

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED
BOUDIAF U.S.T.O.**

Faculté d'Architecture et de Génie Civil

Polycopié

**NOUVEAU MATERIAU : LE VERRE DANS LE
BATIMENT**

Elaboré par

Dr. AATTACHE AMEL

(Docteur en Génie Civil – Option : Matériaux et Conception des Structures, U.S.T.O)

Année universitaire 2017-2018

Présentation

L'objectif de ce polycopié "*Nouveau matériau : le verre dans le bâtiment* " est de permettre de construire de façon innovante et performante avec le matériau verre qui est devenu un matériau incontournable dans les constructions civiles.

Ce document s'adresse aux concepteurs et aussi aux ingénieurs de l'équipement de l'habitat.

Il permet aussi d'avoir une meilleure vue sur des nouvelles conceptions d'une bâtisse afin de lui incorporer une touche d'originalité, de design mais aussi le maximum d'apport lumineux naturel afin de réduire l'énergie consommable.

SOMMAIRE

Sommaire

Chapitre I

Notions et considération générales

I.1. Introduction	1
I.2. Notion de nouveau matériau	1
I.3. Le matériau verre	2
I.4. Conclusion	3

Chapitre II

Fabrication du verre et différents types de verres

II.1. Introduction	5
II.2. Composition et fabrication du verre	5
II.3 Principaux types de vitrage	9
II.3.1 Verre de base	9
II.3.1.1. Le simple vitrage ou verre recuit	9
II.3.1.2. Le verre armé	10
II.3.1.3. Le verre imprimé	10
II.3.1.4. Le verre profilé	11
II.3.2 Verres transformés	12
II.3.2.1. Le verre trempé	12
II.3.2.2. Le verre feuilleté	13
II.3.2.3. Le vitrage isolant	14
II.3.2.4. Le vitrage chromogène	19
II.3.2.5. Le verre autonettoyant	23
II.3.2.6. Le vitrage photovoltaïque	24

II.3.2.7. Le vitrage pour une protection solaire	25
II.3.2.8. Le verre à destination spécial dans le bâtiment	33
II.3.2.9. Le verre fonctionnel	34
II.3.2.10. Le vitrage de toiture	35
II.3.3. Les verres à base de zircone	36
II.3.3.1. Les fibres de verre	36
II.3.3.2. Application au béton dans le génie civil : béton de fibre	37

Chapitre III

Caractéristiques principales des vitrages

III.1. Introduction	41
III.2. La température des vitrages et confort.....	41
III.3. Le coefficient de transmission thermique U_g	41
III.4. La transmission lumineuse TL	42
III.5. Le facteur solaire g	42
III.6. Comment fonctionne un vitrage à haut rendement (HR)?	47
III.6.1. La conduction	47
III.6.2. La convection	48
III.6.3. Le rayonnement	48
III.6.4. Isolation acoustique du vitrage.....	50
III.6.5. Durabilité du verre	54
IV. Conclusion	56
Références bibliographiques	58

CHAPITRE I

NOTIONS

&

CONSIDERATIONS

GENERALES

I.1. Introduction :

Le matériau verre occupe depuis toujours une place à part dans l'architecture et suscite un intérêt inégalé auprès des ingénieurs.

Il offre des possibilités pour la construction de bâtiments légers, ouverts et lumineux. Le formidable concept est de délaissier les murs massifs et aveugles au profit d'une ouverture transparente et translucide sur l'extérieur. Ce développement dont il a récemment fait l'objet a suscité un tel engouement de la part des ingénieurs et architectes qu'il est devenu le matériau de prédilection des constructeurs d'aujourd'hui. Les différentes gammes de matériau a fait naître une relation de l'homme avec son habitat, avec la lumière et la nature.

I.2. Notion de nouveau matériau :

Les nouveaux matériaux ou l'expression « *matériaux innovants* » ont des caractéristiques techniques spécifiques et des conséquences sur l'organisation économique. Les nouveaux matériaux sont aussi considérés innovants grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnels. Les matériaux dits *composites* sont des nouveaux matériaux ou matériaux innovants. Ils consistent en une combinaison de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. En particulier, il devient indispensable de donner à l'information et aux connaissances une place centrale. Les conditions de leur émergence et de leur circulation déterminent la forme organisationnelle optimale de l'innovation. Plus les réseaux se concentrent sur des technologies nouvelles, plus ils sont équilibrés et dépourvus de position dominante. L'homogénéité de niveau de compétence qui compose le réseau facilite la mise en place de liens informels et d'échanges d'informations par contact individuel. Ces réseaux de projets sont plutôt géographiquement concentrés. Le domaine de la protection de l'environnement leur offre d'importantes perspectives de développement.

I.3. Le matériau verre :

« Un jour, des marchands phéniciens de natron (carbonate naturel de sodium cristallisé) s'étant arrêtés sur les rives du Bélus pour cuire leur repas, cherchèrent des pierres pour poser leur marmites. N'en trouvant pas, ils se servirent de morceaux de leur cargaison et sous l'action du feu, le natron fondit et se mêla au sable du rivage. Une fois le mélange refroidi, il y eut à la place une matière transparente et dure : le verre. Mais c'est une histoire, et c'est Pline qui la raconte ».

Le verre a toujours existé dans la nature sous la forme d'obsidienne (roche volcanique issue du refroidissement rapide de laves). Les applications du verre s'étant multipliées depuis le XIX^e siècle, celui-ci a fait l'objet de nombreux développements pour satisfaire aux nouvelles exigences.

Le verre est un corps solide, non cristallin (amorphe), homogène, provenant du figeage progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

Un corps solide (comme le verre) est caractérisé à la fois par leur incapacité à prendre la forme du récipient dans lequel il prend place, et par leur grande résistance aux forces de cisaillement.

Un solide non cristallisé ou amorphe est constitué de cristaux dont l'arrangement des atomes, répond à des règles précises qui dans ce cas-là, sont désordonnés tel que dans un liquide.

Les solides amorphes sont caractérisés par une énergie interne en excès par rapport aux autres états de la matière, si bien que si on les chauffe, ils subissent naturellement une transformation qui apparaît avant que la température de fusion¹ ne soit atteinte. Pour certains solides amorphes, cette transformation est un passage spontané plus ou moins violent vers l'état cristallisé. **Dans le matériau verre**, la cristallisation est toujours précédée de la **transition vitreuse**, qui est le passage de l'état solide à l'état de liquide visqueux. Au cours du refroidissement du liquide, sa viscosité s'accroît progressivement au point qu'il se transforme en un solide, sans qu'il y ait eu formation de cristaux. C'est un phénomène extrêmement important sur le plan pratique car il permet, si on contrôle la température, la mise en forme des objets en verre. La transition vitreuse est réversible pour le matériau verre.

¹ la fusion est le passage d'un corps de l'état solide vers l'état liquide. La température de fusion ou de solidification d'un corps pur, appelée « point de fusion ».

I.4. Conclusion :

Ce chapitre a présenté les notions d'un matériau dit innovant ou nouveau matériau ainsi que la structure du matériau verre du point de vue atomique et physique. Ces données sont fortement recommandables de les aborder car lors du second chapitre, nous devons comprendre la fabrication du verre pour le vitrage dans le domaine de l'habitation. Cet aspect de notion vitreuse permet donc le moulage voulu ainsi que l'aspect lors de la réalisation des vitrages.

CHAPITRE II

FABRICATION DU VERRE

&

DIFFERENTS TYPES DE

VERRES

III.1. Introduction

Les vitrages jouent un grand rôle dans le domaine de la construction. Au-delà du double vitrage, il en existe en effet de nombreux, adaptés aux besoins les plus variés. Avant de connaître quels sont les différents types de vitrage préconisés dans les bâtiments quels que soient leurs usages, il faut au préalable avoir une notion sur la fabrication du verre. Voici quelques éléments sur les différents vitrages.

II.2 Composition et fabrication du verre :

La composition du verre est ajustée en fonction de l'usage auquel elle est destinée. On distingue, selon le domaine d'applications, plusieurs grandes familles de verres. Nous allons nous intéresser à celles qui sont utilisées dans le domaine du bâtiment.

a) Le vitrage, la lumière naturelle :

Le vitrage est un moyen simple de laisser passer le plus de lumière naturelle possible afin de réduire le recours à un éclairage artificiel durant la journée. Sans pour cela entraîner des problèmes d'éblouissement, l'utilisation de la lumière naturelle peut ainsi être optimisée. Le vitrage doit contrôler le rayonnement entrant d'une part, pour limiter ou d'éviter les dépenses en énergie de refroidissement en été. Cela implique que l'excès des apports solaires peut provoquer une surchauffe des locaux et donc l'inconfort des habitants qui auront alors tendance à recourir à la climatisation. D'autre part, il faut cependant veiller à ne pas trop limiter les apports solaires afin de pouvoir encore bénéficier de cette énergie gratuite en hiver [1].

b) Composition du verre :

En général, les principales matières premières se classent en trois catégories :

- **Les vitrifiants** : sont des éléments de bases qui créent la structure vitreuse.
- **Les fondants** : permettent de fondre les vitrifiants à des températures acceptables.
- **Les stabilisants** : permettent d'empêcher la détérioration dans le temps des verres fondus [2].

Le verre utilisé pour le vitrage (appelé *verre sodocalcique*) est constitué :

- **D'oxyde de silicium** (SiO_2) ou **silice**, élément majoritaire, **le vitrifiant**, amené par les sables de carrières ou de rivière (le quartz).
- **L'oxyde de sodium** (Na_2O), **le fondant**, appelé aussi « *soude* », nécessaire pour abaisser de plusieurs centaines de degrés la température de fusion de la silice est apporté par les sulfates (Na_2SO_4). En effet, la silice fond à une température de $1700^\circ C$, une température supérieure que celle utilisée dans l'industrie (température maximale en industrie est de $1500^\circ C$). Ainsi, le mélange silice et fondant donne une température de fusion aux alentours de $1400^\circ C$.
- **L'oxyde de calcium** (CaO) ou « *la chaux vive* », **le stabilisant**, apporté par le calcaire permet au verre constitué de ne pas s'altérer dans le temps.

Les figures II.1 et II.2 nous montrent la composition de base du verre et la fonte respectivement.

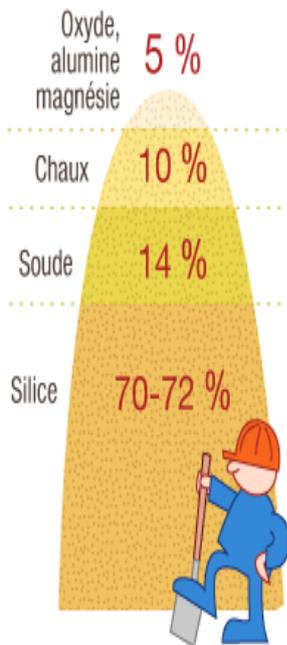


Figure II.1 : La silice est le composant de base du verre. On y adjoint divers ingrédients en fonction des qualités souhaitées. Une très faible variation de dosage suffit à modifier complètement les propriétés physiques [3].

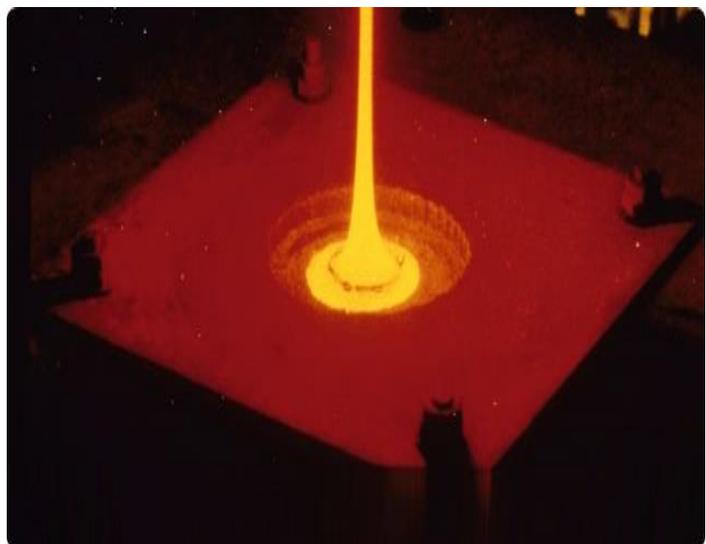


Figure II.2 : Fusion de la silice mélangée au fondant : $1400^\circ C$ (la fonte) [4].

Pour modifier la teinte du verre, ou pour améliorer la résistance à l'eau et refroidir la fonte jusqu'à ce qu'elle ait la viscosité convenable pour le formage (le moulage), sans risquer la cristallisation (solidification), certains oxydes sont ajoutés tels que l'alumine (Al_2O_3), la magnésie (MgO) [5].

Prenons l'exemple de la fabrication des plateaux en verres pour comprendre les différents procédés. Les plateaux sont fabriqués grâce au procédé appelé FLOAT GLASS [6]. Ce procédé que l'on verra plus tard consiste à faire couler du verre en fusion (pâteux) sur un bain d'étain lui-même en fusion. Ce procédé de fabrication fut mis au point par Alistair Pilkington en 1952 [7]. La quasi-totalité du verre plat est fabriqué selon ce procédé [8]. Il existe dans le monde 200 installations de float en activité. Les étapes se suivent comme suit illustrées par la figure II.3 :

- Un mélange automatisé des matières premières (MP) (sable + soude + chaux + divers) ;
- Fusion à 1550°C + affinage du mélange ;
- Flottage du verre sur un bain d'étain en fusion ;
- Dépôt éventuel d'oxydes métalliques en poudre (couches) ;
- Recuisson du verre (refroidissement lent) ;
- Découpe automatique et stockage des plateaux de verre.

Ces étapes sont énumérées dans le tableau 1.

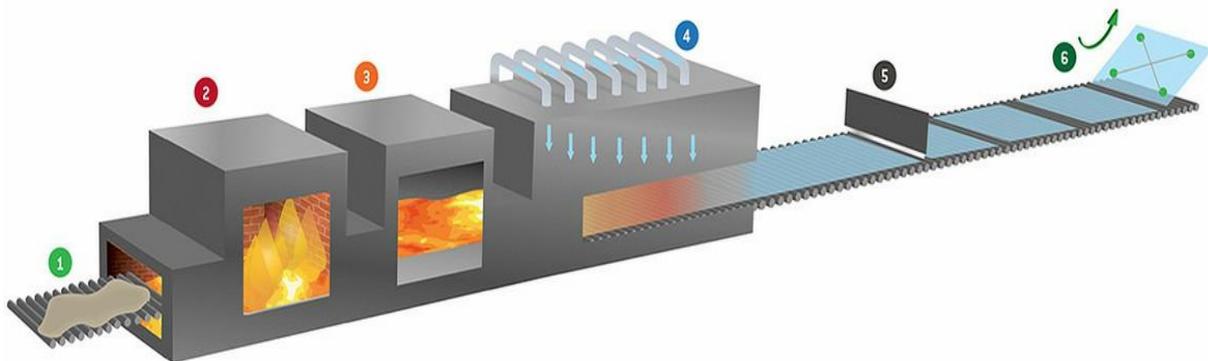


Figure II.3 : Le procédé Float [6].

1. Matières premières	2. Le four	3. Flottage ou Float	4. Dépôt	5. Recuisson	6. Découpe
<p>Stockées dans des silos séparés, les matières premières (le sable, la soude, le calcaire) sont chacune pesées avant d'être mélangées, puis déversées, avec le groisil (déchets de verres concassés), dans la trémie d'enfournement. Ces opérations sont entièrement automatisées.</p>	<p>Introduites dans le four, les matières premières sont alors fondues à une température de 1550 ° C sous l'effet des flammes de puissants brûleurs au fuel et/ou au gaz. Au cours de sa fusion, le mélange vitrifiable s'écoule lentement dans le four où il sera lentement affiné.</p> <p>L'affinage consiste à éliminer les bulles de gaz prisonnières du verre fondu en le maintenant plusieurs heures à haute température.</p>	<p>A la sortie du four, le verre fondu est déversé sur un bain d'étain liquide où la feuille de verre se forme par "flottage". D'une extrémité à l'autre de ce bain, la température du verre et de l'étain se réduira lentement de 1100 ° C à 600 ° C.</p> <p>De chaque côté, des "top rollers" étirent mécaniquement le verre pour lui conférer l'épaisseur et la largeur voulues.</p>	<p>Les couches d'oxydes métalliques sont déposées sur le ruban de verre chaud. Les produits de réaction sont aspirés par des hottes et envoyés dans des équipements d'épuration.</p> <p>Les rouleaux d'impression sont actionnés (ou pas) à la sortie et l'armature métallique y est incorporée (ou pas)</p>	<p>À la sortie du bain d'étain, un ruban continu de verre s'est formé, qu'entraîne un convoyeur à rouleaux dans le tunnel de recuisson.</p> <p>Le verre y subit un refroidissement progressif et contrôlé afin d'assurer sa planéité parfaite et d'éviter toute contrainte mécanique dans sa masse qui l'expose à des risques de casse. Il en ressort à température ambiante et prêt à la découpe.</p>	<p>Après recuisson, le ruban de verre est inspecté par laser optique et automatiquement découpé en feuilles de grandes dimensions (6x3.21m).</p> <p>Sans intervention humaine, ces feuilles sont ensuite réparties par commandes selon le niveau de qualité requis par les clients avant d'être disposées par des empileuses sur les chevalets. Prêtes pour l'expédition ...</p>

Tableau II.1 : Etape de fabrication du verre Float [6].

II.3 Principaux types de vitrage

D'abord destinés aux fenêtres, les vitrages habillent aujourd'hui les façades et signent la modernité de grands projets architecturaux : le verre est aussi un matériau high Tech, fonctionnel et raffiné, jouant pleinement ou discrètement de ses qualités de transparence. Le verre ferme l'espace intérieur en permettant la vision, l'éclairage et le captage de l'énergie solaire. Au-delà de la transparence, les nouveaux vitrages doivent remplir d'autres fonctions : thermique, acoustique, esthétique, sécuritaire. Le choix d'un vitrage dépendra donc des performances à atteindre relativement à ces fonctions, pour assurer le confort des occupants. Nous allons voir quelques types de vitrages selon qui soient des verres de base ou des verres transformés [1].

II.3.1. Verre de base

II.3.1.1. Le simple vitrage ou verre recuit

Il s'agit d'un verre obtenu par le procédé de fabrication « Float » que l'on a décrit ci-dessus. Les matières premières sont dosées et introduites dans le four de fusion. Le mélange arrive alors sur un bain de métal en fusion sur lequel se forme la feuille de verre plane et d'épaisseur constante. Le verre entre alors dans le four de recuit, où il subit un refroidissement progressif et contrôlé jusqu'à 50 °C, en vue d'éliminer les tensions internes et de permettre la découpe ultérieure du verre. C'est pour cette raison que ce type de verre est appelé verre recuit. Le float est un verre plan, recuit, transparent, clair ou coloré, dont les deux faces sont planes et parallèles représenté par la figure II.4.



Figure II.4 : Illustration d'un simple vitrage [9].

II.3.1.2. Le verre armé

On incorpore dans le verre, lors de la phase de fabrication, un treillis métallique destiné à maintenir les morceaux de verre en place en cas de bris mais ne participant pas à la résistance mécanique ou thermique que l'on peut apercevoir sur la figure II.5. Les performances de ce type de vitrage sont les mêmes que celles d'un simple vitrage [10].



Figure II.5 : Illustration du verre armé [11].

II.3.1.3. Le verre imprimé

Le verre imprimé est obtenu par coulée continue, dont une ou les deux faces comportent des dessins réalisés en faisant passer la feuille de verre entre des rouleaux texturés au moment du laminage. La figure II.6 présente un verre imprimé de décoration.



Figure II.6 : Verre imprimé [12].

II.3.1.4. Le verre profilé

Il s'agit d'un verre recuit obtenu par coulée continue suivie d'un laminage et d'un processus de formage, le plus souvent en forme de U (voir figure II.7). Les fibres métalliques y peuvent être introduites lors de la fabrication pour en faire du verre profilé armé. Il peut être confectionné en double paroi pour les bâtiments à faible teneur en humidité pour limiter les problèmes de condensation entre les parois. Il s'applique en paroi tant intérieure qu'extérieure mais nullement dans un endroit où un vitrage de sécurité est requis (toiture, risque de chute).



Figure II.7 : Verre profilé en U pour façade [13].

Le verre profilé en forme de U armé de fils métalliques longitudinaux est un produit verrier translucide qui peut être assimilé à du bardage. Il apporte ainsi une lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment, tout en le protégeant des regards extérieurs.

II.3.2 Verres transformés

II.3.2.1. Le verre trempé

Il s'agit d'un verre ayant subi un traitement thermique de renforcement augmentant considérablement sa résistance aux contraintes mécaniques et thermique. Il existe pour cela deux procédés : la trempe thermique et la trempe chimique.

La première consiste à chauffer le verre jusqu'à environ 600-650 °C avant de subir un refroidissement brutal par jets d'air. Le verre trempé ne peut plus se découper ou se façonner. Si le verre se brise pour une raison quelconque, il se fragmente en de multiples morceaux non coupant, dont la grandeur dépend de l'état de trempe. Ce qui permet de minimiser les risques de blessures profondes. On retrouve les principales applications de ce verre dans le bâtiment (portes, balustrades, allèges, cabine douche, ...). La trempe chimique obtient significativement les mêmes résultats, mais avec une technique différente : le verre est placé dans un bain à 400 °C composé de sels de potassium. Le remplacement des ions sodium du verre par les ions potassium du bain va créer la même compression du verre que par le procédé thermique.

Un verre trempé peut être 5 fois plus résistant qu'un verre ordinaire. La figure II.8 met en relief l'aspect du verre trempé.



Figure II.8 : Verre trempé [14].

II.3.2.2. Le verre feuilleté

Il est composé de deux ou plusieurs feuilles de verre assemblées à l'aide d'un ou plusieurs films plastiques (le PVB : Poly Vinyl Butyral), résine ou gel. Après la mise en place des composants, l'adhérence parfaite est obtenue par traitement thermique s'il s'agit de film plastique (par autoclave). En présence de résine, la mise en place se fait par coulage de résine liquide entre les verres et à la faire durcir sous des lampes ultra-violet. Ce type de verre ne peut être ni coupé, ni scié, ni percé ou façonné (voir figure II.10).

Ces performances peuvent être la limitation des blessures en cas de bris, la protection contre l'effraction, protection contre les armes à feu, les explosions, les incendies, isolation acoustique, la décoration. Le nombre et l'épaisseur de chaque élément du vitrage feuilleté est normalisé avec la notation suivante : 44-2 par exemple signifie que le vitrage comporte deux couches de verre épaisses de 4 mm chacune ainsi que 2 intercalaires PVB que l'on peut apercevoir sur la figure II.9. Le 33-1 comprend donc 2 feuilles de verre de 3mm d'épaisseur + 1 feuille de PVB (épaisseur de 0.38mm).

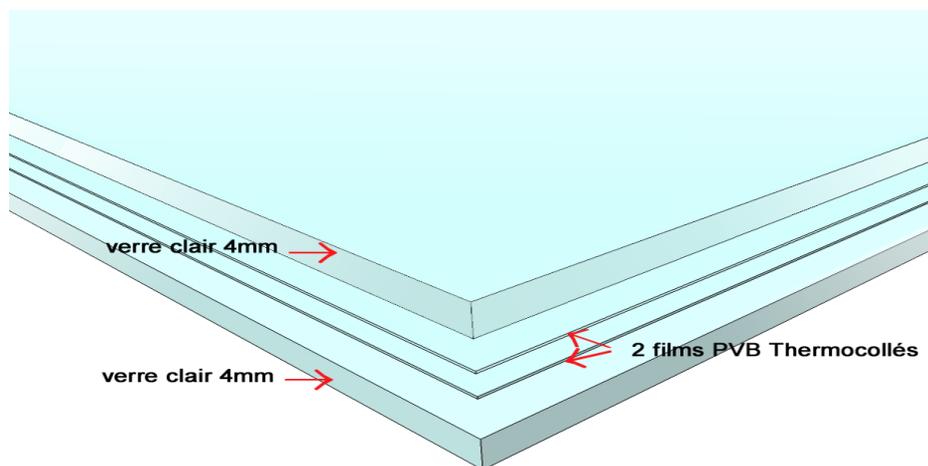


Figure II.9 : Illustration d'un verre feuilleté 44.2 [15].

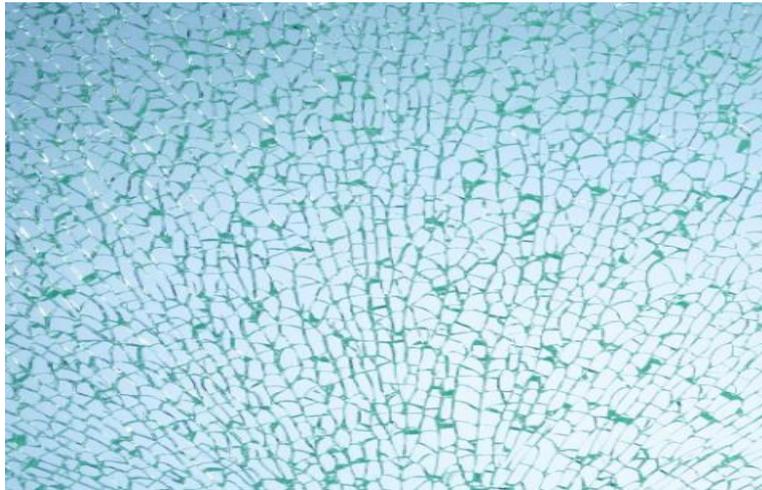


Figure II.10 : Verre feuilleté décoratif.

II.3.2.3. Le vitrage isolant

Ces vitrages ont des propriétés d'isolation thermique et acoustique qui procurent de nette économie d'énergie et permettent d'avoir de grandes fenêtres sans en avoir les inconvénients. Il est composé au minimum de deux feuilles de verre écartées au niveau des bords par un espaceur. On distingue :

➤ Le double vitrage

Le double vitrage représenté par la figure II.11 consiste à assembler deux feuilles de verres séparées par une lame d'air (espace hermétique) ou un gaz déshydraté améliorant l'isolation thermique (souvent de l'argon). Le but premier de cet assemblage est de bénéficier du pouvoir isolant apporté par la lame d'air ou de gaz. Le double vitrage se compose des éléments suivants :

- Deux feuilles de verre ;
- Un espaceur ou intercalaire en aluminium ou acier séparant les deux feuilles de verre ;
- Etanchéité périphérique est assurée par des joints organiques (ex : le mastic) ;
- Des agents déshydratant sont contenus dans l'intercalaire qui vont empêcher l'humidité de l'air de pénétrer entre les vitres est, la plupart du temps, ajouté à l'ensemble pour éviter la formation de buée. Il s'agit de petites billes poreuses, placées sous l'intercalaire absorbant l'humidité (système d'assemblage périphérique).

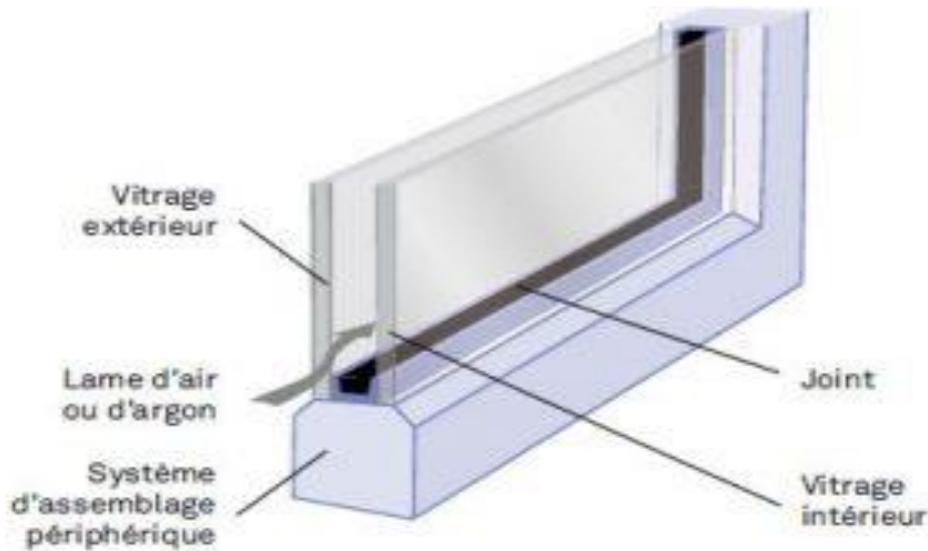


Figure II.11 : principe du double vitrage [17].

Par exemple, un double vitrage classique de type 4-16-4 est constitué d'une première vitre de 4mm, d'une couche d'air de 16mm, puis, d'une seconde vitre de 4mm.

➤ Le triple vitrage

Ce vitrage consiste à améliorer le pouvoir isolant en ajoutant une troisième plaque de verre séparé par deux espaces d'air ou le gaz que l'on aperçoit sur la figure II.12. Il s'agit aussi d'une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. En outre les transmissions solaire et lumineuse diminuent.

Pour les deux types de vitrage, en cas de détérioration du système d'étanchéité, l'humidité pénètre dans l'espace intermédiaire et se condense et la fenêtre est dite « aveugle » (voir figure II.13). La différence d'humidité entre l'espace intermédiaire et l'extérieur entraîne une importante chute de la pression de vapeur.

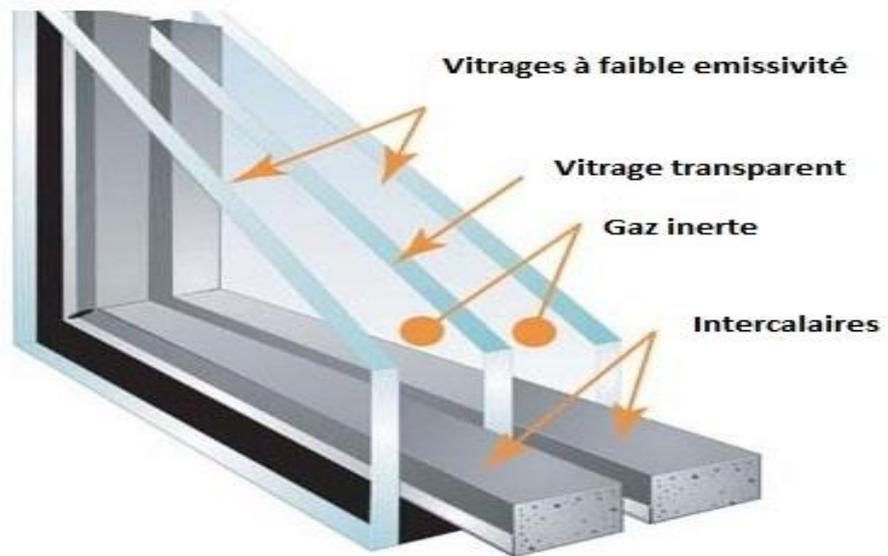


Figure II.12 : Principe du triple vitrage [18].



Figure II.13 : Fenêtre dite « aveugle » [19].

➤ **Vitrage à isolation renforcée :**

Ce vitrage appelé aussi vitrage peu émissif permet de réduire les pertes de chaleur par rayonnement. Le principe de fonctionnement selon la figure II.14, est de conserver la chaleur au sein de l'habitat intérieur. Le rayonnement solaire traverse le vitrage et réchauffe les parois de la pièce. Ces parois émettent de la chaleur (rayonnement infrarouge) vers l'intérieur de la pièce. Le vitrage comporte un revêtement spécial déposé sur la surface intérieure (de l'argent ou des oxydes métalliques comme le nickel ou le titane). Ce revêtement joue un rôle de barrière thermique à l'intérieur du vitrage et réduit les pertes de chaleur de 30%. Prenons l'exemple de la saison d'hiver, froid à l'extérieur et chaud à l'intérieur (voir figure II.15).

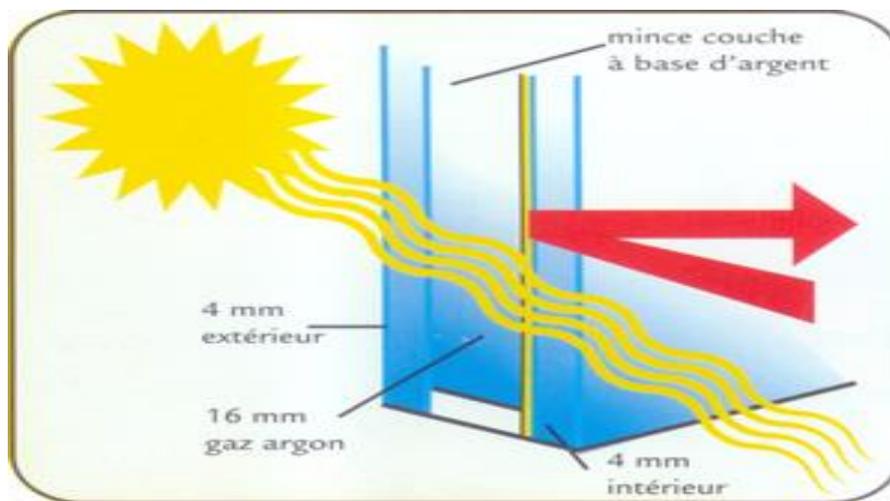


Figure II.14 : Principe de fonctionnement du vitrage à isolation renforcée [20].



Figure II.15 : Aspect d'un vitrage à isolation renforcée : Froid à l'extérieur, chaud à l'intérieur [21].

➤ **Double vitrage dissymétrique :**

Pour améliorer l'isolation acoustique d'un double vitrage, on peut utiliser des verres d'épaisseurs suffisamment différentes de sorte que chacun des deux verres puisse masquer les faiblesses de l'autre lorsqu'il atteint sa fréquence critique. Cela revient à dire que **le verre extérieur est plus épais** et passe de 4 à 10 mm et la lame d'air de 16 à 10 mm par rapport à un double vitrage normale (4/10 /4). Cette modification permet d'atténuer le bruit.



Figure II.16 : Principe du double vitrage dissymétrique [22].

II.3.2.4. Le vitrage chromogène

Les vitrages chromogènes sont des vitrages à propriétés variables. Il existe des vitrages non électro-activés (sans induire un courant électrique) pour lesquels les conditions ambiantes déterminent le changement d'état (température, luminosité,...) et des vitrages électro-activés pour lesquels le changement d'état est induit par l'application d'un courant électrique, c'est-à-dire directement par l'action de l'utilisateur sur le vitrage. Nous décrierons brièvement les différents types de vitrages chromogènes.

1°) Les vitrages non électro-activés :

➤ *Le vitrage photochromique* : la teinte de la vitre se modifie sous l'action de la lumière ultraviolette (exemple : verres de lunettes de soleil qui s'assombrissent). Le temps de réponse de ces vitrages est de l'ordre de quelques minutes. Des micros cristaux sont introduits dans le verre (exemple « des cristaux d'argent »). Sous le contact des UV, le verre devient opaque. La teinte redevient transparente en absence de lumière ultraviolette (voir figure II.17).

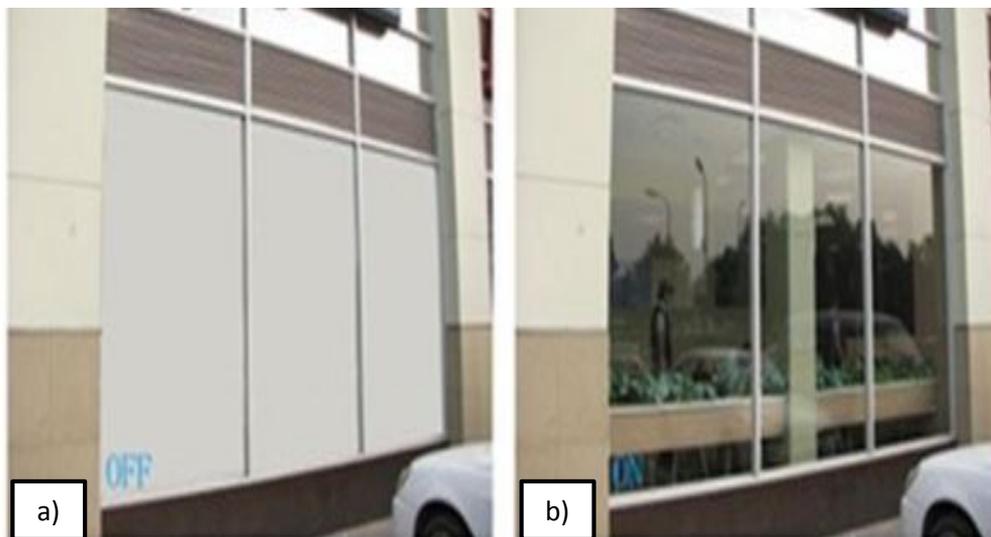


Figure II.17 : Vitrage photochromique : a) vitrage opaque ;b) vitrage transparent [23].

➤ **Le vitrage thermochromique** : a la propriété de changer de teinte en fonction de la température et ceci de façon réversible. Ce principe représenté par la figure II.18 est réalisé par un dépôt de film inorganique, le plus connue, l'oxyde de vanadium. Le vitrage varie de couleur en fonction de la température, à partir d'un certain niveau le vitrage s'assombrit. Le verre thermochromique présente l'avantage de ne requérir aucune intervention humaine ou électrique pour fonctionner. Le verre thermochromique est un verre laminé de deux vitrages clairs ou teintés, selon les spécifications demandées, entre lesquels est apposée une pellicule thermochromique de Polyvinyle Butyral (PVB) modifiée. La pellicule thermochromique contient notamment des nanoparticules d'oxyde de vanadium, qui changent de phase et de propriétés semi-conductrices entre 25 et 65 degrés Celsius. La teinte ou l'opacité du verre est changée grâce à la température.

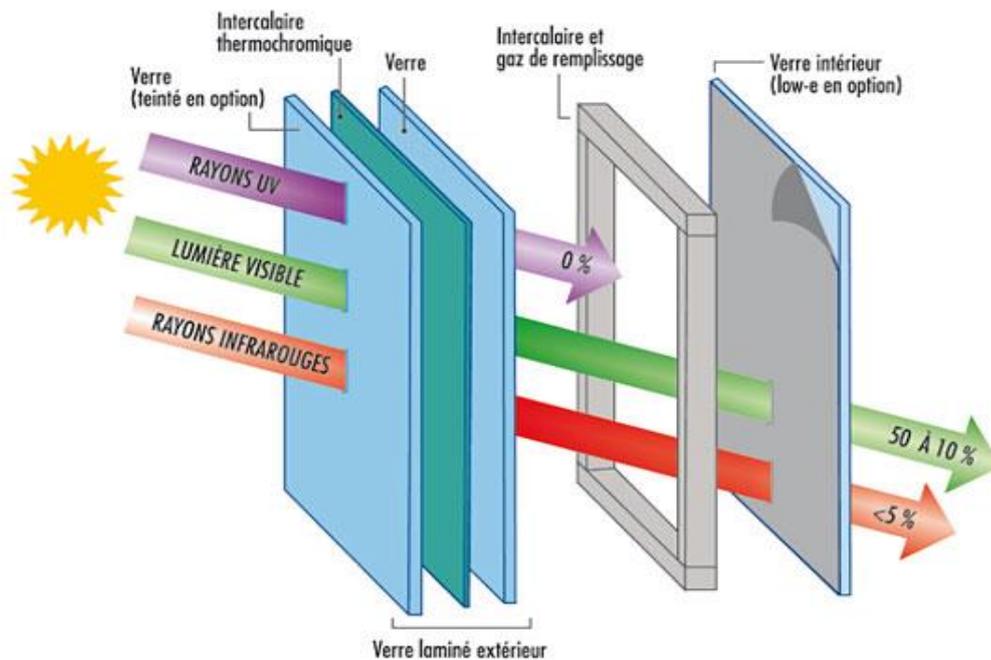


Figure II.18 : Principe du vitrage thermochromique [24].



Figure II.19 : Illustration d'un vitrage photochromique : teinte modifiée sous l'effet de la température extérieure [25].

2°) Les vitrages électro-activés :

➤ *Le vitrage à cristaux liquides* : est composé d'un film à cristaux liquides (les cristaux liquides sont des composés combinant des propriétés des liquides et des cristaux solides) ainsi qu'un branchement électrique inséré entre les vitres du double vitrage ce qui permet de l'opacifier à volonté sur simple pression d'un bouton. Son principe est le suivant : entre deux plaques de verre, chacune revêtue d'une couche transparente conductrice (en général de la silice SiO_2 dopé au fluor), est insérée par lamination un film plastique au sein duquel sont noyées des gouttelettes de cristaux liquides. Sous l'effet d'un champ électrique, on peut modifier l'orientation des cristaux et rendre le vitrage soit opaque (bouton « ON ») soit transparent (bouton « OFF») selon la figure II.20. Ce type de vitrage est destiné à des parois intérieures, par exemple pour des salles de réunion, ou pour des parois extérieures en double vitrage [1], [5], [26].



Figure II.19 : Vitrage à cristaux liquides [27].

➤ **Le vitrage électrochromique** : est activé sous l'effet d'une faible tension électrique. L'électrochromisme n'est autre chose que la réalisation d'une batterie solide entre deux plaques de verre. Il s'agit cependant de modifier non pas l'opacité (le verre reste ici transparent) mais la teinte. Le vitrage s'assombrit ou devient transparent selon le courant électrique que l'on applique : clair en hiver pour chauffer la maison par le rayonnement solaire, sombres en été lors des périodes de fort ensoleillement pour éviter des températures trop élevées (voir figure II.20).

Le principe consiste à induire un champ électrique entre deux couches conductrices déposées sur chacun des verres (ions de lithium par exemple). Selon la couche dans laquelle ils se trouvent, l'ensemble est donc plus ou moins coloré. En inversant le sens du champ, on retrouve évidemment la coloration initiale. La migration d'ions étant un phénomène progressif, le temps de « commutation » est lent [26], [28].

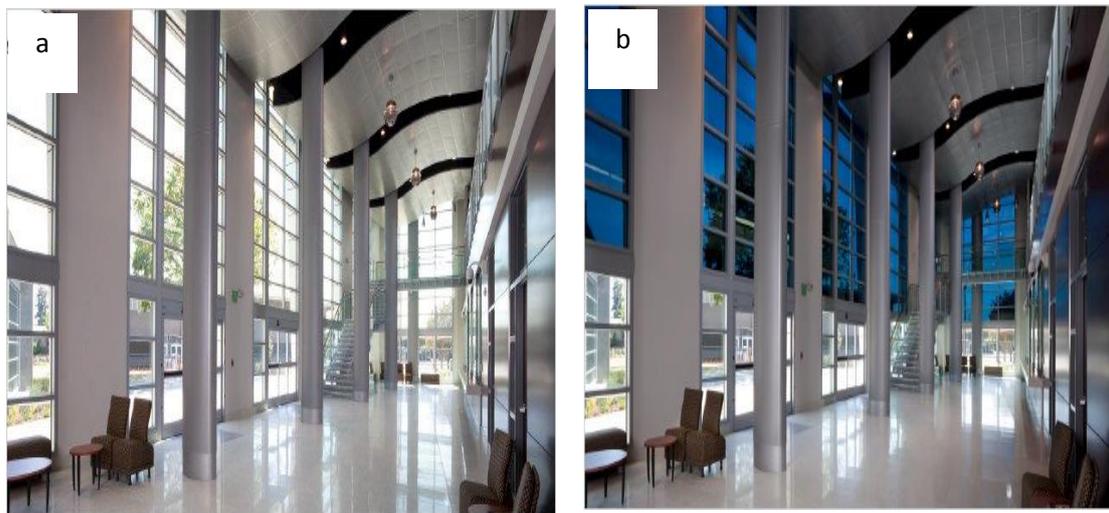


Figure II.20 : Vitrage électrochrome : état clair (a) et état teinté (b) [29].

II.3.2.5. Le verre autonettoyant

Il est composé d'un verre "Float" qui est recouvert d'une couche très fine d'un matériau minéral hydrophile et photocatalytique, sur sa face extérieure. Ce type de vitrage a le même degré de transparence que son équivalent classique.

Les deux principes :

- **La photocatalyse** : Les matières organiques qui reposent sur la vitre sont décomposées par la lumière du soleil. Le verre est recouvert d'une fine couche d'oxyde de titane TiO_2 . Celui-ci détruit les graisses par une réaction chimique induit par les UV.

- **L'hydrophylie** : Le verre autonettoyant est hydrophile. Cela a pour effet que l'eau qui entre en contact avec lui n'est plus constituée de gouttes (comme c'est le cas avec du verre classique) mais forme un film (par tension de surface).

Par conséquent, la pluie le lave au lieu de laisser des traces, parce que le film glisse vers le bas, comme tout corps soumis à la gravité. Lorsque la vitre est salie, la lumière solaire décompose les saletés et l'eau de pluie rince les saletés ensuite en laissant la vitre nette. La figure II.21 met en évidence la différence entre un verre normal et un verre BIOCLEAN.

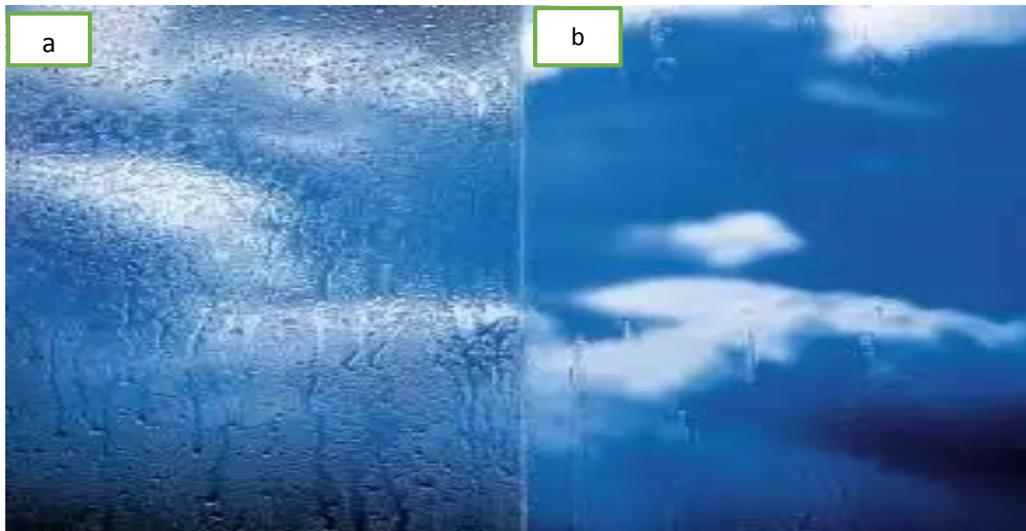


Figure II.21 : Vitrage normale (a) ; vitrage autonettoyant BIOCLEAR (b) [30].

II.3.2.6. Le vitrage photovoltaïque

Les vitrages photovoltaïques sont des matériaux et dispositifs utilisant des panneaux de verre dit photovoltaïque (pouvant être plus ou moins transparent ou coloré) avec un double vitrage qui peut être incorporé pour obtenir une meilleure isolation thermique (voir figure II.22). Le verre laminé photovoltaïque est un vitrage solaire. Il permet de produire de l'électricité à partir d'une partie du spectre visible ou non visible de la lumière solaire. Il empêche également l'entrée des rayons UV nocifs ainsi que la radiation infra rouge. Ces techniques sont encore émergentes [31]. Normalement, elles sont composées d'une enveloppe en verre laminé photovoltaïque de 6, 8, 10, 12 ou 19 mm d'épaisseur, d'une chambre à air de 16 mm d'épaisseur afin d'optimiser l'isolation thermique, et d'une plaque de verre classique à l'intérieur de 6 mm d'épaisseur. De plus, pour améliorer la capacité isolante de la chambre, l'air intérieur peut être remplacé par du gaz (Argon).



Figure II.22 : Vitrage photovoltaïque transparente [32].

II.3.2.7. Le vitrage pour une protection solaire

La fonction d'un verre de protection solaire est de filtrer une partie des rayons du soleil qui l'atteint. Le choix du système de protection solaire est multiple ainsi que certains dispositifs selon que la protection soit de l'intérieure ou de l'extérieure.

➤ **Cas du verre antisolaire avec film/teinté :**

Il permet d'empêcher la plus grande proportion possible d'énergie solaire dans une pièce. Les verres antisolaires avec film transparent ou teinté sont utilisés comme vitrage isolants. Un film sur le verre assure une protection solaire constante et une visibilité parfaite sur l'ensemble de la surface de la vitre. Ce film permet de réfléchir fortement les rayons du soleil. Il existe trois catégories principales de films pour vitrages, qui sont maintenant systématiquement traités anti-rayures (HC) :

- **les films non réfléchissants clairs ou teintés** : de nombreux films destinés à la sécurité des biens et des personnes sont des films clairs. D'autres, destinés à la protection de l'intimité ou la réduction de l'éblouissement, sont teintés ou traités en surface avec un adhésif coloré.

- **les films réfléchissants clairs** : ces films résultent d'une lamination d'un film polyester métallisé et d'un film polyester clair qui protège le métal en surface.
- **les films réfléchissants teintés** : ces films consistent en une lamination d'un film métallisé, et de films teintés, sur une face ou deux du film métallisé [33].

Ils sont très solides, résistent à la décoloration et la plupart d'entre eux possèdent un revêtement anti-abrasif. Ce type de films se pose sur un vitrage existant, à l'extérieur ou à l'intérieur, selon le mode d'emploi voulue comme le montre la figure II.23.



Figure II.23 : Type de verre teinté antisolaire [34].

➤ **Cas du verre antisolaire imprimé :**

La transmission de rayonnement d'une vitre peut être réduite par des zones de partie opaques (motifs). La sérigraphie permet d'appliquer des motifs opaques sur une partie de la surface du verre afin de réduire la transmission du rayonnement (voir figure II.24). Le procédé est de faire passer de l'encre à travers les mailles très fines du verre en cuisant l'email pendant le processus de fabrication.



Figure II.24 : vitrage sérigraphié ; motif sur façade [35].

➤ **Revêtement on-line ou verre à couche pyrolytique :**

Il s'agit d'un verre flotté que l'on applique au cours du processus de fabrication, un oxyde métallique (exemple l'étain) sur la surface encore chaude de manière à ce qu'il se fixe au verre comme on le voit sur la figure II.24. Ce revêtement assure d'une part une meilleure protection solaire, car l'oxyde métallique reflète les rayons du soleil, et contribue d'une part, à l'isolation calorifique (isolation thermique) car la couche d'oxyde d'étain présente une moindre émissivité. Cette application on-line peut se faire sur un double vitrage, ce qui correspond à un vitrage isolant avec un espace intermédiaire rempli d'argon [33].

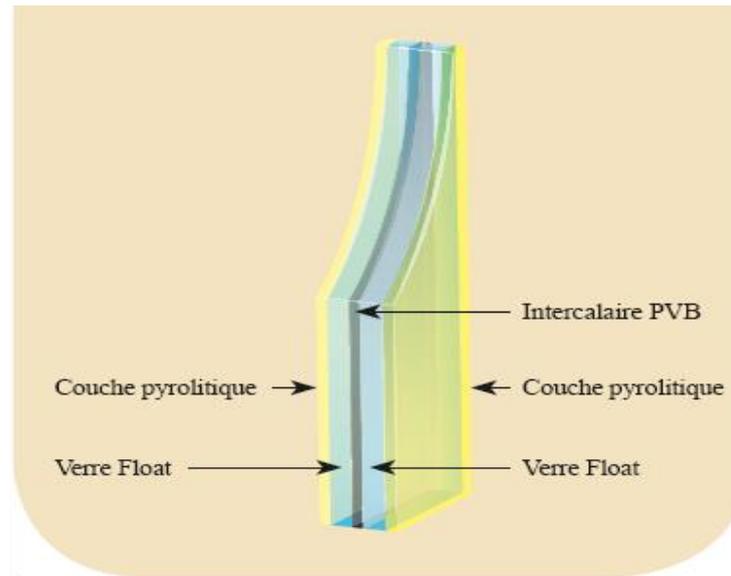


Figure II.25 : Principe du verre à couche ou pyrolytique [36].

➤ Protection solaire extérieure

Une protection solaire extérieure empêche la pénétration des rayons du soleil de l'extérieur et doit donc résister aux aléas externes, par exemple, le vent, la neige, ainsi que la pluie mais ne doit pas faire de bruit lors du vent et doit être nettoyé facilement. Présentons quelques exemples.

a) Pare-soleil fixe :

Il s'agit de lamelles obliques ou horizontales en métal, bois, matières synthétique ou même du verre (voir figure II.26, 27, 28 et 29), qui projettent leur ombre sur les surfaces transparentes exposés au soleil. Les systèmes de protection solaire extérieure évitent d'une manière naturelle et économique le réchauffement de bâtiments et permettent de réduire jusqu'à 30% les besoins de refroidissement. Un système de protection solaire est donc un excellent investissement qui s'amortit rapidement. De plus, les systèmes de protection solaire assurent un apport en lumière naturelle optimisé et éliminent le risque de surchauffe, tout en atténuant les phénomènes d'éblouissement. Un apport suffisant en lumière naturelle est gage de confort visuel. La protection solaire présente un intérêt supplémentaire en offrant un confort thermique idéal durant les périodes de chaleur. Placés devant une façade vitrée, les systèmes de protection solaire protègent la sphère privée sans pour autant couper le contact visuel avec l'extérieur.



Figure II.26 : Brise-soleil ou pare-soleil en aluminium (métal) [37].



Figure II.27 : Pare-soleil en bois dans un immeuble [38]



Figure II.28 : Pare-soleil en matière synthétique [39].



Figure II.29 : Pare-soleil en verre [40].

b) Dispositif extérieur mobile de protection solaire

Ce dispositif permet d'adapter la protection solaire aux besoins individuels. On optera soit des matériaux opaques dans le cas de dispositifs horizontaux ou bien des toiles de store translucide voire des éléments mobiles entièrement en verre.

Par exemple, avec des volets roulants, le bruit et la chaleur entrent moins facilement dans l'habitation. Et comme ils retiennent les rayons UV, l'intérieur de l'habitation se décolore moins vite. Le volet roulant s'enroule et se déroule à l'aide d'un interrupteur ou d'une télécommande.

De même, les volets battants confèrent à la façade une multitude de combinaison pour décorer l'extérieur d'une habitation. Ils servent à réguler individuellement l'apport de lumière. Ils permettent non seulement la protection du bruit lorsqu'ils sont fermés mais diminuent aussi en hiver la dispersion énergétique.

Si on désire davantage de flexibilité, les différents types de panneaux coulissants sont une bonne solution. Ils peuvent être coulissés selon les besoins désirés, soit pour protéger les pièces de l'impact direct du soleil, soit pour laisser pénétrer la lumière du jour.

Les toiles de store translucides doivent résister à la pression du vent et aux intempéries.

Les éléments mobiles extérieurs entièrement en verre reposent sur l'appui de l'ouverture et ils sont remontés devant la fenêtre en cas de besoin. On conserve ainsi une vue en transparence de grande ampleur. Toutes ces dispositifs sont illustrés par les figures II.30 à 33.



Figure II.30 : Volet roulant empêchant le rayonnement solaire [41].



Figure II.31 : Volet battante à l'extérieur de la fenêtre [42].



Figure II.32 : Panneau coulissant qui donne vue vers l'extérieur [43].



Figure II.33 : Toile de store dans un bâtiment face au soleil [44].

II.3.2.8. Le verre à destination spécial dans le bâtiment

En tant que matériau de construction, le verre est de plus en plus utilisé pour protéger contre le feu, la fumée et le rayonnement de chaleur. Une protection incendie transparente permet des passages homogènes entre les pièces ainsi qu'une utilisation optimale de la lumière du jour.

➤ Verre coupe-feu

Il existe deux catégories de verre coupe-feu :

Catégorie G : ils empêchent la progression des flammes, des fumées et des gaz d'incendie pendant un temps donné, mais pas celle de la chaleur d'incendie.

Catégorie F : ils empêchent la progression des flammes, des fumées et des gaz d'incendies pendant un temps donné, et également celle de la chaleur de l'incendie, c'est-à-dire que la chaleur ne peut pas se propager.

Prenons l'exemple du vitrage résistant au feu Pyrobel de la figure II.34 qui est un verre feuilleté transparent, sans maille métallique interne, assemblé à l'aide de deux ou plusieurs intercalaires intumescents qui foisonnent en cas d'incendie. Cette réaction d'intumescence se déclenche dès que la température de la paroi atteint un niveau voisin de 120° C [45].

Jusqu'à ce stade, la vision est conservée ; au-delà, le vitrage réagit progressivement en formant un complexe cellulaire rigide, réfractaire et opaque. Trois fonctions fondamentales sont ainsi assurées :

- **la stabilité** : le vitrage ne s'effondre pas ;

- **l'étanchéité aux flammes, gaz chauds et fumées** : l'incendie ne se propage pas ;

- **l'isolation thermique** : la température moyenne du vitrage côté protégé reste inférieure à 140° C, ce qui élimine tout risque d'auto-inflammation tant par rayonnement que par convection des matériaux exposés et permet une évacuation sans danger et sans panique du bâtiment.

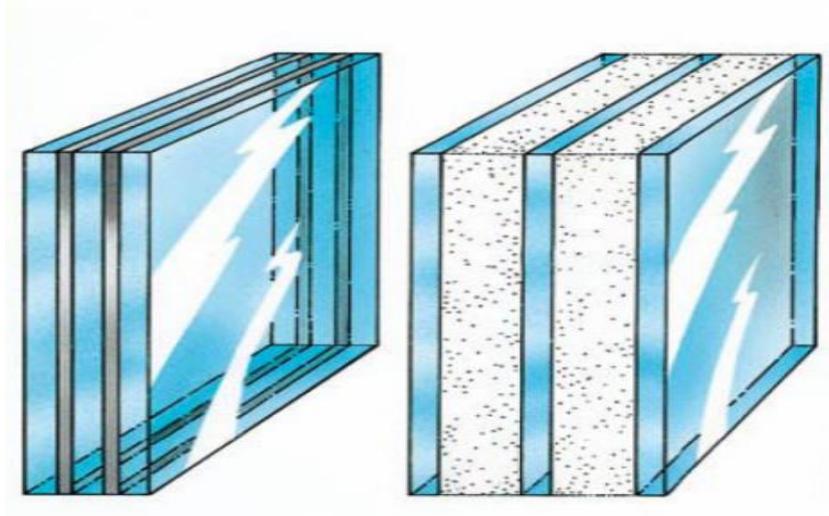


Figure II.34 : Coupe-feu Pyrobel [45].

Il existe aussi le verre feuilleté avec gel aqueux : en cas d'incendie, le gel aqueux se transforme sous l'action de la chaleur et libère de la vapeur d'eau ; le gel devient alors opaque et forme un écran isolant pour une durée jusqu'à 60 minutes une barrière thermique contre le rayonnement du feu, la chaleur et les fumées.

Les vitrages « pare-flamme » empêchent le passage de la flamme. Le verre armé se brise mais il reste en place grâce au treillis métallique. Il garde sa transparence et les fissures se ressoudent dès que la température de ramollissement est atteinte. Les flammes ne passent que lorsque le fluage est devenu tel que le verre sorte de la battée supérieure ; le verre trempé peut résister jusqu'à des températures de l'ordre de 200 °C.

II.3.2.9. Le verre fonctionnel

Depuis quelques années, on peut éclairer facilement le fond d'une pièce avec des verres spéciaux. Les verres ont une surface tellement déformées pendant leur fabrication que le rayon qui arrive à la surface est guidé vers la surface suivante de telle sorte qu'il éclaire le plafond et même l'ensemble de la pièce. On peut prévoir par exemple un plafond en forme de biseau au niveau de la fenêtre pour éclairer encore plus loin au fond de la pièce. Les verres fonctionnels sont particulièrement appropriés pour les lanterneaux car ils sont construits pour faire passer un maximum de lumière quel que soit l'angle d'incidence du soleil [33].

II.3.2.10. Le vitrage de toiture

Pour choisir une fenêtre ou un vitrage de toiture, de nombreux critères doivent être pris en considération : lumière, énergie, confort, acoustique, poids propre, charges de vent et de neige, sécurité. Contrairement à une paroi opaque, un vitrage ne fait pas que perdre de la chaleur, il laisse également entrer la lumière et donc... la chaleur du soleil (voir figure II.35.a et b) [46, 47]. Pour diminuer la consommation de chauffage, le meilleur vitrage est celui qui présente la meilleure isolation tout en laissant passer le plus de soleil. La meilleure option consiste à opter pour un double vitrage muni d'une protection solaire extérieure et automatique.

Par exemple, en montagne le verre devra être très épais pour supporter d'importantes charges dues à la neige mais, dans le Sahara, il pourra être beaucoup plus fin. Il faudra donc toujours connaître et estimer la charge pour construire un vitrage [33].

Si les verres doivent être praticables pour le nettoyage ou des raisons de maintenance, il faut le prévoir dès la planification des travaux (voir figure II.35.c) [48]. Cette charge additionnelle doit être incorporée à l'étude statique et des tests spécifiques de comportement doivent être menés. La pente des vitrages ne doit pas être inférieure à 10° par rapport à l'horizontale pour des raisons d'étanchéité et de propreté. Plus la pente est faible, plus l'entretien à apporter aux vitrages sera important. A partir d'une pente de 75° , les vitrages sont assimilables aux vitrages de façade. Le dimensionnement de l'épaisseur suit la réglementation de la norme NF DTU 39 P4 « travaux de vitrerie et miroiterie ».

Dans le cas de vitrage verticaux, la vitre repose dans le châssis sur des blocs qui transmettent le poids propre du verre ainsi que les contraintes du vent (voir figure II.35.b).

Dans le cas de vitrage en pente, le poids du verre et la contrainte du vent ou de la neige sont transmis aux profilés latéraux du châssis par les côtés du vitrage.

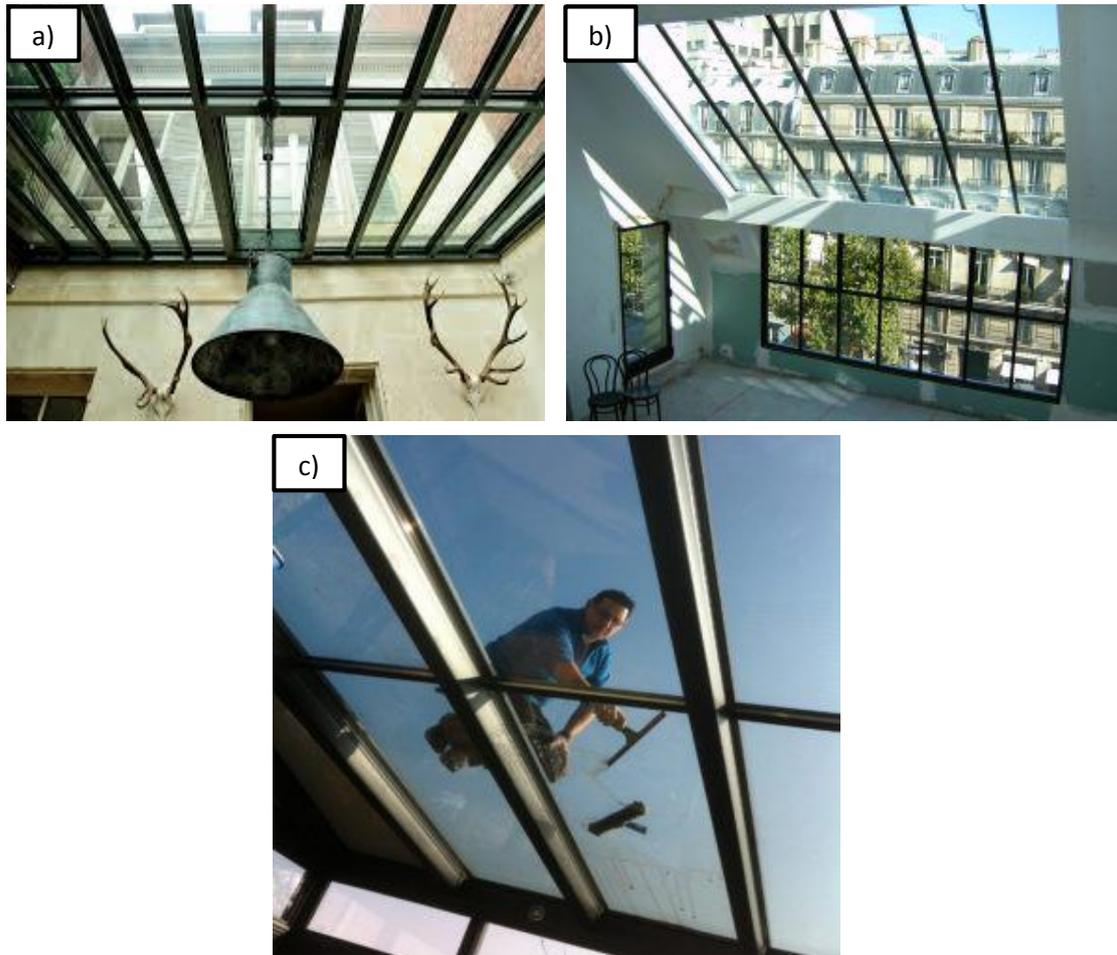


Figure II.35 : Vitrage pour toiture : toiture horizontale (a) ; verticale et incliné (b) ; entretien et sécurité (c) [46-48].

II.3.3. Les verres à base de zircon

Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, il est apparu particulièrement intéressant de renforcer le ciment par des fibres de verre. Un exemple des matières premières et les conditions d'élaboration et de fibrage sont représentés par la composition : 61.5 % SiO_2 , 1 % Al_2O_3 , 16 % Na_2O , 3 % K_2O , 15 % CaO , 17 % ZrO_2 [5].

II.3.3.1. Fibre de verre

La facilité avec laquelle on obtient des tiges ou des fibres de verre provient d'une part de la tension superficielle et d'autre part de la grande augmentation de la viscosité du verre fondu

lorsqu'il se refroidit. Plus on étire rapidement le verre, plus la fibre obtenue est fine. Le verre fondu est filé à travers une filière qui contient des centaines de trous de 1 ou 2 mm environ de diamètre. Les filaments sont étirés à un diamètre final compris entre 5 et 15 μ m, ce qui produit une mèche de fibre de verre. Les fibres de verre sont revêtues pendant le filage d'une résine dont le premier rôle est de protéger les fibres contre l'abrasion. Ce revêtement est appelé *ensimage*. De plus, l'ensimage sert de lubrifiant pour la transformation de la fibre en tissu ou autre produit et d'adhésif avec la résine. Il contient aussi, pour certaines applications, un agent antistatique [49].

II.3.3.2. Application au béton dans le génie civil : béton de fibre

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom : la micro-fibre. Les microfibres peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc... Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferrailage en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment. Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

➤ Types de fibres de verre « E » et « AR »

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore ; Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis (la solution interstitielle du béton est fortement basique) libérés par l'hydratation du ciment.

Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres « AR » (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis. Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue.

➤ Propriétés des fibres de verre

Les caractéristiques mécaniques élevées de ces fibres atteignent les 3000 MPa pour la résistance à la traction [50].

Il faut également souligner leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °C). Ce critère confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.

Les essais en cours doivent permettre d'améliorer l'évolution des caractéristiques du béton de fibres de verre lors de son vieillissement [50].

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;

Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

En préfabrication, les domaines d'application des bétons en fibres de verre sont très vastes. Les fibres de verre permettent la réalisation d'éléments de faible épaisseur (éléments architectoniques, éléments de bardage, panneaux de façade, etc.), de mobilier urbain et de produits d'assainissement. La figure II.36 montre un béton fibré pour dallage.

- Panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé.
- Éléments de bardage et éléments décoratifs.
- Éléments divers : coffret, coffrages, habillages.
- Produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux.

Ils sont en général incorporés avec un taux de 1 à 2% par volume.

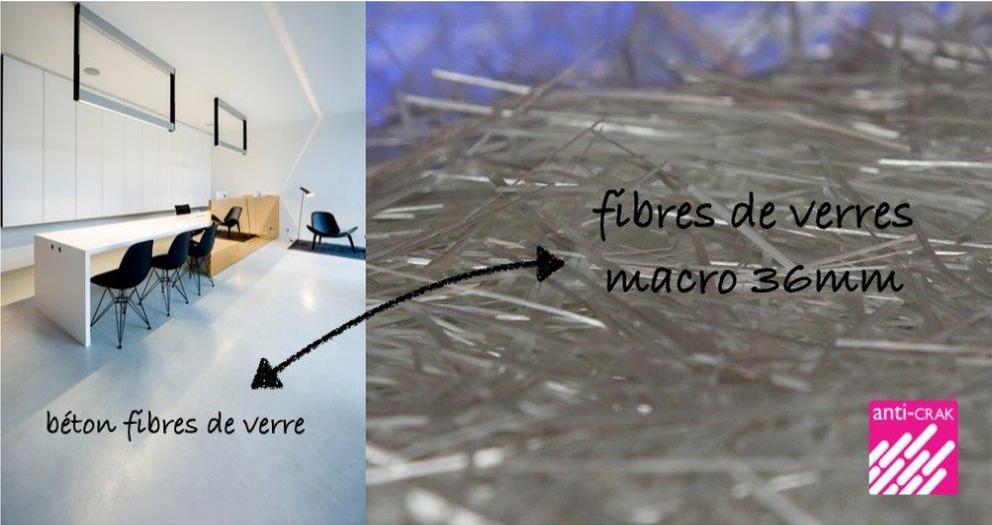


Figure II.36 : Le béton en fibre de verre [51].

CHAPITRE III

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES VITRAGES

III.1. Introduction

Nous avons pu voir les multitudes de vitrages principaux et leur évolution. A chaque situation, l'industrie du verre propose une solution adaptée, performante et élégante. Le choix judicieux des caractéristiques des vitrages permet ainsi une conception optimale de l'enveloppe du bâtiment. Selon leur composition, les vitrages sont une source gratuite de gains solaires et de lumière naturelle ; ils empêchent la chaleur de sortir des pièces et minimisent l'entrée du froid et du bruit ; ils réduisent les problèmes de surchauffe ; ils sont à la base du confort visuel vers l'extérieur en préservant l'intimité vers l'intérieur ; esthétiques, ils embellissent l'habitation [9]. Ce dernier chapitre montre les caractéristiques principales des vitrages qui dépendent de plusieurs facteurs.

III.2. 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 parois froides. L'utilisation de vitrages à haut rendement supprime le phénomène peu confortable de paroi froide et réduit le risque de condensation sur les fenêtres à l'intérieur des pièces [52].

III.3. Le coefficient de transmission thermique U_g

La valeur U_g , exprimée en W/m^2K , est le coefficient de transmission thermique par conduction, par convection et par rayonnement au centre d'un vitrage représenté par la figure III.37. Plus cette valeur est faible, plus l'isolation thermique du vitrage est performante et moins les besoins en chauffage sont importants.

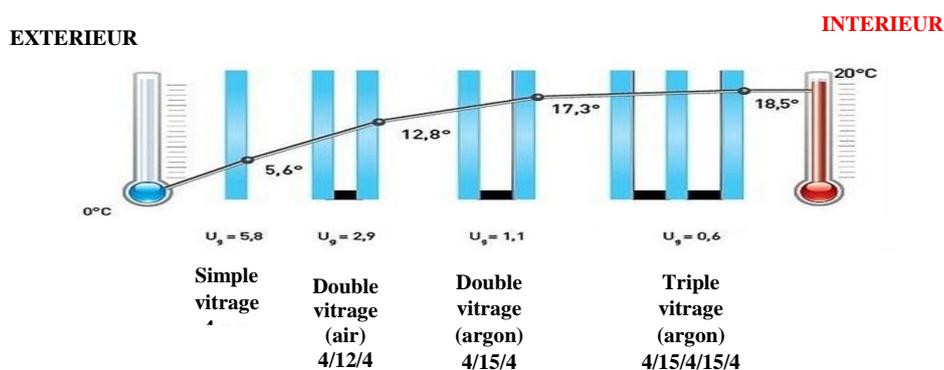


Figure III.37 : Le confort intérieur en fonction des vitrages et du coefficient de transmission thermique [53].

III.4. La transmission lumineuse TL

La transmission lumineuse TL, exprimée en %, correspond à la quantité de lumière naturelle qui pénètre au travers d'un vitrage illustrée par la figure III.38. Plus cette valeur est élevée, plus l'éclairage naturel est important et moins le recours à l'éclairage artificiel est nécessaire.

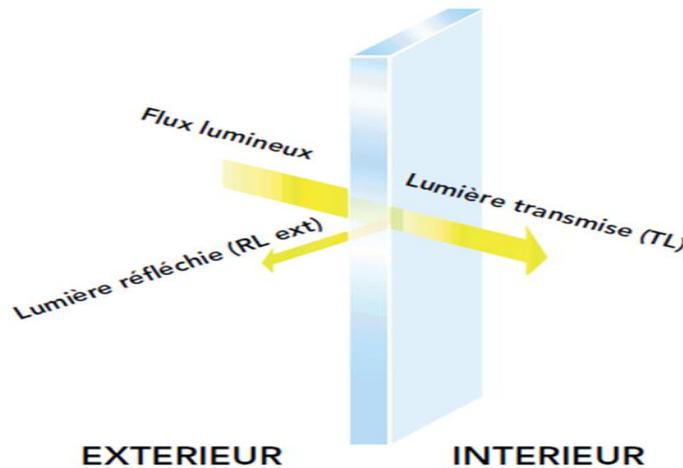


Figure III.38 : La transmission lumineuse TL [54].

III.5. Le facteur solaire g

Le facteur solaire g, exprimé en %, représente la transmission totale d'énergie solaire au travers d'un vitrage. Il s'agit de la somme du rayonnement transmis directement et du rayonnement absorbé qui est réémis vers l'intérieur du bâtiment. Plus ce facteur est élevé, plus les apports solaires sont importants. Le modèle est schématisé par la figure III.39.

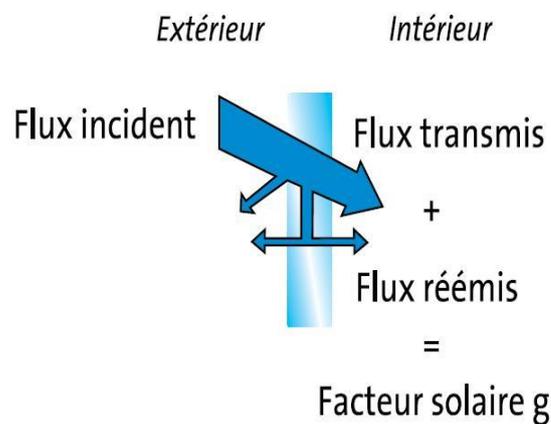


Figure III.39 : Le facteur solaire g [55].

- Prenons l'exemple de calcul pour calculer le coefficient thermique U_g d'une fenêtre à simple vitrage de 4mm.

Selon les normes DIN 4108 et CEN/TC89 [33], les coefficients de résistance thermique et de conductivité thermique pour des panneaux en verre (paroi verticale) avec un angle d'incidence de 60°C sont donnés comme suit :

$$R_i = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W} ; R_e = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W} ; \lambda = 1 \text{ W/m.K}$$

R_i : la résistance thermique d'échange d'une surface intérieure.

R_e : la résistance thermique d'échange d'une surface extérieure.

Pour un vitrage simple de 4mm, la résistance thermique R_g est de :

$R_g = e / \lambda$ avec e = épaisseur du vitrage (4mm).

$$R_g = 0.004 / 1 = 0.004 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ainsi la résistance thermique totale de la paroi du vitrage simple est de :

$$R = R_i + R_g + R_e = 0.13 + 0.004 + 0.04 = 0.174 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

Le coefficient de transmission U_g représente l'inverse de la résistance thermique R total de la paroi et indique la capacité de la paroi à laisser s'échapper la chaleur vers l'extérieur.

$$U_g = 1/R = 1/ 0.174 = 5.75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Le calcul du facteur solaire (g) exprime la transmission énergétique globale, c'est-à-dire le résultat obtenu par addition de la transmission énergétique directe (TED) et de la transmission secondaire de chaleur vers l'intérieur (Q_i) selon la figure ci-dessous III.40.

$$\text{TED} + Q_i = g$$

Pour une protection maximale contre le rayonnement solaire, il doit être le plus faible possible.

La figure ci-dessous d'un simple vitrage montre le flux transmis ainsi que le flux réémis à l'intérieur. Pour un flux de transmission de 84 % et un flux réémis de 2%, nous obtenons un facteur solaire qui est de : $g(\%) = 84 + 2 = 86 \%$ soit $g = 0.86$.

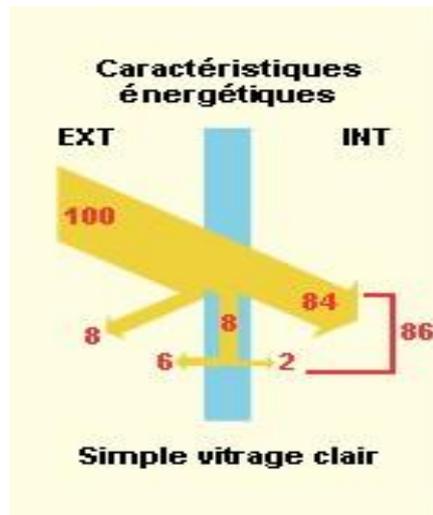


Figure III.40 : Facteur solaire d'un vitrage simple [56].

Exemple de facteur solaire selon le type de bâtiment :

-	Bâtiment lourd	Bâtiment moyen	Bâtiment léger
Est	0.51	0.47	0.36
Sud	0.63	0.60	0.50
Ouest	0.50	0.47	0.35
-	g	g	g

Tableau III. 2 : Facteur solaire minimum de l'ensemble vitrage + protection nécessaire [56].

Les propriétés physiques des vitrages sont mises sous forme de tableau III.3 [57]. On suppose que les doubles vitrages repris dans le tableau ne sont pas dissymétriques et que ces vitrages ne sont pas équipés de verre feuilletés ou de gaz acoustiques. Les valeurs données restent cependant approximatives. En effet, le niveau d'isolation acoustique est fonction aussi de l'épaisseur des verres et de l'espace existant entre les feuilles de verres [57].

Type de vitrage		Coefficient U (W/m ² K)	Transmission lumineuse TL (%)	Facteur solaire g (%)
Simple	clair (8 mm)	5,8	90	86
	clair	2,8	81	76
Double	clair + basse émissivité	1,6	70	55
	clair + absorbant	2,8	36 à 65	46 à 67
	clair + réfléchissant	2,8	7 à 66	10 à 66
	clair + basse émissivité et à contrôle solaire	1,6	71	40
	clair + basse émissivité + gaz isolant	1 à 1,3	70	55
	clair + basse émissivité et à contrôle solaire + gaz isolant	1 à 1,3	71	40
	clair	1,9	74	68
Triple	clair + basse émissivité + gaz isolant	0,6-0,8	65-75	50-70
	clair + basse émissivité (int) + contrôle solaire (ext) gaz isolant	0,6-0,8	60-70	30-40

Tableau III.3 : Propriétés physiques des vitrages [57].

- Calcul de l'épaisseur du vitrage

Le calcul de l'épaisseur d'un vitrage dépend de plusieurs facteurs selon norme NF DTU 39 P4 [58] :

- La pression P
- La situation de zone géographique
- La hauteur du bâtiment
- La pression du vent
- Facteur de réduction (C)
- Facteur d'équivalence (ε) selon le type de vitrage

Si l'on veut déterminer l'épaisseur d'un vitrage isolant avec un composant double feuilleté, l'épaisseur équivalente s'écrit comme suit :

$$e_R = [e_i + \frac{e_j + e_k}{0.9 \times \varepsilon_2}] / 0.9 \times \varepsilon_1 \times \text{Max}(\varepsilon_3)$$

e_R : est égale à la somme des épaisseurs nominales des composant ou épaisseur équivalente pour le calcul de résistance ;

e_i : épaisseur en mm du vitrage simple monolithiques ;

e_j et e_k : épaisseur en mm de chaque composant du feuilleté ;

ε : Facteur ou coefficient d'équivalence.

Exemple (12/...../88.2) ; calculer (e_R)

Soit un double vitrage isolant ($\varepsilon_1=1.6$) avec une face en verre sablé ($\varepsilon_3=1.1$) de 12mm et une face en verre feuilleté de sécurité ($\varepsilon_2=1.3$) trempé ($\varepsilon_3=0.61$) de 88.2. (2 couches de 8 mm).

Donc $e_i= 12$ mm ; $e_j = e_k = 8$ mm

Et le Max (ε_3)=1.1 pour vitrage sablé.

$$e_R = [12 + \frac{8+8}{0.9 \times 1.3}] / 0.9 \times 1.6 \times 1.1 = 16.2mm$$

Soit vitrage isolant de (12/**16.2**/88.2)

III.6. Comment fonctionne un vitrage à haut rendement (HR) ?

Il existe 3 modes de transmission de la chaleur au travers d'un vitrage :

III.6.1. La conduction

Pour minimiser les déperditions d'énergie par conduction, il faut diminuer la conductivité thermique λ du vitrage. Le concept des premiers vitrages isolants consistait à insérer entre deux feuilles de verre ($\lambda_{\text{verre}} = 1 \text{ W/m.K}$) une lame d'air ($\lambda_{\text{air}} = 0,025 \text{ W/m.K}$) afin de diminuer le phénomène de conduction (voir figure III.41). Dans les vitrages à haut rendement, la lame d'air est remplacée par une lame de gaz noble plus performant : $\lambda_{\text{argon}} = 0,017 \text{ W/m.K}$ ou $\lambda_{\text{krypton}} = 0,009 \text{ W/m.K}$.

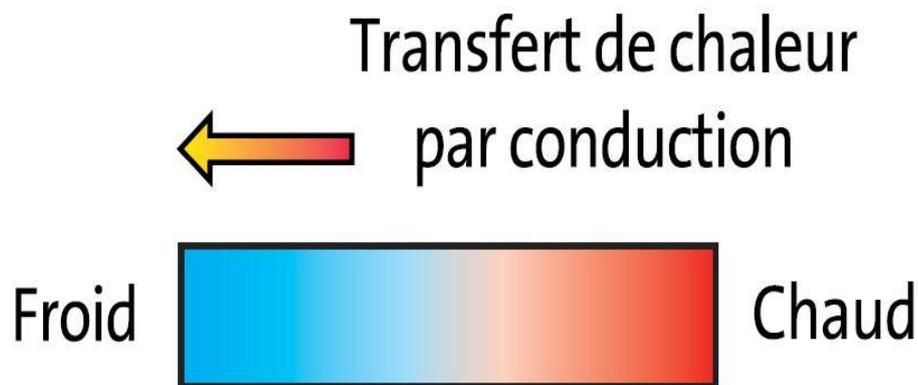


Figure III.41 : Schéma du principe de conduction [59].

III.6.2. La convection

Les gaz nobles utilisés dans les vitrages à haut rendement ont une masse volumique ρ plus élevée que celle de l'air, ce qui rend plus difficile le mouvement des molécules gazeuses dans l'espace et limite donc les déperditions thermiques par convection (voir figure III.42).

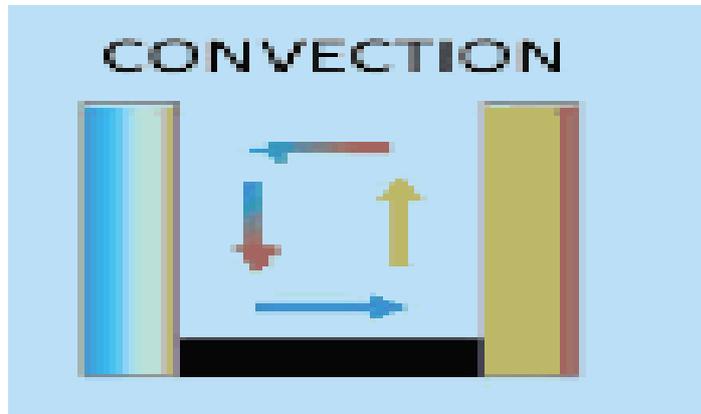


Figure III.42 : Schéma du principe de convection [60].

III.6.3. Le rayonnement

Les objets (appareils électriques, radiateurs...) situés à l'intérieur des bâtiments rayonnent la chaleur sous forme d'infrarouges de grande longueur d'onde selon le modèle de la figure III.43. Une couche métallique à basse émissivité déposée sur le vitrage réfléchit ces infrarouges longs vers l'intérieur du bâtiment tout en étant transparente pour le rayonnement solaire (lumière visible et infrarouges courts). La chaleur et la lumière du soleil peuvent donc pénétrer dans les pièces tandis que la chaleur intérieure est conservée dans les locaux.

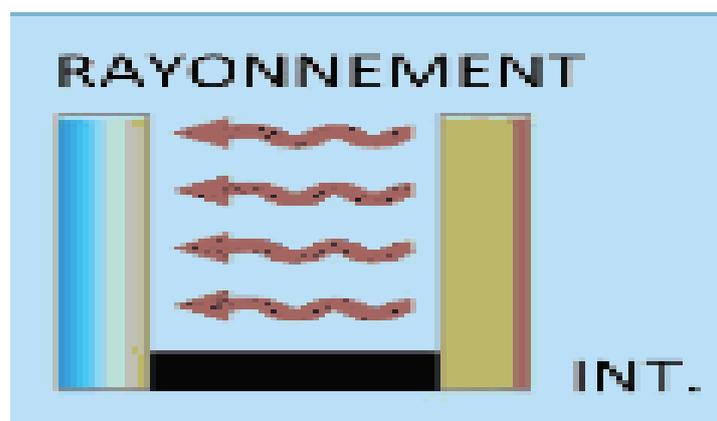


Figure III.43 : Schéma du principe de rayonnement [60].

- **Vitrage SHED : Construction modulaire selon vos besoins.**

La structure shed repose sur un cadre en aluminium avec des profils en aluminium thermo-isolés, adaptatifs à différentes épaisseurs de plaques alvéolaires en polycarbonate ou de verre isolé. Certains éléments peuvent être montés de manière à pouvoir assurer une aération (avec système d'ouverture électrique ou pneumatique). Les systèmes peuvent être utilisés comme exutoires de fumée et sont reconnus comme tels conformément à la directive actuelle de la protection contre les incendies. Grâce aux toitures vitrage shed les pièces sont éclairées d'une lumière naturelle côté nord ce qui évite éblouissements et réchauffement [61]. La figure III.44 ci-dessous illustre une toiture en vitrage SHED.



Figure III.44 : Vitrage Shed, Bronschhofen [61].

Le besoin de grandes surfaces éclairées pour les ateliers à une époque où l'éclairage électrique est encore rare, amène les architectes à cette solution. Le Shed permet donc d'amener la lumière au cœur des ateliers et usines. On oriente généralement le vitrage vers le nord, car la lumière du nord (dans l'hémisphère nord) est constante permettant d'éviter la surchauffe due au soleil direct ainsi que l'éblouissement des travailleurs. La pente du versant vitré peut aller jusqu'à la verticale. Le vitrage Shed apporte beaucoup de lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment sans éblouissement direct tout en minimisant le réchauffement intérieur.

III.6.4. Isolation acoustique du vitrage.

La partie vitrée d'une façade constitue le plus souvent son point faible : ceci est dû aux propriétés acoustiques moindres du verre, mais aussi à l'étanchéité à l'air qu'il faut atteindre malgré les difficultés posées par l'encastrement dans le gros œuvre, le châssis, par la pose de volets roulants, de conduits de ventilation, sans négliger la fatigue résultant des opérations d'ouverture/fermeture [62].

Un son dans un bâtiment peut provenir de l'extérieur (trafic routier, ferroviaire ou aérien, voix dans la rue), des équipements présents dans le bâtiment, des voisins ou de nous-même [63]. Physiologiquement, le bruit est une sensation auditive généralement désagréable ou gênante. Cette notion est subjective. Un bruit pourra être perçu par un individu comme une nuisance sonore du fait de sa durée d'exposition à ce bruit, de son émergence durant une période de sommeil ou du souvenir attaché à ce bruit.

Le son est affaibli en opposant une résistance aux ondes sonores. Cette résistance peut être déterminée très précisément par une mesure en laboratoire. A intervalles réguliers, l'isolation est contrôlée en la soumettant à diverses fréquences et ces valeurs sont enfin réunies, selon des règles précises, en une seule valeur, l'indice d'affaiblissement acoustique R_w . Pour exprimer les choses simplement, l'indice R_w est une valeur moyenne de la gamme audible.

La quantité caractérisant la performance d'isolation d'une fenêtre, d'un vitrage, ou de tout élément de construction est l'**affaiblissement R_w** . D'autres indicateurs sont donnés dans le tableau III.4 selon que l'essai se fait en laboratoire ou in situ.

Il faut d'abord que la pose des fenêtres soit réalisée avec soin et traite bien l'étanchéité des joints. Ensuite, le choix du niveau d'affaiblissement acoustique des fenêtres doit être effectué en fonction de l'ambiance acoustique extérieure au logement. Les niveaux d'affaiblissement acoustique des fenêtres sont exprimés en décibel (dB). Il définit 4 niveaux d'isolation en partant de 28 dB qui est adapté à des ambiances calmes jusqu'à 40 dB pour des ambiances très bruyantes.

La conception de la fenêtre doit aussi prendre en compte le traitement des entrées d'air qui sont indispensables au renouvellement de l'air intérieur des logements. La qualité de l'intégration de cette fonction dans une fenêtre peut influencer notablement sur la performance phonique de celle-ci.

	Bruits de choc	Bruits aérien
Mesures in situ	<p>$L_{nT,w}$: niveau de pression du bruit de choc mesuré in situ.</p> <p>Donne le niveau de bruit résultant du côté inférieur du sol.</p>	<p>$D_{nT,w}$: isolement acoustique standardisé mesuré in situ entre deux locaux.</p> <p>Donne la diminution du bruit mesurée entre deux locaux.</p>
Mesures en laboratoire	<p>$L_{n,w}$: niveau de pression du bruit de choc mesuré en laboratoire.</p> <p>Donne niveau de bruit résultant du côté inférieur du sol.</p>	<p>R_w : Indice d'affaiblissement acoustique mesuré en labo.</p> <p>caractérise l'aptitude d'un matériau ou d'une paroi à atténuer la transmission directe du bruit.</p>

Tableau III.4 : Indicateurs acoustiques [64].

En complément des menuiseries, l'influence du **choix des vitrages** est primordiale. Le vitrage qui représente généralement plus des 3/4 de la surface d'une fenêtre est un élément absolument essentiel de l'affaiblissement acoustique.

Pour les vitrages, l'isolation phonique repose traditionnellement sur les éléments suivants :

- Les épaisseurs des plaques de verre.
- La différence d'épaisseur entre le verre extérieur et le verre intérieur.
- Etanchéité entre les joints.

Ainsi, l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) et la norme SIA 181 spécifient judicieusement que les valeurs d'isolation acoustique s'appliquent à la fenêtre une fois montée et non aux différentes composantes prises individuellement [65].

L'affaiblissement acoustique R_w des vitrages usuels sont reprises dans le tableau III.5. Le vitrage le moins isolant acoustiquement est le double vitrage symétrique 4-15-4, avec un indice d'affaiblissement 29 dB. Cette valeur est inférieure à celle d'un vitrage simple de 4 mm (R_w de 32 dB) à cause d'un phénomène propre aux doubles parois : la chute de l'isolement à la fréquence de résonance. La seule façon de limiter celle-ci est d'alourdir les vitrages et d'augmenter l'épaisseur du vide. Un vitrage 6-16-6 permet ainsi de porter la valeur R_w à 33 Db [66]. Tous les matériaux possèdent une fréquence critique à laquelle leur isolation est plus faible. L'isolation acoustique augmente avec la fréquence [64].

La moins bonne isolation acoustique réalisée par un double vitrage thermique normal enfermant une lame d'air de 6 à 12 mm d'épaisseur par rapport à un vitrage simple est due au fait que les deux panneaux sont intimement couplés par la couche d'air intermédiaire.

Les fabricants ont donc recherché d'autres gaz afin d'atténuer cet effet défavorable. Des mesures effectuées dans divers laboratoires avec différents types de gaz plus lourds ou plus légers ont démontré que le couplage acoustique des deux vitrages était moins fort et procurait une meilleure isolation acoustique.

Il a été démontré théoriquement et expérimentalement que l'isolation moyenne augmentait en fonction de la largeur de la lame. La variation de l'isolation acoustique avec la fréquence est également très importante car la distance entre les panneaux influence en sens divers l'isolement acoustique dans les basses et les hautes fréquences. C'est dans les basses fréquences que la résonance masse-air-masse a la plus grande influence dans le cas d'un double vitrage. Lors de la conception des doubles vitrages destinés à l'isolation acoustique, on s'efforce d'obtenir une résonance masse - air - masse inférieure à 100 Hz. La distance relativement grande nécessaire pour atteindre cette valeur entraîne une baisse de l'isolation thermique par convection.

Type de vitrage	Composition	R _w
Simple	4	32 dB
	8	35 dB
Feuilleté non acoustique	44.2	35 dB
Feuilleté acoustique	44.2A	37dB
Double symétrique	4-15-4	29 dB
	6-16-6	33 dB
Double asymétrique	6-15-4	34 dB
	6-15-10	38 dB
Double feuilleté une face	6-15-55.2	39 dB
Double feuilleté acoustique	8-15-66.2A	43 dB
	10-20-44.2A	45 dB
Double 2x feuilleté acoustique	66.2A-20-44.2A	50 dB
	66.2A-15-88.2A	51 dB
Triple	4-16-4-16-4	32 dB
Triple feuilleté acoustique	6-12-4-12-44.1A	42 dB
Triple 2x feuilleté acoustique	44.1A-12-4-12-44.1A	47 dB
	66.1A-12-6-12-44.1A	50 dB

Tableau III.5 : Caractéristiques acoustiques des différents vitrages [66]. La lettre A signifie acoustique.

- **Recette du succès pour des verres à isolation acoustique de qualité.**

Des vitrages à isolation acoustique performants sont le fruit de la combinaison de diverses mesures: un espace important entre les vitres un montage asymétrique (deux vitres d'épaisseurs différentes), les verres de sécurité feuilletés. Les vitrages isolants peuvent atteindre des valeurs de 50 dB. Cela signifie que 1/100 000 seulement de l'énergie acoustique atteignant le vitrage parvient à l'intérieur de la pièce. Même si notre oreille ne perçoit pas le son de manière linéaire, cela signifie que la valeur perçue correspond à une réduction des nuisances sonores d'environ 97% [65].

III.6.5 Durabilité du verre

Le verre baigne notre civilisation et notre culture depuis des temps immémoriaux. Entre tradition et modernité, c'est un matériau noble, transparent ou coloré, de formes variées. La durée de vie quasiment infinie du verre est due par la composition de ses matières premières naturelles. Le verre est un matériau excellent pour l'environnement. Les performances et la gamme d'applications des produits verriers ne cessent d'évoluer. Employés dans la construction durable, ils font partie des investissements les plus rentables.

Le cycle débute par l'extraction des matières premières, suivie des étapes de production, de distribution et d'utilisation. Il se termine par la fin de vie du produit : réutilisation, recyclage, valorisation énergétique ou élimination. Notamment dans le secteur de la construction, le verre, recyclable sans perte de qualité, à 100% et à l'infini. Il représente le parfait modèle de l'économie circulaire en boucle fermée, le recyclage d'une tonne de verre permet par exemple d'économiser 850 kg de sable, d'économiser une quantité importante d'énergie et d'éviter l'émission de 670 kg de CO₂ [67].

La durabilité du produit ne peut donc être mesurée rigoureusement que via l'analyse de son cycle de vie complet. Selon que le produit est éliminé ou réinjecté dans un nouveau cycle, on parlera de *cradle-to-grave* ou *cradle-to-cradle*. Il existe également des analyses partielles ne permettant pas de déterminer la durabilité : *cradle-to-gate* ou *gate-to-gate*. De même, les divers labels qui ne sont pas basés sur une analyse de cycle de vie complète ne permettent pas d'apprécier la durabilité correctement.

La méthodologie des analyses de cycle de vie est réglementée par la série de normes internationales ISO 14000 [68], et concernant les produits de construction par la norme européenne EN 15804 [69]. Plusieurs indicateurs y sont normalisés afin de quantifier les consommations d'énergie, l'épuisement des ressources, les consommations d'eau, les changements climatiques, l'acidification atmosphérique. Les fiches de déclaration environnementales (EPD) ont été développées à cet effet et présentent de façon standardisée selon la norme internationale ISO 14025 [70] des données vérifiables, cohérentes et comparables, basées sur les analyses de cycle de vie des produits.

IV. Conclusion

Ce polycopié a permis de mettre en avant le matériau verre qui est l'origine d'un long processus d'évolution. Chaque type de vitrage à une destination bien spéciale selon le désir du constructeur, le type de bâtiment et aussi la zone géographique. La propriété de canaliser la chaleur du soleil vers l'intérieur du bâtiment permet aujourd'hui de disposer d'une vaste gamme de possibilité de vitrages. Le verre est devenu aussi un matériau qui peut satisfaire des exigences de sécurité et d'incendie.

Les caractéristiques physiques du verre permettent de donner une évaluation sur le gain de rayonnement et peut donc laisser un rayon pénétrer à l'intérieur d'un bâtiment tout en faisant obstacle aux influences climatiques telles que le vent, la pluie, la neige.

L'utilisation du verre dans la construction est devenue un concept architectural que ce soit en architecture intérieur ou en construction de façades et de toits.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] : Baltus. C et Hauglustaine. J.M, « Types de vitrage, réinventons l'énergie » LEMA, Département d'Architecture et d'Urbanisme, Université de Liège, Belgique, Février 2003.
- [2] : Pajean. G, « L'élaboration du verre » une petite encyclopédie du verre, vol 13 N°5, p 14-17, octobre 2007.
- [3] : Deluzarche. C. Fabrique t-on du verre : <http://www.linternaute.com/science/technologie/comment/06/on-fabrique-du-verre/on-fabrique-du-verre.shtml>
- [4] : Picard. F « le verre et ses propriété » Présentation : <http://slideplayer.fr/slide/10158430/>
- [5] : Barton. J et Guillemet. C, « Le verre science et technologie » EDP Sciences, France, 2005.
- [6] : Riouf Flat Glass « le verre pensé pour vous » Société sous certifications ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001 dans l'usine Eurofloat de Salaise-sur-Sanne, Isère, France,
- [7] : Le Bourhis .E « Le float: une invention révolutionnaire » Institut P'Poitiers. Journée 70 ans de SF2M et de Matériaux, Paris, 20 mars 2015.
- [8] : Livret technique, « Le verre » Document ressource Technologie, ALU-VERRE-PVC.
- [9] : G.Martin « triple vitrage ou vitrage triple » <https://www.gmartin.fr/blog/2015/01/23/triple-vitrage-ou-vitrage-triple/>
- [10] : D. Adams, Cobelver SA et al, « Le verre et les produits verriers – les fonctions des vitrages » Note d'information technique 214, centre scientifique et technique de la construction, Bruxelles, Belgique, Décembre 1999.
- [11] : le Kap Verre : verre et vitrage « verre armé » <http://www.lekapverre.fr/produits-et-applications/verres-et-vitrage/verre-arme>
- [12] : <http://www.archiexpo.fr/prod/glashuette-lamberts-waldsassen/product-62657-926360.html>
- [13] : Les verres profilés : <http://www.miroiteriegbm.com/Les-verres-profiles>
- [14] : Verre trempé/ <http://www.origer.lu/index.php/fr/types-de-verre-verre-trempe-de-securite-feuillete-feuillete-trempe>
- [15] : Plakglass : <https://www.plakglass.fr/epaisseur-du-verre.php>
- [16] : Verre feuilleté décoratif : <http://www.miroiteriesdubrulle.com/produits-et-applications/verres-et-vitrage/verre-feuillete-d%C3%A9coratif>

- [17] : Les principaux critères de choix du double vitrage : <http://menuiserie-vielle.fr/vitrages/double-vitrage-en-question/>
- [18] : Le triple vitrage : http://conseils-thermiques.org/contenu/triple_vitrage.php
- [19] : Condensation sur les fenêtres : explication : <https://mcp-menuiserie.com/nos-dossiers-techniques/explication-de-la-condensation-sur-les-fenetres/>
- [20] : L'isolation thermique des fenêtres, source de confort et d'économies : <https://www.artetfenetres.com/savoir-faire/isolationthermique.html>
- [21] : <https://www.veranda-veranco.com/conseils-pratiques/confort-dans-la-veranda/confort-hiver>
- [22] : Quels types de vitrages de fenêtre choisir ?
<http://www.spp-aluminium.com/particuliers/quels-types-de-vitrages-choisir>
- [23] : <https://french.alibaba.com/product-detail/3-3-to-19-19mm-best-offer-high-quality-photochromic-glass-60271275839.html>
- [24] : Le verre thermochromique Prel-Shade : <http://www.voirvert.ca/nouvelles/innovation/le-verre-thermochromique-prel-shade>
- [25] : Vitres intelligentes : Ceci n'est pas une vitre, c'est l'image d'une vitre !
<https://www.objetconnecte.net/fenetres-intelligentes-futur-0103/>
- [26] : Lehmann. J.C, « Verre et produits verriers d'aujourd'hui et de demain » Bulletin de la S.F.P., vol 150, Juillet-Août 2005.
- [27] : Le verre opacifiant : <http://fecamp-services.com/blog/verre-opacifiant>
- [28] : Etienne. S, « Le verre à couche » 2^{ième} partie, Laboratoire de Physique des Matériaux, UMR CNRS 7756, Pôle Verrier/Cerfav, Nancy, France, Février 2009.
- [29] : Vitrage isolant qui change d'état grâce à l'électricité :
<http://www.batiweb.com/actualites/nouveaux-produits-du-btp/vitrage-isolant-qui-change-detat-grace-a-lelectricite-24-11-2011-19174.html>
- [30] : BIOCLEAN : <http://befr.saint-gobain-glass.com/product/2242/sgg-bioclean-e>
- [31] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitrage_photovolta%C3%AFque_vitrage_photovoltaique
- [32] : Verre photovoltaïque double vitrage : <https://www.onyxsolar.com/fr/verre-photovoltaique-double-vitrage.html>
- [33] : Schittich. C, Balkow. D et al, « Construire en verre » Presses polytechniques et universitaires romandes, Edition en français, Lausanne, Suisse, 2001.

- [34] : Choisir son film vitrage : <https://www.stores-discount.com/conseils/choisir-film-vitre.php>
- [35] : Vitrage sérigraphie : http://www.medglassindustry.com/prescription-fr-vitrage_serigraphie.html
- [36] : Verre pyrolytique : <https://www.pilkington.com/fr-fr/fr/produits/categories-de-produits/applications-speciales/pilkington-optiview>
- [37] : Architecture solaire
<http://www.tamiluz.es/productos/FR-P8-brise-soleil-aluminium-lames-orientables.html>
- [38] : Archi expo : <http://www.archiexpo.fr/fabricant-architecture-design/brise-soleil-bois-17809.html>
- [39] : Store fenêtre de toit pare soleil manuel noir VELUX Mhl mk00 :
<https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/store-fenetre-de-toit-pare-soleil-manuel-noir-velux-mhl-mk00-e61266>
- [40] : brise-soleil en verre / pour façade / vertical
<http://www.archiexpo.fr/prod/sab-international/product-72509-676824.html>
- [41] : volet roulant
<https://www.gefradis.fr/infos/64-les-volets-roulants-renovation-prix-usine>
- [42] : Volet battant : <https://www.volet-system.com/volet-battant-alu-isolant-couleur-2-vantaux-c2x18658848>
- [43] : Le Shoji, panneau coulissant japonais : <http://www.decoration-asiatique.com/panneau-coulissant-japonais-shoji/>
- [44] : Toiles de protection solaire : <https://www.dickson-constant.com/fr/FR/protection-solaire>
- [45] : Vitrage résistant au feu Pyrobel. Brochure AGC, France.
- [46] : Un toit en verre pour sa véranda en acier : de la lumière avant tout : <http://turpin-longueville.com/realisations/veranda-verriere-toiture-verre-double-triple-vitrage.html>
- [47] : La toiture : élément capital de votre bien-être :
<https://www.defimetallerie.fr/fenetres-verandas-exterieures/toiture.html>
- [48] : Nettoyage de vitres, verandas, terrasse, escaliers, toitures :
<http://landroverman.co/veranda-vitre.html>
- [49] : Bathias. C et collection, « Matériaux composites » 2^e Edition Dunod, Paris, France, 2009.
- [50] : Yagoub. M, «évaluation de la qualité du béton de fibres in situ cas de béton auto plaçant avec des fibres mixtes», Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2009.

- [51]: Béton de fibre FiberTech : <http://beton-fibertech.com/francais-2/concept%20beton%20fibre%20bft.html>
- [52] : Fédération de l'Industrie du Verre, « Un autre regard sur les vitrages et leurs fonctions » Deuxième édition, Bruxelles, Belgique, Avril 2013.
- [53] : <https://www.livios.be/fr/info-construction/gros-oeuvre/portes-et-fenêtres/quel-est-le-niveau-isolant-de-vos-chassis/>
- [54] : <http://www.mfg.dz/produits-2/verre-plat/>
- [55] : <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-2-hqe/verre-rayonnement-solaire.php>
<http://www.hqe.guidenr.fr/cible-2-hqe/verre-rayonnement-solaire.php>
- [56] : Facteur solaire : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15428>
- [57] : Tableau des propriétés physiques : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10396#c2234>
- [58] : Document ressource technologie alu-verre-pvc-Fiche 59-A « épaisseur vitrage » Extrait de NF DTU 39 P4 de juillet 2012.
- [59] : <http://www.chauffeeausolaire.info/principes-physiques/>.
- [60] : <http://www.medglassindustry.com/prescription-fr-2.html>.
- [61] : Assainissement du bâtiment historique de construction ferroviaire Schindler à Pratteln/BL « Vitrages shed avec plaques alvéolaires avec ESG/VSG ».
- [62] : Delétré. J.J. « Isolement acoustique » École d'architecture de Grenoble – module 22C-2/02/04- page1
- [63] : « Acoustique du bâtiment-Les Fondamentaux »ISOVER ST-GOBAIN.
- [64] : VAN DAMM.M. « Acoustique : conception et mise en œuvre ». Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement.
- [65] : « Isolation acoustique » Glas Trösch. Suisse.
- [66] : Quels types de vitrages ? <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/quel-type-de-vitrage.html?IDC=8930#4>
- [67] : Fédération de l'Industrie du Verre asbl. Edition 2013.
- [68] : Bulletin No.78/2007. Introduction á iso 14000 systèmes de management environnemental
- [69] : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire -peintures brillantes en phase aqueuse. En conformité avec la norme NF en 15804+a1 et son complément national xp p01-064/CN. novembre 2014.

[70] : International standard ISO 14025 .Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires .First Edition 2006-07-01.