface limitante en direction du flux thermique:

$$h_r = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

La couche réfléchissant l'infrarouge possédant une émissivité  $\varepsilon$  peu élevée, son coefficient  $h_r$  est lui aussi faible.

$h_a$  dépend de l'épaisseur de la couche d'air. Cette dépendance est représentée sur les deux figures ci-après selon la norme EN ISO 6946:1996:

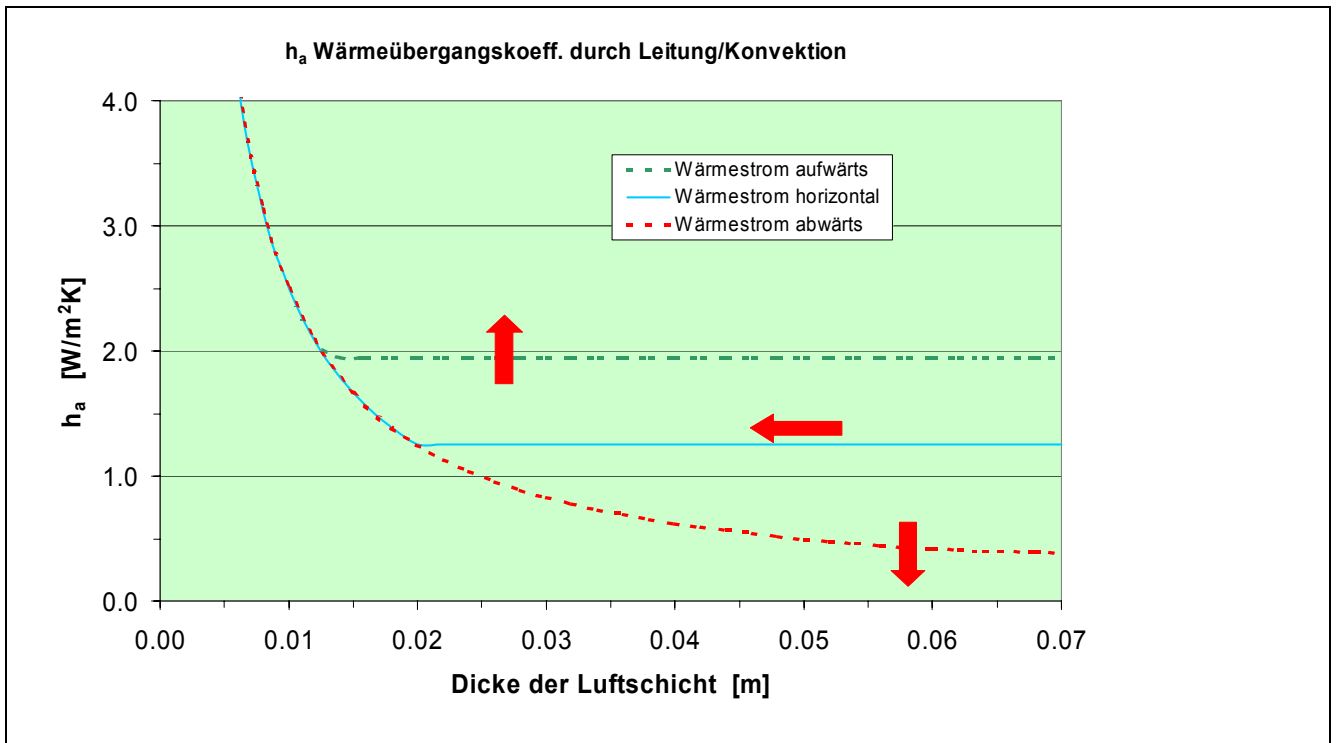


Figure 2:  $h_a$  pour couches d'air d'une épaisseur de 10 à 70 mm selon EN ISO 6946

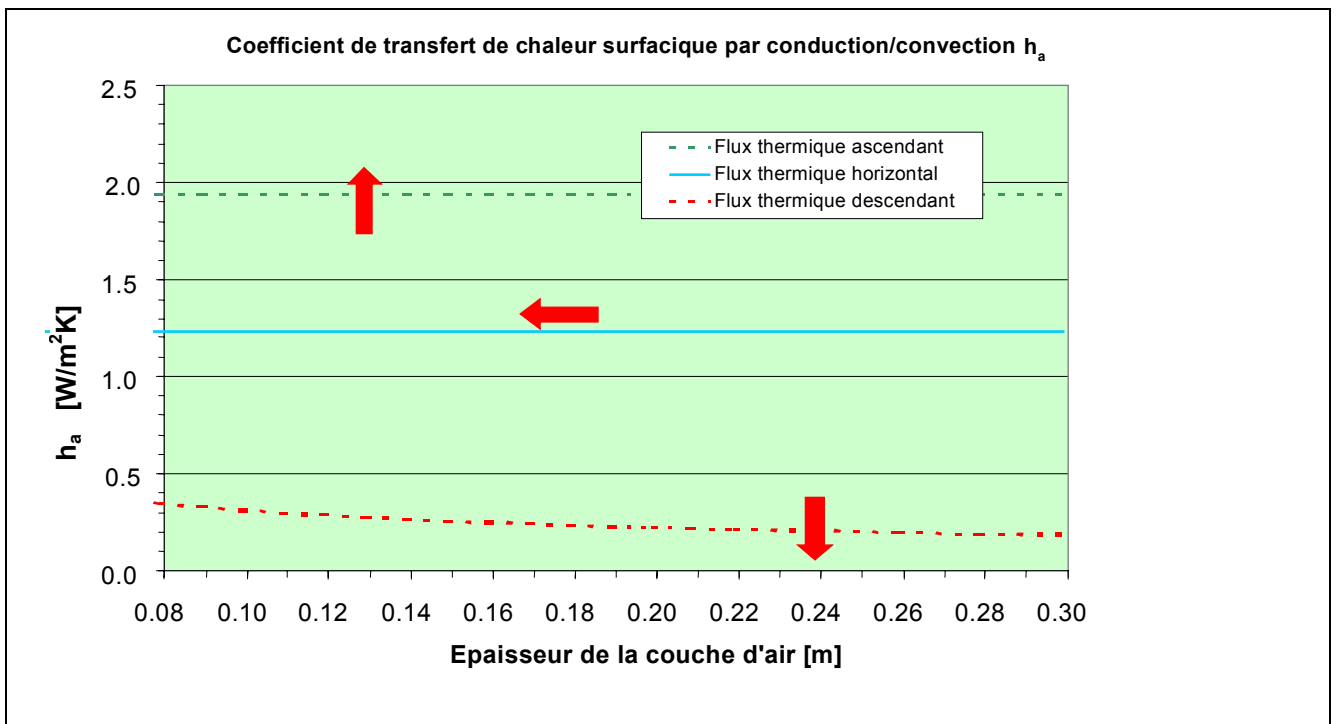


Figure 3.  $h_a$  pour couches d'air d'une épaisseur de 80 à 300 mm selon la norme EN ISO 6946  
La norme n'autorise une détermination de  $R_g$  que pour les couches d'air d'une épaisseur  $< 0.3$  m.

Il ressort des figures 2 et 3 que la résistance thermique  $R_g$  d'une couche d'air non ventilée demeure constante à partir d'une certaine épaisseur. **En d'autres termes, cela signifie que la valeur de  $R_g$  d'une couche d'air verticale (flux thermique horizontal) n'augmente plus à partir d'une épaisseur d'environ 2 cm. Il en va de même pour une couche d'air horizontale avec un flux thermique ascendant (p. ex. toit plat en hiver) à partir d'une épaisseur de 1.3 cm.** Au contraire de cela, sur les isolants conventionnels,  $R$  augmente de manière linéaire avec l'épaisseur.

#### Conductibilité thermique équivalente $\lambda_{eq}$ de couches d'air

La conductibilité thermique équivalente  $\lambda_{eq}$  d'une couche d'air est définie par la relation suivante:

$$\lambda_{eq} = d / R_g = d \cdot (h_a + h_r) \quad d : \text{épaisseur de la couche d'air}$$

Le tableau ci-après donne les valeurs de  $\lambda_{\text{éq}}$  pour  $T_m = 283 \text{ K}$  pour les couches d'air horizontales en fonction des surfaces limitantes, de la direction du flux thermique et de l'épaisseur.

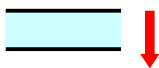
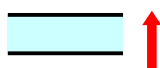
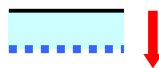
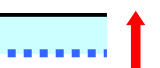

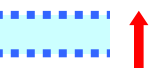

Conductivité thermique équivalente $\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK] pour $T_m = 283 \text{ K} = 10^\circ\text{C}$						
Epaisseur [m]						
0.01	0.067	0.067	0.030	0.030	0.028	0.028
0.02	0.109	0.123	0.035	0.049	0.030	0.044
0.03	0.151	0.185	0.040	0.074	0.033	0.067
0.04	0.194	0.246	0.046	0.098	0.036	0.089
0.05	0.236	0.308	0.051	0.123	0.039	0.111
0.07	0.324	0.431	0.065	0.172	0.048	0.155
0.10	0.460	0.616	0.090	0.246	0.066	0.222
						

Tableau 1. Conductivité thermique équivalente de couches d'air horizontales + surfaces limitantes

### Résistance thermique superficielle $R_s$ de surfaces réfléchissantes

Pour les constructions FIR sur lesquelles une des faces réfléchissante est tournée directement vers l'espace intérieur (fig. 1, b et c), il faut tenir compte d'une réduction du coefficient d'échange thermique superficiel à l'intérieur. Du fait de la faible valeur de  $\epsilon$ , la part du transfert de chaleur par rayonnement diminue et la résistance thermique superficielle intérieure  $R_{si}$  augmente. Selon l'annexe A de la norme EN ISO 6946 on a:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{ci} + h_r} \quad \text{où la part du rayonnement est donnée par} \quad h_r = 4\sigma \cdot \epsilon \cdot T_m^3$$

avec  $h_{ci} = 5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour flux thermique ascendant  
 $h_{ci} = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour flux thermique horizontal  
 $h_{ci} = 0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour flux thermique descendant

Le tableau 2 donne une comparaison avec les résistances thermiques superficielles de surfaces non réfléchissantes (EN ISO 6946 5.2):




$T_m = 293 \text{ K} = 20^\circ\text{C}$		Direction du flux thermique		
Emissivité				
$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K] ( $h_{si} = 1/R_{si}$ )	$\epsilon = 0.1$	<b>0.18</b> (5.56)	<b>0.33</b> (3.03)	<b>0.79</b> (1.27)
	$\epsilon = 0.9$	<b>0.10</b> (10.00)	<b>0.13</b> (7.69)	<b>0.17</b> (5.88)

Tableau 2 . Résistances thermiques superficielles de surfaces intérieures selon EN ISO 6946.

### Coefficient de déperditions thermiques $\Psi$ pour ponts thermiques linéaires

Tout comme pour les produits d'isolation thermique conventionnels, les lattes et les poutres créent sur une construction FIR des ponts thermiques linéaires dont le coefficient de déperditions thermiques  $\Psi$  peut se déterminer à l'aide d'un calcul bidimensionnel (prEN ISO 10211-2).

### Réduction de la résistance thermique

Comme chacun sait, différents facteurs, tels que le vieillissement, l'absorption d'humidité, etc., provoquent une réduction de la résistance thermique des produits d'isolation thermique conventionnels. Sur les constructions FIR, une modification des caractéristiques d'émissivité (augmentation de  $\epsilon$ ) peut entraîner une réduction de la résistance thermique. Les causes possibles d'une telle réduction sont l'oxydation de la couche métallique ou la déposition d'humidité, de poussière ou de salissures sur la surface du revêtement.

### Calcul du coefficient de transmission thermique U

Selon la norme SIA 180 (1999), les ponts thermiques doivent toujours être pris en compte dans le calcul du coefficient de transmission thermique. On peut utiliser pour cela l'équation suivante:

$$U = \frac{U_0 \cdot A + \psi \cdot \ell}{A}$$

$U_0$  = Coef. de transmission thermique de la zone non perturbée (sans ponts thermiques) [W/m<sup>2</sup>K]

$A$  = Surface totale [m<sup>2</sup>]

$\psi$  = Coefficient de déperditions thermiques des ponts thermiques linéaires [W/mK]

$\ell$  = Longueur des ponts thermiques linéaires [m]

### Exemple 1: Toit avec construction FIR (deux couches d'air)

Dans ce premier exemple, deux versions d'une construction FIR sont comparées à une isolation en matériau isolant conventionnel (épaisseur = 50 mm) pour les conditions estivales et hivernales. L'écart entre les lattes est de 1 m. La section des lattes est de 24 x 48 mm pour les constructions FIR et de 50 x 50 mm pour la construction conventionnelle. Ces sections ont été choisies en correspondance avec les dimensions utilisées dans la pratique.






	Matériau	Coefficient $\lambda$ [W/mK]
	Bois	0.14
	Plâtre	0.25
	Acier	50
	Panneaux de fibres de bois liés au ciment	0.12
	Feuille FIR	0.037

Tableau 3. Conductivité thermique des matériaux



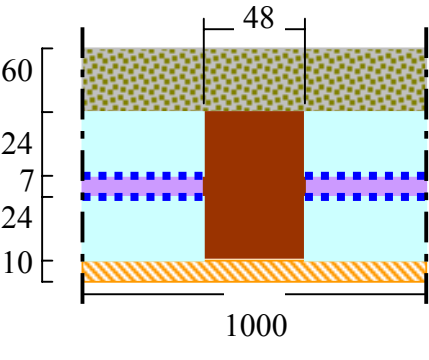
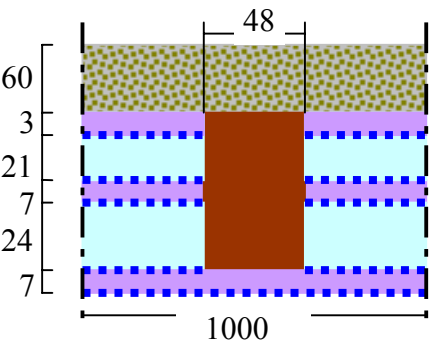
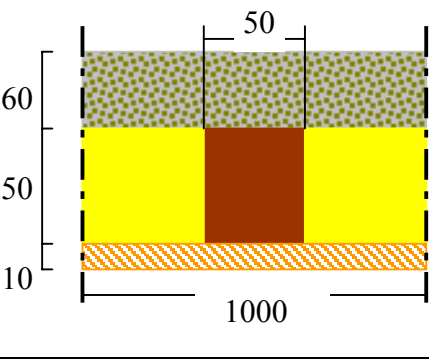

Toit avec lattes de bois Dimensions en mm ..... $\varepsilon = 0.1$	Eté $\theta_{e,R} = 65^\circ\text{C}$ $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ $R_{se} = 0.04$ [m <sup>2</sup> K/W]		Hiver $\theta_{e,R} = 5^\circ\text{C}$ $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ $R_{se} = 0.04$ [m <sup>2</sup> K/W]	
	 q		 q	
	$\lambda_{\acute{e}q}$ [W/mK]	0.042	$\lambda_{\acute{e}q}$ [W/mK]	0.059
	$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.17	$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.10
	q [W/m]	22.35	q [W/m]	9.13
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.48</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.60</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.024</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.020</b>
	$\lambda_{\acute{e}q}$ [W/mK]	0.034 / 0.033	$\lambda_{\acute{e}q}$ [W/mK]	0.047 / 0.054
	$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.79	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.18
	q [W/m]	14.78	q [W/m]	7.39
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.32</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.48</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.013</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.016</b>
	$\lambda$ [W/mK]	0.040	$\lambda$ [W/mK]	0.038
	$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	0.17	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.10
	q [W/m]	23.66	q [W/m]	7.96
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.50</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.50</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.026</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.030</b>
$\theta_{e,R}$	Température de rayonnement sur la face extérieure du toit. La valeur surélevée tient compte du rayonnement solaire direct en été et en hiver.			
$U_0$	Coefficient U du toit non perturbé (sans lattes)			
	Direction du flux thermique			
$\Psi$	Coefficient de déperditions thermiques des ponts thermiques linéaires selon la norme EN ISO 10211-1 Annexe C			

Tableau 4. Résultats des calculs bidimensionnels pour l'exemple 1.

On remarquera que les deux constructions FIR présentent un coefficient  $U_0$  beaucoup plus bas en été qu'en hiver. Cela est dû à l'inversion du sens du flux thermique et à son influence sur le transport de chaleur par convection dans les couches d'air. Il en résulte une modification d'une part de la conductivité thermique équivalente  $\lambda_{\acute{e}q}$  et d'autre part de la résistance thermique superficielle  $R_{si}$  sur le plafond (contre l'espace intérieur). Sur la construction en matériau isolant conventionnel l'inversion du sens du flux thermique n'entraîne qu'une modification de la résistance thermique superficielle  $R_{si}$  sur le plafond car le transport de chaleur dans le matériau isolant est déterminé par la conduction thermique qui est elle indépendante de la direction du flux thermique.

### Exemple 2: Toit avec construction FIR à une seule couche

Les deux tableaux suivants donnent les résultats de calculs bidimensionnels pour deux versions de constructions FIR pour les conditions estivales et hivernales. Les résultats obtenus avec une construction semblable utilisant un isolant conventionnel (épaisseur 60 mm) sont également donnés à titre de comparaison. L'écartement entre les poutrelles d'acier est de 3 m..



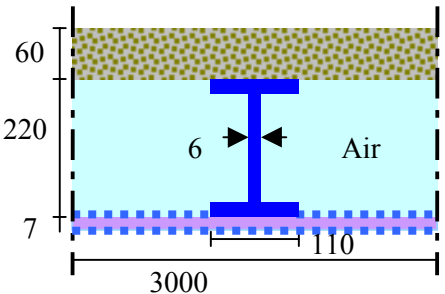
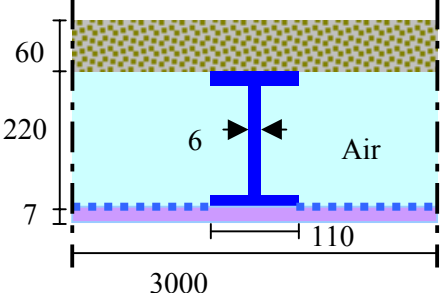
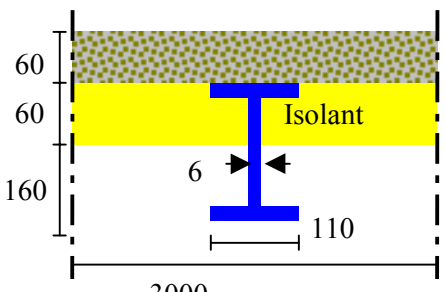

Toit avec poutrelles en acier Version 1  Dimensions en mm ..... $\varepsilon = 0.1$	Eté		Hiver	
	$\theta_{e,R} = 65^{\circ}\text{C}$	$\theta_i = 20^{\circ}\text{C}$	$\theta_{e,R} = 5^{\circ}\text{C}$	$\theta_i = 20^{\circ}\text{C}$
	$R_{se} = 0.04$ [W/m <sup>2</sup> K]		$R_{se} = 0.04$ [W/m <sup>2</sup> K]	
	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.22	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.56
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.79	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.18
	q [W/m]	55.74	q [W/m]	35.21
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.38</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.77</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.047</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.048</b>
	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.22	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.56
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.17	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.10
	q [W/m]	75.31	q [W/m]	37.61
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.53</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.82</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.095</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.056</b>
	$\lambda_D$ [W/mK]	0.040	$\lambda_D$ [W/mK]	0.038
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.17	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.10
	q [W/m]	69.73	q [W/m]	23.34
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.45</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.45</b>
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.193</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.203</b>
$\theta_{e,R}$	Température de rayonnement sur la face extérieure du toit. La valeur surélevée tient compte du rayonnement solaire direct en été et en hiver.			
$U_0$	Coefficient U du toit non perturbé (sans les poutrelles)			
	Direction du flux thermique			
$\Psi$	Coefficient de déperditions thermiques des ponts thermiques linéaires selon la norme EN ISO10211-1m Annexe C			

Tableau 5. Résultats des calculs bidimensionnels de la version de construction 1

Sur cette version (tableau 5), un plafond supporté par des poutrelles en acier est recouvert d'une feuille réfléchissante posée au-dessous des poutrelles métalliques. La couche d'air présente une épaisseur de 200 mm. Afin de mettre en évidence l'influence de la couche réfléchissante sur  $\lambda_{\text{éq}}$  et  $R_{si}$ , le calcul a été effectué pour une feuille avec un revêtement réfléchissant sur une face et pour une feuille avec revêtement réfléchissant sur ses deux faces.

On constate ici aussi sur les constructions FIR une nette différence entre l'été et l'hiver provenant de l'inversion du sens du flux thermique.

Sur la deuxième version (tableau 6), les poutrelles en acier sont enveloppées d'une feuille réfléchissante et la couche d'air ainsi créée entre la feuille et le plafond est plus mince (25 mm). Pour fixer la feuille réfléchissante, deux lattes de bois de section carrée sont fixées des deux côtés de chacune des poutrelles métalliques.



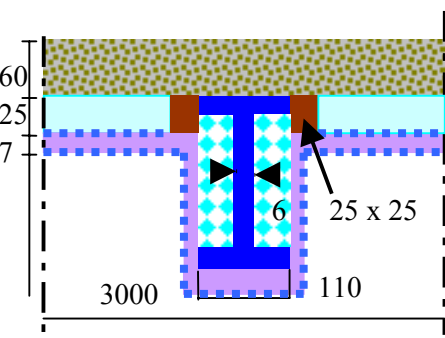
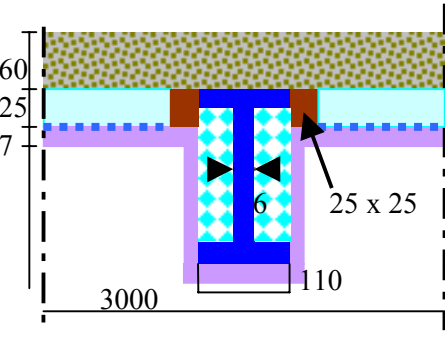
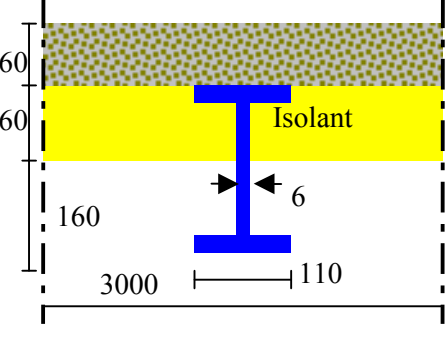

<b>Toit avec poutrelles en acier Version 2</b>  Dimensions en mm ..... $\varepsilon = 0.1$		<b>Eté</b> $\theta_{e,R} = 65^\circ\text{C}$ $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ $R_{se} = 0.04$ [W/m <sup>2</sup> K]		<b>Hiver</b> $\theta_{e,R} = 5^\circ\text{C}$ $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ $R_{se} = 0.04$ [W/m <sup>2</sup> K]	
					
	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.043	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.062	
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.79	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.18	
	$q$ [W/m]	69.28	$q$ [W/m]	35.97	
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.48</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.76</b>	
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.114</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.115</b>	
	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.043	$\lambda_{\text{éq}}$ [W/mK]	0.062	
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.17	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.10	
	$q$ [W/m]	96.74	$q$ [W/m]	38.22	
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.67</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.81</b>	
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.135</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.115</b>	
	$\lambda_D$ [W/mK]	0.040	$\lambda_D$ [W/mK]	0.038	
	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.17	$R_{si}$ [W/m <sup>2</sup> K]	0.10	
	$q$ [W/m]	69.73	$q$ [W/m]	23.34	
	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.45</b>	$U_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	<b>0.45</b>	
	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.193</b>	$\Psi$ [W/mK]	<b>0.203</b>	
$\theta_{e,R}$	Température de rayonnement sur la face extérieure du toit. La valeur surélevée tient compte d'un rayonnement solaire direct de 600 W/m <sup>2</sup> en été et de 300 W/m <sup>2</sup> en hiver.				
$U_0$	Coefficient U du toit non perturbé (sans poutrelles).				
	Direction du flux thermique.				
$\Psi$	Coefficient de déperditions des ponts thermiques linéaires selon EN ISO10211-1 Annexe C.				

Tableau 6. Résultats des calculs bidimensionnels pour la version de construction 2

Ici aussi l'influence de la couche réfléchissante sur  $\lambda_{\text{éq}}$  et  $R_{si}$  été déterminée pour une feuille avec un revêtement réfléchissant sur une face et pour une feuille avec revêtement réfléchissant sur ses deux faces.

## Résumé

Pour la détermination de la résistance thermique  $R$  de constructions avec des feuilles réfléchissant l'infrarouge, le **nombre** et l'**épaisseur** des couches d'air jouent un rôle tout aussi important que l'**émissivité  $\epsilon$**  des surfaces réfléchissant l'infrarouge. Il faut tenir compte du fait que la résistance thermique d'une couche d'air demeure constante à partir d'une certaine épaisseur (env. 2 cm pour les couches d'air horizontales et env. 1.3 cm pour les couches d'air verticales avec un flux thermique ascendant) et ne varie donc plus avec l'augmentation de leur épaisseur. L'épaisseur de la feuille elle-même ne joue qu'un rôle secondaire.

Un autre paramètre qui doit être déclaré est la **disposition géométrique** de la construction FIR. Il faut ainsi indiquer si la valeur  $R$  se rapporte à une paroi (avec couches d'air verticales) ou à un toit (avec couches d'air horizontales). Dans ce dernier cas il faut aussi faire une différenciation entre **l'hiver et l'été** (flux thermique descendant ou ascendant). Un troisième paramètre est le coefficient de déperditions thermiques des ponts thermiques linéaires  $\Psi$ . Ce coefficient est introduit pour tenir compte du flux thermique supplémentaire provoqué par les fixations de la construction (p. ex. lattage). Une déclaration correcte du produit doit ainsi mentionner toutes ces grandeurs déterminantes.

Une comparaison sur le plan thermique avec des isolants conventionnels n'est admissible que sur la base d'une déclaration complète.

A titre de résumé, le tableau 6 donne les coefficients  $U$  des constructions FIR représentatives prises en considération ici sur la base de la surface totale du toit et de la longueur totale des ponts thermiques linéaires  $\ell$  déterminante pour le coefficient de déperditions thermiques des ponts thermiques linéaires.

Construction	Eté	Hiver
	$U_0 = 0.48 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 15 \text{ m}^2$ $\psi = 0.024 \text{ W/mK}$ $\ell = 18 \text{ m}$ <b><math>U = 0.51 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>	$U_0 = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 15 \text{ m}^2$ $\psi = 0.020 \text{ W/mK}$ $\ell = 18 \text{ m}$ <b><math>U = 0.62 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>
	$U_0 = 0.50 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 15 \text{ m}^2$ $\psi = 0.026 \text{ W/mK}$ $\ell = 18 \text{ m}$ <b><math>U = 0.53 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>	$U_0 = 0.50 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 15 \text{ m}^2$ $\psi = 0.030 \text{ W/mK}$ $\ell = 18 \text{ m}$ <b><math>U = 0.54 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>
	$U_0 = 0.38 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.047 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>	$U_0 = 0.77 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.048 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.79 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>
	$U_0 = 0.48 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.114 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.53 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>	$U_0 = 0.76 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.115 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.81 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>
	$U_0 = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.193 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.53 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>	$U_0 = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$ $A = 120 \text{ m}^2$ $\psi = 0.203 \text{ W/mK}$ $\ell = 50 \text{ m}$ <b><math>U = 0.53 \text{ W/m}^2\text{K}</math></b>

Tableau 6. Résumé des résultats des calculs bidimensionnels