



Verre et isolation thermique

2004

1	INTRODUCTION	2
2	LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT.....	3
3	TRANSMISSION DE CHALEUR À TRAVERS UN VITRAGE	3
3.1	INTRODUCTION	3
3.2	TRANSMISSION AU TRAVERS D'UN VITRAGE.....	4
3.3	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE	4
4	LES DIFFÉRENTS TYPES DE VITRAGES ISOLANTS	5
4.1	LES DOUBLES VITRAGES	5
4.2	LES TRIPLES VITRAGES ET SES DÉRIVÉS	6
4.3	LES GAZ NOBLES	6
4.4	LES DOUBLES VITRAGES À HAUT RENDEMENT	7
5	PERFORMANCES THERMIQUES DES VITRAGES	8
6	TEMPÉRATURE DES VITRAGES ET CONFORT.....	9

1 INTRODUCTION

La première fonction demandée historiquement au verre était d'assurer une protection contre la pluie, la neige et le vent tout en permettant l'apport de lumière et la vue vers l'extérieur. Un simple vitrage posé dans la menuiserie selon les règles de bonne pratique permet de satisfaire à ces exigences.

Par contre, en ce qui concerne l'isolation thermique, un simple vitrage n'est plus satisfaisant actuellement:

- un simple vitrage, et même un double vitrage classique, constituent des points faibles dans l'isolation thermique d'une maison par rapport aux murs, façades et toitures; en moyenne, les vitrages représentent environ 35% des pertes thermiques dans une maison (Figure 1)
- les crises pétrolières des années 70 ont conduit à des réflexions sur la consommation d'énergie et à des limitations de son utilisation
- de même, on se préoccupe de plus en plus de l'environnement (Kyoto, ...) et on essaye de limiter au maximum les rejets de gaz carboniques dans l'atmosphère.

Pour ces différentes raisons, la plupart des pays ont publié des réglementations thermiques qui, entre autres, ont imposé dans un premier l'utilisation de doubles vitrages: à l'heure actuelle, la tendance est même à l'utilisation massive et obligatoire de doubles vitrages à haut rendement.

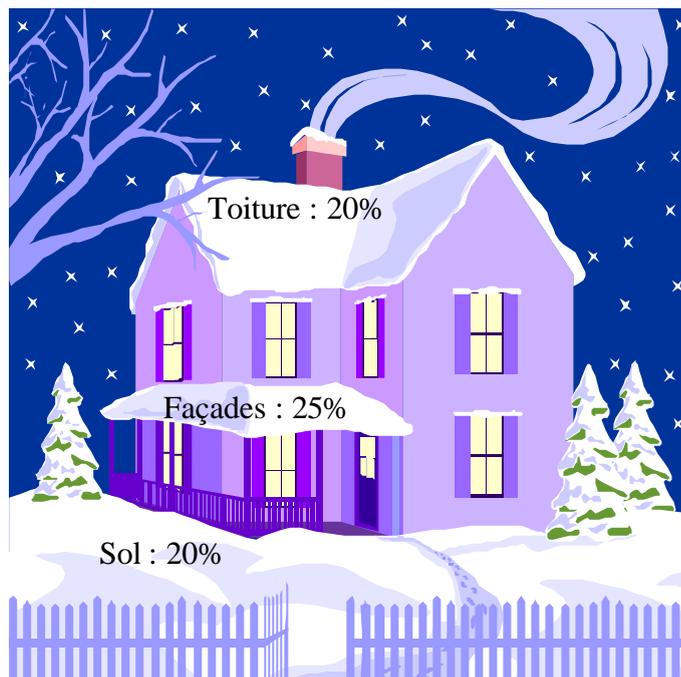


Figure 1 – Les déperditions thermiques moyennes d'une maison

2 LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT

Les rayonnements électromagnétiques sont caractérisés par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde λ . La Figure 2 reprend les différents rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

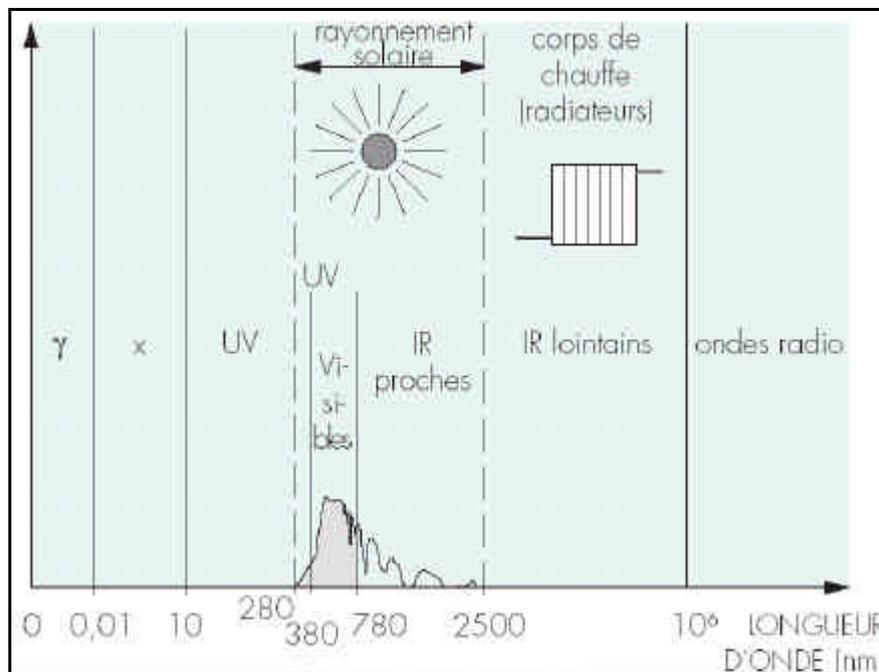


Figure 2 - Les différents types d'ondes électromagnétiques

Pour ce qui concerne l'isolation thermique, il est important de retenir que la chaleur rayonnée par les objets est sous forme d'infrarouges lointains (de 2500 à 1000000 nm).

3 TRANSMISSION DE CHALEUR À TRAVERS UN VITRAGE

3.1 INTRODUCTION

Une différence de température entre deux points d'un corps quel qu'il soit entraîne un transfert de chaleur des points chauds vers les points froids.

Ce transfert peut s'opérer de différentes façons:

- par conduction, c'est-à-dire au sein de la matière même; la chaleur se transmet de molécule en molécule
- par convection dans les liquides et les gaz; les différences de température provoquent des différences de densité qui mettent les molécules en mouvement et tendent à égaliser les températures
- par rayonnement: ce mode de transmission se fait au moyen d'ondes électromagnétiques qui traversent un milieu qui leur est transparent; lorsque les ondes rencontrent un obstacle, elles

leur cèdent une partie de leur énergie sous forme de chaleur; ce mode de transmission ne nécessite pas un milieu particulier; il peut aussi se produire dans le vide.

3.2 TRANSMISSION AU TRAVERS D'UN VITRAGE

Dans le cas d'un vitrage simple (c'est-à-dire sans espace d'air ou de gaz) opaque, la transmission de chaleur entre les deux faces du verre se fait uniquement par conduction.

Dans le cas d'un vitrage simple transparent, la transmission de chaleur se fait par conduction et rayonnement.

Dans le cas d'un double vitrage (Figure 3), la transmission a lieu dans le verre par conduction et rayonnement, dans l'espaceur par conduction et dans la lame de gaz par conduction, rayonnement et convection.

Le but du double vitrage est de limiter les pertes de chaleur par conduction dans le verre en séparant les deux feuilles de verre par une lame d'air, dont le pouvoir isolant est supérieur à celui du verre.

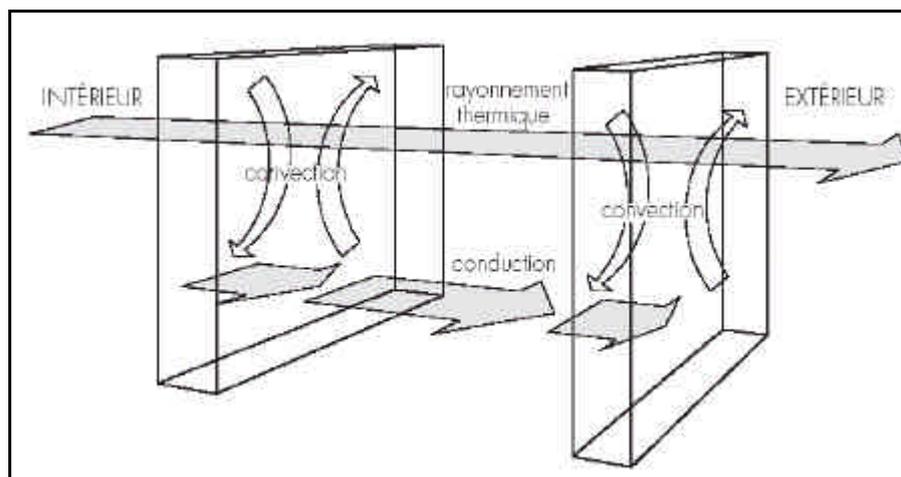


Figure 3 - Modes de transmission de chaleur à travers un vitrage (lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure)

3.3 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE

La densité de flux de chaleur q (W/m^2) qui traverse par seconde le vitrage de l'ambiance chaude vers l'ambiance froide peut être exprimée par la relation

$$q = \frac{(q_i - q_e)}{R} = U (q_i - q_e)$$

où q_i et q_e sont les températures des ambiances intérieures et extérieures

R est la résistance thermique du vitrage ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$)

$U = 1/R$ est le coefficient de transmission thermique du vitrage ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$)

Le **coefficient de transmission thermique U** (anciennement k) est défini comme la quantité de chaleur traversant le vitrage, en régime permanent, par unité de surface, pour une différence de température unitaire entre les ambiances.

La quantité de chaleur Q (W) qui traverse par seconde un vitrage d'une superficie S (m²) de l'ambiance chaude vers l'ambiance froide vaut donc:

$$Q = S U (q_i - q_e)$$

Pour un matériau solide isotrope, la résistance thermique R est définie comme le rapport entre son épaisseur e (m) et sa conductivité thermique I (W/(m K)):

$$R = \frac{e}{I}$$

La **conductivité thermique I** est définie comme la quantité de chaleur traversant en une seconde un panneau de 1 m d'épaisseur et d'une surface de 1 m², lorsqu'il existe une différence de température de 1°C entre les deux surfaces de 1 m².

La conductivité thermique du verre vaut 1 W/(m K). Il ne s'agit donc pas d'un matériau isolant puisque sont considérés comme tels des matériaux dont la conductivité thermique est inférieure à 0,065 W/(m K).

Pour minimiser des déperditions d'énergie, et donc obtenir une isolation thermique maximale, il faut que le coefficient de transmission thermique U du vitrage ait une valeur aussi faible que possible (c'est-à-dire que la résistance thermique R du vitrage soit aussi grande que possible).

On a donc trouvé, au fil des années, diverses solutions afin d'augmenter le pouvoir isolant des vitrages, et ce principalement depuis la crise de l'énergie des années 70.

4 LES DIFFÉRENTS TYPES DE VITRAGES ISOLANTS

4.1 LES DOUBLES VITRAGES

Le premier type de vitrage isolant thermiquement fut le double vitrage. Il s'agit de deux feuilles de verres séparées par un espaceur de manière à délimiter un espace d'air sec. La conductivité thermique de l'air valant 0,025 W/(m K) (à 10°C) pour 1 W/(m K) au verre, la couche d'air augmente le pouvoir isolant et diminue la valeur U du vitrage.

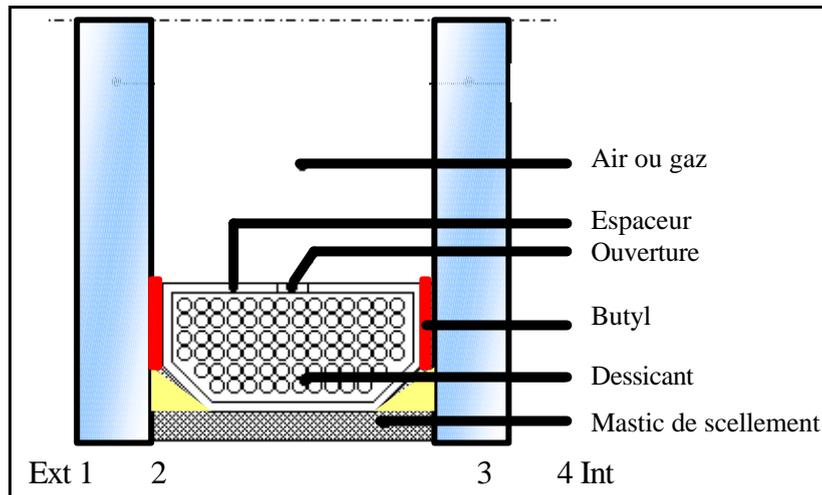


Figure 4 - Double vitrage: Composants et numérotation des faces

4.2 LES TRIPLES VITRAGES ET SES DÉRIVÉS

L'isolation étant augmentée par la présence de la lame d'air, l'étape suivante a été de fabriquer des triples vitrages, c'est-à-dire des vitrages formés de trois feuilles de verre séparant deux espaces d'air.

Cette solution n'est plus que rarement utilisée car elle présente les désavantages de proposer un vitrage d'épaisseur et de poids importants et ne s'adaptent donc pas aux menuiseries classiques. De plus, d'autres solutions, développées ci-dessous, permettent d'obtenir des vitrages nettement plus performants que les triples vitrages.

Une autre solution, les doubles châssis, consistent, comme leur nom l'indique, à placer deux châssis en série avec un important espace d'air entre les deux (au moins 150 mm). Ce système apporte une bonne isolation thermique mais est surtout efficace du point de vue acoustique; il est peu utilisé en Europe de l'Ouest mais se retrouve fréquemment en Allemagne et en Scandinavie.

4.3 LES GAZ NOBLES

Une autre amélioration est de remplacer l'air ($\lambda = 0,024 \text{ W}/(\text{m K})$, $\rho = 1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$, à 10°C , c'est-à-dire aux conditions normalisées de la EN 673) par des gaz ayant une conductivité thermique plus faible afin de limiter la conduction ainsi qu'une masse volumique plus élevée afin de limiter la convection (mise en mouvement plus difficile).

En pratique, on utilise régulièrement l'argon ($\lambda = 0,017 \text{ W}/(\text{m K})$, $\rho = 1,70 \text{ kg}/\text{m}^3$) et parfois le krypton ($\lambda = 0,009 \text{ W}/(\text{m K})$, $\rho = 3,56 \text{ kg}/\text{m}^3$) ou le xénon ($\lambda = 0,05 \text{ W}/(\text{m K})$, $\rho = 5,69 \text{ kg}/\text{m}^3$) qui ont cependant actuellement le désavantage d'avoir un prix plus élevé.

4.4 LES DOUBLES VITRAGES À HAUT RENDEMENT

4.4.1 PRINCIPE

Le développement des techniques de dépôt de couches sur les vitrages a permis de franchir un pas déterminant dans la qualité d'isolation thermique des vitrages. La pose d'une couche métallique sur le vitrage permet d'obtenir des vitrages dits à haut rendement (aussi appelés à basse émissivité, à isolation renforcée ou low E).

Il s'agit:

- en général de couches déposées sous vide; celles-ci qui doivent être assemblées à l'intérieur d'un double vitrage vu leur fragilité
- de couches pyrolytiques, qui sont légèrement moins performantes que les couches sous vide.

Ces couches sont le plus souvent placées en position 3 (Figure 5); la position 2 n'influence pas la qualité de l'isolation mais bien les propriétés de réflexion et donc l'aspect.

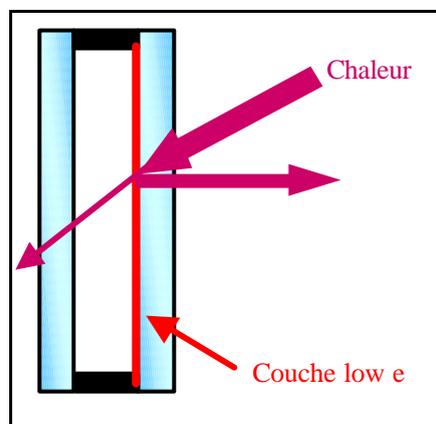


Figure 5 - Vitrage à basse émissivité

4.4.2 L'ÉMISSIVITÉ

L'émissivité est définie comme le rapport entre l'énergie émise par une surface donnée à une température donnée et celle d'un émetteur parfait (c'est-à-dire un corps noir qui a une émissivité égale à 1), à la même température.

Le but de cette couche est de faire rayonner vers l'intérieur du bâtiment les rayons calorifiques (IR lointains) absorbés par le vitrage.

En effet, les corps situés dans les locaux rayonnent la chaleur sous forme d'IR lointains. Le verre étant quasi opaque à ce type de rayonnement, il va s'échauffer.

Un verre clair (sans couche) va principalement réémettre cet échauffement vers l'extérieur, c'est-à-dire vers le côté le plus froid (en hiver).

Il y a dès lors intérêt à utiliser un verre à couches dont l'émissivité a été diminuée, de manière à forcer la réémission vers l'intérieur du bâtiment (Figure 6). Par exemple, une émissivité de 0,2 signifie que 80 % du flux de chaleur absorbé par le vitrage est réfléchi vers les locaux intérieurs.

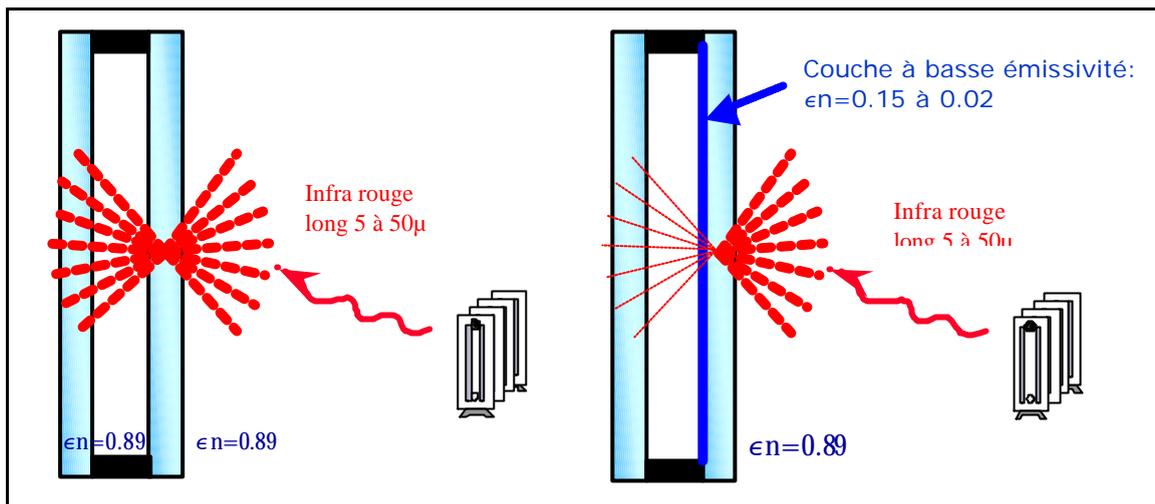


Figure 6 – Double vitrage et double vitrage à haut rendement

La norme EN 12898 décrit une méthode de mesure de l'émissivité normale ϵ_n ; en pratique, on utilise la valeur de l'émissivité corrigée ϵ en multipliant l'émissivité normale par un facteur tenant compte de la distribution angulaire de l'émissivité dans les calculs de transfert thermique.

Une feuille de verre clair a une émissivité corrigée égale à 0,837 alors que des couches pyrolytiques permettent d'obtenir des valeurs de l'ordre de 0,150 et des couches sous vide des valeurs inférieures à 0,100.

Remarque: Contrôle solaire

L'émissivité a une influence sur le rayonnement IR lointain; il n'influence par contre quasiment pas le rayonnement solaire. En utilisant un double vitrage à haut rendement, on améliore donc l'isolation thermique tout en laissant pénétrer l'énergie solaire au travers un vitrage, c'est-à-dire les gains thermiques gratuits.

Pour combiner le contrôle thermique et le contrôle solaire, il faut utiliser d'autres types de couches combinant ces 2 effets (voir "Verre et contrôle solaire").

5 PERFORMANCES THERMIQUES DES VITRAGES

La norme EN 673 donne la méthode de calcul du coefficient de transmission thermique U des vitrages. La valeur trouvée par ce calcul correspond à la valeur U_g au centre des vitrages c'est-à-dire ne tenant pas compte des effets de bords dus à la présence de l'espaceur qui augmente les déperditions calorifiques. Le détail de cette méthode de calcul est donnée en annexe.

Le Tableau 1 donne les valeurs du coefficient de transmission thermique des différents types de vitrages isolants. Les espaceurs les plus couramment utilisés sont ceux de 12 et 15 mm.

Tableau 1 - Valeurs du coefficient de transmission thermique pour différents types de vitrages

Espace x (mm)	4-x-4				4-x-4 HR (e = 0,045)			4-x-4-x-4
	air	argon	krypton	SF6	air	argon	krypton	air
6	3,3	3,0	2,7	3,0	2,5	2,0	1,4	2,3
9	3,0	2,8	2,6	3,1	2,0	1,6	1,0	2,0
12	2,9	2,7	2,6	3,1	1,7	1,3	1,0	1,9
15	2,7	2,6	2,5	3,1	1,5	1,1	1,0	1,8
20	2,8	2,6	2,6	3,1	1,4	1,2	1,1	1,7

A titre de comparaison, un mur creux non isolé a un coefficient U de l'ordre de 1,5 W/(m² K) et un mur isolé de moins de 0,6 W/(m² K).

6 TEMPÉRATURE DES VITRAGES ET CONFORT

Le sentiment de confort dans un local ne dépend pas seulement de la température de l'air ambiant mais également de la proximité éventuelle de surfaces froides. L'annexe 2 donne la méthode de calcul de la température des faces d'un vitrage et quelques exemples de tels calculs.

La Figure 7 donne la température de la face intérieure d'un vitrage simple ou double pour des conditions de températures intérieures et extérieures respectivement de 0°C et 20°C (en régime stationnaire) et différents types de vitrages.

On voit que l'utilisation de vitrage à haut rendement permet donc non seulement de limiter les pertes énergétiques mais aussi de supprimer le phénomène de paroi froide (ou chaude en été) qui provoque un sentiment d'inconfort.

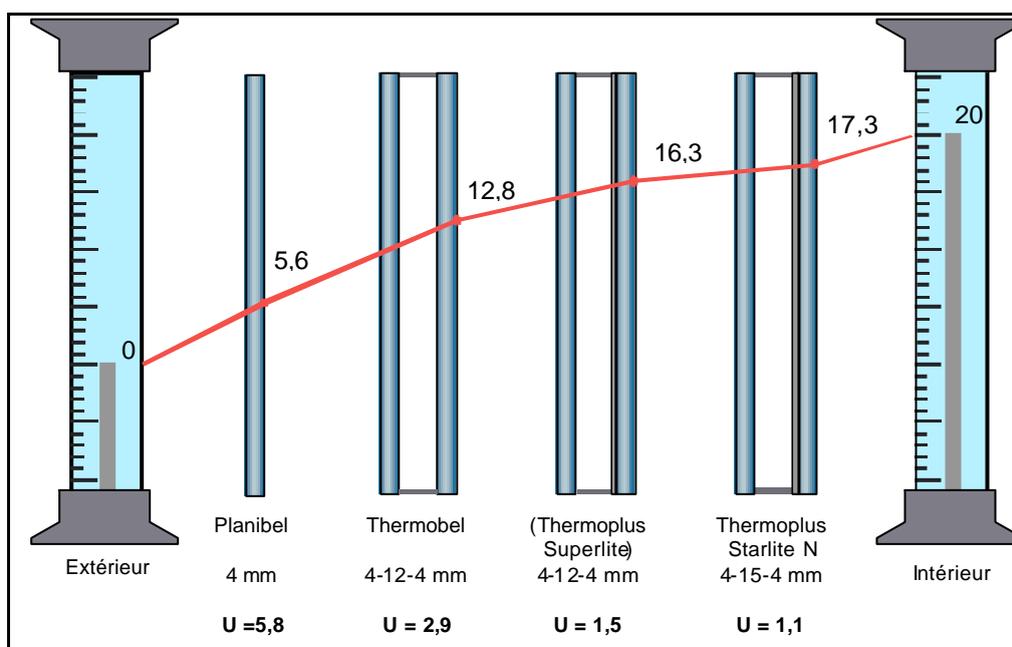


Figure 7 – Evolution de la température de la face intérieure du vitrage en fonction de la valeur U