

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 113 (1987)  
**Heft:** 19

**Artikel:** Température de surface des vitrages  
**Autor:** Püntener, Toni W. / Frank, Thomas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76424>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Température de surface des vitrages

par Thomas Frank et Toni W. Püntener, Dübendorf

Les vitrages sont des éléments de construction complexes sur lesquels interagissent de nombreux facteurs. Aussi le Groupe de physique du bâtiment du LFEM a-t-il effectué un travail de recherche sur le thème « Détermination de la température de surface de vitrages exposés au rayonnement ».

Nous présentons ci-après des diagrammes ainsi qu'un programme en Basic développés dans le cadre de ce travail.

## Introduction

La détermination de profils de température de vitrage est intéressante à plus d'un titre :

- elle permet d'évaluer le confort thermique,
- elle est une donnée utile au calcul des charges thermiques,
- elle permet d'évaluer les risques de condensation en hiver,
- elle est un élément nécessaire au calcul des tensions mécaniques qui apparaissent au niveau des profils d'écartement des vitrages isolants.

La température de surface des vitrages peut être déterminée par mesure ou par calcul ; dans le cadre de ce projet, les deux approches ont été considérées. Des mesures par sondes de contact ont été comparées à des mesures sans contact direct (mesure IR). Pour ce qui est du calcul, un programme en Basic a été développé, il permet de tenir compte des différentes conditions aux limites (température de l'air, vent, rayonnements solaire et infrarouge). L'absorption du rayonnement peut varier très fortement selon le

type de vitrage considéré ; pour cela on doit disposer de données précises sur les caractéristiques optiques et thermiques de ces vitrages. La méthode appliquée s'appuie sur la norme DIN 67507 ; une norme internationale est actuellement en préparation dans le cadre de l'ISO.

## Mesure de température des verres

Les mesures de température de verres exposés au soleil sont toujours entachées d'une erreur, les sondes de mesures absorbant elles-mêmes le rayonnement. Le Département de physique du bâtiment a procédé à une étude détaillée des techniques de mesure et des erreurs qui leur sont liées. A côté des mesures effectuées au LFEM à Dübendorf, des mesures en conditions météorologiques extrêmes ont été effectuées sur le nouveau restaurant du Jungfrauoch.

L'absorption du rayonnement solaire par les verres conduit à un échauffement qui dépend de l'intensité du rayonnement et de l'absorption des verres.

Lors de l'utilisation de sondes de contact on devra veiller :

## Zusammenfassung

Verglasungen sind heute komplexe Bauelemente, müssen doch eine Vielzahl von Wechselbeziehungen erfasst und beurteilt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes bearbeitete die Abteilung Bauphysik der EMPA die messtechnische und rechnerische Bestimmung der Oberflächentemperaturen besonderer Glasscheiben. Es werden hierzu Hilfsmittel wie Diagramme und EDV-gerechte Lösungen in Form von Basic-Programmen bereitgestellt.

- à l'absorption propre de la sonde
- aux perturbations de la couche limite (correction)
- à la qualité du contact thermique entre la sonde et le verre.

Six types différents de sondes ont été testés (des Pt 100 et des thermocouples de différentes sections), les résultats de mesures ont été comparés à ceux effectués à l'aide de sondes IR.

Un thermomètre IR pour sa part doit satisfaire aux critères suivants :

- la sensibilité spectrale de la sonde doit être connue et se situer, dans la mesure du possible, entre 8 et 14  $\mu\text{m}$ ,
- les propriétés émissives de la surface à mesurer doivent être connues,
- les sources de perturbations de l'environnement doivent pouvoir être prises en compte (compensation électronique),
- on doit pouvoir procéder à une calibration de la sonde IR (à l'aide d'un corps noir).

Sept verres (1 verre normal, 4 verres absorbants et 2 verres sélectifs) ont été mesurés en conditions climatiques réelles. Dans ces conditions, les erreurs de mesures, liées aux différentes sondes, peuvent se résumer comme suit :

- Les sondes IR présentent les plus petites erreurs ( $\pm 0,2$  [K]).
- Les sondes résistives (Pt 100), du fait de leur taille, absorbent passablement de rayonnement, elles induisent ainsi des erreurs importantes (de 0,5 à 10 [K]). Avec de telles sondes, les meilleurs résultats sont obtenus avec les plus petites sondes de surface (feuilles de  $8 \times 8$  mm<sup>2</sup>).
- Pour les thermocouples, les erreurs diminuent avec le diamètre du fil (pour un diamètre de 0,2 mm, les erreurs sont comprises entre 0,2 et 2,5 [K]). Le maniement de fils aussi fins devient toutefois très vite critique du fait des risques de rupture.

## Modèle de calcul

Le procédé de calcul adopté pour la description des phénomènes radiatifs et thermiques est fondé sur les travaux de Rubin [2] <sup>1</sup>, sur les données de l'ASHRAE

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

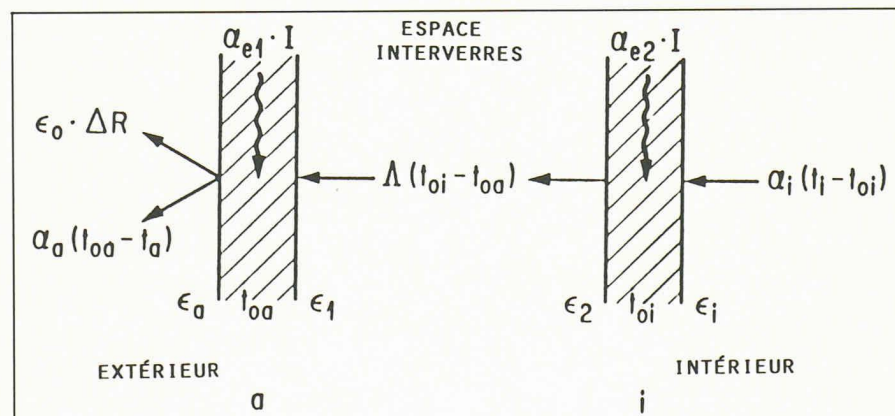


Fig. 1. — Flux de chaleur avec un vitrage double.

- $t_{oa}$  = température de la vitre extérieure [°C]
- $t_{oi}$  = température de la vitre intérieure [°C]
- $t_a$  = température de l'air extérieur [°C]
- $t_i$  = température ambiante intérieure [°C]
- $\alpha_a$  = coefficient de transfert de chaleur extérieur [W/m<sup>2</sup>K]
- $\alpha_i$  = coefficient de transfert de chaleur intérieur [W/m<sup>2</sup>K]
- $\Lambda$  = coefficient de transfert de chaleur de l'espace interverres [W/m<sup>2</sup>]
- $\alpha_{e1}$  = coefficient d'absorption de la vitre extérieure
- $\alpha_{e2}$  = coefficient d'absorption de la vitre intérieure
- $I$  = rayonnement solaire global dans le plan de la fenêtre [W/m<sup>2</sup>]
- $\epsilon_w, \epsilon_i$  = émissivité des surfaces extérieure et intérieure du vitrage
- $\epsilon_e, \epsilon_2$  = émissivité des deux surfaces comprises dans l'espace interverres
- $\Delta R$  = rayonnement IR vers le ciel [W/m<sup>2</sup>] (différence entre l'émission d'un corps noir à la température de l'air et l'émission effective vers le ciel)



[3], ainsi que sur les résultats du projet de recherche effectué par le LFEM et l'EPFZ pour le Fonds national [4]. Le modèle de calcul permet de traiter jusqu'à quatre verres opaques à l'infrarouge. Il permet aussi bien le calcul avec des coefficients de transferts normalisés, que le calcul explicite des transferts de chaleur, sur la base d'un processus itératif. La figure 1 schématise les divers flux de chaleur rencontrés avec un double vitrage.

Le rayonnement ( $\epsilon$ ) absorbé dans les verres peut être considéré comme une source de chaleur, alors que les pertes radiatives supplémentaires du verre extérieur peuvent être assimilées à un puits. Ces deux processus ont une influence importante sur les profils de température des verres. A titre indicatif, les pertes radiatives vers le ciel de surfaces verticales peuvent atteindre 30 à 60 [W/m<sup>2</sup>] par temps clair; pour des surfaces horizontales on atteint 70 à 130 [W/m<sup>2</sup>] [4]. En annexe, les formules nécessaires au calcul des divers flux de chaleur sont données.

Les figures 2 et 3 donnent les coefficients spécifiques de transfert de chaleur, par convection et rayonnement, pour les surfaces intérieure et extérieure du vitrage. La figure 4 montre l'influence de la distance entre les verres sur le coefficient de

transfert de chaleur  $A$ , en fonction du type de verre (émissivité) et du gaz compris entre les verres.

Les deux exemples suivants présentent une application du modèle de calcul.

*Exemple 1: Source de chaleur due au rayonnement solaire*

Un verre isolant double athermique (5/12/5) reçoit, en façade ouest et en été, un rayonnement solaire maximal de 600 [W/m<sup>2</sup>]. On peut calculer dans ces conditions la température de surface des verres, de même que l'apport de chaleur par rayonnement secondaire.

Données:

- $t_a = 30^\circ\text{C}$                        $t_i = 26^\circ\text{C}$
- $V_{\text{vent}} = 2 \text{ m/s}$                        $\Delta R = 30 \text{ W/m}^2$
- $\alpha_{e1} = 47\%$                        $\alpha_{e2} = 1\%$
- $I = 600 \text{ W/m}^2$

Résultats:

- $t_{oa} = 42,3^\circ\text{C}$                        $t_{oi} = 30,6^\circ\text{C}$
- $\alpha_i = 18,3 \text{ W/m}^2\text{K}$                        $\alpha_i = 7,9 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $q_i = \alpha_i (t_{oi} - t_i) = 36,3 \text{ W/m}^2$

*Exemple 2: Perte de chaleur par rayonnement IR vers le ciel*

On désire calculer la température de surface du pare-brise d'une voiture parkée à l'extérieur par temps clair.

$\alpha_e, \alpha_i$	= coefficient de transfert de chaleur ext., int.	[W/m <sup>2</sup> ]
$\beta$	= coefficient de dilatation du gaz	[1/K]
$\epsilon_i$	= émissivité de la surface $i$	
$\epsilon_{\text{ciel}}$	= émissivité du ciel	
$\lambda$	= coefficient de conductibilité thermique	[W/mK]
$\mu$	= viscosité dynamique du gaz	[kg/ms]
$\rho$	= densité du gaz	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	= constante de Stephan Boltzmann:	5,67 E-8 [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$F_{\text{ciel}}$	= facteur de forme entre la fenêtre et le ciel	
$Gr$	= nombre de Grashoff	
$Nu$	= nombre de Nusselt	
$Pr$	= nombre de Prandtl	
$Ra$	= nombre de Rayleigh	
$\Delta R$	= rayonnement IR vers le ciel	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_a$	= température absolue de l'air extérieur	[K]
$T_m$	= température radiative moyenne	[K]
$c$	= degré de couverture nuageuse du ciel	[1/10]
$g$	= accélération terrestre	[m/s <sup>2</sup> ]
$s$	= largeur de l'espace interverres	[m]
$\Delta t$	= différence de température dans l'espace interverres	[°C]
$V_{\text{vent}}$	= vitesse du vent	[m/s]

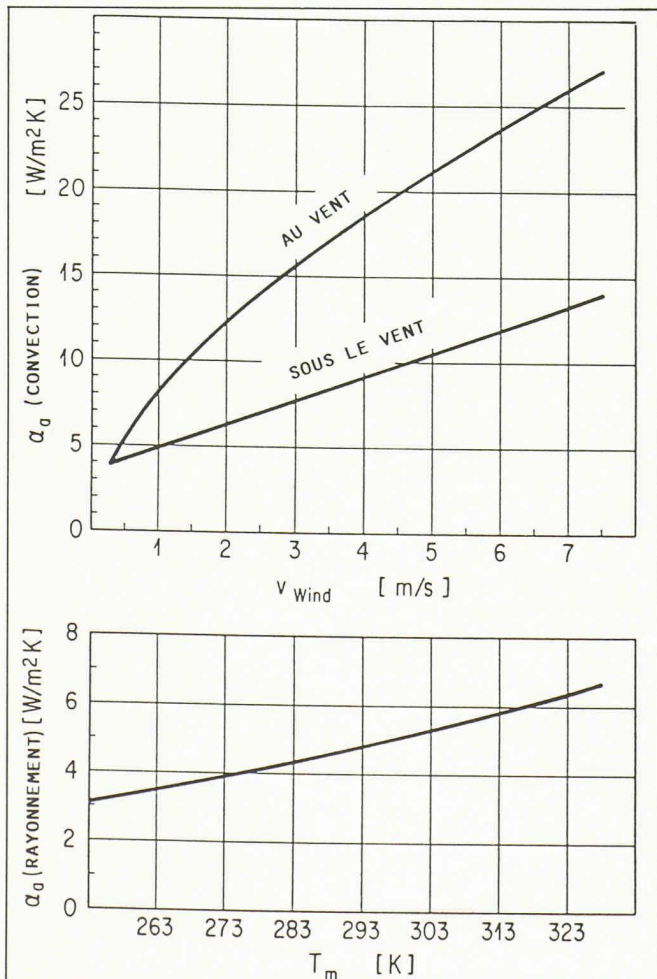


Fig. 2. — Coefficient de transfert de chaleur vers l'extérieur (convection et rayonnement).

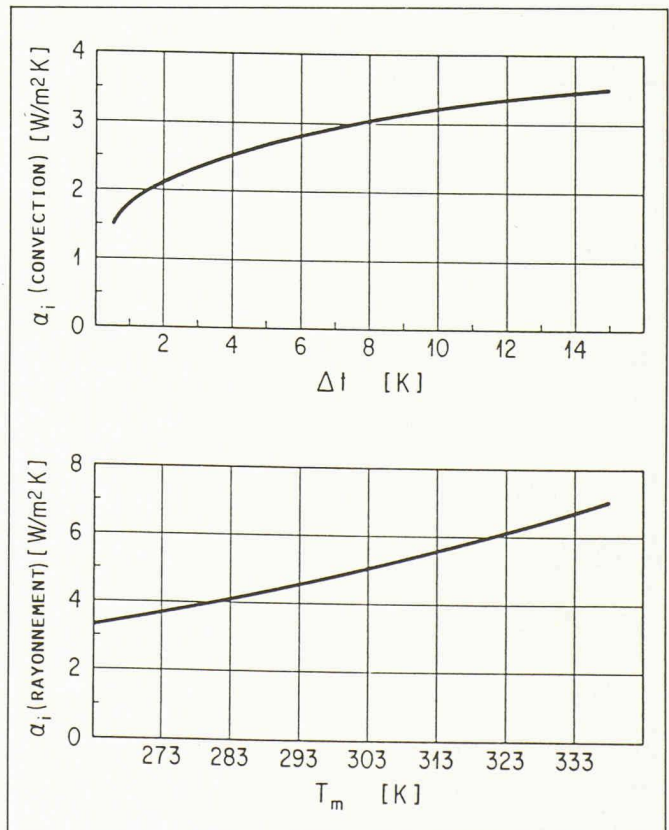


Fig. 3. — Coefficient de transfert de chaleur vers l'intérieur (convection et rayonnement).



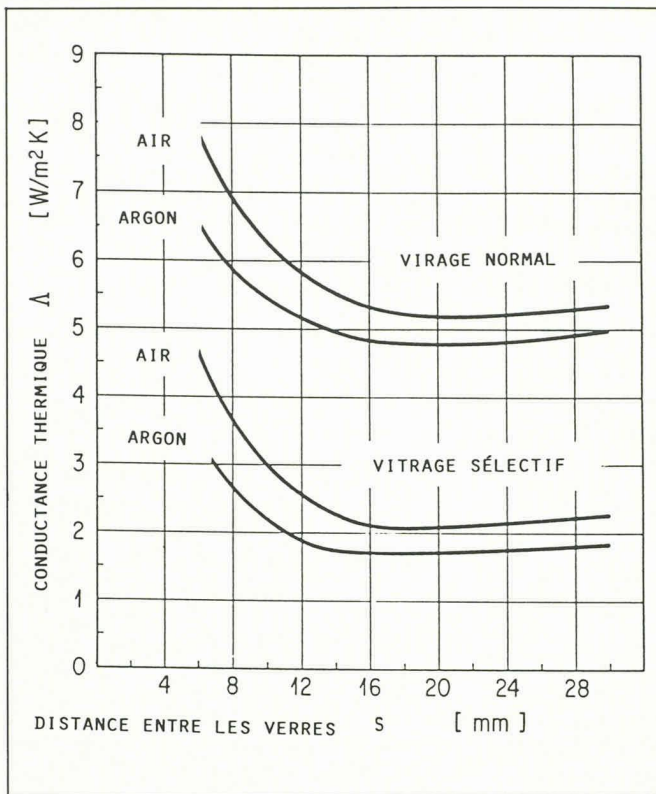


Fig. 4. — Transfert de chaleur dans l'espace entre les deux verres pour un vitrage normal ( $\epsilon = 0,84$ ) et pour un vitrage sélectif ( $\epsilon_1 = 0,84, \epsilon_2 = 0,10$ ).

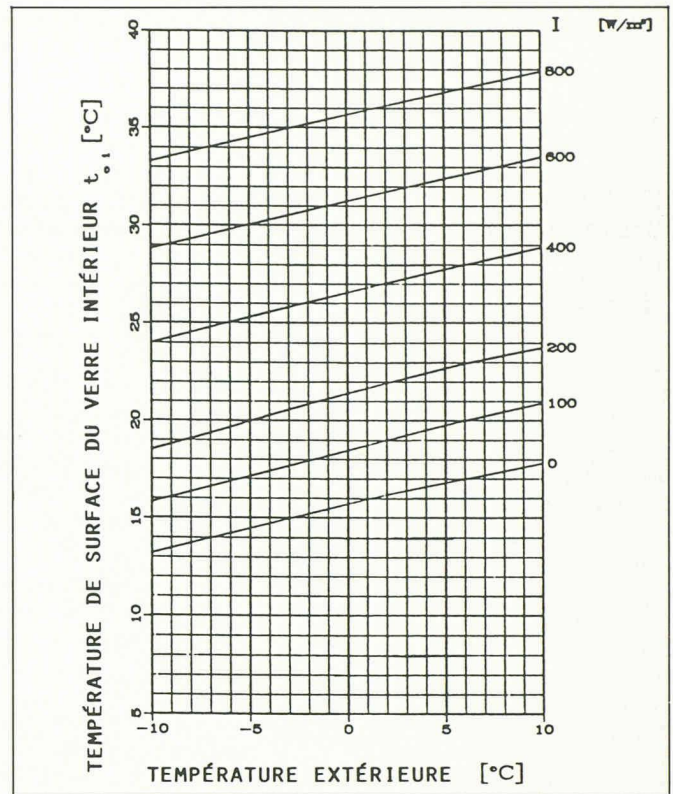


Fig. 5. — Diagramme donnant la température du verre intérieur d'un verre sélectif isolant de type confort (4/15/4 mm), valable pour  $t_i = 20^\circ\text{C}$ .

Données:

$$t_a = t_i = 4^\circ\text{C}$$

$$V_{\text{vent}} = 0,1 \text{ m/s}$$

$$\Delta R = 70 \text{ W/m}^2 \text{ (pare-brise incliné)}$$

Résultats:

$$t_{\text{vitrage}} = -0,3^\circ\text{C}$$

$$\alpha_a = 7,9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_i = 6,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Des diagrammes ont été établis; ils permettent une détermination rapide de la température de surface de vitrages exposés au rayonnement. A titre illustratif, la figure 5 présente un tel diagramme.

#### Bibliographie

- [1] NEFF-Bericht Nr. 266 «Oberflächen-temperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort», EMPA, Dübendorf, 1986.
- [2] RUBIN, M.: «Calculating heat transfer through windows», *Energy Research*, Vol. 6, 1982.
- [3] *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, 1985.
- [4] NF-Projekt «Strahlungsvorgänge an Gebäudeoberflächen», LFEM + EPFZ:
  - Messbericht «Testkabinen Maugwil», 1982
  - Programmbeschrieb «HELIOS 1», 1982
  - Meteo-Daten Maugwil, 1981.

Adresse des auteurs:

Thomas Frank, ing. dipl. EPFZ  
Toni W. Püntener, ing. dipl. HLK  
LFEM — Groupe de physique  
du bâtiment  
8600 Dübendorf

ANNEXE: Formules nécessaires au calcul des divers flux de chaleur

Transfert de chaleur vers l'extérieur

$$\alpha_a = \alpha_a \text{ (rayonnement)} + \alpha_a \text{ (convection)}$$

$$\alpha_a \text{ (rayonnement)} = \epsilon_a \sigma (1 - \epsilon_{\text{ciel}}) T_a^4$$

$$\Delta R = F_{\text{ciel}} \cdot \sigma \cdot (1 - \epsilon_{\text{ciel}}) \cdot T_a^4$$

$$\epsilon_{\text{ciel}} (\text{C}) = (1 - 0,84 c) \epsilon_{\text{ciel}} (0) + 0,84 c$$

$$\alpha_a \text{ (convection)} = 8,1 (V_{\text{vent}})^{0,6} \text{ côté du vent}$$

$$\alpha_a \text{ (convection)} = 3,5 + 1,4 V_{\text{vent}} \text{ côté sous le vent}$$

Transfert de chaleur entre les verres

$$A = A \text{ (rayonnement)} + A \text{ (convection)}$$

$$A \text{ (rayonnement)} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot (1/(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1))$$

$$A \text{ (convection)} = Nu \cdot \lambda / s$$

$$Nu = 1 \text{ pour } Ra \leq 5000$$

$$= 0,0429 \cdot (Ra)^{0,37} \text{ pour } 5000 < Ra \leq 60000$$

$$= 0,43 \cdot (Ra)^{0,16} \text{ pour } 60000 < Ra \leq 150000$$

$$= 0,354 \cdot (Ra)^{0,37} \text{ pour } Ra > 150000$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho^2 \cdot s^3 \cdot \Delta t}{\mu^2}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

Transfert de chaleur vers l'intérieur

$$\alpha_i = \alpha_i \text{ (rayonnement)} + \alpha_i \text{ (convection)}$$

$$\alpha_i \text{ (rayonnement)} = 0,80 \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3$$

$$\alpha_i \text{ (convection)} = 1,77 \cdot (\Delta t)^{0,25} \text{ écoulement turbulent}$$