

"Analyse énergétique des bâtiments" Notes de Cours
Préparé par D. Mather

BE1 : ENVELOPPE DU BÂTIMENT

1. Introduction
2. Valeur U et valeur R : Unités métriques et unités IP
3. Valeurs R nominales de certains types d'isolants
4. Pont thermique
5. Flux d'énergie à travers les fenêtres
6. Valeurs U des fenêtres
7. "Valeurs U " d'ordre de grandeur
8. Le problème des flux d'énergie parallèles
9. Coefficient de gain de chaleur solaire

Annexe : Extraits du Guide du pont thermique

Aperçu du module

Ce module fournit un bref résumé de certains aspects liés à l'analyse énergétique des composants de l'enveloppe du bâtiment. Le matériel se concentre sur deux "points faibles" typiques de l'enveloppe des bâtiments : les "ponts thermiques" et les fenêtres.

Note : Le contenu de ce module est plus qualitatif que quantitatif.

Résultats d'apprentissage visés par le cours :

- Appliquer les calculs énergétiques de base à une variété de composants et de systèmes ayant un impact sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.
- Reconnaître les effets interactifs entre les différents composants et systèmes du bâtiment en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie.

1. Introduction

L'enveloppe du bâtiment assure la séparation entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur. Ses composants sont notamment les murs, les fenêtres et les toits. Les flux d'énergie à travers l'enveloppe peuvent avoir un impact important sur la consommation d'énergie du bâtiment. En fait, ces flux sont souvent le facteur dominant de la consommation d'énergie des bâtiments, en particulier dans les endroits où il existe de grandes différences entre les conditions intérieures et extérieures souhaitées (p. ex., dans les climats chauds ou froids).

Les modes importants de transfert d'énergie à travers l'enveloppe du bâtiment sont les suivants :

- la transmission thermique (p. ex. à travers les surfaces solides ; valeur U)
- transmission de l'énergie solaire
- le mouvement de l'air ("ventilation")

Les deux voies de *transmission* mentionnées ci-dessus impliquent un flux d'énergie sans flux de masse et se présentent sous une ou plusieurs formes de flux de chaleur à travers des surfaces solides. Il est courant de diviser les surfaces solides en deux catégories :

- composants (ou assemblages) opaques : la capacité du rayonnement à ondes courtes (p. ex. l'énergie solaire) à traverser directement la surface est négligeable ; le rayonnement peut être réfléchi et/ou absorbé.
- Composants (ou assemblages) de vitrage : transparents/translucides (p. ex., fenêtres, puits de lumière) ; permettent le passage direct d'une partie du rayonnement de courte longueur d'onde qui les frappe.

Pour un composant opaque - à condition qu'il soit effectivement "étanche à l'air" - la principale caractéristique pertinente pour la performance énergétique est généralement la **valeur U effective**. En outre, nous pourrions dire que c'est la taille de l'élément combinée à sa valeur U - c.à.d. le "**produit UA**" - qui détermine réellement son importance. Cependant, d'autres caractéristiques peuvent être importantes pour la performance énergétique, comme la "capacité thermique" (c.à.d. la capacité à stocker l'énergie thermique).

Pour un composant de vitrage - à condition qu'il soit effectivement "étanche à l'air" - nous considérons généralement que les caractéristiques importantes sont la **valeur U effective** et le **coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)**. Le SHGC indique la capacité du composant à laisser passer l'énergie solaire d'un côté et à la transformer en gain de chaleur pour l'environnement de l'autre côté. Ces caractéristiques, ainsi que la taille du composant, déterminent généralement l'importance du composant.

LECTURE :

Lisez le bref article suivant (12 pages) du professeur John Straube, UW CEE..

["BSD-011 : Thermal Control in Buildings"](#) John Straube, déc. 2011.

2. Valeur U et valeur R : Unités métriques et unités IP

L'équation simple du coefficient de transmission thermique est la suivante :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_H - T_C) = \frac{A}{R} \cdot (T_H - T_C)$$

Les unités des termes de l'équation sont généralement indiquées ci-dessous, selon que les calculs sont effectués en unités métriques (SI) ou en unités pouces-livres (IP) :

| Durée | Métrique | IP |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|
| \dot{Q} | W | btu/hr |
| A | m^2 | ft^2 |
| T_H, T_C | $^{\circ}C$ | $^{\circ}F$ |
| U | $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ | $btu/hr \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F$ |
| R | $m^2 \cdot ^{\circ}C/W$ | $hr \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F/btu$ |

En Amérique du Nord, les deux systèmes d'unités sont fréquemment rencontrés et il est donc utile de pouvoir travailler dans les deux systèmes et de faire la conversion entre les deux. L'industrie nord-américaine utilise souvent la convention suivante :

| Durée | Unités présumées |
|------------------------|-------------------------------------|
| "U" ou "valeur U" | $btu/hr \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F$ |
| "USI" ou "valeur USI". | $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ |
| "R" ou "valeur R" | $hr \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F/btu$ |
| "RSI" ou "valeur RSI". | $m^2 \cdot ^{\circ}C/W$ |

Facteurs de conversion :

$$\text{Valeur U} \times 5,678 = \text{Valeur USI}$$

$$\text{Valeur R} \div 5,678 = \text{Valeur RSI}$$

Exemple :

Isolation en polystyrène extrudé (XPS)

Typiquement "R-5 par pouce" (à "température ambiante")

Une pièce de 2 pouces d'épaisseur est classée "**R-10**"

Valeur RSI = Valeur R \div 5,678 = 10 \div 5,678 \approx **1,76**



Note : La valeur U pour une couche de 2 pouces de cet isolant :

$$U = 1/R = 1/10 = \mathbf{0.1} \text{ (btu/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F)}$$

$$USI = 1 / RSI = 1/ 1.76 \approx \mathbf{0.568} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

ou

$$USI = U \times 5.678 = 0.1 \times 5.678 \approx 0.568 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)}$$

3. Valeurs R nominales de certains types d'isolants

Pour une isolation correctement installée, non comprimée, non endommagée et en l'absence de mouvement d'air à travers l'isolation, voici les valeurs R approximatives (résistance thermique à long terme ou "valeur R vieillie") généralement attribuées à différents types d'isolation (à une température ambiante approximative) :

| Type | Valeur R par pouce |
|--|--------------------|
| 1. Natte en fibre de verre | ≈ 3.3 |
| 2. Laine minérale | ≈ 4.3 |
| 3. Feuille de polystyrène expansé (EPS) | ≈ 4 |
| 4. Plaque de polystyrène extrudé (XPS) | ≈ 5 |
| 5. Feuille de polyisocyanurate ("polyiso") | ≈ 6 |



Les valeurs R réelles dépendent des conditions d'installation et de fonctionnement. (p. ex. : Voir Building Science Corporation "[Info-502 : Temperature Dependence of R-values in Polyisocyanurate Roof Insulation](#)", 12 avril 2013. Veuillez noter que la référence à ce document n'est fournie qu'à titre d'information, c.à.d. que son examen est facultatif - il ne sera pas utilisé lors d'un test, d'un quiz ou d'un examen).

4. Pont thermique

Le pont thermique peut avoir un impact important sur la performance thermique d'un assemblage. Ce phénomène se produit lorsque des composants non isolants créent des chemins thermiques qui permettent à la chaleur de contourner les composants isolants, augmentant ainsi la valeur U globale.

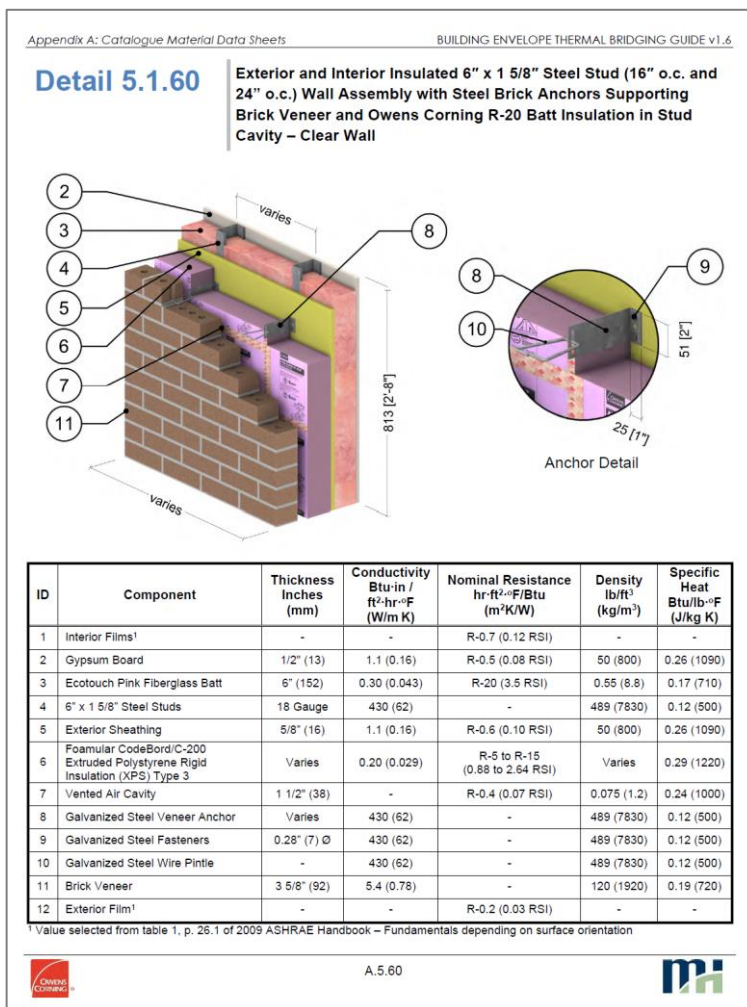
Selon la situation, les effets du pont thermique peuvent aller de "modestes" (p. ex., les montants en bois dans la construction résidentielle) à "très importants" (p. ex., les composants en aluminium dans les systèmes de murs-rideaux/fenêtres/murs).

Guide du pont thermique de l'enveloppe du bâtiment (BETBG) version 1.6 (2021)

<https://www.bchousing.org/research-centre/library/residential-design-construction/building-envelope-thermal-bridging-guide>

C'est seulement
1413 pages !

- Fournit des conseils sur le calcul des valeurs U effectives pour les assemblages afin de prendre en compte l'impact des ponts thermiques. Il inclut de nombreux assemblages modernes courants.



VIDÉO + LECTURE :

1. ["Vidéo 1 - Introduction au guide du pont thermique de l'enveloppe du bâtiment"](#)
(11 minutes)

2. Parcourez le contenu du **corps principal (sec. 1 à 6, pages 1 à 31)** des BETBG. Révisez le contenu jusqu'à ce que vous ayez une compréhension raisonnable des termes de l'équation du coefficient de transmission thermique effectif :

$$U_T = U_o + \frac{\sum(\psi \cdot L) + \sum(\chi)}{A_{total}}$$

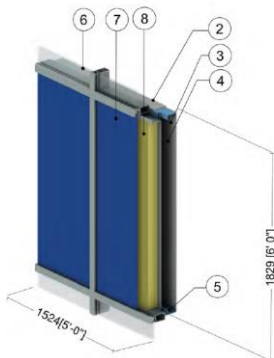
$\psi = psi$
 $\chi = chi$

↑ ↑ ⏟
 champ libre les "anomalies" linéaires et ponctuelles

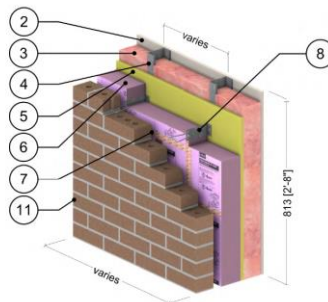
↑
transmittance thermique effective totale de l'assemblage

3. Examinez et essayez de comprendre les fiches d'information des annexes A et B des BETBG pour les **trois** détails de construction énumérés ci-dessous. Comparez les valeurs de champ libre des trois types. (Note : Des copies de ces fiches sont fournies dans l'annexe de cette série de notes).

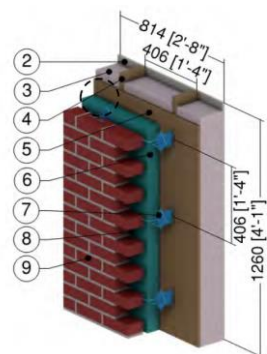
Détail 4.1.1



Détail 5.1.60



Détail 8.1.19



5. Flux d'énergie par les fenêtres

L'énergie peut traverser l'enveloppe du bâtiment à travers les fenêtres (et autres vitrages) par transmission thermique, transmission solaire et mouvement d'air. Pour de nombreux bâtiments, les flux d'énergie à travers les fenêtres sont les flux d'énergie dominants à travers l'enveloppe et auront un impact significatif sur les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement.

La transmission de la lumière du jour visible à travers les vitrages peut fournir un éclairage utile, mais peut parfois causer des problèmes d'inconfort visuel ou thermique (p. ex., lorsque la lumière directe du soleil passe à travers une fenêtre).

"Fenestration" - En architecture et en ingénierie du bâtiment, ce terme général désigne les fenêtres, les lucarnes et les portes d'un bâtiment (c.à.d. les "ouvertures").

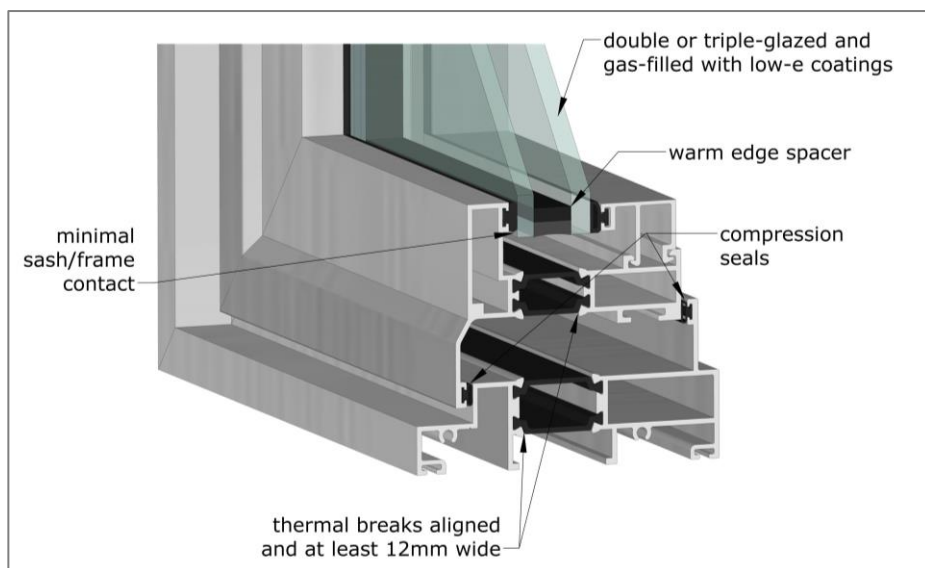
Principaux indicateurs de performance

Voici les principaux indicateurs de performance qui nous intéressent :

- Valeur U Transmittance thermique effective
- SHGC Coefficient de gain de chaleur solaire
- VLT (ou VT) Transmittance de la lumière visible

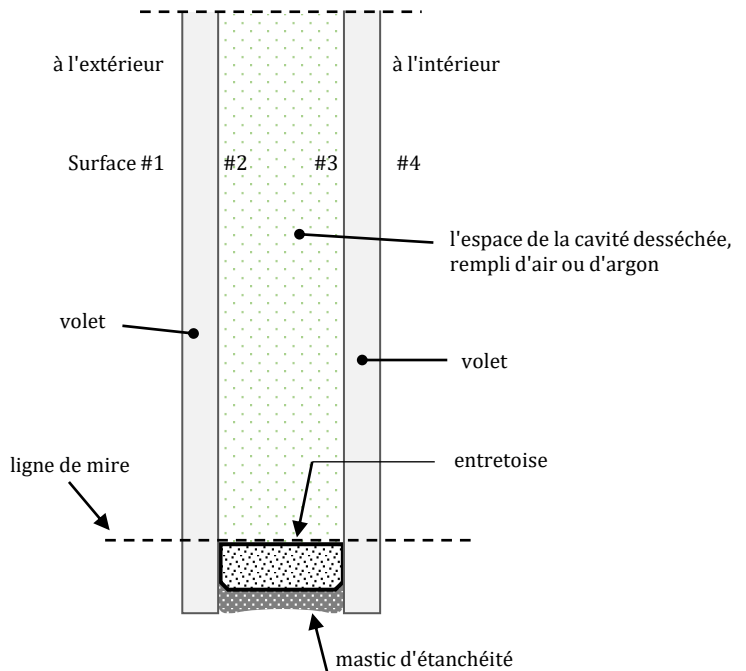
Composants de la fenêtre

Lorsque l'on parle de technologie des fenêtres, on classe souvent un composant comme faisant partie du vitrage isolant (IGU) ou du cadre. Les principaux composants d'un vitrage isolant sont les vitres et les intercalaires.



Détails typiques d'un Double vitrage IGU

(Adapté du manuel ASHRAE du fondamental 2009 SI)



LECTURE ET VIDÉO :

- Lisez le document d'une page intitulé ["Technology Primer"](#), publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN).
- La vidéo suivante présente les principaux composants d'une fenêtre. Le processus de fabrication présenté est celui d'un fabricant de fenêtres résidentielles. Notez que la vidéo est informative, mais qu'il s'agit également d'une longue publicité pour le fabricant, et qu'il convient donc de faire preuve d'esprit critique pendant le visionnage.

"Visite de l'usine de fenêtres Simonton Visite de l'usine Simonton Windows"
2013 <https://youtu.be/BZY5-T E5MA> (19 minutes)



6. Valeurs U des fenêtres

"Performance au centre du verre et performance globale"

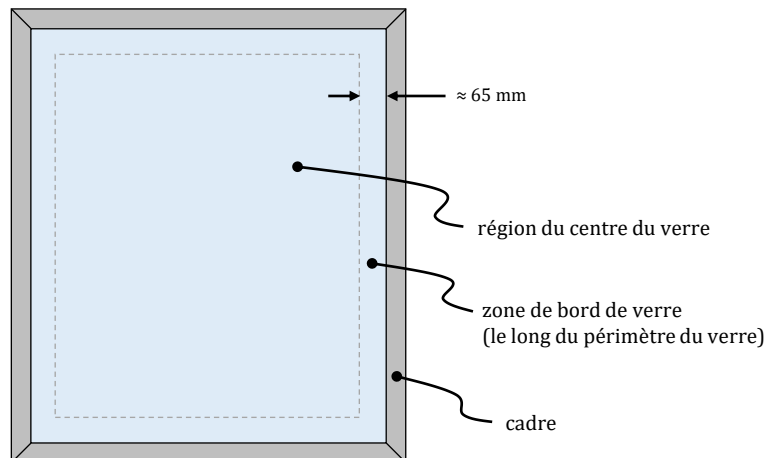
Lorsqu'il est question des performances des fenêtres, les mesures peuvent être indiquées pour la région du "centre du vitrage" ou pour l'ensemble de la fenêtre (c.à.d. y compris l'intercalaire et le cadre).

Dans la région du centre du vitrage, les flux d'énergie sont traités comme unidimensionnels (c.à.d. le long de la direction normale aux vitres). Dans les régions du bord du verre et du cadre, les flux d'énergie sont plus complexes, c.à.d. bidimensionnels ou tridimensionnels. (Remarque : la région du bord du verre est généralement considérée comme s'étendant à ≈ 65 mm de la "ligne de vue").

En général, on peut dire que la valeur U globale de l'unité dépend de la performance du centre du vitrage, du bord du vitrage et des parties du cadre :

$$U_o = \frac{U_{cg}A_{cg} + U_{eg}A_{eg} + U_fA_f}{A_o}$$

Pour ce cours, il suffit d'être conscient de la différence fondamentale entre la signification du "centre du verre" et celle de la performance "globale".



Le tableau ci-dessous indique les valeurs U au centre du vitrage et les valeurs U globales de la fenêtre pour certains systèmes de vitrage et de cadre. Les principales variations dans les types de vitrage et de cadre sont les suivantes :

- Nombre de vitres (simple, double, triple)
- Utilisation d'un revêtement à faible émissivité ("low-e")
- Cavités remplies d'air ou d'argon (pour les fenêtres à double ou triple vitrage)
- Type de matériau du cadre (influence sur la conductivité thermique du cadre)

Transmittance thermique effective approximative (W/m² -°C) pour une sélection de produits de fenêtrage

(Pour les "fenêtres fixes" ; d'après le Handbook of Fundamentals 2009 de l'ASHRAE)

| Vitrage Type | Rangée # | Remplir Gaz | IGU uniquement | Fenêtre globale | |
|--|-------------|----------------|----------------------|--|---|
| | | | Centre - de verre | Alum. Cadre (avec thermique pause) | Fibre de verre ou Cadre en vinyle |
| Simple vitrage | 1 | s/o | 5.91 | 6.06 | 5.40 |
| Double vitrage | 2 | l'air | 2.73 | 3.18 | 2.72 |
| | 3 | argon | 2.56 | 3.04 | 2.58 |
| Double vitrage + faible émissivité e = 0,20 (surface 2 ou 3) | 4 | l'air | 1.99 | 2.55 | 2.12 |
| | 5 | argon | 1.70 | 2.30 | 1.88 |
| Double vitrage + faible émissivité e = 0,05 (surface 2 ou 3) | 6 | l'air | 1.70 | 2.30 | 1.88 |
| | 7 | argon | 1.42 | 2.06 | 1.65 |
| Triple vitrage | 8 | l'air | 1.76 | 2.34 | 1.92 |
| | 9 | argon | 1.65 | 2.24 | 1.83 |
| Triple vitrage + deux revêtements à faible émissivité e = 0,20 (surface 2/3 & 4/5) | 10 | l'air | 1.14 | 1.80 | 1.40 |
| | 11 | argon | 0.97 | 1.65 | 1.26 |

Notes :


- Installation verticale
- Entretoise en aluminium
- Dimensions totales : 1,5 m (h) x 1,2 m (l)
- Largeur du cadre : aluminium = 33 mm, fibre de verre/vinyle = 46 mm

LECTURE :

"Comment fonctionne le verre à faible émissivité ?

<http://glassed.vitroglazings.com/topics/how-low-e-glass-works>

Veuillez consulter les informations sur le site web indiqué. Essayez d'acquérir une compréhension générale de la signification de "low-e" (faible émissivité). Notez qu'une vidéo sur le site web couvre les mêmes informations que celles fournies par le texte.

**Glass Education Center**

GLASS TOPICS ▾
Detailed Information Provided

GLASS FAQs ▾
Common Questions Answered

GLOSSARY ▾
Important Terms


Learn About Glass

[Home](#) » [Topics](#) » [How Low-e Glass Works](#)


posted in Low-E Glass, Video

[Like](#) [Share](#) [Tweet](#)

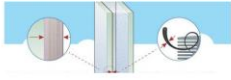
Related posts you may also enjoy



What's the Difference Between U-Value and R-Value?



Specifying Heat-Rated Glass



The Science of Low-E Coatings

How Low-e Glass Works

Glass is one of the most popular and versatile building materials used today, due in part to its constantly improving solar and thermal performance. One way this performance is achieved is through the use of passive and solar control low-e coatings. So, what is low-e glass? In this section, we provide you with an in-depth overview of coatings.

In order to understand coatings, it's important to understand the solar energy spectrum or energy from the sun. Ultraviolet (UV) light, visible light and infrared (IR) light all occupy different parts of the solar spectrum – the differences between the three are determined by their wavelengths.





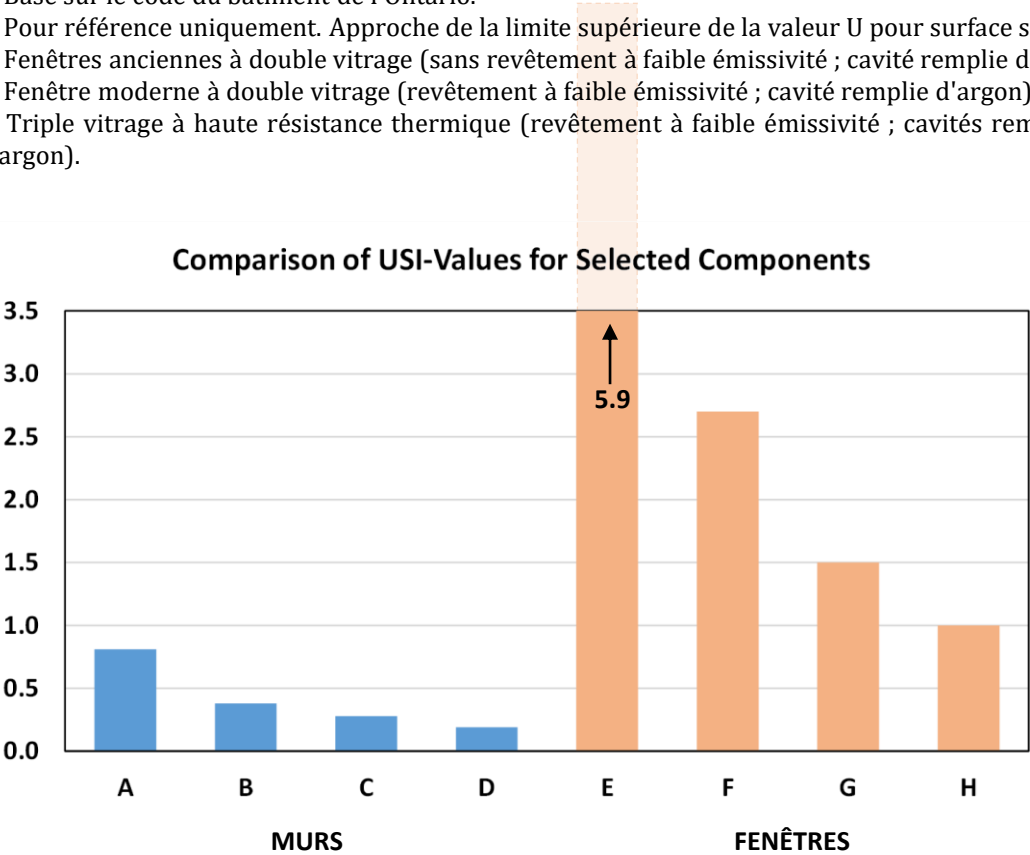
7. "Ordre de grandeur" Valeurs U

Pour certaines discussions, il est utile d'avoir une idée de la fourchette des valeurs U typiques que l'on peut s'attendre à trouver dans la construction d'un bâtiment. Comparons plusieurs assemblages de murs et la performance du centre du vitrage pour plusieurs fenêtres.

| Type | Description | U (W/m ² · °C) | Équivalent Valeur R |
|----------|--|------------------------------|------------------------|
| Murs | A. Faible résistance thermique ¹ | 0.81 | R-7 |
| | B. Typique "conforme au code" ² | 0.38 | R-15 |
| | C. "Mieux que le code" | 0.28 | R-20 |
| | D. Haute performance | 0.19 | R-30 |
| Fenêtres | E. Simple vitrage ³ | 5.9 | R-1.0 |
| | F. "Double vitrage "conventionnel" ⁴ | 2.7 | R-2.1 |
| | G. Double vitrage à haute performance ⁵ | 1.5 | R-3.8 |
| | H. Triple vitrage haute performance ⁶ | 1.0 | R-5.7 |

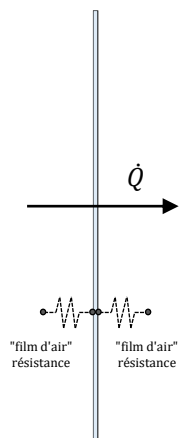
Notes :

1. p. ex., panneau d'allège dans un mur-rideau à ossature aluminium.
2. Basé sur le code du bâtiment de l'Ontario.
3. Pour référence uniquement. Approche de la limite supérieure de la valeur U pour surface solide.
4. Fenêtres anciennes à double vitrage (sans revêtement à faible émissivité ; cavité remplie d'air).
5. Fenêtre moderne à double vitrage (revêtement à faible émissivité ; cavité remplie d'argon).
6. Triple vitrage à haute résistance thermique (revêtement à faible émissivité ; cavités remplies d'argon).



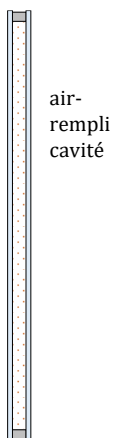
Performances représentatives de certains systèmes de vitrage

E. Simple vitrage



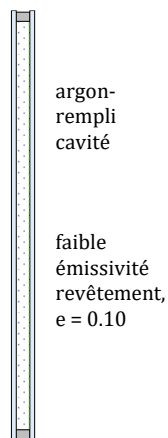
$$USI_{cg} \approx 5.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

F. Conventionnel
Double vitrage



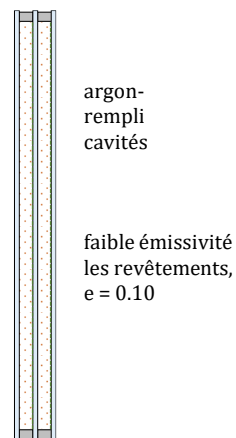
$$\approx 2.7$$

G. Haute performance
Double vitrage



$$\approx 1.5$$

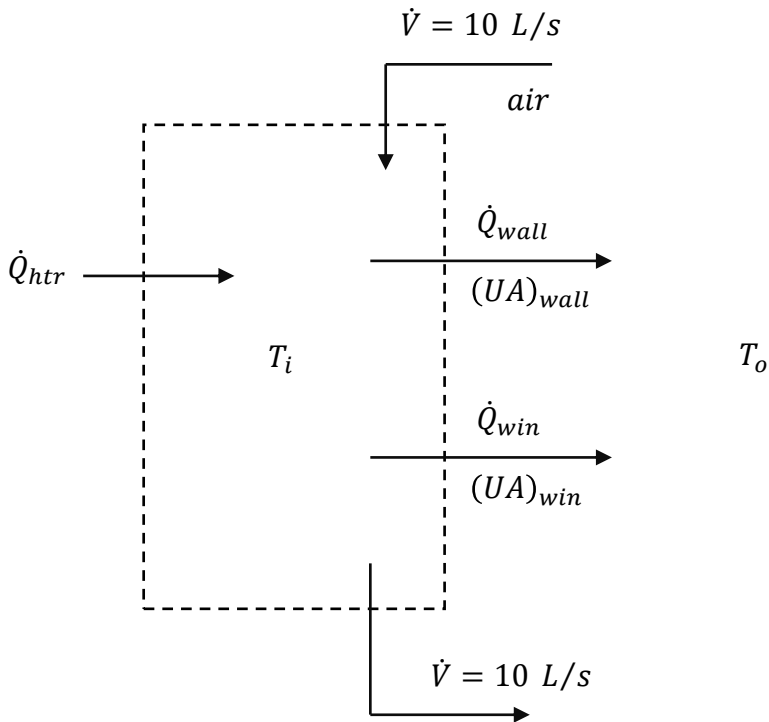
H. Haute performance
Triple vitrage



$$\approx 1.0$$

8. Le problème des flux d'énergie parallèles

Reprenons la discussion précédente (EA3, section 5) sur une pièce qui doit être maintenue à T_i malgré la perte de chaleur par plusieurs voies parallèles.



Disons que les facteurs de perte de chaleur sont :

Murs : $U = 0.38 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}, A = 15 \text{ m}^2, UA = 5.7 \text{ W/}^\circ\text{C}$

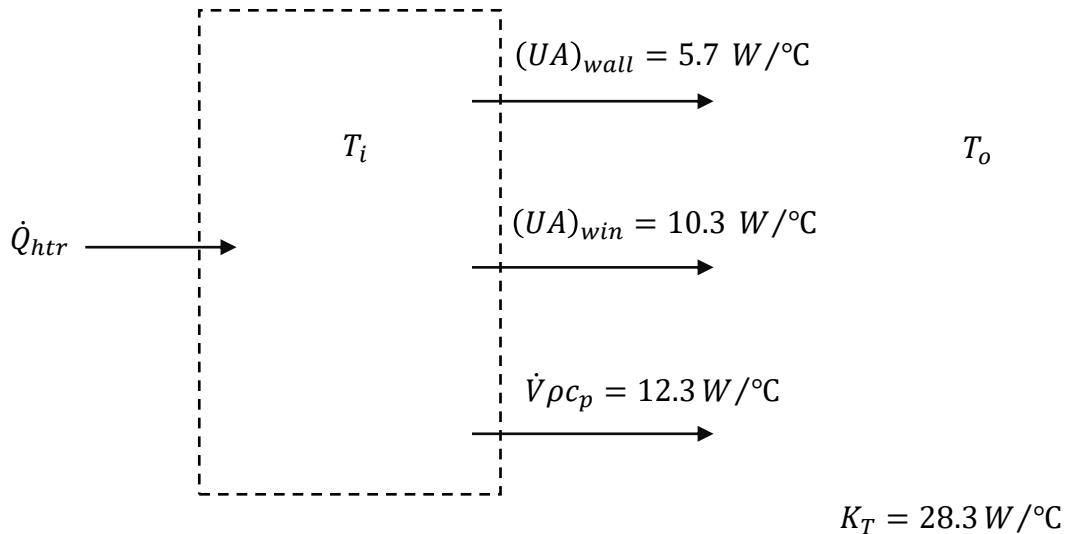
Fenêtres*: $U = 2.06 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}, A = 5 \text{ m}^2, UA = 10.3 \text{ W/}^\circ\text{C}$

Ventilation: $\dot{V}\rho c_p = 12.3 \text{ W/}^\circ\text{C}$

Total: $28.3 \text{ W/}^\circ\text{C}$

* Note : La valeur U est similaire à celle d'un double vitrage "haute performance" dans un cadre en aluminium à rupture de pont thermique.

Représentation alternative des voies de déperdition de chaleur :



Si le taux de chauffage doit correspondre au taux de perte de chaleur, alors :

$$\dot{Q}_{htr} = [\dot{V}\rho c_p + (UA)_{wall} + (UA)_{win}] \cdot (T_i - T_o) = K_T \cdot (T_i - T_o)$$

p.ex, si $T_i = 20^\circ\text{C}$ et $T_o = 0^\circ\text{C}$, alors $\dot{Q}_{htr} = 566 \text{ W}$

Supposons que les paramètres énumérés ci-dessus (U , A , etc.) représentent la conception initiale d'un bâtiment et que l'intérêt de l'équipe de conception est maintenant d'évaluer les options permettant d'améliorer la performance du bâtiment. Une réduction des pertes de chaleur est souhaitée pour y parvenir.

L'équipe discute de la situation et remarque que les valeurs U des murs sont "tout juste" conformes au code (c.à.d. l'isolation minimale nécessaire pour respecter le code). En outre, ils notent que la surface des fenêtres semble "modeste" par rapport à la taille des murs et que des fenêtres à double vitrage haute performance sont déjà spécifiées, de sorte que les fenêtres sont peut-être déjà "correctes". Par ailleurs, une certaine ventilation est nécessaire pour maintenir une qualité d'air intérieur raisonnable, et un débit de 10 L/s est considéré comme "raisonnable" pour l'espace.

Au cours de la discussion, un membre de l'équipe de conception mentionne qu'il a entendu dire que les "bâtiments verts" utilisent des murs "super-isolés". La meilleure solution est donc probablement d'améliorer considérablement l'isolation des murs, ce qui apportera une amélioration significative, n'est-ce pas ?

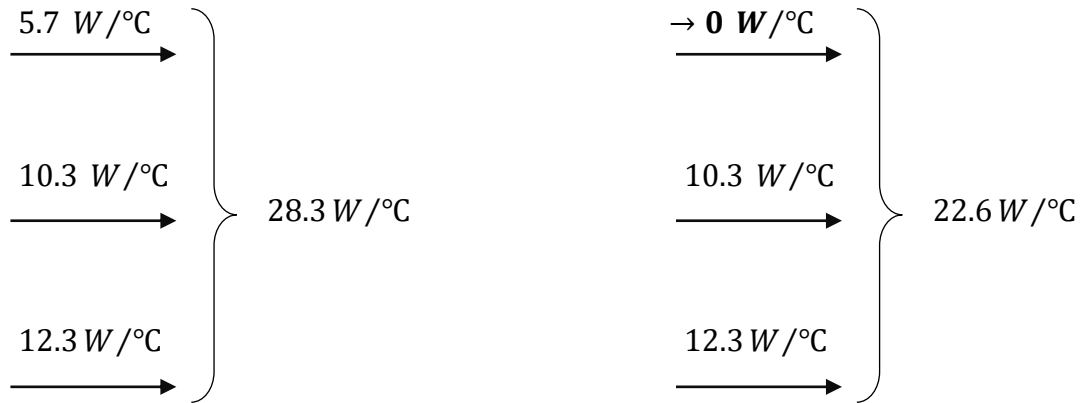
L'équipe procède à l'évaluation d'une conception dans laquelle la résistance thermique des murs est doublée. Elle est déçue lorsque les calculs indiquent que cela ne réduit les pertes de chaleur globales que d'environ 10 %.

Peut-être que doubler la valeur d'isolation n'était pas suffisant ? Ils essaient donc de la doubler à nouveau, mais constatent que la réduction globale n'est plus que de 15 % (par rapport à la conception initiale). Ce n'est pas suffisant, il faut donc la doubler à nouveau.... ?

Question :

Quelle est la réduction maximale en % de la perte de chaleur globale (par rapport à la conception initiale) que l'équipe de conception peut espérer obtenir grâce à l'isolation des murs ?

Au fur et à mesure que l'on ajoute de l'isolation aux murs, la perte de chaleur à travers les murs se rapproche de zéro.



À un moment donné, les murs seront suffisamment isolés pour que la perte de chaleur par cette voie semble négligeable (c.à.d. minuscule) par rapport aux autres voies. À ce stade, nous *pourrions* continuer à acheter de l'isolant et à en ajouter aux murs, mais cela n'aurait qu'un impact insignifiant sur la perte de chaleur globale.

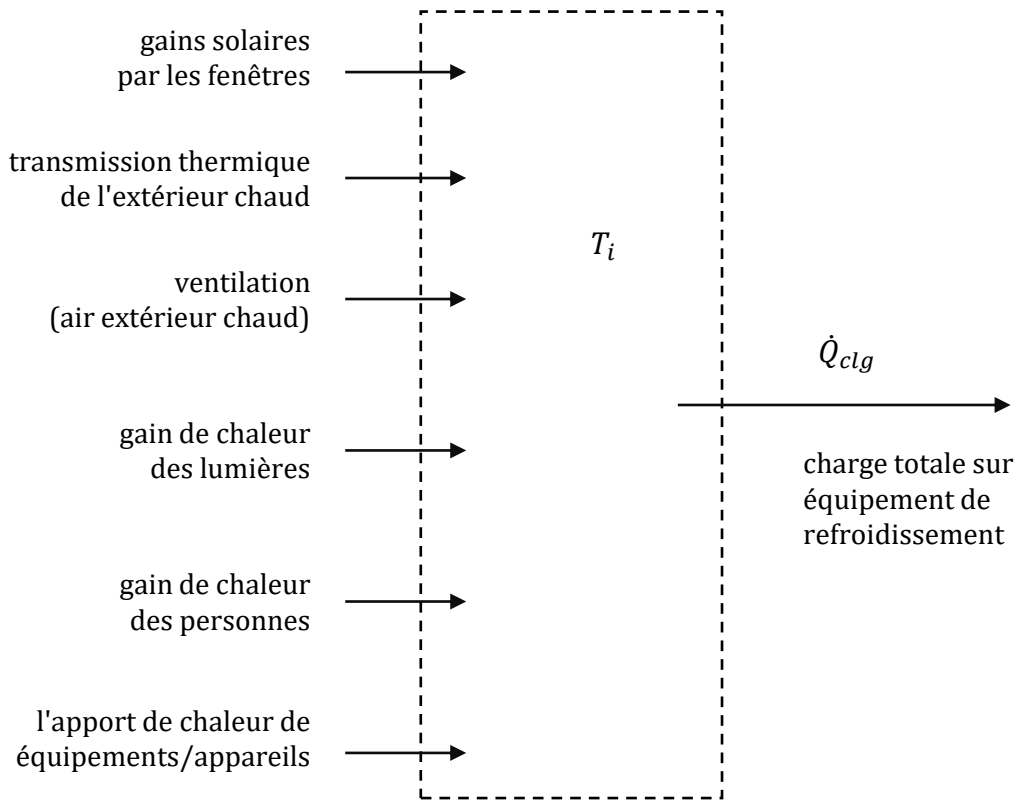
Dans l'analyse initiale, nous pouvons voir les limites de l'avantage potentiel de travailler sur une seule voie - la perte de chaleur la plus faible possible est zéro.

| | |
|-----------|---------|
| 5.7 W/°C | (20.1%) |
| 10.3 W/°C | (36.4%) |
| 12.3 W/°C | (43.5%) |
| <hr/> | |
| 28.3 W/°C | (100%) |

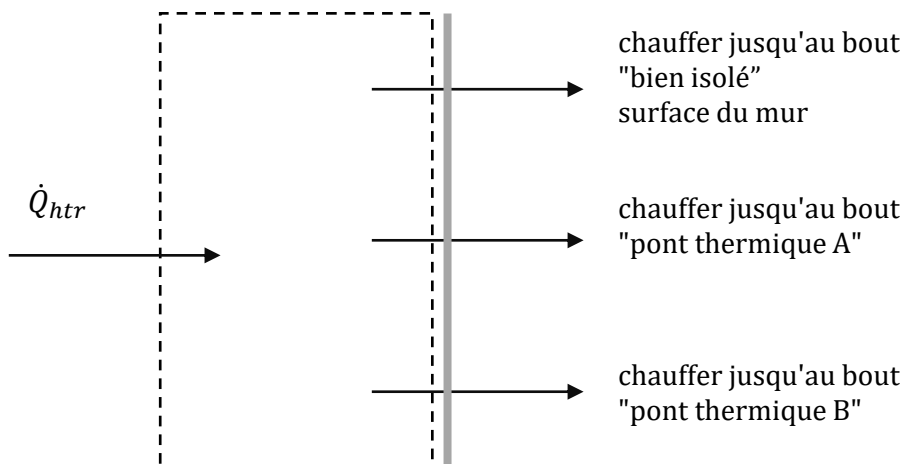
Lorsque les flux d'énergie se produisent en parallèle et que l'amélioration d'une voie n'a pas d'impact sur les autres voies, nous devons veiller à travailler sur les voies significatives si nous voulons obtenir une amélioration globale significative.

Il existe de nombreuses situations dans lesquelles des "charges" (p. ex. sur les équipements CVC) sont créées en raison de flux d'énergie parallèles. Ce phénomène ne se limite pas aux pertes de chaleur : il se produit également dans les situations de gain de chaleur (c.à.d. de charge de refroidissement).

Il existe de nombreuses situations dans lesquelles des "charges" (p. ex. sur les équipements CVC) sont créées en raison de flux d'énergie parallèles. Ce phénomène ne se limite pas aux pertes de chaleur : il se produit également dans les situations de gain de chaleur (c.à.d. de charge de refroidissement).



Les ponts thermiques sont une version du problème des flux parallèles. Si le pont thermique n'est pas corrigé, l'amélioration de l'isolation dans la partie "bien isolée" peut présenter très peu d'avantages.

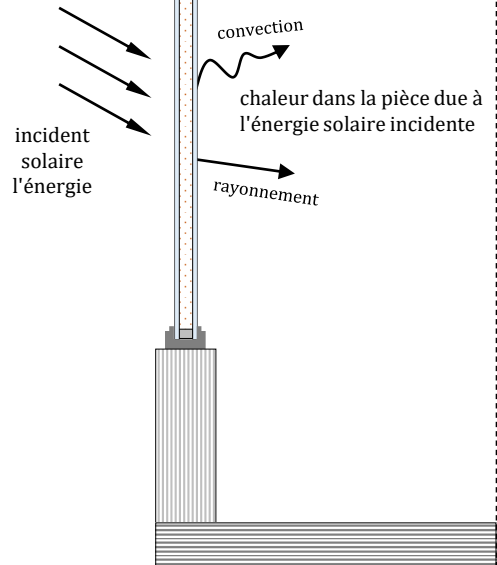


9. Coefficient de gain de chaleur solaire

Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)

Fraction du gain de chaleur solaire à travers une fenêtre par rapport à la quantité d'énergie solaire frappant la fenêtre (y compris les longueurs d'onde visibles et invisibles).

$$SHGC = \frac{\text{l'apport de chaleur solaire par les fenêtres}}{\text{énergie solaire frappant la fenêtre}}$$



Remarque : le SHGC tient compte de l'énergie solaire visible et invisible (gain de chaleur). Le VLT ne prend en compte que la lumière visible (incidente et transmission).

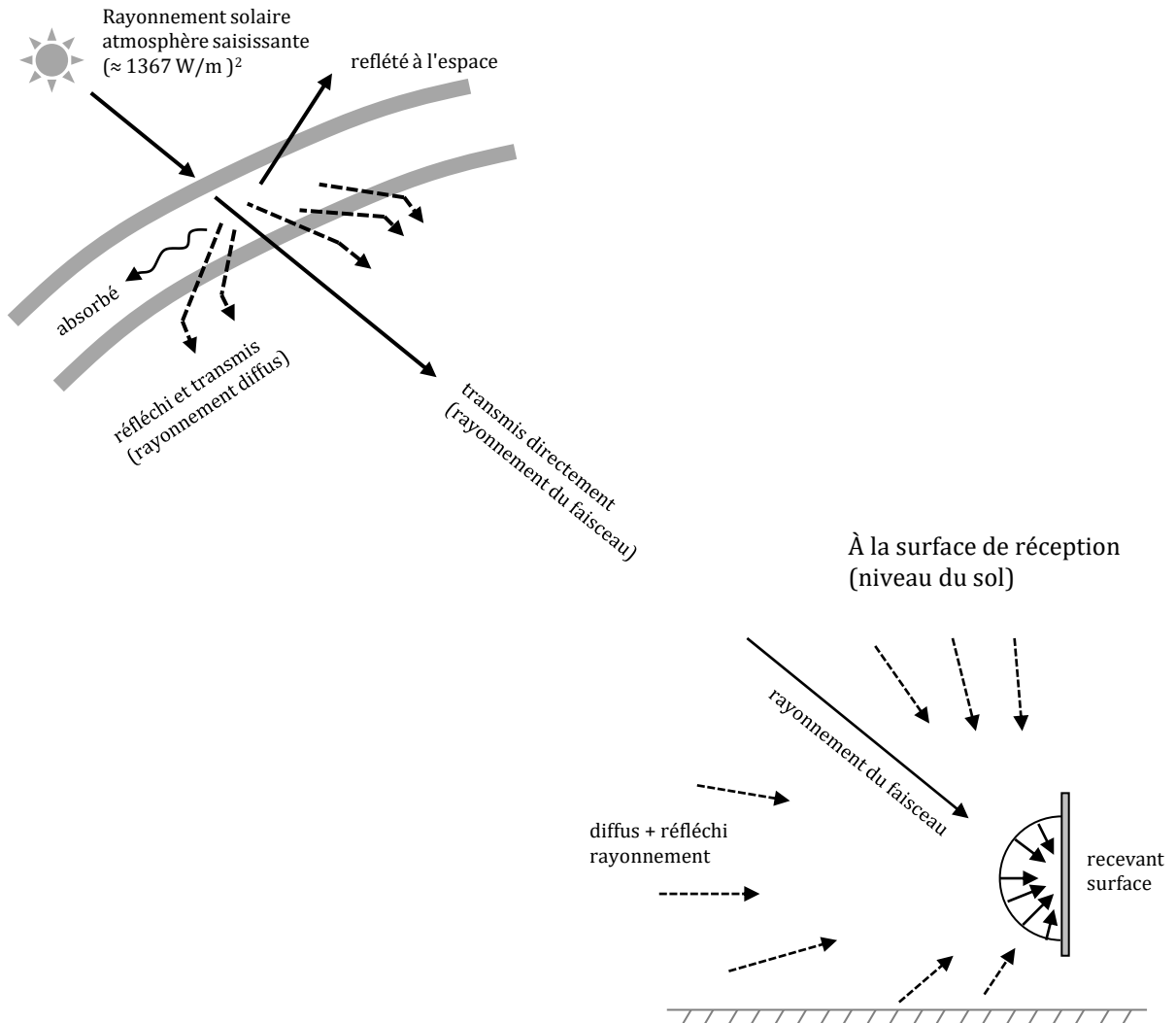
Notez que l'énergie solaire frappe la fenêtre sous plusieurs angles simultanément. Une partie de l'énergie peut être "directe" et une autre "diffuse" (et/ou réfléchi).

L'"angle d'incidence" a un impact important sur ce qui arrive à un photon solaire lorsqu'il frappe la fenêtre, c'est pourquoi nous évaluerons généralement séparément les gains de chaleur provenant de l'énergie solaire directe et diffuse qui frappe la fenêtre.

Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Une partie du rayonnement solaire qui atteint l'atmosphère terrestre peut passer directement à travers la surface réceptrice. C'est ce que nous appelons le rayonnement "direct" (ou faisceau).

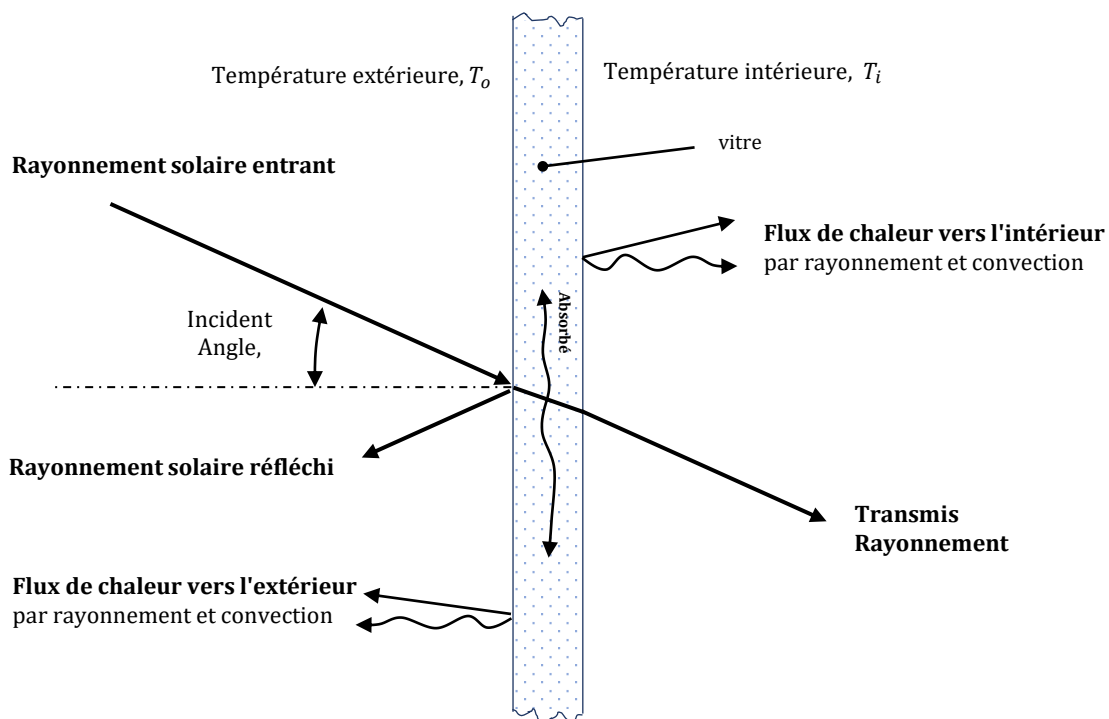
Une partie du rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère, p. ex. par réflexion ou absorption. (Le "ciel" que nous voyons pendant les heures de clarté est le rayonnement solaire réfléchi par les particules de l'atmosphère). Le rayonnement qui arrive à la surface réceptrice et qui n'est pas "direct" est appelé "diffus".



- La position du soleil se déplace dans le ciel - la direction du **rayonnement** change au cours de la journée (et au cours de l'année).
- La plupart des fenêtres reçoivent un **rayonnement diffus et réfléchi** pendant une grande partie de la journée.

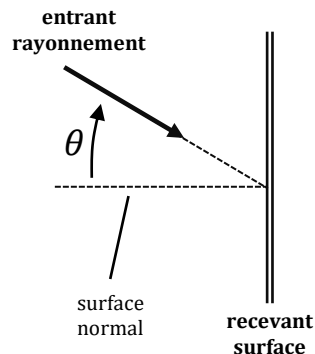
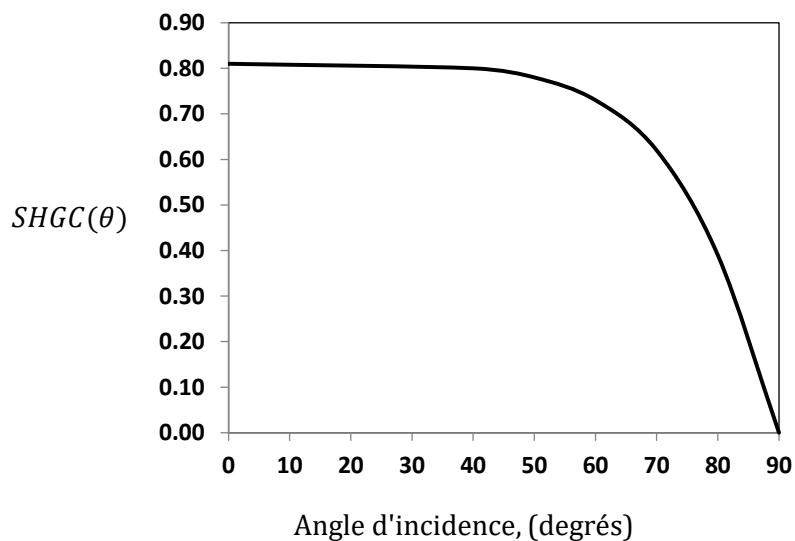
Bilan thermique instantané pour un matériau de vitrage éclairé par le soleil

(Adapté de ASHRAE Handbook of Fundamentals SI 2009, chapitre 15).



Impact approximatif de l'"angle d'incidence" sur le SHGC

Une seule feuille de verre architectural transparent (6 mm d'épaisseur)



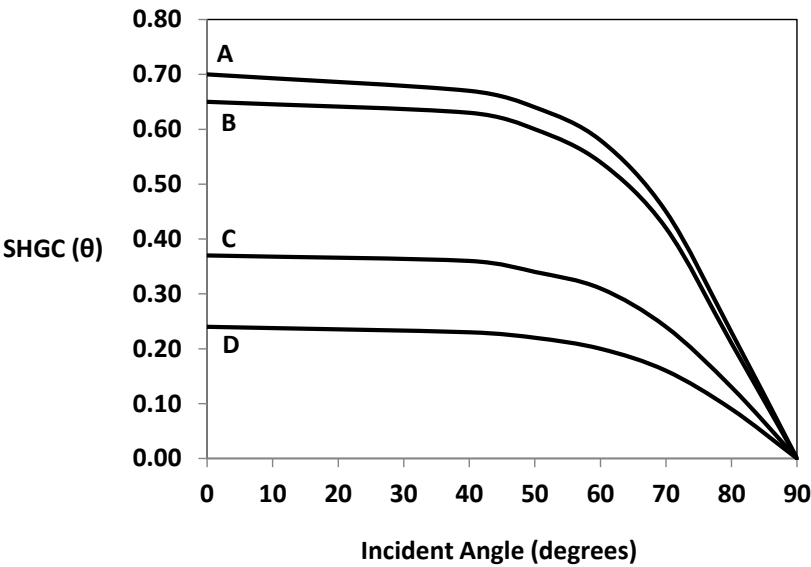
Propriétés approximatives de certains vitrages génériques
(D'après ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009 SI, chapitre 15).

| Vitrage Système | Description |
|-----------------|--|
| A | Double vitrage, verre clair, espace d'air de 12,7 mm |
| B | Double vitrage, verre clair, low-e = 0,2 sur la surface 3, espace argon de 12,7 mm |
| C | Double vitrage, verre clair, low-e = 0,05 sur la surface 2, espace argon de 12,7 mm |
| D | Double vitrage, vitre extérieure teintée en gris, faible émissivité = 0,05 sur la surface 2, espace argon de 12,7 mm |

| Vitrage Système | Le CdG Valeur U W/m · °C² | Le CdG Visible Transmettre. | CoG SHGC | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|--------|
| | | | Angle d'incidence - Rayonnement du faisceau | | | | | | | Hémis. |
| | | | 0° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° | Diffus |
| A | 2.7 | 0.78 | 0.70 | 0.67 | 0.64 | 0.58 | 0.45 | 0.23 | 0.00 | 0.60 |
| B | 1.7 | 0.73 | 0.65 | 0.63 | 0.60 | 0.54 | 0.42 | 0.21 | 0.00 | 0.56 |
| C | 1.4 | 0.70 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.31 | 0.24 | 0.13 | 0.00 | 0.32 |
| D | 1.4 | 0.35 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.20 | 0.16 | 0.09 | 0.00 | 0.21 |

Rayonnement d'un faisceau à un angle d'incidence spécifique

Pour un rayonnement diffus, à intensité uniforme sur l'hémisphère vu par la surface

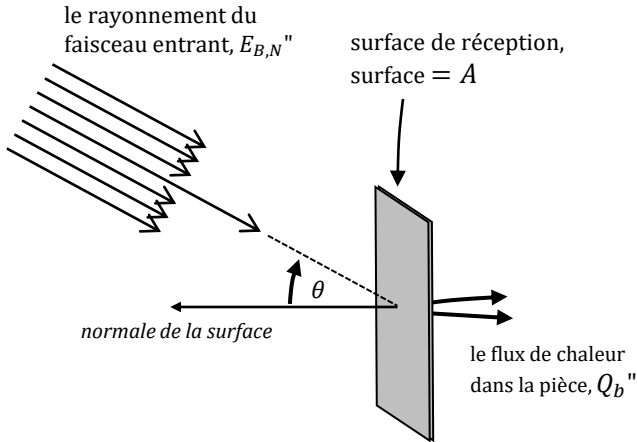


Flux d'énergie solaire du vitrage dû au rayonnement direct du faisceau

$$Q_B'' = E_{B,N}'' \cdot \cos \theta \cdot SHGC_\theta$$

$$Q_B'' (W/m^2) =$$

W de chaleur entrant dans la pièce (par rayonnement), par unité de surface de vitrage



$$E_{B,N}'' (W/m^2) =$$

flux entrant du rayonnement du faisceau mesuré perpendiculairement à la direction du déplacement

$$\theta =$$

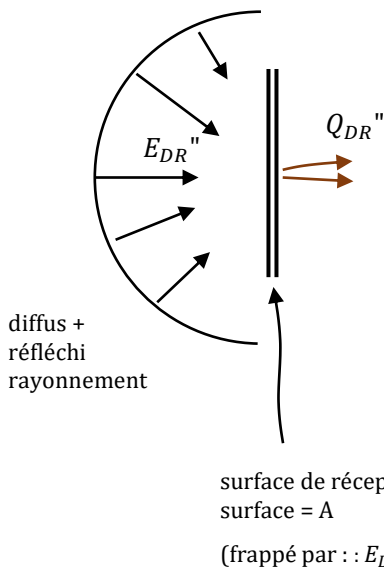
"angle d'incidence" (entre la normale de la surface et la direction du rayonnement du faisceau)

Vitrage Flux d'énergie solaire dû au rayonnement diffus et réfléchi

$$Q_{DR}'' = E_{DR}'' \cdot SHGC_{DR}$$

$$Q_{DR}'' (W/m^2) =$$

watts de chaleur entrant dans la pièce (en raison du rayonnement D et R), par unité de surface du vitrage

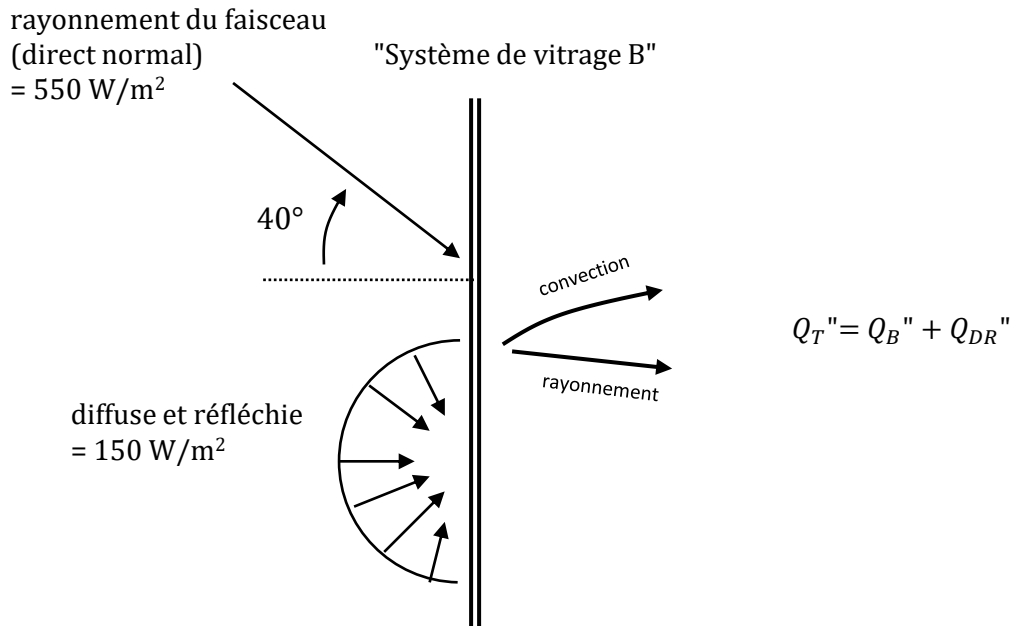


$$E_{DR}'' (W/m^2) =$$

watts de rayonnement diffus et réfléchi frappant le vitrage, par unité de surface du vitrage

Exemple de calcul

Estimez le flux de chaleur solaire total au centre du verre pour la situation indiquée ci-dessous.



Solution :

$$SHGC_{\theta=40^\circ} = 0.63$$

$$SHGC_{DR} = 0.56$$

$$\begin{aligned} Q_B'' &= E_{B,N}'' \cdot \cos \theta \cdot SHGC_{\theta} \\ &= (550 \text{ W/m}^2) \cdot (\cos 40^\circ) \cdot (0,63) \\ &= (550 \text{ W/m}^2) \cdot (0,766) \cdot (0,63) \\ &= 421 \text{ W/m}^2 (0,63) \\ &= 265 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{DR}'' &= E_{DR}'' \cdot SHGC_{DR} \\ &= (150 \text{ W/m}^2) \cdot (0,56) \\ &= 84 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

$$Q_T'' = Q_B'' + Q_{DR}'' = 265 + 84 = \mathbf{349 \text{ W/m}^2}$$