



II.

LE VERRE QUID ?

1	Produits verriers	16
1.1	Composition du verre	17
1.2	Propriétés du verre	18
1.3	Les produits verriers	19
2	Propriétés et fonctions	30
2.1	Rayonnement, lumière et couleur	31
2.2	Isolation thermique	38
2.3	Contrôle solaire	49
2.4	Contrôle lumineux	62
2.5	Isolation acoustique	66
2.6	Sécurité	81
2.7	Protection incendie	98

1 PRODUITS VERRIERS



Siège ING, Amsterdam, Hollande - Architecte : Meijev en van Schooten Amsterdam -
Planibel Low-E, Top^N

1.1 COMPOSITION DU VERRE

Le verre plat utilisé dans le bâtiment est essentiellement un silicate (silice ou sable) sodo-calcique (soude + carbonate de calcium) obtenu par fusion à haute température.

Le verre silico-sodo-calcique est composé :

- > de sable de silice qui donne sa texture au verre ; on l'appelle le vitrifiant ou formateur de réseau SiO_2
- > de carbonate de calcium utilisé comme fondant dans le but d'abaisser la température de fusion de la silice, et comme affinant dans le but d'homogénéiser le mélange en fusion et d'en éliminer les bulles
- > de chaux utilisée comme stabilisant donnant au verre sa résistance chimique
- > d'affinants, dont le rôle est de remuer le mélange en fusion de sorte à provoquer un dégagement gazeux et à en uniformiser les qualités
- > de divers oxydes métalliques servant à améliorer ses caractéristiques mécaniques, sa résistance aux agents atmosphériques et à lui donner sa coloration éventuelle.

Il existe d'autres types de verre, par exemple :

- > les boro-silicates utilisés notamment pour la verrerie de laboratoires en raison de son faible coefficient de dilatation
- > les vitrocéramiques constituées d'une phase cristalline et d'une phase vitreuse résiduelle ; elles ont un coefficient de dilatation linéaire quasiment nul et sont utilisées e.g. pour la fabrication de plaques de cuisines
- > les alcalino-terreux
- > les verres à haute teneur en plomb (de l'ordre de 70%), qui permettent une forte atténuation des rayons X ; ils sont utilisés pour les parois vitrées de salles de radiologie médicale ou industrielle
- > le cristal, verre contenant minimum 24% d'oxyde de plomb, qui présente des caractéristiques particulières de transparence et de résonance.

1.2 PROPRIÉTÉS DU VERRE

Les principales propriétés du verre silico-sodo-calcique

Masse volumique ρ à 18°C	2500 kg/m ³
Module de Young E	70 000 N/mm ²
Module de glissement G	29 166 N/mm ²
Coefficient de Poisson ν	0,2
Dureté Mohs	6
Température de fusion	≈ 1500°C
Température de ramollissement	≈ 600°C
Coefficient de dilatation linéaire α	9.10 ⁻⁶ m/(m.K)
Conductivité thermique λ	1 W/(m.K)
Capacité thermique massique c	720 J/(kg.K)
Résistance caractéristique à la rupture par flexion :	
float recuit *	45 N/mm ²
float durci *	70 N/mm ²
float trempé thermiquement *	120 N/mm ²
Résistance à la compression	1000 N/mm ²
Coefficient de transmission thermique (verre simple 4 mm)	5,8 W/(m ² .K)
Indice de réfraction n par rapport à l'air	1,5
Transmission lumineuse (verre simple 4 mm)	0,90
Facteur solaire (verre simple 4 mm)	0,87
Emissivité normale d'un verre sans couche ou avec couche sans influence sur l'émissivité	0,89

* Un coefficient de sécurité est appliqué sur ces valeurs lors d'un calcul mécanique.

1.3 LES PRODUITS VERRIERS

1.3.1 INTRODUCTION

Le verre à l'état fini est obtenu en amenant le mélange à son point de fusion ($\approx 1600^{\circ}\text{C}$) puis en le refroidissant et en le transformant. Plusieurs types de verres peuvent être obtenus selon le procédé utilisé.

Pour la description des produits verriers, on fait la distinction entre :

- > les produits de base, c'est-à-dire les produits verriers silico-sodo-calciques obtenus à la sortie du four, sans traitement ultérieur
- > les produits transformés, c'est-à-dire les produits obtenus par transformation des produits de base. On peut distinguer :
 - les transformations primaires qui peuvent être réalisées sur des grandes dimensions (plateaux) ou éventuellement des mesures fixes
 - les transformations secondaires qui sont réalisées sur des mesures fixes.

Ces différents produits sont brièvement décrits aux paragraphes 1.3.2 et 1.3.3.

Produits de base et produits transformés

Produits de base		Float - Verre imprimé - Verre armé - Glace armée polie - (Verre profilé) - (Verre étiré)
Produits transformés	Transformations primaires	Verre à couches - Miroir - Traitements de surface (matage, sablage, ...) - Verre feuilleté
	Transformations secondaires	Verre trempé thermiquement - Verre durci - Verre émaillé et sérigraphié - Verre trempé chimiquement - Verre bombé - Vitrage isolant - Allèges

Dans les descriptions qui suivent, la norme européenne à laquelle le produit est conforme, est à chaque fois mentionnée entre parenthèses.

1.3.2 PRODUITS DE BASE

▼ Float (EN 572-1 et 2)

Verre de silicate sodo-calcique plan, transparent, clair ou coloré (vert, gris, bronze, bleu), à faces parallèles.

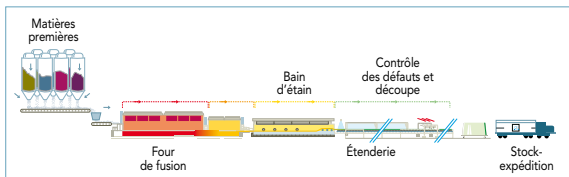
Les épaisseurs standard pour des applications architecturales sont de 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 19 et 25 mm ; les dimensions maximales sont de 6 m par 3,21 m.

Le float est le verre de base utilisé dans toutes les opérations ultérieures de transformation du verre.

La ligne de fabrication de float comporte essentiellement les étapes suivantes :

- > l'installation de stockage et de dosage des matières premières
- > le four de fusion et d'affinage : les matériaux sont fondus à une température de l'ordre de 1600°C ; l'affinage a pour rôle d'homogénéiser le mélange et d'éliminer les bulles gazeuses et d'assurer un bon conditionnement thermique du verre fondu
- > le bain d'étain : le verre fondu « flotte » alors sur un bain d'étain liquide afin de former la feuille de verre ; en réglant la vitesse d'écoulement du mélange, on détermine l'épaisseur de la feuille de verre
- > l'étenderie ou galerie de recuisson : elle permet de refroidir le verre de manière contrôlée et d'éliminer les contraintes internes
- > les équipements de détection de défauts et de découpe du ruban continu de verre
- > la zone de stockage et d'expédition des produits finis.

Procédé float



Gammes AGC : Planibel clair, Planibel Linea Azzurra, Planibel Clearvision, Planibel colorés.

▼ Verre imprimé (EN 572-1 et 5)

Verre comportant un dessin sur une ou deux faces, obtenu en faisant passer la feuille de verre entre des rouleaux texturés.

Une ligne de fabrication de verre imprimé ou coulé est proche d'une ligne float, si ce n'est que le flottage sur un bain d'étain est remplacé par un formage entre 2 rouleaux ; ensuite le verre passe également dans une galerie de recuisson.

Gamme AGC : Imagin.

▼ Verre armé (EN 572-1 et 6)

Verre imprimé dans lequel un treillis de fils métalliques est incorporé juste avant le laminage entre les rouleaux ; l'armature a pour but de maintenir les morceaux de verre en place en cas de bris mais ne participe pas à la résistance mécanique.

Gamme AGC : Imagin armé.

▼ Glace armée polie (EN 572-1 et 3)

La glace armée polie est un verre armé et imprimé avec un très léger dessin ; ce dessin en surface est ensuite douci et poli de manière à obtenir la transparence et la clarté d'un float.

Gamme AGC : glace armée polie (voir Imagin armé).

▼ Verre profilé (EN 572-1 et 7)

Verre de silicate sodo-calcique, translucide, clair ou coloré, armé ou non armé, obtenu par coulée continue et laminage suivi d'un processus de formage en U.

▼ Verre étiré (EN 572-1 et 4)

Verre de silicate sodo-calcique plan, transparent, clair ou coloré, obtenu par étirage continu, initialement vertical, d'épaisseur régulière et dont les deux faces sont polies au feu.

Ce produit n'est à l'heure actuelle quasiment plus fabriqué et a été remplacé par le verre float.

1.3.3. PRODUITS TRANSFORMÉS

▼ Verres à couches (EN 1096-1 à 3)

Verres obtenus par dépôt d'une ou de plusieurs couches de matières inorganiques afin d'en modifier les propriétés physiques (facteur solaire, émissivité, couleur, transmission et réflexion lumineuse, ...).

Les verres à couches peuvent être classés selon trois critères :

- > le mode de fabrication de la couche (pyrolytique ou magnétron)
- > l'emplacement de la couche sur le vitrage lors de la mise en œuvre en vitrage isolant (position 1, 2, 3 ou 4)
- > l'application réservée au vitrage (contrôle thermique, contrôle solaire et lumineux, ...).

La norme EN 1096-1 définit différentes classes de verres à couches en fonction de leur usage et de leurs propriétés :

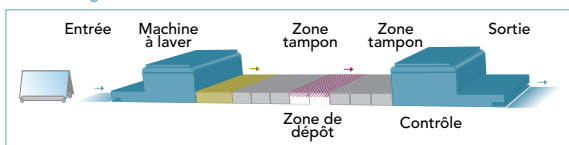
- > Classe A : le verre à couche peut être utilisé en face extérieure ou intérieure de l'immeuble
- > Classe B : le verre à couche peut être utilisé en vitrage monolithique mais le côté couche doit être à l'intérieur du bâtiment
- > Classe C : le verre à couche ne peut être utilisé qu'en vitrage isolant, la couche étant du côté de l'espaceur
- > Classe D : le verre à couche ne peut être utilisé qu'en vitrage isolant, la couche étant du côté de l'espaceur ; de plus, l'assemblage en vitrage isolant doit se faire immédiatement après la fabrication de la couche ; ces couches ne sont donc pas disponibles en vitrages monolithiques
- > Classe S : le verre à couche peut être utilisé en surface extérieure ou intérieure de l'immeuble, mais seulement pour certaines applications bien définies (par exemple devanture de magasins).

> Verres à couches magnétron

Couches à base d'oxydes métalliques ou de métaux, déposées sur un float clair ou coloré, sous vide (hors de la ligne de fabrication du verre float) dans un magnétron. Différentes chambres de dépôts permettent de réaliser des produits multicouches ayant des performances élevées.

Elles ne peuvent jamais être utilisées en position 1.

Procédé magnétron



Gammes AGC : Stopray, Stopray T, Planibel Top^{N+}, Planibel Top^{N+T}, Planibel Energy^N, Planibel Energy^{NT}, Planibel Tri.

> Verres à couches pyrolytiques

Couches à base d'oxydes métalliques déposées sur un float clair ou coloré sur la ligne de production du verre, à la sortie du bain d'étain, lorsque le verre a encore une température de l'ordre de 600°C, ce qui leur confère une résistance mécanique et chimique élevée. Ces verres à couches peuvent de ce fait être utilisés en simple vitrage mais également être trempés, bombés, émaillés, sérigraphiés.

Ces couches permettent d'obtenir des performances élevées en termes de contrôle solaire.

Gammes AGC : Stopsol, Sunergy, Blackpearl, Planibel G, Planibel G fast.

▼ Miroir (EN 1036-1)

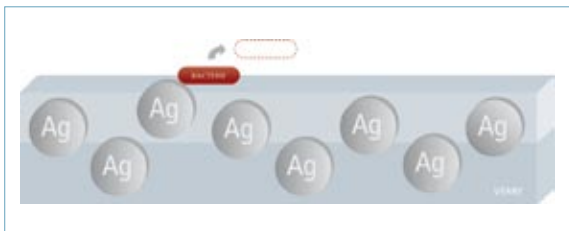
Verre sur lequel est déposée une couche destinée à réfléchir les images ; cette couche est elle-même protégée par une couche de peinture. Des effets décoratifs peuvent être obtenus.

Le procédé de fabrication des miroirs est appelé l'argenture.

Gammes AGC : Mirox 3G, Miroid Morena, Sanilam Easycut.

▼ Verre antibactérien

Le procédé mis au point et breveté par AGC consiste en la diffusion d'argent dans les couches supérieures du verre : les ions entrent en contact avec les bactéries, bloquent leur métabolisme et interrompent leur mécanisme de division menant ensuite à leur destruction. L'effet antibactérien du verre est continu, notamment dans des conditions d'humidité et de température propices au développement des bactéries et des moisissures.



▼ Verre laqué

Verre dont une des faces est revêtue d'une peinture laquée de grande qualité. De nombreuses teintes sont disponibles.

Gammes AGC : Lacobel, Lacobel Safe, Matelac, Matelac Safe.

▼ Verre maté

Verre dépoli à l'acide qui peut être rendu mat partiellement ou intégralement. L'acide attaque la surface du verre et lui procure un aspect translucide et un toucher différent.

Gammes AGC : Matelux, Matobel One Side, Matelac.

▼ Verre sablé

Verre qui a subi un sablage c'est-à-dire une projection d'abrasif à haute pression ; ce procédé permet d'obtenir des motifs unifiés ou en multi-relief.

Gammes AGC : Planibel sablé, Imagin sablé.

▼ Verre feuilleté (EN 12543-1 à 6)

Ensemble constitué d'au moins deux feuilles de verre, assemblées sur toute leur surface par un intercalaire. L'intercalaire peut être un (ou plusieurs) film(s) plastique(s) (PVB, EVA, ...), une résine, un silicate ou un gel. Il a pour fonction de coller les feuilles de verre tout en conférant des performances supplémentaires au produit fini.

Ces performances peuvent être :

- > la sécurité des biens et des personnes (limitation du risque de blessure en cas de bris, protection contre la défenestration, protection contre le vandalisme, protection contre l'effraction, ...)
- > la protection contre les armes à feu et les explosions
- > la protection contre l'incendie
- > l'isolation acoustique
- > la décoration.

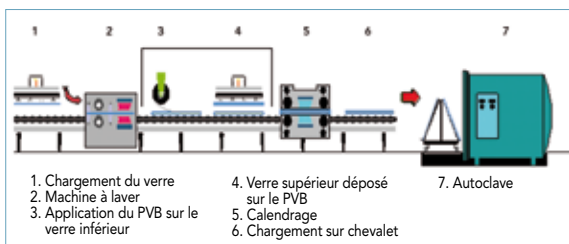
Gammes AGC : Stratobel, Stratobel Color, Stratobel EVA Creation, Pyrobel, Stratophone.

La méthode de fabrication du verre feuilleté avec intercalaires en PVB comprend les étapes suivantes :

- > chargement et nettoyage du verre
- > le ou les films sont déposés sur le premier verre, puis le second verre est à son tour déposé sur les films
- > le verre passe dans une calandreuse : à température élevée, un rouleau passe sur le verre de manière à éliminer les bulles d'air incluses et à assurer un début de collage entre le verre et le PVB
- > les verres feuilletés (non encore transparents) sont alors stockés sur des chevalets

- > les chevalets sont placés dans un autoclave, à pression et température élevées, de manière à obtenir l'adhésion et la transparence finale du produit.

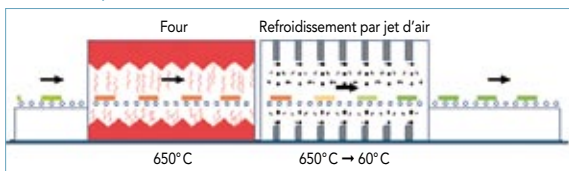
Procédé feuilleté



▼ Verre trempé thermiquement (EN 12150-1)

Verre qui a subi un traitement thermique consistant à le réchauffer à environ 600°C puis à le refroidir rapidement par jets d'air.

Procédé trempé thermique



Une contrainte superficielle permanente en compression est dès lors induite dans le verre. Ceci lui procure une résistance accrue aux contraintes mécaniques et thermiques et des caractéristiques de fragmentation prescrites.

En cas de bris, le verre se fragmente en morceaux peu coupants et plus petits que le verre recuit, ce qui limite les risques de coupure ; le verre trempé est dès lors considéré comme un verre de sécurité contre les blessures pour certaines applications (cabines de douches, cloisons, ...).

Gammes AGC : verres trempés.

▼ Verre trempé thermiquement traité «Heat Soak» (EN 14179-1)

Traitement thermique supplémentaire appliqué au verre trempé thermiquement, destiné à éliminer la plupart des verres trempés contenant des inclusions de sulfure de nickel non stable et d'éviter de la sorte les ruptures spontanées.

Gammes AGC : verres trempés THS, Structaflex.

▼ Verre durci (EN 1863-1)

Verre qui a subi un traitement thermique consistant à le réchauffer à environ 600°C puis à le refroidir de manière contrôlée par jets d'air, plus lentement que dans le cas du verre trempé thermiquement.

De la sorte, une contrainte superficielle permanente en compression est induite dans le verre ce qui lui procure une résistance accrue aux contraintes mécaniques et thermiques et des caractéristiques de fragmentation prescrites.

En cas de bris, le verre durci se casse en grands morceaux coupants comme le float et n'est dès lors pas considéré comme un produit verrier de sécurité.

Les verres durcis ne nécessitent pas de traitement Heat Soak.

Gammes AGC : verres durcis.

▼ Verre émaillé (EN 1863-1, EN 12150-1, EN 14179-1)

Verre recouvert sur toute sa surface d'une couche d'émail vitrifiée lors d'une opération de trempé ou de durci.

Le verre émaillé est le plus souvent utilisé en allège.

Gamme AGC : Colorbel.

▼ Verre sérigraphié (EN 1863-1, EN 12150-1, EN 14179-1)

Procédé apparenté à l'émaillage qui consiste à déposer un émail sur une partie d'un verre au travers d'un écran et à le vitrifier par une opération de trempé ou de durci.

Gammes AGC : Artlite, Structaflex.

▼ Verre trempé chimiquement (EN 12337-1)

Verre obtenu en soumettant un float à un procédé d'échange ionique afin de donner une résistance accrue aux contraintes mécaniques et thermiques. Les ions de petit diamètre se trouvant dans la surface et la tranche du verre sont remplacés par des ions de plus grand diamètre, ce qui se traduit par la mise en compression de la surface et des chants de verre.

Le verre trempé chimiquement est essentiellement réservé à des applications particulières telles que l'aéronautique et l'éclairage.

▼ Verre bombé

Verre auquel on donne, par déformation à chaud, la courbure du moule sur lequel il repose.

Procédé de bombage du verre



Gamme AGC : verre bombé.

▼ Vitrage isolant (EN 1279-1 à 6)

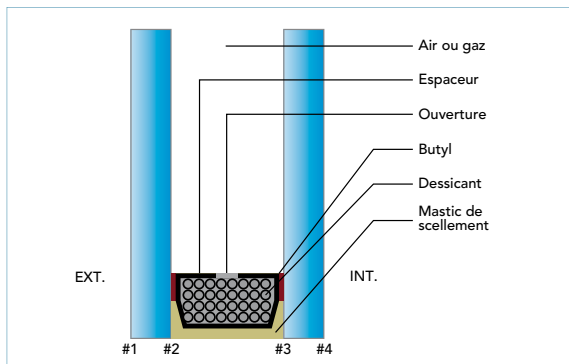
Vitrage scellé en usine et constitué de feuilles de verre (double vitrage, triple vitrage) séparées par un espace d'air et/ou de gaz déshydraté grâce à un espaceur.

Le but premier du double vitrage est d'augmenter l'isolation thermique par rapport à un simple vitrage.

On peut combiner l'isolation thermique du vitrage isolant à des fonctions de contrôle solaire, d'isolation acoustique ou de sécurité en utilisant les produits verriers adéquats comme composants du vitrage isolant.

Les faces des composants d'un double vitrage sont conventionnellement numérotées, de l'extérieur vers l'intérieur, de 1 à 4.

Vitrage isolant : composants, orientation et numérotation des faces

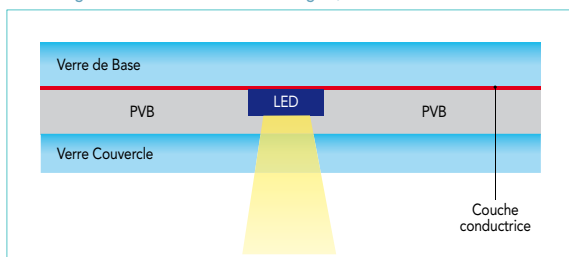


Gammes AGC : Thermobel, Thermobel S, Thermobel Phonibel, Thermobel Warm E, Thermobel Tri, etc.

▼ Verre feuilleté avec intégration de LED's

Gamme de verres feuilletés dans lesquels sont intégrées des diodes électroluminescentes (RGB ou mono-couleur). Les LED's sont alimentées par une couche conductrice invisible haute performance.

Assemblage verre feuilleté avec LED's intégrés, Glassiled



Gamme AGC : Glassiled.

2 PROPRIÉTÉS ET FONCTIONS



Maison privée, Paris, France -
Architecte : G. Harmonic & JC Masson - Thermobel Energy^N

2.1 RAYONNEMENT, LUMIÈRE ET COULEUR

Les notions de rayonnement, lumière, énergie et couleur sont indispensables à la bonne compréhension des chapitres concernant l'isolation thermique, le contrôle solaire et le contrôle lumineux.

2.1.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENTS

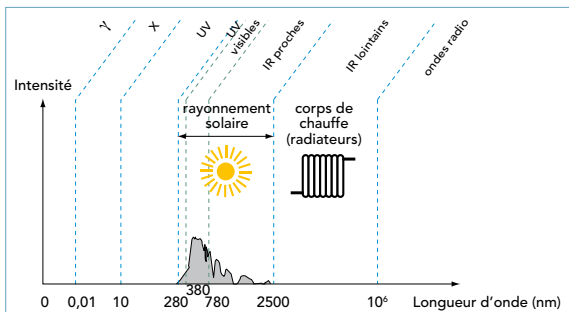
Nous sommes chaque jour soumis à différents types de rayonnements, entre autres ceux provenant du soleil. Le tableau et la figure ci-après donnent la classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

Classification des rayonnements électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde

Type de rayonnement	Longueurs d'ondes (nm)*
Rayons Gamma	de 0 à 0,01
Rayons X	de 0,01 à 10
Rayons ultraviolets (UV)	de 10 à 380
UV C	de 10 à 280
UV B	de 280 à 315
UV A	de 315 à 380
Rayons visibles	de 380 à 780
Rayons infrarouges (IR)	de 780 à 10 ⁶
proches IR A	de 780 à 1400
proches IR B	de 1400 à 2500
lointains IR C	de 2500 à 10 ⁶
Ondes radios	de 10 ⁶ nm à plusieurs km

* 1nm = 1 nanomètre = 10⁻⁹m.

Les différents types d'ondes électromagnétiques



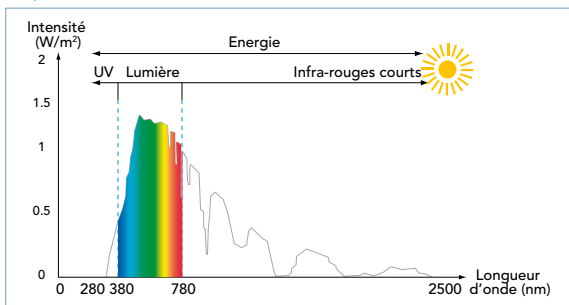
2.1.2 LE SPECTRE SOLAIRE

Le rayonnement solaire ne correspond qu'à une petite partie du spectre des ondes électromagnétiques. Sa composition est donnée au tableau et à la figure ci-après. Le spectre de la lumière visible fait partie du spectre solaire.

Composition du spectre solaire

Type de rayonnement	Longueur d'onde (nm)	Fraction énergétique
UV	280 à 380	≈ 5%
Visible	380 à 780	≈ 50%
IR	780 à 2500	≈ 45%

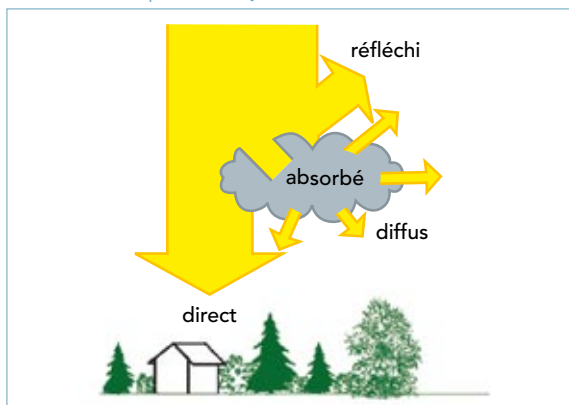
Le spectre solaire



Le soleil est à l'origine du spectre solaire. Il dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2 , produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Cette fraction, d'une valeur de $1353 W/m^2$ est appelée constante solaire.

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que la constante solaire, car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et en réfléchit une autre vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme étant la somme des rayonnements direct et diffus.

Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire



L'énergie reçue dépend en outre de la saison (angle d'incidence du soleil par rapport à la terre), de la latitude, des conditions météorologiques (nébulosité), du relief, de la pollution, de l'orientation du bâtiment,...

2.1.3 LA LUMIÈRE

La lumière est la partie du spectre solaire, de 380 nm à 780 nm, qui est perceptible par l'œil humain.

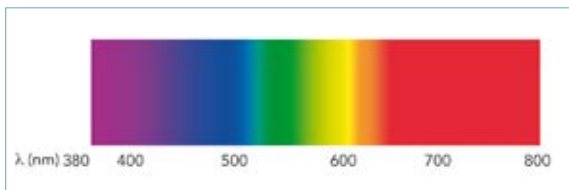
Sa composition est donnée ci-après.

Composition de la lumière

Couleur	Longueurs d'ondes (nm*)
Violet	380 à 462
Bleu	462 à 500
Vert	500 à 577
Jaune	577 à 600
Orange	600 à 625
Rouge	625 à 780

* 1nm = 1 nanomètre = 10^{-9} m.

La lumière



Nous avons une perception visuelle de la lumière mais celle-ci est également perceptible sous forme de chaleur. La lumière constitue d'ailleurs environ la moitié de la chaleur que nous recevons du soleil.

2.1.4 LA CHALEUR

La chaleur que nous percevons peut avoir deux origines :

- > la chaleur provenant du spectre solaire et apportée par les UV, la lumière et les IR courts
- > la chaleur émise par les objets (lampes, radiateurs, ...) sous forme d'IR longs.

2.1.5 PROTECTION DU VERRE CONTRE LES TYPES DE RAYONNEMENT

▼ Protection contre les UV

Le rayonnement solaire est une forme d'énergie susceptible, dans certains cas, de dégrader les couleurs des objets qui lui sont exposés. Cette altération des couleurs résulte de la dégradation progressive des liaisons moléculaires sous l'action des photons de forte énergie. Les rayonnements à l'origine de cet effet sont les ultraviolets et, dans une moindre mesure, la lumière visible de courte longueur d'onde (violet et bleu). De plus, le rayonnement solaire engendre des élévations de température qui accélèrent encore ce phénomène.

Certains produits verriers permettent de lutter contre la décoloration :

- > les verres feuilletés avec intercalaires en PVB absorbent plus de 99% des UV
- > les verres colorés à dominante jaune-orangée absorbent en partie la lumière violette et bleue
- > les vitrages ayant un facteur solaire faible limitent les élévations de température.

Aucun produit verrier ne garantit cependant à 100% l'absence de phénomènes de décoloration ; en effet, l'éclairage artificiel intérieur peut également, dans certains cas, être à l'origine de la décoloration.

Différents indices permettent de quantifier la protection contre les UV et le risque de décoloration :

- > la transmission UV (TrUV)
- > le CIE damage factor : cet indice est défini dans l'ISO 9050 et tient compte de la transmission du rayonnement pour des longueurs d'ondes de 300 à 600 nm, c'est-à-dire celles contribuant à la décoloration des objets
- > le skin protection factor (SPF) : cet indice est défini dans l'ISO 9050 et tient compte de la transmission du rayonnement pour des longueurs d'ondes de 300 à 400 nm, c'est-à-dire celles contribuant à la détérioration de la peau.

▼ Contrôle de la lumière

Le contrôle de la lumière peut être réalisé à l'aide de verres colorés, de verres à couches ou de verres translucides.

Pour plus de détails, voir «Contrôle lumineux».

▼ Protection contre les IR courts et la chaleur

La protection contre les IR courts ou contre la chaleur en général s'obtient par des verres de contrôle solaire ayant un facteur solaire adapté.

Dans le cadre de la conception d'un bâtiment, la surface des vitrages et leur facteur solaire influencent directement le système de ventilation éventuel.

Pour plus de détails, voir «Contrôle solaire».

▼ Contrôle des IR longs

Le contrôle des IR longs consiste à empêcher ces ondes, à savoir la chaleur émise par les objets, de quitter les bâtiments afin d'en améliorer l'isolation thermique.

Ce contrôle s'obtient grâce à des verres à couches à basse émissivité.

Dans le cadre de la conception d'un bâtiment, le niveau d'isolation thermique des vitrages (et du bâtiment en général) influence directement le système de chauffage à mettre en œuvre.

Pour plus de détails, voir «Isolation thermique».

2.1.6 LA COULEUR

Les objets que nous voyons, qu'ils soient transparents, translucides ou opaques, ont une certaine couleur.

Cette couleur dépend de nombreux paramètres tels :

- > la lumière incidente (type d'illuminant)
- > les propriétés de réflexion et de transmission de l'objet
- > la sensibilité de l'œil de l'observateur
- > l'environnement de l'objet observé et le contraste entre cet objet et ceux qui l'entourent.

La couleur d'un objet dépend de ces différents paramètres et un observateur ne percevra pas forcément cet objet de la même façon en fonction, par exemple, du moment de la journée ou du niveau de lumière naturelle.

La teinte en transmission du verre clair est légèrement verte. Les propriétés optiques des verres colorés varient fortement en fonction de leur épaisseur. Les floats colorés bronze, gris, bleus et verts permettent de réduire la quantité d'énergie solaire, et donc de lumière transmise.

La vue au travers d'un vitrage coloré est donc influencée par la couleur du verre.

Indice de rendu des couleurs RD 65 (R_a) : cet indice donne une évaluation quantitative de la différence de couleur entre 8 échantillons de couleur-test éclairés directement par l'illuminant D65, et la lumière provenant du même illuminant, transmise par le vitrage. Plus sa valeur est élevée, moins la couleur est modifiée par la vue au travers du vitrage.

2.2 ISOLATION THERMIQUE

2.2.1 TRANSMISSION DE CHALEUR À TRAVERS UN VITRAGE

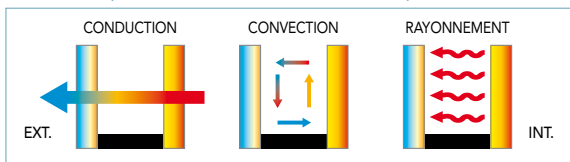
Une différence de température entre deux points d'un corps quel qu'il soit entraîne un transfert de chaleur du point chaud vers le point froid.

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, sous l'influence d'une source de température ; il s'agit par exemple d'une barre métallique dont une extrémité est chauffée
- > par convection dans les liquides et les gaz ; les différences de température provoquent des différences de densité qui mettent les molécules en mouvement puisque les parties chaudes ont une masse plus légère et se déplacent vers le haut alors que l'effet est inverse pour les parties froides ; ces mouvements tendent à égaliser les températures ; c'est le cas d'une casserole d'eau que l'on chauffe
- > par rayonnement : tout corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique ; celui-ci traverse un milieu qui est transparent aux ondes ; par contre, lorsque les ondes rencontrent un obstacle, elles cèdent une partie de leur énergie à l'obstacle qui émet à son tour de la chaleur ; ce mode de transmission ne nécessite pas un milieu et il peut aussi se produire dans le vide ; c'est le cas par exemple du rayonnement solaire ou d'une ampoule électrique.

Le but du double vitrage est de limiter les pertes de chaleur par conduction dans le verre en insérant entre les deux verres une lame isolante d'air ou de gaz.

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



2.2.2 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE

▼ Introduction

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 :

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R} = U (\theta_i - \theta_e)$$

où θ_i et θ_e sont les températures des ambiances intérieures et extérieures

R est la résistance thermique du vitrage ($m^2.K/W$)

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

▼ Coefficient de transmission thermique U (anciennement K)

Défini comme la quantité de chaleur traversant le vitrage, en régime permanent, par unité de surface, pour une différence d' $1^\circ C$ entre les ambiances.

La quantité de chaleur Q (W) qui traverse par seconde un vitrage d'une superficie S (m^2) de l'ambiance chaude vers l'ambiance froide vaut donc :

$$Q = S U (\theta_i - \theta_e)$$

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

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

▼ Conductivité thermique λ

Définie comme la quantité de chaleur traversant en une seconde un panneau de 1 m d'épaisseur et d'une surface de 1 m^2 , lorsqu'il existe une différence de température de 1°C entre les deux surfaces.

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_g) 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).

La norme EN 673 donne la méthode de calcul du coefficient de transmission thermique U_g 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 tableau ci-après donne les valeurs du coefficient de transmission thermique des différents types de vitrages isolants. Les espaceurs les plus couramment utilisés ont une épaisseur de 12 et 15 mm.

Valeurs du coefficient de transmission thermique pour différents types de vitrages

Espace x (mm)	4-x-4			4-x-4 VIR* ($\epsilon = 0,04$)			4-x-4-x-4
	air	90% argon	90% krypton	air	90% argon	90% krypton	argon
6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,0	1,5	
10	3,0	2,8	2,6	1,8	1,5	1,1	
12	2,9	2,7	2,6	1,7	1,3	1,1	0,8
15	2,7	2,6	2,6	1,5	1,1	1,1	
20	2,8	2,6	2,6	1,4	1,2	1,1	

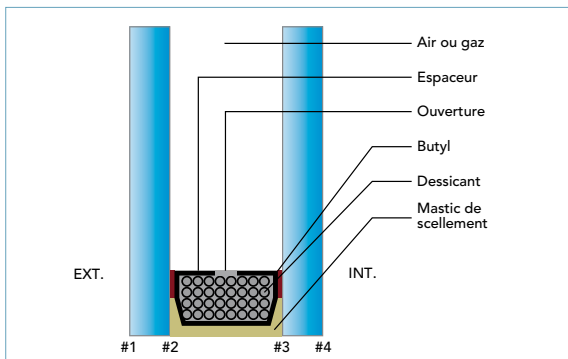
* VIR : vitrage à isolation renforcée.

2.2.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE VITRAGES ISOLANTS

▼ 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 $0,025 \text{ W/(m.K)}$ (à 10°C) pour 1 W/(m.K) au verre, la couche d'air augmente le pouvoir isolant et diminue la valeur U_g du vitrage.

Double vitrage : composants, orientation et numérotation des faces



Les faces des doubles vitrages sont conventionnellement numérotées de 1 à 4 de l'extérieur vers l'intérieur.

▼ Les gaz nobles

Une autre amélioration consiste à remplacer l'air ($\lambda = 0,025$ W/(m.K), $\rho = 1,23$ kg/m³, à 10°C, c'est-à-dire aux conditions normalisées de la EN 673) par des gaz ayant à la fois une conductivité thermique plus faible afin de limiter la conduction et une masse volumique plus élevée afin de limiter la convection (mise en mouvement plus difficile).

Ces gaz permettent de diminuer la valeur U_g de l'ordre de 0,2 à 0,3 W/(m².K) et ne sont utilisés que pour des vitrages isolants à couches.

En pratique, on utilise régulièrement l'argon ($\lambda = 0,017$ W/(m.K), $\rho = 1,70$ kg/m³) et parfois le krypton ($\lambda = 0,009$ W/(m.K), $\rho = 3,56$ kg/m³).

▼ Les doubles vitrages VIR

> Principe

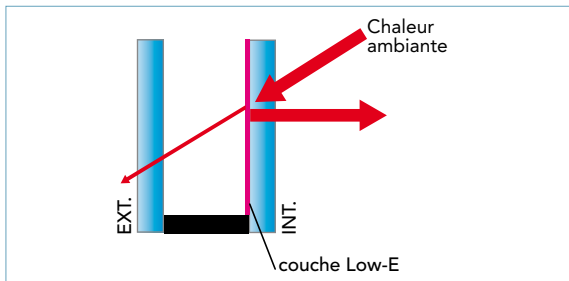
Le développement des techniques de dépôt de couches sur les vitrages a permis de franchir un pas déterminant dans la qualité d'isolation thermique des vitrages. La pose d'une couche métallique sur le vitrage permet d'obtenir des vitrages appelés à basse émissivité, à isolation thermique renforcée ou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

Il s'agit :

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

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

Vitrage à basse émissivité



> L'émissivité

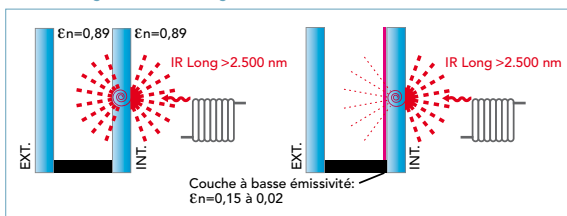
Les objets situés à l'intérieur des bâtiments rayonnent la chaleur sous forme d'IR longs (plus de 2500 nm). Le verre ne transmettant quasiment pas ce type de rayonnement, il va absorber les IR longs, s'échauffer puis réémettre cette chaleur.

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

Le but de la couche à basse émissivité est d'augmenter la réflexion de la chaleur absorbée par le vitrage vers l'intérieur du bâtiment. Contrairement à un verre clair, un verre à basse émissivité permet donc de conserver la chaleur dans un bâtiment et d'améliorer le confort thermique.

L'émissivité d'un verre peut donc être interprétée comme son absorption ; plus l'émissivité (c'est-à-dire l'absorption) est basse, plus la réflexion est haute et plus la chaleur est conservée.

Double vitrage et double vitrage VIR



Par exemple, une émissivité de 0,2 signifie que 80% du flux de chaleur absorbé par le vitrage est réfléchi vers l'intérieur du bâtiment.

La formule mathématique s'écrit comme suit :

$$\epsilon = AE = 1 - TR - RE = 1 - RE \quad (\text{car } TR = 0)$$

Au niveau scientifique, 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.

La norme EN 12898 décrit la 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 normale égale à 0,89 alors que les couches pyrolytiques (Planibel G, Sunergy) permettent d'obtenir des valeurs de l'ordre de 0,30 à 0,15 et les couches magnétron (Top^{N+}, Top^{N+T}, Stopray) atteignent des valeurs inférieures de 0,10 à 0,02.

▼ Les espaceurs «Warm Edge»

L'espaceur métallique en aluminium ou acier traditionnellement utilisé, est remplacé par un espaceur en matière plastique (éventuellement renforcé par une âme métallique afin d'en améliorer la rigidité). La conductivité thermique des matières plastiques utilisées étant moindre que celle de l'acier et de l'aluminium, on diminue les déperditions thermiques à travers l'espaceur, à la périphérie du vitrage (coefficient ψ).

Il est important de noter que l'amélioration apportée par l'espaceur Warm Edge ne se répercute pas sur la valeur U_g , qui représente la déperdition thermique au centre du vitrage, mais bien sur la valeur U_w , qui représente la déperdition thermique de la fenêtre complète (vitrage + espaceur + châssis).

▼ Les triples vitrages

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

Cette solution est utilisée dans les cas où l'on veut obtenir des valeurs U_g très basses, inférieures à $1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Elle présente cependant des désavantages du point de vue de l'épaisseur et du poids des vitrages qui ne s'adaptent donc pas toujours aux menuiseries classiques.

Ces solutions reviennent cependant d'actualité pour obtenir un très haut niveau d'isolation thermique (par exemple pour les maisons passives).

AGC propose une gamme de triples vitrages Thermobel avec valeur U_g de 0,9 à 0,5 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

▼ Remarques

> Contrôle solaire

L'émissivité a une influence sur le rayonnement IR lointain ; elle n'influence par contre quasiment pas le rayonnement solaire. En utilisant un double vitrage VIR, on améliore donc l'isolation thermique tout en laissant pénétrer une grande partie de l'énergie solaire.

Pour combiner le contrôle thermique et le contrôle solaire, il faut utiliser d'autres types de couches combinant ces deux fonctions.

> Aspect des vitrages

Il est déconseillé de placer côte à côte des doubles vitrages «classiques» et des doubles vitrages VIR car il existe une légère différence de teinte (due à la présence de la couche métallique) qui peut être visible lorsqu'elle est vue sous certaines orientations.

2.2.4 LA GAMME AGC FLAT GLASS EUROPE

▼ Verres de base

Certaines de ces couches sont uniquement destinées à l'isolation thermique et sont caractérisées par une teinte neutre qui autorise leur utilisation en applications résidentielles (Top^{N+}, Top^{N+T}, Planibel Tri).

Plus récemment sont apparues les couches Planibel Energy^N et Energy^{NT} neutres également, qui combinent l'isolation thermique et le contrôle solaire.

Enfin, certaines couches de contrôle solaire (Stopray et Sunergy) permettent également d'améliorer l'isolation thermique ; ces couches peuvent être neutres ou colorées (voir «Verre et contrôle solaire»).

Gamme AGC de verres à isolation thermique renforcée

	Couches magnétron	Couches pyrolytiques
Verre neutre à isolation renforcée	Planibel Top ^{N+} ($U_g = 1,1$) Planibel Top ^{N+T} ($U_g = 1,1$) Planibel Tri ($U_g =$ entre 0,9 et 0,6)	
Verre à isolation renforcée et de contrôle solaire	Planibel Energy ^N ($U_g = 1,1$) Planibel Energy ^{NT} ($U_g = 1,1$) Stopray ($U_g = 1,1$)	Sunergy ($U_g = 1,8$) Planibel G ($U_g = 1,5$)
Verre de contrôle solaire		Stopsol (uniquement à basse émissivité en combinaison avec un verre à couche Low-E)

- NB : > Les couches magnétron doivent toujours être assemblées en double vitrage
 > Les couches Top^{N+T} et Energy^{NT} doivent obligatoirement être trempées avant assemblage.

▼ Vitrages isolants

Les couches à isolation thermique renforcée doivent être assemblées en double vitrage.

Les vitrages isolants fabriqués par AGC portent la marque Thermobel.

Gamme des doubles vitrages AGC

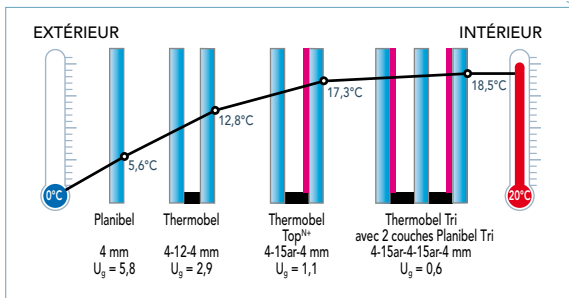
	Sans couche	Couche Top ^{N+}	Couche Energy ^N
Marque vitrage isolant	Thermobel	Thermobel Top ^{N+}	Thermobel Energy ^N

2.2.5 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. En effet, le corps humain dont la température (de peau) est de l'ordre de 28°C, se comporte comme un «radiateur» vis-à-vis des parois froides telles que les vitrages offrant une isolation thermique peu performante. L'énergie ainsi dissipée se traduit par une désagréable sensation de froid.

On voit sur la figure suivante que l'utilisation de vitrages VIR permet donc non seulement de limiter les pertes énergétiques mais aussi de supprimer le phénomène peu confortable de paroi froide.

Evolution de la température de la face intérieure du vitrage en fonction de la valeur U_g



2.2.6 PHÉNOMÈNES DE CONDENSATION

On note trois phénomènes de condensation susceptibles de survenir sur les vitrages :

- > la condensation superficielle sur la face intérieure (position 4) : ce phénomène se produit si l'humidité relative intérieure est élevée et/ou la température de la face intérieure du vitrage est basse ; pour des climats intérieurs normaux (bâtiments chauffés sans source d'humidité particulière), ce phénomène ne se présente que très rarement avec des doubles vitrages VIR
- > la condensation superficielle sur la face extérieure (position 1) : ce phénomène se produit parfois à l'aube, pour des doubles vitrages VIR, et uniquement après des nuits sans nuages et sans vent ; dans ces conditions, vu l'isolation thermique performante du double vitrage, la feuille extérieure se refroidit à un point tel que de la condensation se forme à l'extérieur. Celle-ci est passagère et est une preuve du bon caractère isolant du vitrage
- > la condensation interne au volume de double vitrage (position 2 ou 3) : le bon fonctionnement du dessiccant et des barrières d'étanchéité conditionnent la durée de vie du vitrage ; si le dessiccant perd de son efficacité ou si le scellement n'est plus hermétique, de la condensation se forme à l'intérieur du vitrage et le vitrage doit être remplacé.

2.3 CONTRÔLE SOLAIRE

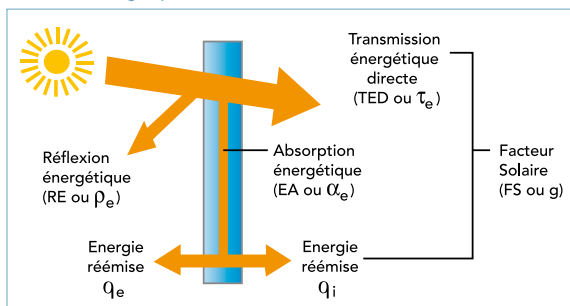
2.3.1 LES FACTEURS ÉNERGÉTIQUES ET LUMINEUX

▼ Les facteurs énergétiques

Lorsque les rayons du soleil viennent frapper un vitrage, le rayonnement solaire total incident (de 300 à 2500 nm) ϕ_e est réparti entre :

- > une fraction $\rho_e \phi_e$ réfléchi vers l'extérieur, où ρ_e (ou RE) est le facteur de réflexion énergétique directe du vitrage
- > une fraction $\tau_e \phi_e$ transmise à travers le vitrage, où τ_e (ou TED) est le facteur de transmission énergétique directe du vitrage
- > une fraction $\alpha_e \phi_e$ absorbée par le vitrage, où α_e (ou AE) est le facteur d'absorption énergétique directe du vitrage ; l'énergie absorbée par le vitrage est ensuite partagée en :
 - une fraction $q_i \phi_e$ réémise vers l'intérieur, où q_i est le facteur de réémission thermique vers l'intérieur
 - une fraction $q_e \phi_e$ réémise vers l'extérieur, où q_e est le facteur de réémission thermique vers l'extérieur.

Les facteurs énergétiques



Ces différents facteurs sont liés par les relations :

$$\rho_e + \tau_e + \alpha_e = 1 \quad \text{ou} \quad RE + TED + AE = 100$$

et

$$\alpha_e = q_i + q_e$$

Le facteur solaire g (ou FS) représente la transmission totale d'énergie à travers le vitrage ; il s'agit donc de la somme du rayonnement transmis directement et du rayonnement absorbé qui est réémis vers l'intérieur :

$$g = \tau_e + q_i$$

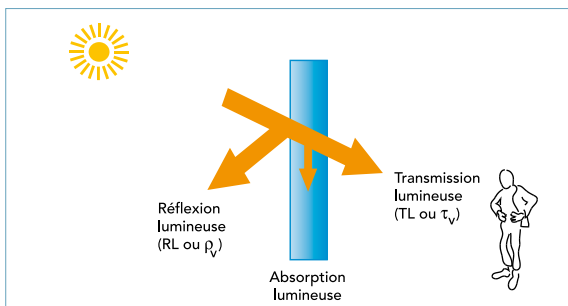
▼ Les facteurs lumineux

Par analogie aux facteurs énergétiques, les facteurs lumineux sont définis en tenant seulement compte de la partie visible du spectre solaire (de 380 à 780 nm).

Les facteurs de transmission lumineuse τ_v (ou TL) et de réflexion lumineuse ρ_v (ou RL) sont définis comme étant respectivement les fractions de lumière visible transmise et réfléchie par le vitrage.

Le rayonnement absorbé par le vitrage ne donne lieu à aucune impression visuelle et il n'est généralement pas pris en compte.

Les facteurs lumineux



Valeurs g et τ_v de simples et doubles vitrages clairs

	Facteur solaire FS	Transmission lumineuse TL
Verre clair 4 mm	0,86	0,90
Vitrage isolant clair 4-15-4 (mm)	0,76	0,81
Vitrage isolant avec Top ^{N+} 4-15-4 (mm)	0,60	0,78

Indice de rendu des couleurs RD 65 (R_g) : cet indice donne une évaluation quantitative de la différence de couleur entre 8 échantillons de couleur-test éclairés directement par l'illuminant D65, et la lumière provenant du même illuminant, transmise par le vitrage. Plus sa valeur est élevée, moins la couleur est modifiée par la vue au travers du vitrage.

La norme EN 410 définit de nouvelles notations pour les indices ; la correspondance est donnée ci-après.

Notations

Indice	Autre notation	EN 410
Facteur de réflexion lumineuse	RL	ρ_v
Facteur de transmission lumineuse	TL	τ_v
Facteur de transmission directe de l'énergie solaire	TED	τ_e
Facteur d'absorption directe de l'énergie solaire	AE	α_e
Facteur de réflexion directe de l'énergie solaire	RE	ρ_e
Facteur solaire	FS	g

▼ La sélectivité

La chaleur rentrant dans un local provient de l'entièreté du rayonnement solaire, à savoir la lumière visible, les ultra-violets et les infra-rouges.

On peut limiter la chaleur pénétrant dans le bâtiment, sans pour autant diminuer la lumière, en utilisant des verres à couches performants empêchant le passage des UV et des IR et non de la lumière visible. Ces verres sont dits sélectifs.

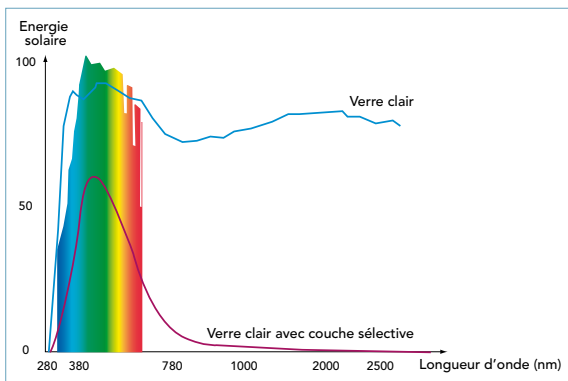
La sélectivité d'un vitrage est le rapport de sa transmission lumineuse TL et de son facteur solaire FS : sélectivité = TL / FS.

La sélectivité est toujours comprise entre 0 et 2 :

- > 0 correspond à un verre opaque qui a une transmission lumineuse nulle
- > 2 correspond à la meilleure sélectivité possible puisque la lumière représente 50% du spectre solaire ; par exemple, pour un vitrage ayant une TL de 50%, le FS le plus bas que l'on peut atteindre est 25.

Plus on s'approche de 2, plus le vitrage est sélectif.

La sélectivité



Exemples :

- > Planibel clair 4 mm : TL = 90 ; FS = 86 ; sélectivité = $90/86 = 1,04$.
- > Stopray Galaxy on Clearvision 6-12-6 : TL = 41 ; FS = 22 ; sélectivité = $41/22 = 1,86$.
- > Stopsol Classic bronze 6 mm : TL = 21 ; FS = 42 ; sélectivité = $21/42 = 0,50$.

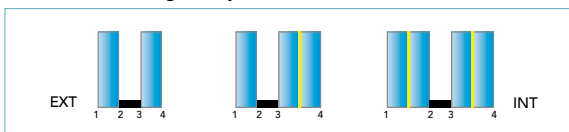
▼ Conventions concernant les positions des couches

Les conventions utilisées sur le site www.yourglass.com sont reprises ci-après.

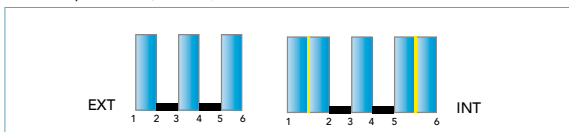
> En verre monolithique (toujours de 1 à 2)



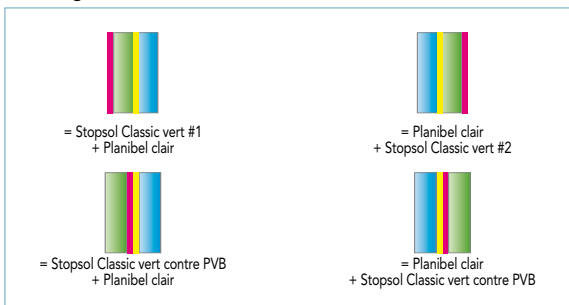
> En double vitrage (toujours de 1 à 4)



> En triple vitrage (toujours de 1 à 6)



Exemple : Comment décrire le Stopsol Classic vert assemblé en vitrage feuilleté.



2.3.2 LE CONTRÔLE SOLAIRE

▼ Introduction

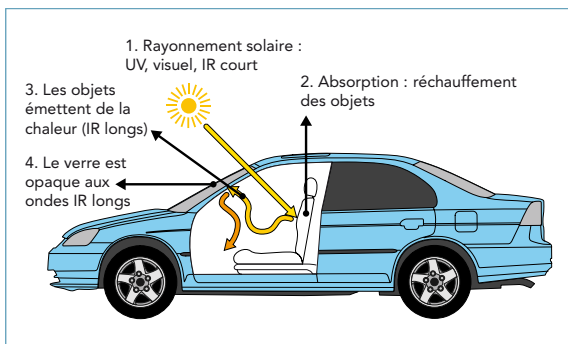
> Echauffement des locaux – effet de serre

Le soleil peut amener trop de chaleur à l'intérieur des bâtiments abondamment vitrés. La chaleur du soleil pénètre dans le local par transmission directe ou par réémission vers l'intérieur après absorption par le vitrage. Cette fraction de rayonnement solaire qui a pénétré le bâtiment vient frapper les murs, le sol ou les meubles qui vont l'absorber partiellement et s'échauffer. A leur tour, ils vont restituer cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge calorifique de longueur d'onde supérieure à 2500 nm (IR lointains). Or, le verre est pratiquement opaque à ce rayonnement de grande longueur d'onde qui est dès lors rayonné vers l'intérieur. La température s'élève donc progressivement : c'est l'effet de serre.

Un verre teinté dans la masse ou un verre à couches de contrôle solaire permettent un passage de la chaleur moindre et donc un échauffement moindre.

La figure ci-après illustre l'effet de serre dans le cas d'une voiture stationnant au soleil : échauffement important de la température intérieure mais aussi des sièges et du volant.

L'effet de serre



> Utilisation des locaux – énergie solaire gratuite

L'effet de serre est recherché dans les logements aux périodes froides de l'année car il permet de réaliser des économies d'énergie. Par contre, il est rarement apprécié dans les bâtiments du secteur tertiaire dans lesquels le fort taux d'occupation, les appareils électriques et l'éclairage artificiel provoquent déjà une augmentation de la température interne. Dans ce cas, l'effet de serre engendre une hausse des coûts liés au conditionnement d'air. Il est utile pour ces bâtiments de prévoir une protection contre l'apport d'énergie solaire.

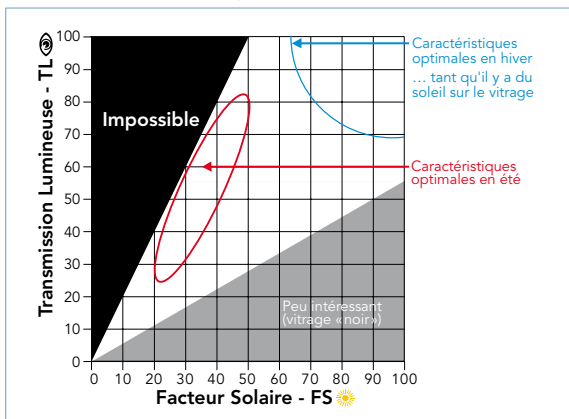
> Orientation des fenêtres

La quantité des apports solaires dépend évidemment de l'orientation de la fenêtre. Dans l'hémisphère nord, les fenêtres orientées au nord présentent le moins d'apport. Les fenêtres orientées au sud bénéficient d'un large ensoleillement en hiver et de peu d'ensoleillement en été. Les fenêtres orientées à l'ouest et à l'est bénéficient d'apports solaires toute l'année ; celles orientées à l'ouest présentent de plus l'inconvénient de bénéficier d'apports en fin de journée alors que le bâtiment a déjà eu le temps de s'échauffer ; il s'agit donc de l'orientation la plus critique lorsque l'on essaie de se prémunir des apports énergétiques du soleil.

> Performances des vitrages

La zone centrale claire du graphique correspond aux caractéristiques qu'il est théoriquement possible d'atteindre ; certaines parties de cette zone sont plus intéressantes du point de vue du contrôle solaire et lumineux :

Combinaisons facteur solaire FS(g) - transmission lumineuse TL



- en bâtiments résidentiels :
 - en été, il est souhaitable d'avoir un facteur solaire faible (et donc performant) combiné à une transmission lumineuse plus ou moins élevée (zone rouge)
 - en hiver, il est souhaitable d'avoir un facteur solaire et une transmission lumineuse élevés (zone bleue).
- en immeubles de bureaux, contrairement au résidentiel, il se peut qu'en hiver également on essaye de limiter les gains solaires si les gains thermiques internes sont élevés.

Tous les points de la zone claire sont théoriquement atteignables mais les produits verriers actuels ne permettent pas encore d'obtenir de manière sélective toutes ces combinaisons.

Ces critères de choix ne tiennent compte que de la transmission énergétique et lumineuse ; en réalité, pour le choix d'un vitrage, il faut également garder à l'esprit les impératifs d'isolation thermique.

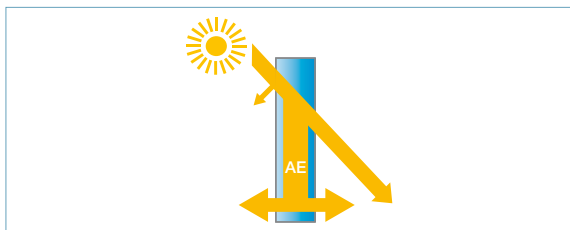
▼ Verres de contrôle solaire

> Verres absorbants

Il s'agit de verres teintés dans la masse (bronze, gris, vert, bleu,...) par adjonction d'oxydes métalliques à la composition. Selon la couleur et l'épaisseur du verre, le facteur solaire varie de 40 à 80%.

Ces verres absorbent une partie de l'énergie du rayonnement solaire avant de la réémettre vers l'intérieur et l'extérieur.

Verre absorbant



La proportion entre l'énergie émise vers l'intérieur et l'extérieur dépend de la vitesse du vent et des températures d'air extérieur et intérieur. Pour évacuer le mieux possible la chaleur rayonnée vers l'extérieur, il faut placer le verre absorbant le moins possible en retrait du plan de la façade. Au nu extérieur de la façade, la chaleur absorbée peut mieux s'échapper et le rayonnement vers l'intérieur est plus faible.

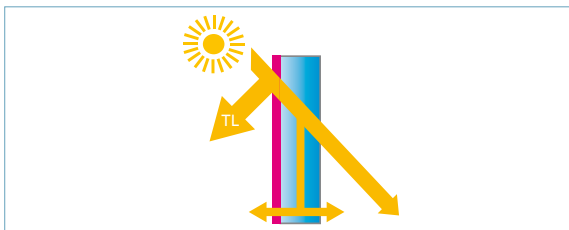
Les verres absorbants sont de moins en moins utilisés comme verre de contrôle solaire depuis que les techniques de dépôt de couches permettent de fabriquer des verres à couches performants.

Les verres absorbants s'échauffent plus rapidement que les verres classiques. Une étude du risque de bris par choc thermique doit être réalisée dans certains cas.

> Verres à couches

Ce sont des verres à couches dont la propriété est de réfléchir une partie de l'énergie solaire incidente.

Verre à couches



Ces couches peuvent être de plusieurs natures :

- couches pyrolytiques à base d'oxydes métalliques déposées sur un verre clair ou coloré sur la ligne de production du verre ; elles sont placées en position 1 ou 2, en simple ou double vitrage
- couches sous vide à base d'oxydes métalliques ou de métaux ; ces couches étant plus fragiles que les couches pyrolytiques, elles sont utilisées en position 2 ou 3 (selon le type) et doivent obligatoirement être placées à l'intérieur d'un double vitrage ; ces verres sont disponibles dans un très grand nombre de coloris.

Comme pour les verres absorbants, il faut veiller au problème de casse thermique lorsque l'on utilise des verres à couches. Une étude du risque de bris par choc thermique doit être réalisée dans certains cas (cf. page 489).

> Remarques

- Il est important pour l'uniformité d'une façade d'utiliser le même type de vitrages (épaisseur, couleur, couches,...) côte à côte.
- Les verres à couches réfléchissent la lumière provenant du milieu le plus «lumineux». Lorsqu'il fait noir à l'extérieur et que l'éclairage artificiel est allumé dans les locaux, c'est cette lumière qui sera réfléchiée vers l'intérieur et la vue vers l'extérieur n'est plus possible.

▼ Les allèges

Les vitrages d'allèges masquent les parties opaques et les structures des façades. Utilisés en combinaison avec des vitrages de vision, ils donnent naissance à des façades «tout verre».

En fonction des produits et couleurs utilisés, on obtient une harmonie totale ou, au contraire, des effets de contraste.

Du point de vue esthétique, le choix de l'allège la plus appropriée au vitrage vision n'est pas toujours aisé. Il est dès lors recommandé à l'architecte, au maître d'œuvre et au professionnel du verre de sélectionner ensemble la solution la plus adéquate sur base d'échantillons ou de prototypes.

Les allèges peuvent être combinées à des fonctions d'isolation thermique, acoustique ou de protection incendie.

Les différents types d'allèges sont :

- > du verre simple émaillé : il s'agit de verre clair, coloré ou à couche pyrolytique recouvert d'une couche d'émail puis trempé ou durci (Colorbel)
- > d'un shadow-box : il s'agit d'une allège composée d'un vitrage de vision combiné à un arrière plan opaque (tôle,...) de manière à obtenir une partie opaque en harmonie avec le bâtiment.

Sauf étude préalable, les vitrages d'allèges sont durcis ou trempés. En cas d'allèges en vitrage isolant placés devant une structure en béton ou un matériau isolant, une étude thermique est nécessaire pour valider la durabilité du vitrage.

▼ Risque de bris par choc thermique

Un bris par choc thermique se produit s'il existe entre deux zones d'un verre recuit une différence de température trop importante. En effet, si la température du verre augmente, celui-ci se dilate ; ce phénomène ne présente pas d'inconvénient si l'augmentation de température est uniforme sur tout le vitrage. Par contre, si une partie du vitrage reste froide, elle empêchera la partie chaude de se dilater librement. Il en résulte la naissance de contraintes de traction qui sont susceptibles de dépasser la contrainte admissible dans le verre. Si un tel risque existe, le verre doit être trempé ou durci.

Sauf étude préalable, les allèges doivent être trempées ou durcies.

2.3.3. LA GAMME AGC

AGC dispose d'une gamme complète de verres de contrôle solaire : verres colorés, verres à couches pyrolytiques et verres à couches magnétron. Le tableau ci-après résume cette gamme.

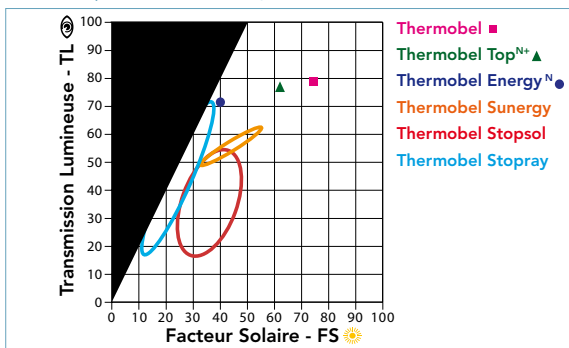
Gamme de verres de contrôle solaire AGC

Verres colorés	Couches pyrolytiques	Couches magnétron
Planibel coloré	Stopsol Sunergy	Energy ^N et NT* Stopray / Stopray ^T

* Voir également dans la partie Isolation thermique.

La figure ci-après résume dans un même graphique le positionnement des différentes familles de verre de contrôle solaire de AGC ainsi que des doubles vitrages Thermobel (composition 6-12-6).

Gammes de performances des vitrages de contrôle solaire AGC



Les deux tableaux ci-après résument les possibilités de transformations et les propriétés des verres à couches de contrôle solaire de AGC.

Utilisation et transformation des verres de contrôle solaire

	Verres à couches pyrolytiques		Verres à couches magnétron
	Stopsol	Sunergy	Stoprpay / Energy ^N
Résistance	bonne	bonne	faible
Utilisation en simple vitrage	# 1 ou 2	# 2	-
Utilisation en vitrage isolant	# 1 ou 2	# 2	# 2
Emargeage	non	non	oui
Transformations	Laminage	Laminage	Laminage*
	Trempe	Trempe	} Trempe Emaillage Bombage Energy ^{XT} Stoprpay ^T
	Emaillage	Emaillage	
	Bombage	Bombage	

* La couche ne peut pas être en contact avec le PVB.

Propriétés des verres de contrôle solaire

Propriétés	Verres à couches pyrolytiques		Verres à couches magnétron
	Stopsol	Sunergy	Stoprpay / Energy ^N
Réflexion lumineuse	Elevée (# 1) Faible (# 2)	Faible	Faible à élevée
Isolation thermique	Faible	Moyenne	Elevée
Sélectivité	Faible	Moyenne	Elevée
Neutralité	Faible	Moyenne	Elevée

Remarque : comme pour tous les matériaux, les verres colorés et les verres à couches peuvent présenter de légères différences de teintes.

2.4 CONTRÔLE LUMINEUX

2.4.1 CONTRÔLE DE LA LUMIÈRE

La localisation d'un bâtiment influence fortement les exigences au niveau du contrôle de la lumière. Dans les pays bénéficiant d'un fort ensoleillement, on essaye en général de limiter la transmission lumineuse (et le facteur solaire). Par contre dans les pays ayant peu d'ensoleillement, on essaiera au contraire de profiter de la lumière naturelle.

Les vitrages permettent de répondre à tous les types de demande puisque des transmissions lumineuses variant de quelques % (pour des applications visant à réduire l'éblouissement), jusqu'à plus de 90% (pour le verre extra clair) peuvent être obtenues.

De plus, en fonction du type de couche ou de verre utilisé, ces niveaux de transmission lumineuse peuvent être combinés à des niveaux de facteur solaire plus ou moins équivalent, ou plus performant.

Exemple : pour un vitrage ayant une transmission lumineuse d'environ 50%, différents niveaux de facteur solaire sont possibles :

- > 5 mm Planibel bronze – 12 mm air – 5 mm Planibel clair :
TL = 50, FS = 55, sélectivité = 0,91.
- > 6 mm Sunergy vert – 12 mm air – 6 mm Planibel clair :
TL = 50, FS = 34, sélectivité = 1,47.
- > 6 mm Stopray Vision-50 – 12 mm air – 6 mm Planibel clair :
TL = 49, FS = 29, sélectivité = 1,7.

2.4.2 ÉCLAIRAGE DES LOCAUX

▼ Introduction

Dans le cadre de la conception d'un bâtiment, la surface des vitrages et leur niveau de transmission lumineuse influencent directement le niveau d'éclairage artificiel nécessaire.

L'éclairage naturel des locaux est une matière complexe. Nous ne donnerons ici que quelques règles générales pour les habitations privées et non pour les immeubles de bureaux pour lesquels un éclairage artificiel est toujours présent.

Pour chaque projet, l'architecte doit adapter la position et la dimension des baies, en fonction de l'orientation, de la localisation du bâtiment, et faire le choix du vitrage adéquat.

▼ L'éclairage naturel

La quantité de lumière disponible dépend bien sûr des conditions météorologiques, de la saison et de l'heure du jour et des obstacles éventuels proches de la baie (arbres,...).

Tout comme les apports énergétiques, les apports lumineux dépendent de l'orientation de la fenêtre. L'orientation au nord ne bénéficiant pratiquement pas du soleil, l'éclairage naturel y est le plus constant. Les orientations est et ouest ainsi que sud en hiver bénéficient par contre d'apports lumineux directs.

▼ La position des baies

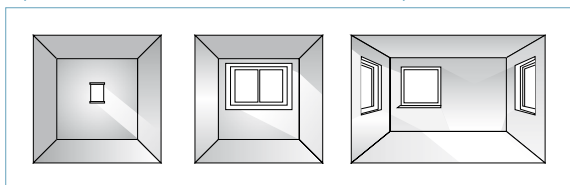
La lumière se propageant en ligne droite, ce sont les parties supérieures des baies qui éclairent un local en profondeur. Il est conseillé de poser les vitrages de manière telle que leur bord supérieur soit à une hauteur au moins égale à la moitié de la profondeur du local. Les ouvertures en toiture sont également favorables.

La répartition de la lumière est également un facteur clef pour un éclairage de qualité. Il ne suffit pas de laisser entrer la lumière dans les espaces. Il faut aussi la distribuer harmonieusement. La lumière étant réfléchiée par les plafonds, les sols et les murs, on évitera les couleurs foncées qui absorbent la lumière et provoquent des «coins sombres».

Il est donc tout indiqué de placer les baies vitrées dans les parties supérieures de plusieurs parois.

Lorsque cela n'est pas possible, il faut jouer sur la réflexion des surfaces intérieures du local, agissant comme autant de sources lumineuses secondaires. Un déséquilibre entre les intensités lumineuses de plusieurs sources sera avantageusement compensé par le choix de leur transmission lumineuse.

Répartition de la lumière en fonction de la taille et de la position des fenêtres



Enfin, si une lumière abondante est agréable, il faut éviter qu'une trop forte intensité ne provoque l'éblouissement ; celui-ci est dû à la présence dans le champ visuel de sources lumineuses trop intenses. La diminution de la surface des baies n'est pas une solution valable car elle accentue le contraste entre la fenêtre et le mur dans lequel elle est percée, augmentant ainsi encore l'inconfort. Par contre, l'éblouissement peut être atténué par l'emploi de verres à couches à transmission lumineuse réduite.

▼ La surface des vitrages

Pour permettre un bon éclairage naturel des locaux, la surface des baies doit être suffisamment grande et la proportion d'éléments non transparents (par exemple les subdivisions des châssis) doit être limitée ; en effet le clair de baie doit toujours être optimisé.

2.4.3 PROTECTION CONTRE LA VISION

Dans certains cas particuliers, on cherche à protéger l'intimité des locaux en empêchant la vue vers l'intérieur. Plusieurs types de produits verriers apportent des solutions :

- > verres à couches : ils abritent partiellement un local contre les regards extérieurs pour autant que celui-ci soit moins éclairé que l'environnement extérieur à ce local
- > verres translucides et/ou colorés : verre imprimé, verre feuilleté avec PVB mat ou coloré, verre maté à l'acide, verre sablé, briques en verre
- > verres sérigraphiés ou émaillés
- > cas particulier des miroirs-espions : il s'agit de vitrages qui permettent la vision dans un seul sens et ce, dans le but d'observer sans être vu soi-même (aéroports, grands magasins,...). Deux conditions doivent être remplies pour obtenir un bon miroir espion :
 - utilisation d'un verre à couche (par exemple Blackpearl) ayant un faible niveau de transmission lumineuse
 - niveau de luminosité nettement plus faible du côté de l'observateur que du côté observé.

2.5 ISOLATION ACOUSTIQUE

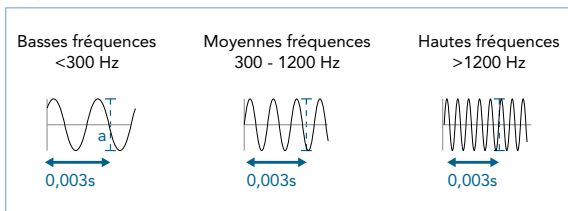
2.5.1 NOTIONS D'ACOUSTIQUE

▼ Son, pression et fréquence

Pour caractériser un son, il faut le définir par deux grandeurs :

- > son niveau de pression, exprimé en Pascal, ou plus généralement son niveau de pression acoustique, exprimé en décibels
- > sa fréquence qui dépend de la durée d'une vibration complète ; pour la caractériser, on utilise le nombre de vibrations par seconde qu'on exprime en Hertz (Hz) ; plus la fréquence d'un son est élevée, plus celui-ci paraît aigu. On distingue 3 gammes de fréquences :
 - les basses fréquences, inférieures à 300 Hz
 - les moyennes fréquences, de 300 à 1200 Hz
 - les hautes fréquences, supérieures à 1200 Hz.

Les gammes de fréquences



Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine correspond à un niveau de pression de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ; elle peut supporter sans dégradation des pressions jusqu'à 20 Pa, le seuil de douleur se situant environ à 200 Pa. La sensibilité de l'oreille humaine est donc telle que la variation de pression minimale audible est plus de 10 millions de fois inférieure à celle représentant le seuil de la douleur.

Au niveau des fréquences, l'oreille peut en moyenne percevoir des sons allant d'environ 20 jusqu'à environ 16 000 à 20 000 Hz.

▼ Niveau de pression acoustique

En pratique, pour caractériser l'intensité d'un son, on n'utilise pas la pression acoustique car :

- > la gamme de pression est trop étendue : de $2 \cdot 10^{-5}$ à 20, voire 100 Pa
- > la relation entre l'oreille humaine et la pression acoustique n'est pas linéaire mais logarithmique.

On définit donc le niveau de pression acoustique L_p d'un son par la relation :

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ (dB)}$$

où p est la pression sonore (Pa) de l'onde acoustique considérée

p_0 est la pression de référence correspondant au seuil d'audibilité soit $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Cette grandeur est exprimée en décibels (dB).

Exemple : si un bruit a une pression sonore de 10 Pa, son niveau de pression acoustique vaut :

$$L_p = 10 \log \frac{10^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} = 114 \text{ dB}$$

Le tableau ci-après donne la correspondance entre les pressions acoustiques (Pa), les niveaux de pression acoustique (dB), ainsi que les impressions physiologiques et des exemples de bruits correspondants.

Pression sonore et niveau de pression acoustique

Effet	Exemple	Pression sonore p (Pa)	Pression acoustique L_p (dB)
Syncope		200 000	200
			190
		20 000	180
			170
		2 000	160
			150
Seuil de douleur		200	140
	Moteur d'avion		130
Danger	Klaxon	20	120
	Tondeuse à gazon		110
	Arrivée métro	2	100
	Grand orchestre		90
	Trafic intense	0,2	80
	Rue bruyante		70
	Voix fortes	0,02	60
	Appartement calme		50
	Voix normales	0,002	40
	Calme montagne		30
	Chuchotement	0,0002	20
	Silence du désert		10
Seuil d'audibilité	Calme total	0,00002	0

▼ Les décibels en pratique

Lorsque plusieurs sources indépendantes produisent en un point des pressions acoustiques p_1, p_2, p_3, \dots , la pression résultante p est déterminée par $p^2 = p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots$, et le niveau de pression acoustique résultant vaut :

$$L_p = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}{p_0^2}$$

Cela signifie qu'il n'est pas correct d'additionner des niveaux de pression acoustique, exprimés en dB, entre eux.

En effet, deux bruits de même niveau de pression se composent en donnant un bruit de niveau 3 dB plus élevé que celui de chacun des composants.

Exemple : Si un bruit à une pression sonore de 0,2 Pa, son niveau de pression acoustique vaut :

$$L_p = 10 \log \frac{0,2^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} = 60 \text{ dB}$$

Si deux bruits de 0,2 Pa sont combinés, le niveau de pression acoustique vaut :

$$L_p = 10 \log \frac{0,2^2 + 0,2^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} = 63 \text{ dB}$$

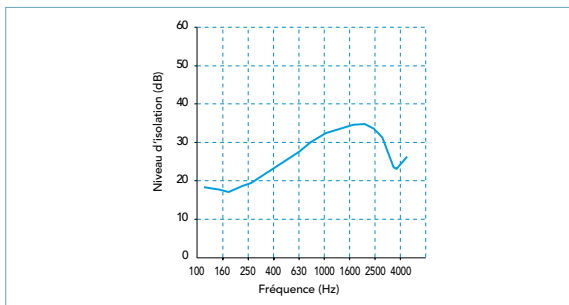
Important : même si une différence de 3 dB au niveau de l'isolation entre deux produits représente une réduction de moitié de l'intensité sonore, au niveau de la perception de l'oreille il n'en est pas de même. C'est ainsi que, pour l'oreille, une différence de :

- > 1 dB est quasiment inaudible
- > 3 dB est à peine perceptible
- > 5 dB est significative
- > 10 dB correspond à une réduction de moitié de la perception de l'intensité sonore
- > 20 dB correspond à réduction de trois quarts de la perception de l'intensité sonore.

Cette différence de 20dB correspond environ à l'étendue de la gamme des vitrages acoustiques.

Pour représenter un son de manière complète, il est donc nécessaire de le présenter dans un graphique appelé spectre acoustique, exprimant le niveau de pression (ou d'isolation acoustique) en fonction de la fréquence. La figure ci-après montre un exemple de spectre acoustique.

Exemple de spectre acoustique



▼ Indices d'affaiblissement acoustique

> Indicateur R_w (C ; C_{tr})

L'indicateur, selon la norme européenne EN ISO 717-1, comprend en réalité trois termes et est défini de la manière suivante :

$$R_w(C ; C_{tr})$$

où R_w est l'indicateur appelé indice pondéré d'affaiblissement acoustique

C est le facteur d'adaptation pour un bruit rose (riche en sons plus aigus)

C_{tr} est le facteur d'adaptation pour un bruit de trafic (riche en sons plus graves).

Les deux termes d'adaptation ont été définis de manière à tenir compte du type de son dont on doit s'isoler : le 1^{er} indice (bruit rose) correspond à une prédominance de fréquences hautes et moyennes ; le 2^e indice (bruit de trafic routier) correspond à une prédominance de fréquences basses et moyennes.

Pour classer des performances ou fixer des exigences, on additionne donc la valeur de l'indicateur unique et le facteur d'adaptation approprié, lequel est choisi selon la source de bruit. Les valeurs à considérer pour caractériser l'isolation acoustique d'un vitrage sont donc, selon les cas, $(R_w + C)$ ou $(R_w + C_{tr})$.

Il est important de préciser que les valeurs d'indice d'affaiblissement acoustique ainsi obtenues correspondent aux mesures en laboratoire et sont généralement plus favorables que celles obtenues in situ pour la même source de bruit. En pratique donc, le niveau d'affaiblissement acoustique est inférieur.

Les indicateurs à valeur unique permettent cependant de classer les vitrages en fonction de la source de bruit. En d'autres termes, si un vitrage spécifique présente un meilleur indicateur qu'un autre vitrage, il offrira également de meilleures performances in situ en présence de la même source de bruit.

Exemple : soit un vitrage ayant un isolement acoustique $R_w (C ; C_{tr}) = 38 (-2 ; -5)$.

Ce vitrage aura donc :

- vis-à-vis des bruits de basse fréquence :
un isolement $R_w + C_{tr} = 38 - 5 = 33$ dB
- vis-à-vis des bruits de haute fréquence :
un isolement $R_w + C = 38 - 2 = 36$ dB.

Remarque : certains pays n'utilisent pas la notation $R_w (C ; C_{tr})$ mais plutôt R_A et $R_{A,tr}$ avec :

- $R_A = R_w + C$
- $R_{A,tr} = R_w + C_{tr}$

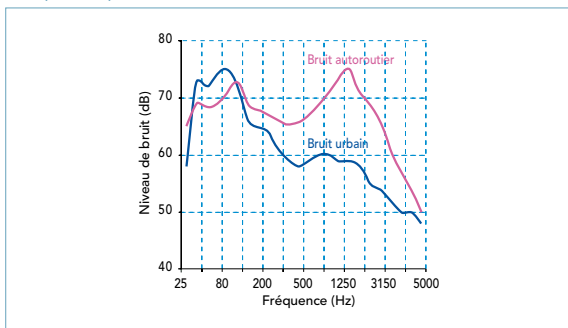
▼ Le bruit extérieur

Le niveau et la tonalité des bruits parasites, de même que le niveau de bruits de fonds non identifiables sont des facteurs dont il faut tenir compte au stade de la conception si on veut isoler une façade correctement d'un point de vue acoustique.

Le bruit extérieur peut non seulement avoir un niveau sonore très différent selon la source, mais il peut aussi avoir une autre tonalité : un trafic à circulation rapide, plutôt aigu, n'a pas la même tonalité que le bruit grave d'un moteur d'autobus ou du trafic urbain plus lent ; le bruit d'un avion ou d'un train a, lui aussi, une autre tonalité. Ce paramètre a d'autant plus d'importance pour la conception d'une façade qu'il est beaucoup plus difficile, dans la pratique, de réaliser une isolation aux sons graves.

Pour illustrer cela, la figure ci-après représente le spectre de deux types de sources sonores (trafic urbain et autoroutier).

Exemples de spectres des trafics urbain et autoroutier



Les niveaux sonores assurant le confort acoustique intérieur dépendent du type d'environnement dans lequel le bâtiment est placé. Le bruit traversant le vitrage sera perçu comme plus irritant dans un environnement très calme que dans un centre urbain. Plus grande est la différence entre le bruit d'une source spécifique reconnaissable pénétrant de l'extérieur (passage d'un vélomoteur par exemple) et le bruit de fond non reconnaissable (beaucoup plus élevé dans un centre ville), plus le bruit est perçu comme gênant. Le concepteur doit tenir compte de ces données.

2.5.2 ISOLATION ACOUSTIQUE DES VITRAGES

▼ Verre simple (float)

Un verre simple se comporte au niveau acoustique comme une simple paroi ; il respecte dès lors deux lois acoustiques qui s'appliquent à toutes les simples parois, quels que soient les matériaux :

- > la loi des fréquences
- > la loi des masses.

Vu la loi des fréquences, tous les matériaux offrent naturelle-

ment une meilleure isolation acoustique aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences. Cependant, les bruits dont il faut s'isoler en acoustique du bâtiment comportent souvent des basses fréquences.

- > L'augmentation de l'épaisseur d'un verre simple qui permet en théorie d'améliorer l'isolation acoustique est contrebalancée négativement par le déplacement du puits de fréquence critique vers les basses fréquences et donc un affaiblissement de l'isolation aux bruits graves ; aux basses fréquences, l'augmentation de l'épaisseur apporte néanmoins des améliorations.
- > Les verres simples permettent d'obtenir un niveau d'isolation (R_w) de l'ordre de 29 dB pour le 4 mm jusqu'à 35 dB pour le 12 mm.

▼ Verres feuilletés

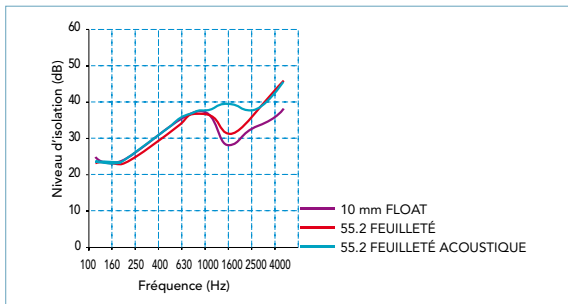
On distingue, du point de vue acoustique, deux types de verres feuilletés :

- > les vitrages à intercalaire en PVB (butyral de polyvinyle) : la première fonction de ce type de vitrage est la protection contre l'effraction et la sécurité ; néanmoins, ces vitrages apportent également une amélioration acoustique
- > les vitrages avec PVB acoustique : c'est un type de PVB plus souple que le PVB de sécurité qui a été développé pour obtenir une meilleure isolation acoustique ; ces verres conservent des propriétés de sécurité et de résistance à l'effraction.

Vu son élasticité, le PVB acoustique, permet de désolidariser les 2 verres composant le feuilleté et éviter que celui-ci n'ait un comportement monolithique ; le puits dû à la fréquence critique est à la fois amoindri et repoussé vers les hautes fréquences.

Les spectres d'un float et de ces 2 types de verres feuilletés, de même épaisseur totale, sont représentés ci-après.

Spectres d'isolation acoustique d'un verre simple et de verres feuilletés de même épaisseur



Conclusions :

- > Pour un verre feuilleté, à masse égale, l'isolation acoustique est surtout accrue dans la zone de coïncidence autour de la fréquence critique. Le puits d'isolation acoustique est limité par l'amortissement des vibrations, apporté par l'intercalaire. Cet effet est plus marqué pour le PVB acoustique. De plus, dans ces cas, le puits de résonance est décalé vers les hautes fréquences. L'effet global est perceptible essentiellement pour $R_w + C$, moins pour $R_w + C_{tr}$.
- > Les verres feuilletés ont des performances R_w de l'ordre de 33 dB pour le 33.2 jusqu'à 39 dB pour le 88.2.
- > Les verres feuilletés à PVB acoustique ont des performances R_w de l'ordre de 35 dB pour le 33.2 jusqu'à 41 dB pour le 88.2.

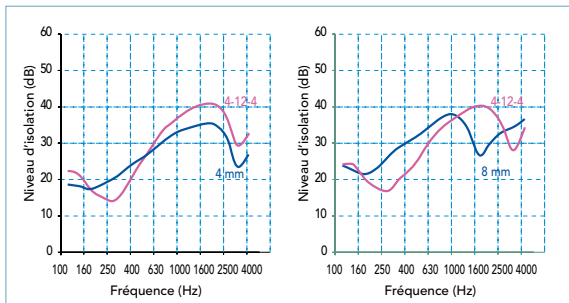
Un verre feuilleté dissymétrique n'a pas d'intérêt au niveau acoustique.

▼ Vitrages isolants

Les performances d'un double vitrage symétrique sont souvent inférieures à celles d'un simple vitrage de même épaisseur totale de verre.

La figure suivante montre le spectre d'isolation acoustique d'un double vitrage 4-12-4 en comparaison avec des simples vitrages de 4 et 8 mm d'épaisseur.

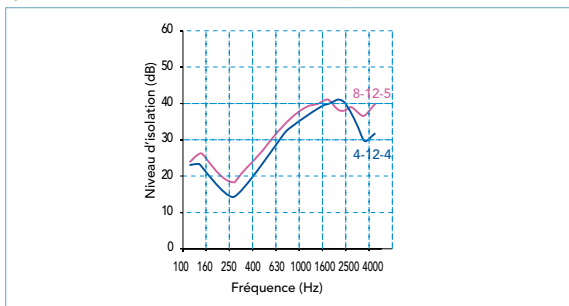
Spectre d'isolation acoustique d'un double vitrage 4-12-4
en comparaison de verres simples de 4 et 8 mm d'épaisseur



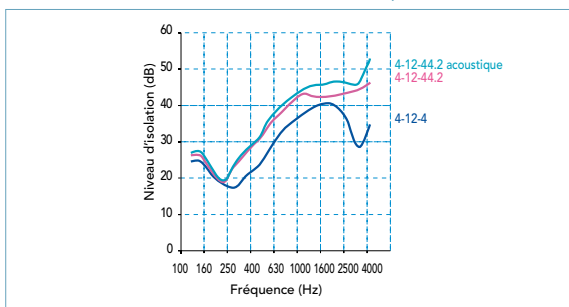
- > Les performances acoustiques d'un double vitrage symétrique sont limitées.
- > On pourrait donc supposer que le remplacement, en rénovation, de simple vitrage par du double vitrage n'est pas intéressant ; cette supposition est cependant erronée pour deux raisons :
 - le remplacement du simple vitrage par un double vitrage s'accompagne le plus souvent d'un remplacement du châssis qui aura également une meilleure isolation acoustique que l'ancien châssis ; on peut donc s'attendre à une amélioration de l'isolation acoustique de l'ensemble vitrage – châssis
 - au niveau de l'isolation thermique, le gain fourni par le double vitrage par rapport au simple vitrage est tel que c'est la seule solution envisageable.
- > De plus, l'isolation acoustique des doubles vitrages peut facilement être améliorée (voir ci-dessous), en utilisant des compositions dissymétriques ou des verres feuilletés.
- > Les doubles vitrages symétriques ont des performances R_w allant de 29 dB pour le 4-12-4 jusqu'à 34 dB pour le 10-12-10.
- > L'utilisation de 2 verres d'épaisseurs différentes dans un double vitrage permet d'améliorer significativement les performances par rapport à des solutions symétriques.

- > Les doubles vitrages dissymétriques ont des performances R_w de l'ordre de 34 dB pour le 6-15-4 jusqu'à 38 dB pour le 10-15-6.

Spectres d'isolation acoustique de doubles vitrages 4-12-4 et 8-12-5



Spectre d'isolation acoustique de doubles vitrages classiques 4-12-4, avec verre feuilleté 4-12-44.2 et verre feuilleté acoustique 4-12-44.2



Le sens de pose des doubles vitrages dissymétriques et/ou comprenant un verre feuilleté n'a pas d'influence sur les performances acoustiques du vitrage. Lorsque l'on est confronté à un verre feuilleté avec PVB, il est conseillé de le placer du côté intérieur pour des raisons de sécurité en cas de bris.

- > Lorsque les performances obtenues en doubles vitrages dissymétriques ne sont pas suffisantes, le remplacement de

l'un ou des 2 verres simples par un verre feuilleté, ou par un verre feuilleté acoustique, permet d'obtenir de meilleurs résultats.

- > Les améliorations se marquent principalement au niveau des hautes fréquences, donc de l'indice $R_w + C$.
- > Avec du verre feuilleté, on atteint des performances R_w de l'ordre de 36 dB pour le 6-12-44.2 et jusqu'à 41 dB pour le 10-12-66.2.
- > Avec du verre feuilleté acoustique, on atteint des performances R_w de l'ordre de 40 dB pour le 6-12-44.2, jusqu'à 44 dB pour le 10-12-66.2 et de 50 dB pour un 44.2-20-66.2.

▼ Triples vitrages

Les triples vitrages ne présentent pas d'intérêt particulier au niveau acoustique vu les multiples phénomènes de résonance qui se produisent dans les cavités.

▼ Conclusion

On peut résumer les facteurs ayant une influence sur l'acoustique des vitrages de la manière suivante :

- > En simple vitrage :
 - augmentation de l'épaisseur : légère amélioration
 - utilisation de verre feuilleté et de verre feuilleté acoustique : amélioration significative des performances.
- > En double vitrage
 - recours à un vitrage dissymétrique dans tous les cas
 - utilisation d'une lame d'air importante
 - utilisation de verres épais dans la plupart des cas
 - utilisation d'un verre feuilleté (PVB traditionnel de sécurité) pour remplacer un des deux verres monolithiques
 - utilisation d'un verre feuilleté avec PVB acoustique pour des nuisances sonores importantes.

Par contre, les facteurs suivants n'ont pas d'influence, positive ou négative, sur l'isolation acoustique des vitrages :

- > le sens de pose du vitrage
- > la présence de couches
- > les verres trempés
- > l'utilisation d'argon (isolation thermique).

2.5.3 ISOLATION ACOUSTIQUE DES FENÊTRES ET DES FAÇADES

▼ Performances acoustiques in situ des fenêtres et des façades

Les performances in situ des fenêtres et des façades ne dépendent pas uniquement des vitrages mais également de leurs dimensions, du type de châssis et de pose, du bruit environnant, de l'étanchéité à l'air de la façade, ...

- > Les résultats proviennent de tests réalisés en laboratoire selon des critères appliqués par la plupart des grands laboratoires européens. Les dimensions testées sont toujours de 1,23 x 1,48 m selon la norme EN ISO 140-3. Ainsi, il faut raisonnablement s'attendre à une moindre performance pour des vitrages nettement plus grands ; cette perte est de l'ordre de 2 à 3 dB dans des dimensions atteignant 5-6 m². Il est indispensable d'en tenir compte lors du choix du vitrage.
- > Les fenêtres et les vitrages en particulier isolent des bruits aériens (transmis par l'air) et non des bruits de choc sur les parois (bruits graves de basse fréquence se transmettant par les parois).
- > Il est indispensable que le châssis soit exempt de fuites par l'utilisation notamment de joints à double frappe. Un bon châssis bien étanche peut apporter une amélioration allant jusqu'à 2 dB par rapport aux valeurs annoncées pour le vitrage. Par contre des fuites trop importantes peuvent faire chuter le résultat annoncé de 10 dB.
- > Les fenêtres équipées de volets avec caisson extérieur nécessitent une isolation du caisson à l'aide de matériaux absorbants

- le son (panneaux en laine de verre ou de roche par exemple).
- > L'étanchéité entre le dormant du châssis et la maçonnerie devra faire l'objet du plus grand soin. La finition extérieure entre le châssis et la maçonnerie sera assurée par un joint souple étanche et non par un solin de ciment.
 - > La présence de grilles de ventilation ou d'entrées d'air peut fortement dégrader les performances acoustiques.
 - > Les performances in situ des fenêtres dépendent également du type de bruit extérieur et de l'angle d'incidence du bruit sur la façade.
 - > Pour des niveaux d'isolation élevés, il est conseillé de choisir un vitrage dont les performances sont légèrement plus élevées que le niveau requis.
 - > Le bon indice d'affaiblissement $R_w + C$ ou $R_w + C_{tr}$ doit être choisi en fonction du type de bruit concerné.

▼ La gamme AGC

Les vitrages spécifiquement développés pour l'isolation acoustique chez AGC sont le verre feuilleté Stratophone et les doubles vitrages acoustiques Thermobel Phonibel.

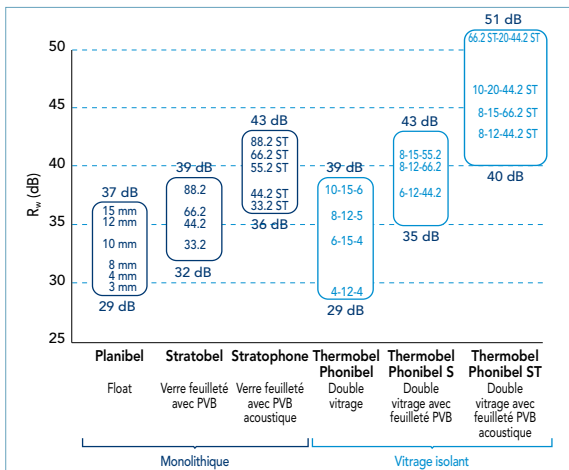
Verre feuilleté	Double vitrage Thermobel
Stratophone	Phonibel
	Phonibel S (avec verre feuilleté PVB Stratobel)
	Phonibel ST (avec verre feuilleté PVB acoustique Stratophone)

Les vitrages monolithiques (float et feuilleté) permettent de couvrir une gamme de performances acoustiques (valeur R_w) allant de 29 à environ 43 dB.

Les doubles vitrages permettent de couvrir une gamme de performances acoustiques allant de R_w 29 dB jusqu'à environ 50 dB.

La figure ci-après indique les performances qui peuvent être atteintes, en simple vitrage en utilisant du Planibel, du Stratobel et du Stratophone, ainsi qu'en double vitrage en utilisant deux Planibel, un ou deux Stratobel et un ou deux Stratophone.

Performances acoustiques des différents vitrages



En simple vitrage, pour un niveau de performance équivalent, un Stratobel a une épaisseur moindre qu'un Planibel, et un Stratophone a une épaisseur moindre qu'un Stratobel.

2.6 SÉCURITÉ

2.6.1 PRODUITS VERRIERS DE SÉCURITÉ

▼ Généralités

La notion de sécurité est large et comporte plusieurs aspects :

- > la protection des personnes contre le risque de blessures provoquées :
 - soit par des morceaux de verre brisés et coupants
 - soit suite à une chute (défenestration).

Dans le cas où seul le risque de blessure doit être évité, c'est la fragmentation du verre qui est importante : il faut éviter que le bris du verre ne libère des morceaux susceptibles de provoquer des blessures ; si en outre, la protection contre les chutes est exigée, il faut qu'il n'y ait pas effacement du vitrage.

- > la protection des biens et la sécurité contre l'effraction et le vandalisme des habitations privées, des magasins et bureaux ; dans ce cas, le vitrage doit rester en place et empêcher la pénétration
- > la sécurité contre les armes à feu
- > la sécurité contre les explosions.

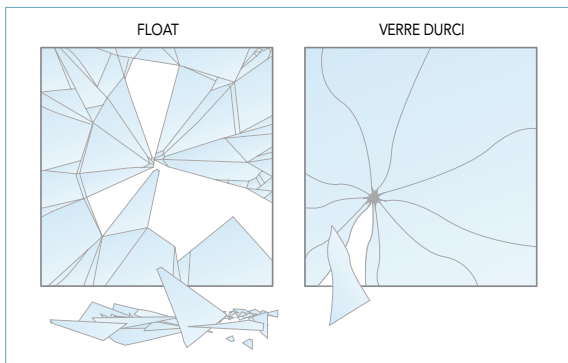
Seul un petit nombre de produits verriers satisfont aux exigences de fragmentation, de défenestration ou de résistance évoquées ci-dessus. Il s'agit des verres trempés thermiquement et des verres feuilletés. Les autres produits verriers, e.a. le float, le verre durci, le verre armé, ... ne sont pas des verres de sécurité.

Les caractéristiques de ces produits sont brièvement rappelées ci-dessous.

▼ Float, verre durci, verre armé

Le float, vu sa fragmentation en grands morceaux coupants ne peut pas être considéré comme un verre de sécurité. Il en va de même pour le verre durci dont la fragmentation est comparable à celle du float.

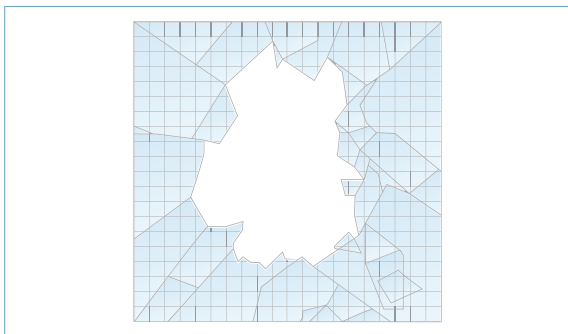
Fragmentation du float et du verre durci



Le verre armé (plat ou profilé) est un verre dans lequel ont été incorporés au moment de la fabrication des fils métalliques destinés à retenir les morceaux de verre en cas de bris. Néanmoins, en cas d'impact, des morceaux de verre et le treillis métallique peuvent se libérer et présenter des risques de blessures.

Ce type de vitrage est donc à proscrire comme produit de sécurité destiné à éviter les blessures ou résister à la chute d'un corps humain.

Fragmentation du verre armé



▼ Verre trempé thermiquement

Vu les contraintes internes inhérentes à leur mode de fabrication, les verres trempés thermiquement se brisent, en cas de choc, en petits morceaux peu coupants.

Fragmentation du verre trempé thermiquement



Un verre trempé thermiquement est considéré comme verre de sécurité s'il satisfait à des critères de fragmentation. Ces critères sont définis dans la norme EN 12150 qui décrit également le test à effectuer pour vérifier cette fragmentation.

Pour rappel, les principales différences entre le float et le verre trempé sont les suivantes :

- > résistance caractéristique à la flexion beaucoup plus élevée : 120 N/mm^2 au lieu de 45 N/mm^2
- > résistance au choc plus élevée
- > résistance au choc thermique accrue (de l'ordre de 200°C)
- > casse en petits morceaux peu coupants
- > non découpable ni façonnable après trempé
- > en fonction des cas, un traitement «Heat Soak» s'avère nécessaire

- > anisotropie du matériau ; sous éclairage naturel, les propriétés de réfraction varient de point en point et l'aspect superficiel de la feuille de verre peut présenter des dessins diversement colorés dus à des phénomènes d'interférences appelés « fleurs de trempé ».

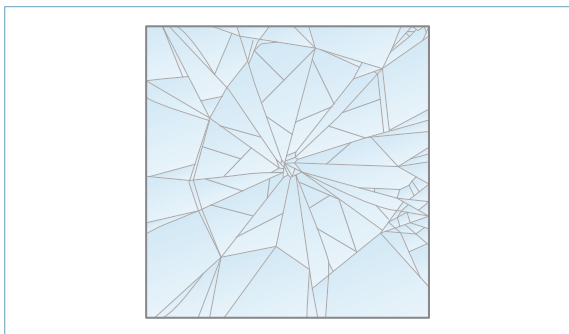
Comparaison de la résistance au choc d'un float et d'un verre trempé thermiquement de dimensions 30 cm x 30 cm :

- > un float de 6 mm résiste à une bille de 250 g tombant d'une hauteur de 30 cm
- > un verre trempé de 6 mm résiste à une bille de 250 g tombant d'une hauteur de 3 m
- > un verre trempé de 8 mm résiste à une bille de 500 g tombant d'une hauteur de 2 m.

▼ Verre feuilleté

Un verre feuilleté est un assemblage constitué d'au moins deux feuilles de verre, collées entre elles sur toute leur surface par un intercalaire. Pour les verres feuilletés de sécurité, l'intercalaire le plus couramment utilisé est un film plastique en PVB (butyral de polyvinyle). Des films polyuréthane ou EVA (éthylène vinyle acétate) peuvent également être utilisés. En cas de bris, l'adhérence entre le verre et l'intercalaire garantit le maintien des morceaux brisés du vitrage en place (tout au moins pendant un temps ou jusqu'à un niveau de charge déterminé).

Fragmentation du verre feuilleté



Les verres feuilletés avec intercalaires en PVB possèdent une nomenclature propre qui permet de reconnaître leur composition ; celle-ci se donne sous la forme de deux (ou plusieurs) chiffres indiquant l'épaisseur des différentes feuilles de verre en mm, suivi d'un chiffre séparé des précédents par un point donnant le nombre (et non l'épaisseur) de films de PVB placés entre chaque feuille de verre. Les films de PVB sont calculés avec une épaisseur de 0,38 mm.

Exemples :

- > un vitrage 66.2 correspond à deux feuilles de verre (float) de 6 mm séparées par deux films de PVB de 0,38 mm d'épaisseur chacun ; certains pays décrivent également le verre feuilleté en donnant son épaisseur totale, à savoir 12,76 dans le cas du 66.2
- > un double vitrage composé d'un verre simple de 4 mm, d'un espace d'air de 12 mm et d'un verre feuilleté 66.2 est noté 4-12-66.2 (indiqué de l'extérieur vers l'intérieur).

Selon la norme EN ISO 12543-2, un verre feuilleté peut être considéré comme un verre feuilleté de sécurité s'il satisfait au moins à une classe de résistance 3B3 suite à l'essai pendulaire décrit dans la norme EN 12600.

Dans certains cas précis, on a recours à des verres trempés ou durcis pour la fabrication de verre feuilleté.

Ainsi, dans des applications spécifiques nécessitant une grande résistance ponctuelle, on utilise parfois un verre feuilleté composé d'un verre trempé et d'un verre durci ; le premier assure la résistance mécanique et le second donne une stabilité résiduelle suffisante en cas de bris du verre, jusqu'au moment du remplacement.

Les verres feuilletés durcis sont parfois utilisés lorsqu'on recherche une résistance à la rupture par flexion supérieure à celle du float ou pour éviter les risques de bris par choc thermique.

▼ Verre avec film collé

Un film autocollant peut être apposé sur un verre de manière à maintenir les morceaux en cas de bris.

Ces films sont en général utilisés pour des applications telles que les miroirs ou les verres laqués opaques.

Remarque : ces films ne sont utiles que s'ils sont apposés sur le vitrage avant la pose du vitrage en feuillure ; coller un film sur la partie apparente d'un vitrage déjà posé n'a en effet pas d'efficacité lors d'un bris éventuel ; de plus, certains films posés in situ peuvent causer des problèmes de bris par choc thermique.

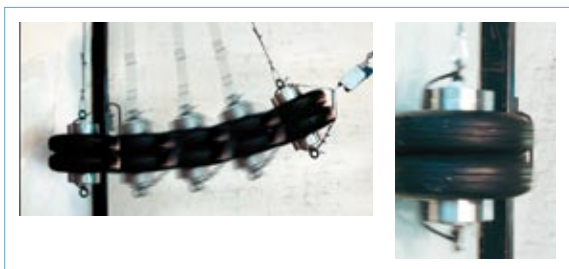
Ce collage de film doit faire l'objet de tests de durabilité.

2.6.2 NORMES ET ESSAIS

▼ Résistance à l'impact – EN 12600

La norme EN 12600 «Essai au pendule – Méthode d'essai d'impact et classification du verre plat» donne une classification des vitrages à l'impact d'un corps mou. Il s'agit d'un test avec un impacteur (2 pneus jumelés). Ce test permet de classer les produits verriers par rapport aux risques de blessures et de défenestration.

Essai d'impact



La classification distingue d'une part la hauteur de chute et d'autre part le type de casse.

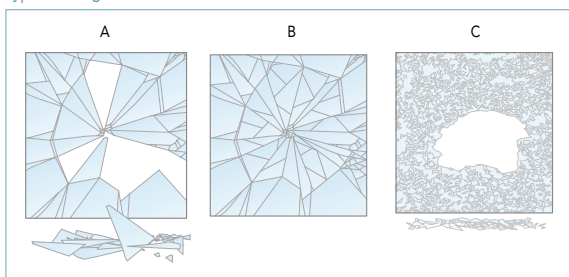
> Hauteur de chute :

- 1 : 1200 mm
- 2 : 450 mm
- 3 : 190 mm.

> Type de casse :

- A : fissures avec fragments séparés (recuit, armé, durci, trempé chimiquement)
- B : fissures avec fragments unis (feuilleté, film sur verre recuit)
- C : désintégration en petites particules (trempé thermique).

Types de fragmentation



La classification des performances d'un produit verrier est exprimée au moyen de 2 chiffres et 1 lettre : α (β) Φ

où :

- > α est la plus haute classe de hauteur de chute pour laquelle le verre ne se casse pas ou se casse selon un des deux modes de fragmentation définis ci-dessous
- > β est le type de casse (A, B ou C)
- > Φ est la plus haute classe de hauteur de chute pour laquelle le verre ne se casse pas ou se casse sans permettre la pénétration (selon le premier des 2 critères donnés ci-dessous) ; lorsqu'un verre se casse pour la plus petite hauteur de chute en permettant la pénétration, il est noté 0.

Les 2 modes de fragmentation acceptés par la norme pour le critère α sont les suivants :

- > de nombreuses fissures apparaissent, mais aucune cassure ou fracture permettant la pénétration d'une sphère d'un diamètre de 76 mm à travers l'éprouvette sous l'application d'une force maximale de 25 N n'est autorisée. De plus, le poids total des particules pouvant se détacher et leur dimension sont limités
- > une désintégration est observée et le poids cumulé des 10 plus grandes particules exemptes de fissure recueillies dans un délai de 3 minutes après l'impact est limité.

Pour un verre de 4 mm, cela représente une masse de 65 grammes ; pour un verre de 19 mm, 309 grammes.

L'essai doit être réalisé sur 4 éprouvettes pour chaque hauteur de chute. Les produits feuilletés dissymétriques qui n'ont pas un sens unique d'utilisation doivent être testés dans les deux sens.

Exemples :

- > un verre feuilleté est classé 1B1 s'il résiste à un impact d'une hauteur de chute de 1200 mm sans permettre la pénétration
- > un verre feuilleté est classé 2B2 s'il résiste à un impact d'une hauteur de chute de 450 mm sans permettre la pénétration
- > un verre trempé est classé 1C1 s'il résiste à un impact d'une hauteur de chute de 1200 mm sans casser
- > un verre trempé est classé 1C2 s'il résiste à un impact d'une hauteur de chute de 450 mm sans casser et s'il casse à une hauteur de chute de 1200 mm avec une fragmentation conforme à un des deux modes autorisés par la norme.

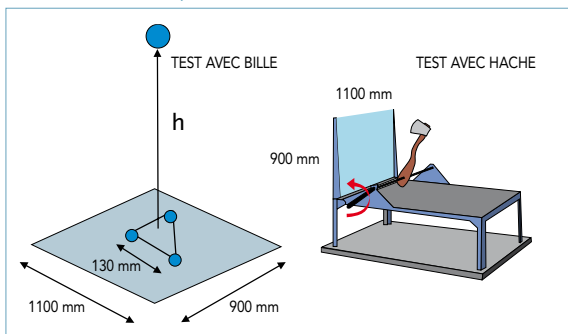
Lorsqu'un verre bénéficie d'un test pour une certaine classe (par exemple 44.2 = 1B1), il est communément accepté que les verres plus épais, ayant le même nombre de films PVB, sont de la même classe (dans ce cas, 55.2 et 66.2 sont également de classe 1B1).

Pour les châssis et fenêtres résistants à l'impact, se référer aux normes EN 13049 (fenêtres) et EN 14019 (façade-rideaux). Cinq classes de résistance ont été définies.

▼ Résistance à l'effraction – EN 356

La norme EN 356 «Vitrage de sécurité – Mise à essai et classification de la résistance à l'attaque manuelle» définit des méthodes d'essais afin de classer les vitrages en fonction de leur résistance à l'effraction. Huit classes sont définies par ordre croissant de résistance. Les 5 premières classes, notées P1A à P5A sont basées sur l'essai de chute de bille. Les 3 classes suivantes, notées P6B à P8B, sont basées sur un essai à la hache.

Essai de résistance à l'impact



Pour les essais avec la bille, une éprouvette de 1100 mm x 900 mm est placée horizontalement et des impacts d'une bille de 4,1 kg sont réalisés en triangle au centre du vitrage (13 cm entre les impacts). Le nombre d'impact et la hauteur de chute varient selon les classes.

Pour les essais à la hache, une éprouvette de 1100 mm x 900 mm est placée verticalement ; dans un premier temps, les différents verres de l'éprouvette sont brisés à l'aide de coups de marteaux (minimum 12) ; par la suite, on essaye de pratiquer une ouverture au centre du verre, à coups de hache.

Classes de résistance à l'effraction selon la norme EN 356

Essai	Classe	Hauteur de chute de la bille	Nombres de coups
Bille	P1A	1500 mm	3 en triangle
	P2A	3000 mm	3 en triangle
	P3A	6000 mm	3 en triangle
	P4A	9000 mm	3 en triangle
	P5A	9000 mm	3x3 en triangle
Hache	P6B	-	30 à 50
	P7B	-	51 à 70
	P8B	-	> 70

L'essai à la bille est considéré comme réussi si la bille ne traverse pas entièrement l'éprouvette dans les 5 secondes qui suivent le moment de l'impact.

L'essai à la hache est considéré comme réussi si la partie (de dimension 400 mm x 400 mm), sur laquelle ont été donnés les coups de hache n'est pas détachée totalement du reste de l'éprouvette.

Lorsqu'un verre bénéficie d'un test pour une certaine classe (par exemple 44.2 PVB = P1A), il est communément accepté que les verres plus épais, ayant le même nombre de films PVB, sont de la même classe (dans ce cas, 55.2 et 66.2 sont également de classe P1A).

Le pr EN 1627 donne la classe de vitrage (selon EN 356) à utiliser en relation avec la classe de châssis pour obtenir une fenêtre «homogène» vis-à-vis de la résistance à l'effraction.

Classes de correspondance pr EN 1627 – EN 356

Classe de châssis	Classe de vitrage
1	P4A
2	P5A
3	P6A
4	P7B
5	P8B
6	P8B

La norme pr EN 1627 prévoit des limitations quant aux dimensions d'utilisation par rapport aux dimensions d'essais.

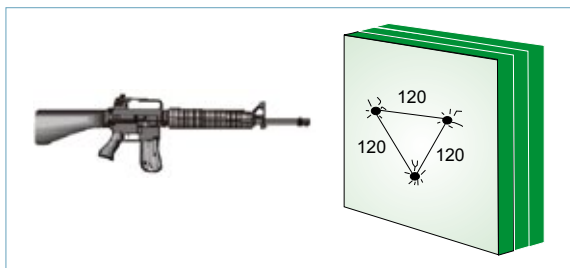
▼ Résistance aux armes à feu – EN 1063

La norme EN 1063 «Vitrage de sécurité – Mise à essai et classification de la résistance à l'attaque par balle» donne une méthode de classification des vitrages résistant aux armes à feu.

La norme distingue la résistance face à deux types d'armes : les pistolets et fusils/carabine (classe BR) et les fusils de chasse (classe SG).

Neuf classes sont définies ; le vitrage est classé, pour la catégorie d'arme essayée, s'il arrête toutes les balles sur trois éprouvettes testées (dimensions 500x500). De plus, le procès-verbal indique s'il y a eu des éclats (S) ou non (NS) à l'arrière du vitrage.

Essais de résistance aux armes à feu



Les classes BR1 à BR7 sont classées par niveau croissant de protection offerte. Cela signifie qu'un verre satisfaisant aux exigences définies pour une classe donnée satisfait également aux classes inférieures.

Il n'y a pas de corrélation entre les classes SG et BR.

Le tableau ci-après donne les détails des armes, munitions et conditions d'essais pour les différentes classes.

Classes de résistance aux armes à feu selon la norme EN 1063

Classe	Type d'arme	Calibre	Type	Masse (g)	Conditions d'essais			
					Distance de tir (m)	Vitesse d'impact (m/s)	Nombre d'impacts	Distance entre impacts (mm)
BR1	Carabine	0,22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10,00 ± 0,5	360 ± 10	3	120 ± 10
BR2	Pistolet	9 mm luger	FJ ⁽¹⁾ /RN/SC	8,0 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	3	120 ± 10
BR3	Pistolet	0,357 magnum	FJ ⁽¹⁾ /CB/SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	3	120 ± 10
BR4	Pistolet	0,44 Rem. Mag.	FJ ⁽¹⁾ /RN/SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	3	120 ± 10
BR5	Carabine	5,56x45*	FJ ⁽²⁾ /FN/SC	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	3	120 ± 10
BR6	Carabine	7,62x51	FJ ⁽²⁾ /PB/SCP1	9,5 ± 0,1	10,00 ± 0,5	830 ± 10	3	120 ± 10
BR7	Carabine	7,62x51**	FJ ⁽²⁾ /PB/HC1	9,8 ± 0,1	10,00 ± 0,5	820 ± 10	3	120 ± 10
SG1	Fusil de chasse	Cal 12/70	Plomb massif ⁽³⁾	31,0 ± 0,5	10,00 ± 0,5	420 ± 20	1	-
SG2	Fusil de chasse	Cal 12/70	Plomb massif ⁽³⁾	31,0 ± 0,5	10,00 ± 0,5	420 ± 20	3	120 ± 10

* longueur de torsion 178 mm ± 10 mm

** longueur de torsion 254 mm ± 10 mm

(1) Chemisage acier plaqué

(2) Chemisage alliage laiton

(3) Brenneke

L Plomb

CB Balle conique

FJ Balle chemisée métal

FN Balle cylindro-conique tronquée

HC1 Noyau dur en acier, masse 3,7 g ± 0,1 g, dureté > 63 HRC

PB Balle cylindro-conique

RN Balle cylindro-ogivale

SC Noyau mou (plomb)

SCP1 Noyau mou (plomb) et masse pénétrante en acier (type SS109)

Munitions utilisées pour les différentes classes



BR1

BR2

BR3

BR4

BR5

BR6

BR7

SG

Kalash

La même méthode d'essai et de classification s'applique aux portes et fenêtres (EN 1522 et EN 1523). La classification est alors notée FB1 à FB7 et FSG (pour la classe SG2 de verre) ; il n'y a pas de correspondance pour la classe SG1.

▼ Résistance aux explosions – EN 13541

La norme EN 13541 «Vitrage de sécurité – Mise à essai et classification de la résistance à la pression d'explosion» donne une classification des vitrages résistants à l'explosion (méthode dite du «tube à onde de choc»).

Le vitrage est placé à l'extrémité d'un tube ; à l'autre extrémité, une charge est placée, puis explose de manière à créer une surpression.

Quatre classes sont définies de ER1 à ER4 pour les vitrages. De plus, le procès-verbal indique s'il y a eu des éclats (S) ou non (NS) à l'arrière du vitrage.

Classes de résistance aux explosions selon la norme EN 13541

Classe	Surpression positive maximale Pr (kPa)	Impulsion positive spécifique i+ (kPa ms)	Durée de la période de pression positive t+ (ms)
ER1	$50 \leq Pr < 100$	$370 \leq i+ < 900$	≥ 20
ER2	$100 \leq Pr < 150$	$900 \leq i+ < 1500$	≥ 20
ER3	$150 \leq Pr < 200$	$1500 \leq i+ < 2200$	≥ 20
ER4	$200 \leq Pr < 250$	$2200 \leq i+ < 3200$	≥ 20

L'essai est considéré comme réussi si, pour 3 éprouvettes, il n'y a aucune perforation «traversante» de la face exposée à la face arrière, ni aucune ouverture entre le cadre support du vitrage et les bords de l'éprouvette.

La résistance à l'explosion ne concerne que la protection des personnes situées dans un bâtiment contre une explosion se produisant à l'extérieur.

Les normes pr EN 13123-1 & 2 et 13124-1 & 2 définissent des méthodes d'essais de résistance des châssis aux explosions. Les parties 1 sont basées sur un essai en tube ; les classes sont alors notées de EPR1 à EPR4. Les parties 2 sont basées sur un essai en plein air ; les classes sont alors notées de EXR1 à EXR5.

2.6.3 APPLICATIONS DES VERRES DE SÉCURITÉ

▼ Sécurité des personnes contre les blessures et les chutes

> Introduction

Deux aspects doivent être distingués en ce qui concerne la sécurité des personnes :

- la prévention du risque de blessure par morceaux de verre coupants
- la prévention contre le risque de chute au travers du verre (défenestration).

Dans le premier cas, tant le verre trempé thermiquement que le verre feuilleté sont d'application. Dans le second cas, seul le verre feuilleté peut être utilisé.

Les normes d'essais dont il est question ci-dessus définissent des épaisseurs minimales. Les épaisseurs effectives de verre à utiliser doivent être déterminées au cas par cas en fonction des sollicitations, des dimensions réelles du verre et de son mode de fixation (cf. page 434).

> Protection contre les blessures

Pour limiter le risque de blessures par morceaux de verre libérés, seuls conviennent des verres trempés ou des verres feuilletés (avec minimum 1 PVB) ; il s'agit entre autres des cas suivants :

- vitrines de magasin
- parois intérieures (si la base du verre est proche du niveau du sol) sans différence de niveau de part et d'autre
- portes et fenêtres dans les lieux publics
- mobilier urbain : abribus, cabines téléphoniques, ...
- cabines de douches, tablettes, mobilier, ...
- dans le cas de vitrages en toiture, le verre feuilleté est indispensable pour protéger les personnes se trouvant sous la

baie vitrée contre le risque de blessures par éclats détachés, notamment à la suite d'objets extérieurs tombant sur celle-ci ; la retenue de ces objets n'est par contre pas garantie ; elle ne sera effective que si les sollicitations engendrées par l'impact ne dépassent pas les performances offertes par le produit utilisé.

De plus, lorsque les bords d'un verre sont apparents, ceux-ci doivent être rôdés (et dans certains cas, il convient de tremper les verres).

> Protection contre les chutes

Pour limiter le risque de chute, du verre feuilleté (avec minimum 2 PVB) doit être utilisé entre autres dans les cas suivants :

- fenêtres ou parois intérieures (si la base du verre est proche du niveau du sol) avec différence de niveau
- garde-corps
- planchers et escaliers.

> Position du verre de sécurité

On peut envisager l'utilisation de deux verres de sécurité dans l'assemblage d'un double vitrage si le choc peut survenir de part et d'autre (par exemple dans le cas d'un double vitrage placé dans une porte d'un lieu public) ; les combinaisons admissibles en double vitrage sont alors trempé-trempé, trempé-feuilleté ou feuilleté-feuilleté.

Un double vitrage composé d'un float et d'un verre trempé n'a pas de sens du point de vue de la sécurité puisque le bris simultané des deux présente un risque de blessure.

Pour les doubles vitrages en toitures, c'est le verre intérieur qui doit être feuilleté.

▼ Résistance à l'effraction

Seuls les verres feuilletés peuvent être utilisés pour empêcher la protection contre le vandalisme et l'effraction (ou dans certains cas particuliers la fuite, par exemple prisons ou hôpitaux).

Tant qu'il s'agit de vandalisme, de protection d'habitation ou de protection contre le vol classique dans les magasins, on utilise un verre feuilleté composé de 2 feuilles de verre et d'un

nombre croissant de films de PVB selon le degré de sécurité recherché et/ou les exigences des assureurs ; pour de très hauts niveaux de sécurité, on utilise des vitrages multifeuilletés en intégrant éventuellement du polycarbonate.

Dans le cas de verre de sécurité résistant à l'effraction assemblé en double vitrage, il est conseillé de placer le verre feuilleté du côté intérieur.

Classement EN 356

	Degré de protection	Classe conseillée	Exemples d'application
Protection contre vandalisme	Protection contre le vandalisme non organisé	P1A P2A P3A	Rez-de-chaussée d'habitation (Etagères de magasins présentant des risques limités ou contenant des objets de grandes dimensions)
Retardateur d'effraction	Protection contre l'effraction	P4A P5A	Maisons isolées Etagères de magasins présentant des risques limités et contenant des objets de grandes dimensions
	Protection de haut niveau	P6B P8B	Etagères de magasins présentant des risques élevés et contenant de petits objets
	Très haut niveau de protection contre toutes formes d'agression à arme blanche		Etagères de magasins à très hauts risques ou pour objets de très grande valeur

▼ Résistance aux armes à feu et aux explosions

La résistance aux armes à feu et aux explosions est assurée par des vitrages feuilletés ou multifeuilletés, incluant parfois du polycarbonate.

L'utilisation de vitrages comme éléments résistants aux armes à feu et aux explosions est un domaine fort spécialisé. Il appartient à l'utilisateur de définir le niveau de protection souhaité et il est éventuellement recommandé de consulter un spécialiste afin de déterminer les produits verriers répondant aux perfor-

mances escomptées en fonction des spécificités du projet et du type de protection recherchée.

▼ **Qualité des châssis**

Dans tous les cas, l'utilisation de vitrages de sécurité n'a de sens que si la menuiserie attenante présente les mêmes qualités de résistance, car c'est évidemment le composant le plus faible qui déterminera la résistance de l'ensemble.

▼ **Mise en œuvre des verres de sécurité**

Lors de la mise en œuvre des verres de sécurité, les prescriptions générales de mise en œuvre ainsi que les prescriptions particulières relatives aux verres de sécurité doivent être respectées (cf. page 436).

2.6.4 LA GAMME AGC

AGC Flat Glass Europe possède une gamme complète de produits de sécurité :

- > résistant à l'impact (corps mou) : Stratobel, Stratobel EVA, Stratophone, film Safe et verre trempé
- > résistant à l'effraction : Stratobel, Stratophone
- > résistant aux armes à feu : Stratobel.

2.7 PROTECTION INCENDIE

2.7.1 INTRODUCTION

La protection contre l'incendie prend une part de plus en plus importante dans la conception des bâtiments et des façades.

Deux notions distinctes doivent être considérées : la réaction au feu et la résistance au feu.

- > La réaction au feu caractérise le comportement d'un matériau donné, lorsqu'il est soumis au feu, à alimenter le feu auquel il est exposé. On peut par exemple distinguer les *matériaux non-combustibles* (ne manifestant aucun dégagement notable de chaleur), les *matériaux combustibles* (matériaux ayant tendance à émettre de la chaleur en fonction de l'échauffement auquel ils sont soumis) et les *matériaux inflammables* (matériaux ayant tendance à dégager des gaz dont la nature et la quantité sont susceptibles de produire une combustion en phase gazeuse, c'est-à-dire de produire des flammes).
- > La résistance au feu d'un élément de construction est le temps exprimé en minutes pendant lequel un élément de construction satisfait à des critères de stabilité, d'étanchéité aux flammes, de limitation au rayonnement ou d'isolation thermique. La résistance au feu porte sur l'ensemble d'un élément de construction et non pas sur une partie de ce dernier.

Chaque produit peut être caractérisé par une classe de réaction au feu. Certains produits ou systèmes, ayant des propriétés particulières, peuvent bénéficier d'un classement de résistance au feu (exprimé en minutes).

2.7.2 RÉACTION AU FEU

▼ Classification européenne

Ce nouveau système de classement de la réaction au feu «Euroclasses» doit être utilisé en concordance avec la norme EN 13501-1 «Classement au feu des produits et éléments de construction – Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu» (02/2002).

Les produits de construction sont ainsi hiérarchisés en 7 Euro-classes : A1, A2, B, C, D, E et F dont les meilleurs matériaux du point de vue de la réaction au feu sont répertoriés dans les classes A et les plus mauvais dans la classe F. Deux classes (A1 et A2) existent pour le niveau d'exposition élevé.

Une distinction est opérée entre la classification des revêtements de sol et des autres matériaux. Ainsi, l'indice se complète des lettres FL (pour «floor») pour les revêtements de sol (par exemple A_{FL}, B_{FL}, etc.).

De plus, un classement conventionnel pour la réaction au feu des matériaux de construction appartenant à la classe A1 (sans test nécessaire) a été entériné.

Pour les matériaux à tester, il existe trois niveaux de sollicitation thermique concernant le développement de l'incendie à simuler par des essais : *bas*, *moyen* et *élevé*. Ces trois niveaux distincts de sollicitation représentent trois phases possibles de feu dans le bâtiment. Pour évaluer les produits aux niveaux bas et élevé, les outils d'essais sont communs à tous les matériaux. Par contre une distinction est opérée pour qualifier la réaction au feu d'un niveau moyen de sollicitation.

Pour terminer, remarquons que des classifications additionnelles mettent en jeu deux aspects complémentaires à la classe de contribution au feu. Le premier aspect est relatif à la production de fumée («s» pour smoke) : s1, s2 et s3 ; s3 représentant l'élément n'ayant aucune performance pour cet aspect.

Un second aspect est relatif à la production de gouttelettes («d» pour droplets) : d0 (pas de gouttelettes en feu), d1 (pas de gouttelettes en feu plus de 10 secondes) et d2 (pas de performance déterminée dans le SBI ou échec au test à la petite flamme).

▼ Performances des produits verriers

Selon le classement en Euroclasses, le verre float, le verre imprimé, le verre durci, le verre trempé thermiquement, le verre trempé chimiquement, le verre à couches inorganiques et le verre armé sont repris dans la liste des matériaux considérés de classe A1 sans devoir faire de test (Journal Officiel des Communautés Européennes 96/603/EC et 2000/605/EC).

Les autres types de verre doivent être testés s'ils contiennent une fraction organique supérieure à 0,1% de leur poids.

2.7.3 RÉSISTANCE AU FEU

La résistance au feu d'un produit se mesure en temps (minutes). Afin de préciser le terme résistance au feu, les performances principales sont :

- > R (capacité portante)
- > E (étanchéité)
- > I (isolation thermique)
- > DH (cantonement des fumées).

Les vitrages peuvent dès lors faire l'objet des classements mentionnés ci-après associés à une durée t exprimée en minutes :

Classification du verre

E t	Pare-flammes
EW t	Pare-flammes avec limitation du rayonnement
EI t	Résistant au feu ou coupe-feu
DH t	Ecran de cantonnement

La période t est exprimée en minutes. Ainsi, par exemple, un poteau stable au feu pendant une heure sera dénommé *R60*, une porte pare-flamme une demi-heure *E30* et un mur coupe-feu pendant une heure *EI60*.

▼ Essais de résistance au feu

Il a également été nécessaire de développer une série d'essais standard de résistance au feu afin de couvrir tous les produits et tous les scénarios.

Un essai par type d'élément est nécessaire. Par exemple, les conditions requises pour tester une porte coupe-feu sont très différentes de celles requises pour tester une poutre.

Pour entreprendre un essai de résistance au feu sur un produit de construction, il faut utiliser les Exigences Générales (EN 1363-1) – éventuellement modifiées par d'autres modes opératoires – ainsi que la méthode d'essais propre à l'élément de construction à tester.

Les essais de performances des parois vitrées sont en général effectués selon la norme EN 1364-1 «Essais de résistance au feu des éléments non porteurs – Partie 1 : Murs».

> Description sommaire de l'essai

L'élément à tester est placé devant un four. En général, il est réalisé aux dimensions maximales pour le système.

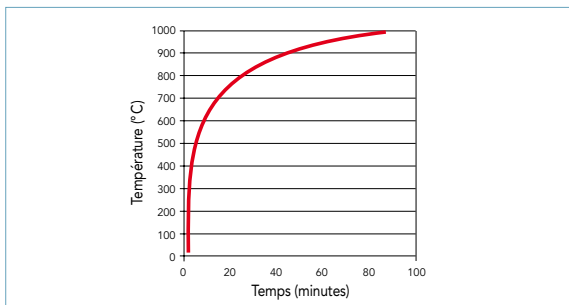
Dispositif d'essai



Une montée en température standardisée et contrôlée est effectuée dans le four.

Un dispositif est prévu pour mesurer le rayonnement du côté non exposé au feu et/ou la température de la surface non exposée au feu via des thermocouples.

Courbe de montée en température du four



La réussite du test est évaluée de la manière suivante :

- critère d'étanchéité : il s'agit du temps écoulé sans qu'un tampon de coton placé pendant 30 secondes devant la paroi ne puisse s'enflammer, sans qu'un calibre ne puisse pénétrer à travers la paroi et sans qu'il n'y ait d'inflammation soutenue du côté non exposé au feu
- critère de rayonnement : il s'agit du temps pendant lequel le rayonnement, mesuré à un mètre de la surface non exposée au feu, est inférieur à 15 kW/m^2
- critère d'isolation thermique : il s'agit du temps pendant lequel, la moyenne des températures mesurées via les thermocouples n'excède pas de plus de 140°C la température initiale, et la température maximale parmi les thermocouples n'excède pas de plus de 180°C la température initiale.

▼ Les produits verriers résistants au feu

Certains vitrages, tels que les verres simples recuits, les verres feuilletés (PVB, EVA, résine), les doubles vitrages standard n'offrent pas une résistance valable au feu puisqu'ils se brisent par choc thermique dès que la température s'élève brusquement.

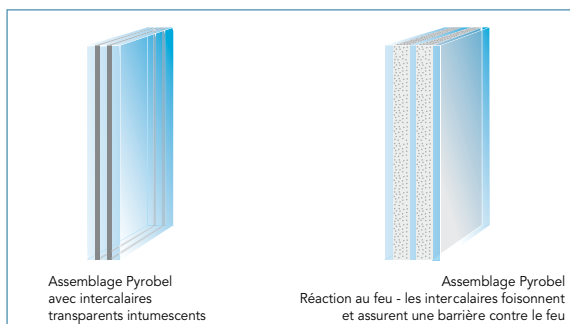
Par contre les produits suivants peuvent être envisagés pour la résistance au feu :

- > verre trempé thermiquement : la trempe thermique du verre permet d'améliorer leur résistance à la traction et aux chocs thermiques. Les applications peuvent se faire en simple ou

double vitrage. Le procédé de trempe est spécialement adapté aux produits résistant au feu afin d'obtenir des performances élevées

- > verre à couches trempé thermiquement : la trempe thermique du verre permet d'améliorer sa résistance à la traction et aux chocs thermiques. Combiné à une couche, cela permet également de limiter son rayonnement. Les applications peuvent se faire en simple ou double vitrage. Le procédé de trempe est spécialement adapté aux produits résistant au feu afin d'obtenir des performances élevées
- > verre feuilleté avec intercalaire intumescent : il s'agit d'un verre feuilleté ou multifeuilleté contenant un intercalaire solide qui foisonne en cas d'incendie.

Verre feuilleté avec intercalaire foisonnant



En condition normale, l'intercalaire est transparent à la lumière ; en cas d'incendie, sous l'effet de la chaleur, l'intercalaire gonfle et se transforme en une mousse isolante opaque qui réduit les échanges par convection et absorbe quasi intégralement le rayonnement. Plus le nombre de couches augmente, plus la durée de résistance au feu du vitrage augmente.

Réaction d'un verre feuilleté avec intercalaire intumescent sous l'action du feu



Pour pouvoir être utilisés comme tels, les produits verriers doivent disposer d'un rapport d'essai assurant leurs performances.

2.7.4 LA GAMME DE PRODUITS AGC

AGC dispose d'une gamme de produits en verre trempé et verre trempé à couches (Pyropane) et en verre feuilleté à intercalaire intumescent (Pyrobelite et Pyrobel) couvrant les différents niveaux de performances des verres résistant au feu. Le tableau ci-après résume cette gamme.

La gamme de produits AGC

	Verre trempé	Verre feuilleté avec intercalaire intumescent
E	Pyropane	-
EW	Pyropane	Pyrobelite
EI	-	Pyrobel
DH	Pyropane	-

▼ Les verres Pyropane

Pyropane est la gamme des vitrages pare-flamme trempés de AGC. Les vitrages de cette gamme s'obtiennent en traitant et en trempant un verre revêtu ou non d'une couche métallique spéciale. La gamme Pyropane est conforme aux normes européennes spécifiques et possède des classements après essais dans des systèmes de châssis adéquats. Elle est adaptée à plusieurs usages :

- > double vitrage pare-flamme E/EW 30 et E/EW 60 pour façades
- > vitrage intérieur pour cloisons et portes E 30
- > écran de cantonnement des fumées DH 30.

En tant que vitrage trempé, Pyropane offre tous les avantages au niveau de la sécurité des personnes contre les blessures.

▼ Pyrobel et Pyrobelite

Les verres Pyrobel et Pyrobelite sont des verres feuilletés à intercalaire intumescent. En cas d'incendie, le ou les intercalaires s'expandent lorsque la paroi atteint une température voisine de 120°C et forment un écran rigide qui constitue une barrière aux flammes, aux gaz chauds et au transfert de chaleur.

En cas d'incendie, le Pyrobelite se transforme en un écran cellulaire réfractaire et opaque assurant l'étanchéité aux flammes, aux gaz et aux fumées de la paroi vitrée ainsi qu'une forte réduction du transfert de chaleur à travers cette paroi. Il permet d'atteindre des performances EW 30 et EW 60.

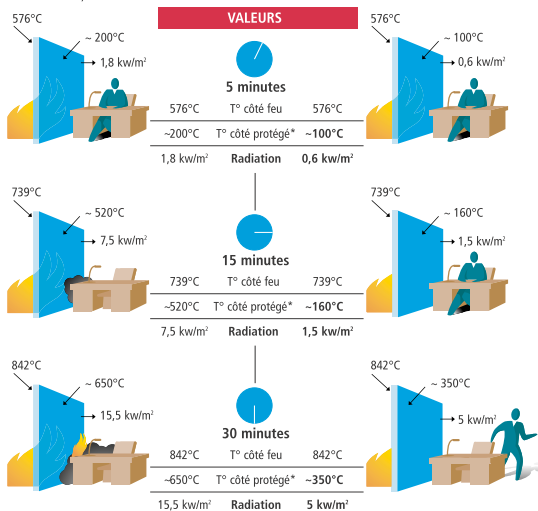
En cas d'incendie, le Pyrobel se transforme en un écran cellulaire réfractaire et opaque assurant l'étanchéité aux flammes, aux gaz et aux fumées de la paroi vitrée ainsi que l'isolation thermique de la paroi. Il permet d'atteindre des performances allant de EI 30 jusqu'à EI 120.

▼ Comparaison lors d'un incendie

COMPARAISON LORS D'UN INCENDIE

VERRE PARE-FLAMMES PUR
(sans limite de radiation) - E

Pyrobelite® VERRE PARE-FLAMMES
à radiation limitée - EW



* Lors d'un essai-feu la température est mesurée sur la surface du verre.



Rondo 1, Varsovie, Pologne - Architecte : Skidmore, Owings & Merrill - Stopray Safir 61/32