

Collection « Une introduction à »  
Dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

# Le verre

*Un matériau éternel*

**Didier Roux**



EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

## Dans la même collection

*L'énergie solaire photovoltaïque*

Daniel Suchet et Erik Johnson

*Neutrinos, les messagers de l'invisible*

François Vannucci

*L'Univers décrypté par les énigmes*

Cumrun Vafa, traduit par Michel Le Bellac

*Atomes, ions, molécules ultrafroids et technologies quantiques*

Robin Kaiser, Michèle Leduc et Hélène Perrin

*Un siècle de gravitation*

Ron Cowen, traduit par Michel Le Bellac

*Quantique : au-delà de l'étrange*

Philip Ball, traduit par Michel Le Bellac

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>

## Ouvrage publié avec le soutien de Saint-Gobain.



Leader mondial de la construction durable, Saint-Gobain conçoit, produit et distribue des matériaux et services pour les marchés de l'habitat et de l'industrie. Développées dans une dynamique d'innovation permanente, ses solutions intégrées pour la rénovation des bâtiments publics et privés, la construction légère et la décarbonation du monde de la construction et de l'industrie apportent durabilité et performance. L'engagement du Groupe est guidé par sa raison d'être « MAKING THE WORLD A BETTER HOME ».

**ISBN (papier) : 978-2-7598-3177-7 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-3178-4**

© 2024, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

L'ambition de ce livre est d'illustrer à travers les propriétés du verre et son histoire les liens entre la science, la technologie et l'innovation.

En décrivant ce matériau aux propriétés extraordinaires, nous présenterons de façon très simple les principes physiques permettant d'en comprendre la nature et les propriétés en donnant des explications dans le texte ou par des encarts spécifiques.

Nous illustrerons aussi comment la technologie a permis de développer des procédés uniques et pourquoi l'évolution de ces procédés a conduit à des produits répondant aux besoins du marché. Le lien entre économie et technologie sera une des lignes directrices de ce texte.

À chaque fois, nous donnerons une illustration prise dans la vie courante ou liée à une histoire des propriétés du verre. Les riches documentations des archives de Saint-Gobain et de Corning apportent un complément illustratif à ce livre :

<http://www.saint-gobain350ans.com/#!/fr>

<https://www.cmog.org/francais>



# Table des matières

L'auteur	vii
Introduction Les merveilles du verre	1
1 D'où vient le verre ?	9
2 Les propriétés exceptionnelles du verre	21
3 L'utilisation incontournable du verre	27
4 Le contrôle des propriétés	35
5 La fabrication du verre	53
Conclusion	81
Remerciements	85
Bibliographie	87
Biographies	89



## L'auteur

Didier ROUX est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies.



Didier Roux est né en 1955, ancien élève de l'ENS de Saint-Cloud, membre du CNRS de 1980 à 2005. Il est lauréat de nombreux prix et distinctions. Il est titulaire de la médaille d'argent du CNRS. Il crée deux start-ups en 1994 et 1998, il est directeur scientifique adjoint de Rhône-Poulenc puis de Rhodia entre 1997 et 2005. Il occupe entre 2005 et 2017 le poste de directeur de la R&D et de

l'innovation du groupe Saint-Gobain. Il est membre de l'Institut de France (Académie des sciences) et de l'Académie des technologies. Il a été professeur au Collège de France (chaire annuelle 2016-2017 Innovation technologique Liliane Bettencourt). Il préside ou est membre de nombreux conseils scientifiques (Cyprus Institute, École des mines, École des ponts et chaussées, CEA, OPECST, HCERES...) et siège au conseil d'administration de plusieurs PMI/PME. Il est président d'Unitec : une technopole qui s'occupe d'accompagner des start-ups et est président de la fondation La Main à la pâte qui promeut l'enseignement des sciences à l'école.

# Introduction

## Les merveilles du verre

Le verre est un matériau universel connu depuis des millénaires. Depuis sa découverte, il a été façonné par l'homme qui lui a trouvé de nombreux domaines d'applications. Qui parle de verre parle de transparence et c'est effectivement une propriété extraordinaire. En effet, jusqu'au développement récent des matières plastiques dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, il était l'unique matériau solide pouvant être produit en grande quantité avec cette propriété intrinsèque, unique et merveilleuse : la transparence. Seules les pierres précieuses qui sont des monocristaux<sup>1</sup>, par essence rares et précieux, avaient cette même propriété. Du fait de sa transparence, nous retrouvons le verre dans de très nombreuses applications. De façon spectaculaire, il est à l'origine de notre capacité de voir le monde qui nous entoure depuis les objets les plus petits jusqu'aux grandes structures de l'Univers. Il est l'élément essentiel des microscopes optiques dont les lentilles de verre nous permettent de voir l'intérieur des cellules avec une résolution exceptionnelle (figure 1).

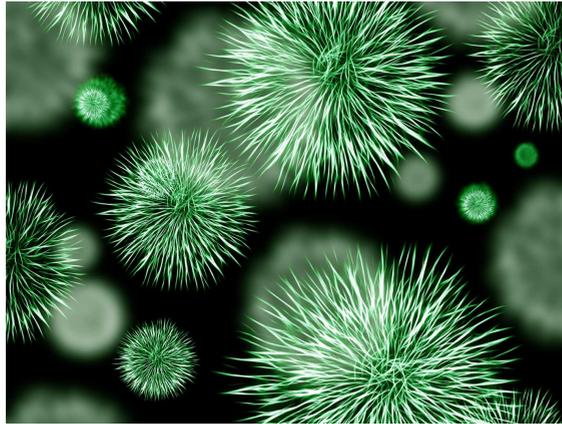
Mais c'est aussi grâce au verre que nous sommes capables d'observer les objets les plus lointains. On peut ainsi, depuis l'existence des premières lunettes astronomiques jusqu'aux télescopes actuels, observer les planètes, les étoiles et les galaxies qui nous entourent (figure 2). Les miroirs des immenses

---

<sup>1</sup> Un monocristal est un arrangement parfaitement ordonné d'atomes ou de molécules. C'est l'état le plus stable de la matière condensée, mais les monocristaux sont la plupart du temps de petite taille. Seules des conditions contrôlées permettent d'obtenir des monocristaux de taille importante (de plusieurs millimètres à plusieurs centimètres en général). Le plus souvent, un solide est formé de multiples cristaux de petite taille (structure multicristalline).



(a)



(b)

**FIGURE 1.** (a) Microscope. Les éléments essentiels d'un microscope sont les lentilles en verre qui permettent le grossissement des objets. Leur qualité optique définit en grande partie la qualité du microscope. (b) Cellule sous microscope de fluorescence. C'est grâce au développement de la microscopie optique que la biologie a fait de spectaculaires progrès. Les développements récents de la microscopie de fluorescence ont permis d'observer avec une grande précision les organismes vivants, ici des bactéries.



(a)



(b)

**FIGURE 2.** Le verre est un élément essentiel des appareils optiques pour l'astrophysique : lunettes astronomiques et télescopes. Cela demande non seulement des procédés particuliers pour gérer l'indice de réfraction du verre et la transmission de la lumière à différentes longueurs d'onde (caractérisant la couleur), mais aussi une qualité de mise en forme et de surface particulièrement soignée. (a) Nébuleuse NGC2207-Nasa, formée de deux galaxies en train de fusionner, observée avec le Hubble Space Telescope. Crédit NASA/jPL-Caltech/STScI/Vassar. (b) Photo du miroir du Hubble Space Telescope.

interféromètres comme ceux de Virgo (35 cm de diamètre d'une surface quasiment parfaite) permettent aujourd'hui la détection des ondes gravitationnelles, ce qui constitue une véritable révolution pour l'astrophysique et la cosmologie.



**FIGURE 3.** La maison de verre ou maison de Johnson, construite en 1949 à New Canaan, dans le Connecticut aux États-Unis, a été conçue par Philip Johnson et son collaborateur Richard Foster pour sa résidence principale. Avec sa maison de verre, Philip Johnson, en continuateur des recherches de l'architecture de son époque et notamment du Bauhaus, réalise un fantasme de l'architecture moderne : la transparence.

Dans notre vie de tous les jours, la propriété de transparence du verre est aussi omniprésente, par exemple dans nos vitrages. Indispensable pour faire entrer la lumière naturelle dans notre habitat, une vitre nous permet de voir le monde extérieur de l'intérieur et réciproquement (figure 3).

D'autres propriétés du verre sont tout aussi étonnantes : la durabilité que l'on peut illustrer par les merveilleux vitraux de la cathédrale de Chartres, qui datent, pour certains, du XII<sup>e</sup> siècle et dans leur grande majorité du XIII<sup>e</sup> siècle, comme ceux de la Sainte-Chapelle à Paris (figure 4).

Il faut aussi noter que la neutralité du verre dans les interactions avec d'autres matériaux (gazeux, liquides ou solides) en a fait le matériau rêvé des alchimistes puis des chimistes. Parfaitement imperméable aux gaz et aux liquides, résistant à l'attaque de la majorité des produits chimiques, le verre est omniprésent dans un laboratoire de chimie (figure 5).

Au fil du temps, nous avons aussi appris à le rendre résistant à la température, ce qu'il n'est pas naturellement. Nos cuisines modernes sont équipées de plaques en vitrocéramique qui permettent par induction de cuire et de chauffer nos aliments (figure 6).

Le verre résiste aussi aux contraintes mécaniques comme la compression et la traction. Il est capable, sans casser, de supporter de lourdes charges, comme illustré par le test de chercheurs du laboratoire de recherche de Saint-Gobain en 1929 montant sur une plaque de verre en équilibre sur deux piliers éloignés. De façon encore plus spectaculaire, il peut résister à la traction des éléphants maintenus par une plaque de verre en suspension (figure 7).



**FIGURE 4.** Vitraux de la Sainte-Chapelle. Les vitraux ont été une application emblématique du verre qui s'est développée au XII<sup>e</sup> et surtout au XIII<sup>e</sup> siècle. À cette époque, le coût des vitraux pouvait représenter jusqu'à la moitié du coût total du bâtiment.



**FIGURE 5.** Verre dans un laboratoire de chimiste : le verre résiste à énormément de produits chimiques. Cette propriété, combinée avec la facilité de sa mise en forme pour réaliser de nombreux dispositifs, en fait le matériau par excellence utilisé dans tous les laboratoires de chimie.

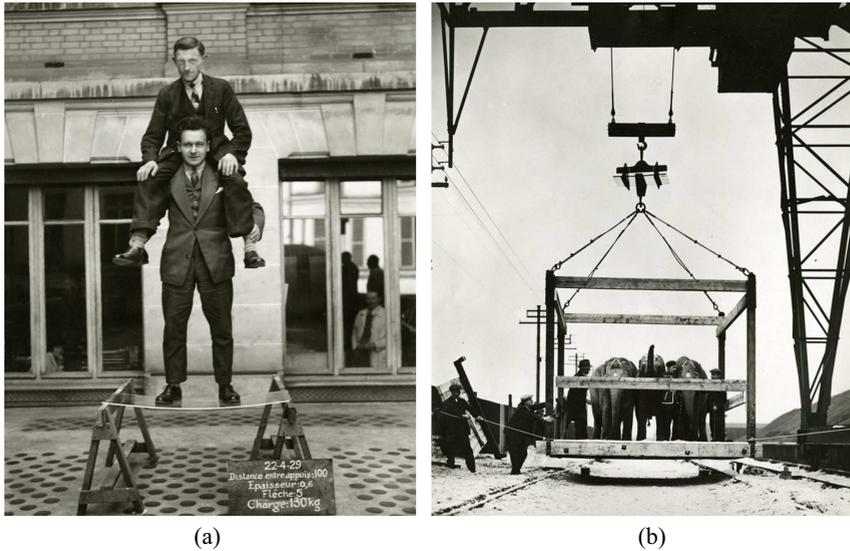


**FIGURE 6.** Plaque de vitrocéramique : ce verre très spécial résiste aux changements de température par la cristallisation partielle du verre. Elle permet d'avoir un matériau qui ne change pas de dimension avec la température grâce à la compensation de la contraction des nanocristaux avec la chaleur par la dilatation de la matrice en verre qui les entoure.

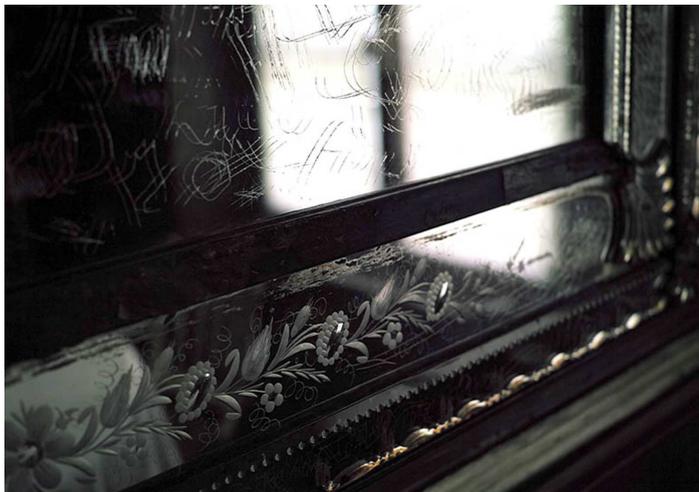
Le verre est aussi un matériau d'une dureté exceptionnelle. Nous pouvons illustrer cette propriété par les traces encore visibles sur les miroirs des salons du restaurant Lapérouse à Paris. En effet, ces miroirs portent encore des rayures faites au XIX<sup>e</sup> siècle par de belles courtisanes qui se voyaient offrir de luxueux diamants, pour preuve de leur intérêt par des galants – on parle même de sénateurs – qui les invitaient à dîner. Elles testaient la qualité des pierres par leur capacité à rayer le verre (figure 8).

Le verre a aussi cette propriété d'être un solvant remarquable dans lequel se dissolvent toutes sortes de minéraux. Ceci est dû, comme nous le verrons plus loin, à la structure non cristalline du verre qui, comme un liquide, accepte l'introduction de corps étrangers. L'une des illustrations nous montre un morceau de verre dans lequel des déchets nucléaires ultimes sont solubilisés en vue de leur enfouissement futur (figure 9).

Enfin, la propriété peut-être la plus intéressante, à la base de son utilisation si diversifiée, est la variation continue de la viscosité du verre avec la température, ce qui permet de le mettre en forme de façon unique grâce à de nombreux procédés utilisant tous cette étonnante particularité (figure 10). La variation de la viscosité est énorme sur une gamme de température accessible.



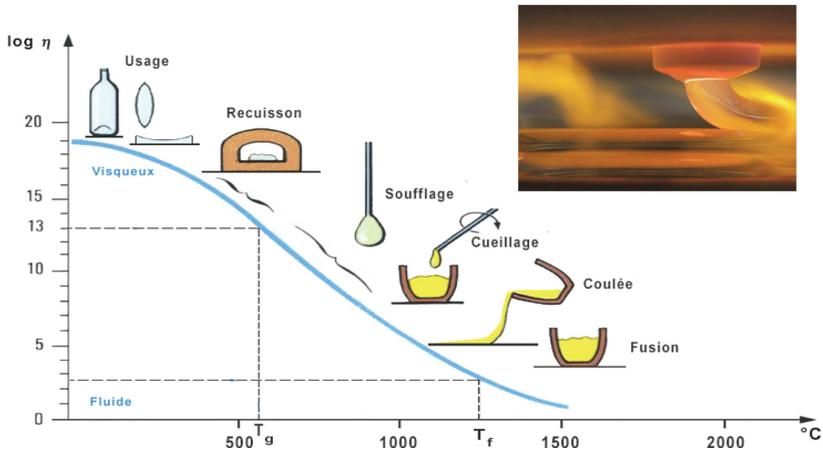
**FIGURE 7.** Le verre est un matériau très solide qui résiste à la traction et à la compression. Cette propriété mécanique est illustrée par les deux figures suivantes. (a) Deux chercheurs du centre de recherche de Saint-Gobain testant en 1929 la résistance mécanique d'une plaque de verre. (b) Trois éléphants suspendus à une plaque de verre. © DR / Archives de Saint-Gobain.



**FIGURE 8.** Miroirs des salons du restaurant Lapérouse à Paris. Des sénateurs au XIX<sup>e</sup> siècle avaient pour habitude d'inviter des courtisanes dans les salons du restaurant Lapérouse à Paris et de leur offrir des bagues en diamant. Ces dames testaient la qualité de la pierre offerte en rayant le verre des miroirs, s'assurant ainsi de la valeur du cadeau. © DR.



**FIGURE 9.** Des déchets nucléaires ultimes dissous dans du verre en vue de leur enfouissement. Le verre est un très bon solvant permettant de dissoudre bien des composés, en particulier des ions minéraux. Ceci est illustré par la dissolution de déchets nucléaires dans du verre avant l'encapsulation dans un récipient en acier, préalable à l'enfouissement. © DR.



**FIGURE 10.** Variation de la viscosité du verre en fonction de la température. Le verre passe continûment d'un matériau liquide à très haute température à un matériau solide à température ambiante. Il est un matériau pâteux puis visqueux sur une plage de température de l'ordre de mille degrés. Cette propriété est largement exploitée dans les procédés de formage (mise en forme) des objets en verre. On voit que la viscosité (sur l'axe vertical en échelle logarithmique) varie par des facteurs de l'ordre de plusieurs dizaines de milliards quand la température passe de l'ambiante à 1 350 °C. La variation de la viscosité peut être de l'ordre de 1 000 ou plus sur quelques dizaines de degrés. Adapté de <http://www.astrosurf.com/luxorion/miroir-specifications-verres.htm>.

C'est aussi un des premiers matériaux recyclables à l'infini qui est effectivement recyclé de façon industrielle depuis plusieurs années dans un bon nombre de pays.



# 1

## D'où vient le verre ?

Le verre est fabriqué à partir de la silice qui est le composant majoritaire. Chimiquement parlant, la silice est du dioxyde de silicium, de formule chimique  $\text{SiO}_2$ . La silice est l'élément le plus abondant de la croûte terrestre continentale (60 %). On peut la trouver principalement sous forme pure dans certaines roches ou sous la forme de silicate ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) associé à un contre-ion<sup>2</sup> donnant par exemple des silicates de sodium, de potassium ou de calcium pour les minéraux les plus courants. La forme cristalline du dioxyde de silicium pur est le quartz (appelé aussi cristal de roche). Le quartz fond à des températures supérieures à 1 600 °C et on le retrouve souvent comme un des composés majoritaires du sable. Lorsque l'on fait fondre du quartz, on obtient le plus souvent, en le refroidissant ensuite, une structure multi-cristalline<sup>1</sup>. Le quartz est loin d'avoir toutes les propriétés du verre ; en particulier, il ne bénéficie pas d'une viscosité variable avec la température, ce qui est une des caractéristiques essentielles du verre et se révèle une propriété essentielle pour la fabrication d'objets en verre, comme nous le verrons plus tard.

La découverte du verre n'est pas vraiment connue, mais elle remonte vraisemblablement à l'Antiquité. Il existe une histoire probablement romancée rapportée par Pline l'Ancien (voir biographie B1) dans le livre XXXVII de son *Histoire naturelle* :

« On raconte que des marchands phéniciens, ayant fait relâche sur le littoral du fleuve Bélus, préparaient leur repas, dispersés sur le

---

<sup>2</sup> Un contre-ion est une molécule ou un atome ionisé de charge opposée à un ion ; ensemble ils forment un sel (par exemple, le contre-ion du chlore ionisé négativement (Cl) peut être du sodium ionisé positivement ( $\text{Na}^+$ ) formant ainsi le sel dit de cuisine (NaCl).

rivage. Ne trouvant pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils employèrent à cet effet des pains de natron sortis de leur cargaison. Ce nitre ayant été ainsi soumis à l'action du feu se transforma avec le sable répandu sur le littoral du fleuve : **ils virent couler des ruisseaux transparents d'une liqueur inconnue. Telle fut l'origine du verre.** »

Une figure célèbre illustre ce phénomène (figure 11).



**FIGURE 11.** Découverte par les Phéniciens du verre selon l'histoire de Pline l'Ancien. « On raconte que des marchands phéniciens, ayant fait relâche sur le littoral du fleuve Bélus, préparaient leur repas, dispersés sur le rivage. Ne trouvant pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils employèrent à cet effet des pains de natron sortis de leur cargaison. Ce nitre ayant été ainsi soumis à l'action du feu se transforma avec le sable répandu sur le littoral du fleuve : ils virent couler des ruisseaux transparents d'une liqueur inconnue. Telle fut l'origine du verre. » © Jules Rouff et Cie, éditeurs, Paris, 1890-1900.

## Comment expliquer ce phénomène ?

Le sable du littoral du fleuve Bélus est composé en grande quantité de silice tandis que le natron est une forme naturelle de carbonate de sodium que l'on trouve autour du bassin méditerranéen. Nous savons maintenant que le sodium ajouté à la silice a comme effet d'abaisser son point de fusion (passant de  $1\,650\text{ °C}$  à environ  $1\,000\text{ °C}$  selon la concentration), mais loin de fondre brutalement en passant de l'état solide à l'état liquide, comme le ferait de la glace se transformant en eau par exemple, le matériau « s'amollit » continûment pour passer de l'état solide à une sorte de pâte vers  $800\text{ °C}$  puis à une « liqueur » vers  $1\,000\text{ °C}$

(ressemblant à du miel). Ensuite, à plus haute température et toujours de manière continue, il donne un liquide de moins en moins visqueux au fur et à mesure que la température s'élève. C'est donc le mélange du sodium contenu dans le natron avec la silice présente dans le sable qui, sous l'effet de la température élevée due au feu, a permis de « fabriquer » pour la première fois du verre. Cette histoire est contestée par de nombreux historiens, mais elle est tellement belle qu'elle mérite d'être racontée. Belle, mais aussi en partie crédible, car, comme souvent, les innovations résultent d'une découverte accidentelle doublée de la présence d'un esprit d'observation affûté sachant réutiliser par la suite de façon constructive cette découverte. C'est ainsi que les premiers verres fabriqués étaient un mélange de sable (silice) et de carbonate de sodium permettant d'obtenir une pâte de verre à des températures accessibles avec un feu de bois.

Quel que soit l'inventeur du verre ou la véracité de l'histoire contée par Pline, on sait maintenant que plus de mille ans avant Jésus Christ, il existait déjà de nombreux endroits où l'on fabriquait du verre. Probablement née en Mésopotamie plusieurs milliers d'années avant notre ère, la fabrication du verre s'est développée autour du bassin méditerranéen. Mais le verre naturel issu des éruptions volcaniques (obsidienne) était utilisé dès le néolithique (7 000 ans av. J.-C.), en particulier pour les propriétés tranchantes de ce matériau pour en faire des raclours et des couteaux. On retrouve des objets en verre de l'époque des Égyptiens et la première recette d'un procédé verrier datant de 658 av. J.-C. dans la bibliothèque du roi assyrien Assurbanipal. Dans certains endroits, du fait de l'accès aux matières premières, la pâte de verre brute était fabriquée dans des fours adaptés, puis ce verre brut (appelé maintenant calcin) voyageait autour de la Méditerranée pour être transformé au plus près des consommateurs.

L'ajout d'un fondant, le sodium (Na) dans l'exemple décrit par Pline (mais cela peut être aussi le potassium (K) que l'on obtient à partir de la cendre de certains végétaux) permet d'obtenir ces deux propriétés essentielles utiles pour la mise en forme du verre que sont d'une part l'abaissement du point de fusion rendant accessible la fabrication du verre avec des fours à bois, d'autre part et surtout cette exceptionnelle variation continue de la viscosité largement utilisée dès les origines pour la fabrication des objets en verre. Assez rapidement, les utilisateurs de verre composé essentiellement de silice et d'un fondant se sont aperçus que ce verre de sodium et de silice était sensible à l'eau et avait tendance à se détériorer au cours du temps. Une amélioration notable a été de s'apercevoir que l'ajout de calcium dans la préparation des verres (sous la forme de carbonate de calcium le plus souvent) permet de diminuer sensiblement cette érosion par l'eau et rend ainsi le verre bien plus durable. Ce mélange de silice, sodium et calcium est à l'origine de la composition moderne du verre sodocalcique. Ce

sont ces trois constituants les plus courants qui caractérisent ce qu'on appelle aujourd'hui le verre, bien que d'autres compositions et de nombreuses variantes existent.

Ainsi, comme le décrit Augustin Cochin (voir biographie B2) dans son livre sur Saint-Gobain<sup>3</sup> :

« Voilà donc la vérité sur tous ces profonds mystères de Murano, de la Bohême et de Saint-Gobain ! Une glace est un objet précieux tiré des matières les plus vulgaires. »

Comme nous l'avons vu, l'innovation qui a permis l'invention du verre vient de l'addition de sodium à de la silice. Mais que se passe-t-il d'un point de vue microscopique ?

La silice est constituée principalement d'un réseau de molécules de dioxyde de silicium liées les unes aux autres par des liaisons fortes. Cette structure se développe dans l'espace et elle forme un cristal dans lequel les atomes de silice et d'oxygène sont placés sur un réseau périodique parfaitement organisé. Ce type de structure s'appelle une structure cristalline<sup>1</sup>. Du fait de la périodicité de l'arrangement, il est possible, à partir de la position d'un atome et de la connaissance de sa structure cristalline<sup>4</sup>, de positionner dans l'espace tous les autres atomes. On pourrait comparer cette organisation à un tas d'oranges bien rangées sur l'étal d'un marchand dans lequel vous pouvez connaître la position exacte de toutes les oranges. L'adjonction de sodium vient perturber ce réseau bien ordonné en formant un réseau contenant des silicates de sodium. Dans la formation des silicates ( $\text{SiO}_3\text{Na}_2$ ), une partie des liaisons Si-O est rompue et l'ordre cristallin a beaucoup plus de difficultés à se former. Les atomes de silicium et d'oxygène se trouvant alors dans une configuration désordonnée, comme si, pour reprendre l'exemple précédent, le tas d'oranges était maintenant en vrac. Ce désordre est la caractéristique structurelle du verre et la raison de sa spécificité.

On appelle de façon générique « verre » les arrangements solides non cristallins constitués par un désordre des atomes ; le terme de matériau amorphe est aussi souvent utilisé pour caractériser cet arrangement non ordonné d'atomes ou de molécules. Les verres de silice décrits plus haut sont de loin les plus abondants, mais il existe de nombreux autres types de verre. Le sodium joue donc le rôle de perturbateur et il est à l'origine de la difficulté à construire un ordre cristallin lorsque le verre fondu est refroidi. Sans sodium, le verre (ou la

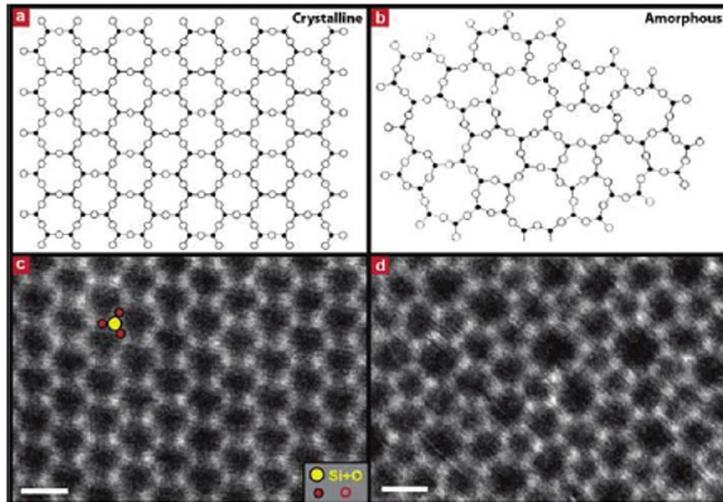
---

<sup>3</sup> Augustin Cochin, *La Manufacture des glaces de Saint-Gobain de 1665 à 1865*, Paris Douniol et Guillaumin in-8° [https://books.google.co.in/books?id=J19xQAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.in/books?id=J19xQAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

<sup>4</sup> Les arrangements des structures cristallines sont de 14 types bien définis par des réseaux à trois dimensions : les réseaux de Bravais. Les plus connus sont : cubiques, hexagonaux, monocliniques.

silice?) cristalliserait facilement. Quelques pourcents en poids de sodium suffisent à maintenir le désordre caractéristique du liquide lors de l'abaissement de la température. Dans un verre, ce désordre qui change brutalement du liquide au solide, se maintient au fur et à mesure de l'abaissement de la température. C'est aussi ce qui explique que le verre « fond » à plus basse température que la silice (voir encadré 1).

Ces structures sont illustrées sur la figure 12.



**FIGURE 12.** Réseau cristallin de silice et structure de la silice amorphe (verre). Alors qu'un solide cristallin correspond à une organisation périodique des atomes, dans un solide amorphe, les mêmes atomes sont positionnés de façon désordonnée. La figure illustre ces deux arrangements par des dessins à deux dimensions et une photo de ces structures prise avec un microscope électronique. © DR.

Le sodium n'est pas le seul matériau utilisable comme fondant, le potassium a la même fonction ainsi que le magnésium. Le cas du potassium est intéressant, car il a été très utilisé dès l'Antiquité. En effet, comme on l'a vu précédemment, le sodium peut provenir d'une roche naturelle (le natron : carbonate de sodium), mais l'on s'est aperçu, au cours des siècles, que l'on pouvait utiliser comme fondant de la cendre de certains végétaux (fougères ou algues) ou le salpêtre (nitrate de potassium). Dans ces derniers cas, l'apport ne correspond pas toujours à du sodium, mais peut aussi être du potassium (ou bien un mélange de sodium et de potassium). Cette technique a été beaucoup utilisée dans des régions où il était plus facile de se procurer ces matériaux que le natron.

## Encadré 1 – Les différents états de la matière

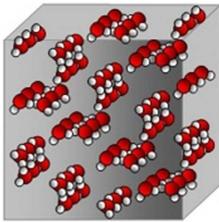
La matière qui nous entoure se présente le plus souvent sous la forme de solide, de liquide ou de gaz. Nous savons tous que le même matériau<sup>5</sup> peut, en fonction de la température, se trouver sous l'une ou l'autre de ces formes. L'eau à pression atmosphérique est solide en dessous de 0 °C, liquide au-dessus de 0 et gazeuse au-dessus de 100 °C. C'est certainement le matériau le plus familier que nous pouvons observer sous ses trois phases. Le passage d'une phase à l'autre se fait par modification de la température ou de la pression. Dans la phase solide, les molécules constituant la matière sont parfaitement organisées sur un réseau tridimensionnel périodique : c'est la forme cristalline. Les molécules sont liées entre elles par une force attractive, le matériau est résistant à une sollicitation mécanique et n'a pas besoin d'un récipient pour maintenir sa forme. À plus haute température, ce matériau fond et passe à l'état liquide. Les molécules restent proches les unes des autres, mais perdent leur positionnement régulier dans l'espace. Agitées d'un mouvement aléatoire (mouvement brownien), elles changent de position constamment, mais restent en contact les unes avec les autres. Le matériau est alors fluide, il prend la forme du récipient dans lequel on le verse, mais il occupe un volume correspondant à la quantité de matière qui le compose. À plus haute température, les molécules se séparent les unes des autres, envahissent tout l'espace disponible : on obtient un état gazeux. Les molécules sont en mouvement constant, elles se choquent entre elles et sur les parois du récipient dans lequel elles sont confinées, mais elles ne sont pas « collées » les unes aux autres.

Ces différentes phases résultent d'une compétition entre la nature attractive des interactions entre les molécules qui composent la matière et l'effet de la température qui tend à disperser ces mêmes molécules. À basse température, ce sont les interactions qui dominent et la matière s'organise dans un état où ces interactions sont optimisées : on appelle cela le cristal. À très haute température, l'effet de la température domine et les molécules sont le plus dispersées possible : l'effet des interactions est négligeable, on est à l'état gazeux. À des températures intermédiaires, les interactions et l'effet de la température sont du même ordre de grandeur : la matière est à la fois condensée (du fait des interactions) et désordonnée (du fait de l'effet de la température), c'est l'état liquide.

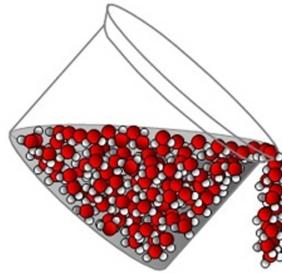
<sup>5</sup> Ce n'est pas le cas de tous les matériaux, mais de beaucoup, certains subissent soit une dégradation chimique (le bois par exemple) avant de se transformer soit passent directement du solide au gaz (par exemple la carboglace, ou le CO<sub>2</sub> solide en dessous de -78,5 °C qui, à pression atmosphérique, se sublime en gaz directement sans passer par l'état liquide)

L'état vitreux (le verre) correspond à un état où, comme dans le liquide, les molécules sont dans une organisation désordonnée, mais où elles ne se déplacent pas (ou peu) les unes par rapport aux autres : elles sont figées. Il n'est pas encore établi, de nos jours, si cela correspond à un état solide qui n'a pas pu atteindre son état d'équilibre cristallin du fait de la lenteur à mettre en place cette organisation (liquide en surfusion...), ou bien si cela correspond à un nouvel état de la matière (figure E1).

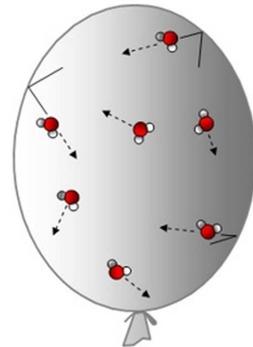
## L'EAU ET LES ÉTATS DE LA MATIÈRE



**SOLIDE**  
*glace*



**LIQUIDE**



**GAZ**  
*Vapeur d'eau*

Ao-toulouse / GL / image libre de droit

**FIGURE E1.** – Différents états de la matière : solide, liquide ou gaz. Le solide correspond à un arrangement dense, ordonné, périodique des atomes. Le liquide correspond à un arrangement dense, mais désordonné des atomes, et le gaz à un arrangement diffus (qui remplit tout l'espace) des atomes.

## Encadré 2 – Les fours à goémon

Parmi les sources de fondant, la cendre de goémon (quelquefois le terme varech est utilisé) a été particulièrement prisée jusqu'à ce qu'elle soit détrônée par l'utilisation de carbonate de soude issu du procédé Leblanc puis du procédé Solvay (encadré 3). Lorsque l'on se promène sur la côte bretonne, on trouve encore fréquemment des tranchées rectangulaires : ce sont les restes de fours qui permettaient de « brûler » les algues laminaires récoltées dans la mer et sur le rivage. Ces algues, ou goémon, qu'on laisse sécher dans un premier temps, sont ensuite brûlées dans ces fours. Le résidu est un matériau incombustible (les cendres) qui forme des pains dits « pains de soude » contenant principalement des carbonates de sodium et de potassium (ainsi que minoritairement de l'iode et d'autres minéraux). Ces pains de soude étaient alors très prisés des fabricants de verre qui les utilisaient comme fondant. Ils ont fourni pendant plusieurs siècles la matière première des verriers.



**FIGURE E2.** – On trouve ces fours dans de nombreuses régions côtières, dont la Bretagne. Dans ces fours, les paysans ou les pêcheurs y mettaient des algues qu'ils faisaient brûler. Les cendres, riches en carbonate de potassium et de sodium, étaient récupérées sous forme de « pains » qui servaient comme additifs dans les fours verriers.

### **Encadré 3 – Fabrication industrielle de la soude, les procédés Leblanc et Solvay**

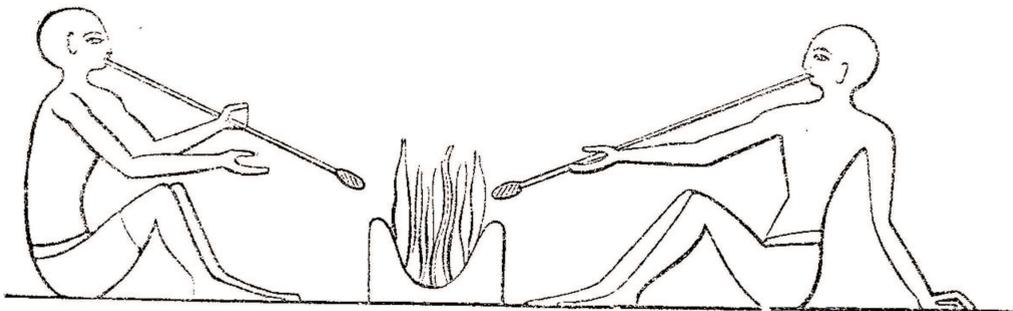
La fabrication du verre demandait au XIX<sup>e</sup> siècle de plus en plus de carbonate de sodium et/ou de potassium obtenu par des cendres issues de la combustion de végétaux. La déforestation rendait l'accès à ces produits de plus en plus difficile. L'Académie des sciences décida en 1783 d'attribuer un prix de 2 400 livres à celui qui permettrait la fabrication de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) à partir de sel de mer ( $\text{NaCl}$ ). Nicolas Leblanc emporta le prix pour un procédé sur lequel il travaillait depuis plus de dix ans à partir d'une succession de réactions chimiques utilisant du sel de mer, de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), du charbon de bois (source de carbone), ainsi que du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : le premier procédé industriel menant au carbonate de sodium était découvert. Ce procédé produisait malheureusement plusieurs polluants (dont l'acide chlorhydrique  $\text{HCl}$ ) et était coûteux en énergie. Le procédé Leblanc utilisait de l'acide sulfurique et Louis Joseph Gay-Lussac (voir biographie B3), consultant scientifique puis président du conseil d'administration de Saint-Gobain, en améliora sensiblement sa production en 1827 par l'introduction d'une fabrication en continue (les tours Gay-Lussac). Il fut supplanté par le procédé Solvay un siècle plus tard.

Le procédé Solvay utilisait, comme le procédé Leblanc, le sel de mer et le carbonate de calcium comme éléments de base, mais remplaçait l'attaque acide par l'acide sulfurique et la réduction avec le charbon de bois par une utilisation très astucieuse de l'ammoniac dissous dans de l'eau riche en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). Le procédé Solvay, très efficace énergétiquement et bien moins polluant que le procédé Leblanc, remplaça ce dernier dès la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Il est encore aujourd'hui utilisé pour la fabrication du carbonate de soude.

Une conséquence intéressante de la conversion industrielle du procédé Leblanc au procédé Solvay a été pour l'entreprise Saint-Gobain (qui fabriquait pour ses besoins propres, liés au procédé Leblanc, de grandes quantités d'acide sulfurique) une reconversion de l'emploi de cet acide sulfurique vers la fabrication d'engrais superphosphates : en effet, ces engrais utilisaient l'acide sulfurique pour leur fabrication. C'est ainsi que Saint-Gobain devint au début du XX<sup>e</sup> siècle un important fabricant d'engrais pour une agriculture en pleine expansion. Un bel exemple historique de reconversion industrielle sur de nouveaux marchés.



**FIGURE E3.** – Affiche vantant les engrais Saint-Gobain. Saint-Gobain, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, avait recyclé pour produire des engrais phosphatés sa production d’acide sulfurique qui ne lui servait plus pour fabriquer le carbonate de sodium par le procédé Leblanc devenu obsolète, remplacé par le procédé Solvay. Cette entreprise est alors devenue un important producteur de fertilisants pour l’agriculture qui se développait très fortement. © DR / Archives de Saint-Gobain.



**FIGURE 13.** Soufflage du verre en Égypte antique. On retrouve des dessins décrivant le soufflage du verre plusieurs milliers d’années avant notre ère. Cette technique, qui est de loin la plus ancienne, est toujours utilisée de nos jours.

Hérités de la métallurgie et surtout de la cuisson des céramiques développée dès l'Antiquité, des fours ont été alors utilisés pour fabriquer le verre. Mais, contrairement au métal qui était récupéré sous forme liquide ou à la céramique qui elle, restait solide, le verre une fois fabriqué passait continûment et de façon non clairement définie de l'état solide à l'état liquide. Comme nous l'avons vu, ceci est dû à une variation continue de sa viscosité et au passage par un état « pâteux ». Cet état visqueux permettait de le prélever et de le transformer de façon unique. Pour cette raison, le verre était rarement « moulé » comme le fer ou le bronze, mais il pouvait être travaillé directement par soufflage. On retrouve des illustrations du travail du verre par soufflage en Égypte probablement vers 2000 ans av. J.-C.



# 2

## Les propriétés exceptionnelles du verre

### La transparence

La transparence d'un matériau est une propriété rare. Si nous regardons autour de nous, à part les matières plastiques synthétiques qui n'existent que depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle (encadré 4), très peu de matériaux solides sont transparents. En dehors du verre, les matériaux transparents sont les pierres précieuses ou semi-précieuses, souvent colorées. Les métaux, les végétaux, les céramiques, s'ils sont colorés, ne permettent pas à la lumière de les traverser, excepté s'ils sont en couches extrêmement minces. Par contre, un grand nombre de liquides sont transparents : l'eau, bien sûr, mais aussi l'huile (qui devient opaque lorsqu'elle se fige). Un glaçon (sauf dans certains cas) est bien moins transparent que le même glaçon fondu sous la forme d'eau liquide. Le sucre est aussi un exemple intéressant, car il est blanc à l'état solide (en poudre ou en morceaux, voir figure 14), mais devient transparent lorsqu'il fond (avant qu'il ne subisse une transformation chimique pour donner du caramel). Ce phénomène est directement lié au caractère ordonné des solides.

Nous avons vu qu'un solide est composé, en règle générale, d'atomes ou de molécules ordonnées régulièrement dans l'espace. Lorsqu'un liquide devient solide, dans certains cas, si la transformation se fait lentement et avec précaution, on peut former un « monocristal », c'est-à-dire un seul bloc dans lequel l'ordre périodique sera conservé non seulement localement, mais dans le cristal tout entier. Les pierres précieuses en sont un exemple : le cas du diamant

(monocristal de carbone pur) en est une illustration emblématique<sup>6</sup>. Mais en général, lorsque la cristallisation n'est pas très bien contrôlée, il se forme de minuscules monocristaux qui s'agglutinent entre eux pour constituer le solide. L'ordre périodique est conservé sur des tailles de l'ordre de quelques micromètres, mais ces petits cristaux sont désorientés les uns par rapport aux autres : le matériau est alors polycristallin<sup>1</sup>. Les zones (parois) entre les domaines monocristallins peuvent être considérées comme des défauts et l'orientation microscopique de l'arrangement solide périodique change à travers cette paroi.

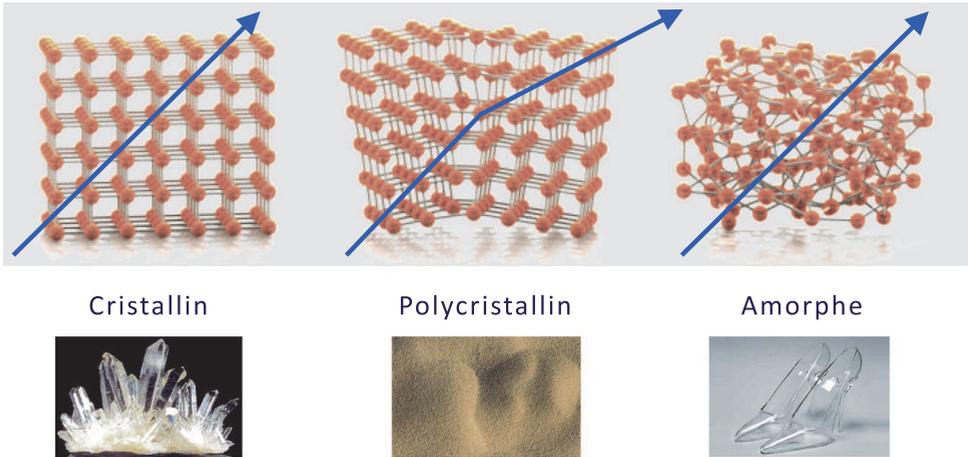
Cet ordre a une conséquence sur la vitesse de la lumière à l'intérieur du solide, car celle-ci dépend de l'arrangement des atomes qui composent ce solide. Elle n'est donc pas la même selon la direction du rayon lumineux par rapport à cet arrangement. Dans le cas d'un monocristal de grande taille (une pierre précieuse par exemple), même si la vitesse de la lumière change avec l'orientation de la pierre, le rayon lumineux traverse le solide sans être dévié car l'orientation ne change pas sur son trajet : le solide apparaît alors comme transparent. Le même rayon lumineux traversant un solide polycristallin rencontre des changements d'orientation cristalline fréquents, ce qui a pour effet de diffracter et de diffuser la lumière. La signature de cette diffusion est la turbidité qui apparaît dans le matériau : elle se traduit dans sa version ultime par la « couleur » blanche que prend le matériau. Ceci explique aussi que lorsque le solide polycristallin fond et que l'ordre périodique disparaît : le matériau devient alors transparent, car la lumière a la même vitesse dans toutes les directions. Du fait de la rareté des matériaux monocristallins, les matériaux solides transparents (en dehors du verre et des polymères) sont exceptionnels et généralement de petite taille.

Dans le cas du verre, bien qu'étant solide, le matériau est désordonné et il n'existe pas d'ordre cristallin. De ce fait, comme dans un liquide, le matériau est transparent (figure 14).



**FIGURE 14.** Sucre à l'état monocristallin, polycristallin et liquide. Le sucre monocristallin est transparent et la lumière passe à travers, le sucre multicristallin est blanc et diffuse la lumière qui ne passe pas à travers, le sucre fondu retrouve sa transparence.

<sup>6</sup> Les couleurs des pierres précieuses transparentes sont en général dues à des défauts ou inclusions à l'intérieur de la pierre.



**FIGURE 15.** Organisation de la matière et trajet des rayons lumineux. Lorsque la lumière traverse un solide monocristallin, le rayon lumineux se propage en ligne droite et ne voit qu'un seul indice de réfraction qui dépend de l'orientation du cristal. Lorsqu'il traverse un milieu polycristallin, il est dévié par l'interface entre deux orientations des cristaux (joint de grain) et se trouve réfracté. La multiplication de ces déviations dévie la lumière dans toutes les directions, ce qui empêche de voir à travers. Dans un liquide ou un solide amorphe, le matériau ayant un seul indice de réfraction, quelle que soit la direction, la lumière se propage en ligne droite sans être déviée, d'où la transparence de beaucoup de liquides.

#### Encadré 4 – La transparence des polymères

Les matériaux polymériques (ou matériaux plastiques) sont des matériaux obtenus par synthèse industrielle de macromolécules. Ils sont généralement (mais pas toujours) amorphes à cause de la taille importante des molécules et de leur difficulté à cristalliser et donc, peuvent être transparents. Les bouteilles en plastique (polyéthylène (PE) ou polytéréphtalate d'éthylène (PET)) sont transparentes. De même, le polycarbonate a de très bonnes propriétés de transparence et peut parfois remplacer le verre pour des parois transparentes que l'on souhaite légères (verres optiques, lunettes de casques, protection des phares de voitures...), au détriment cependant de la dureté. La raison de cette transparence est identique à celle des liquides et du verre. Elle est due au fait que dans un polymère amorphe, les molécules sont distribuées de façon aléatoire comme dans un liquide, et que l'indice de réfraction de la lumière, lié à la vitesse de la lumière dans le matériau, est isotrope. Il existe des polymères semi-cristallins (de structure en partie cristallisée et en partie amorphe) où la transparence est le plus souvent perdue, tout comme pour les matériaux solides polycristallins.

## Dureté et durabilité

D'autres propriétés importantes du verre tiennent aux caractéristiques de la liaison chimique entre le silicium et l'oxygène (Si-O). En effet, cette liaison est particulièrement robuste, la structure du verre comme celle de la silice se caractérise par des liens chimiques continus et forts qui forment un pont entre les atomes de silicium réalisé avec des atomes d'oxygène. Ainsi, les atomes de silicium peuvent être en partie considérés comme liés chimiquement, comme dans un réseau polymérique à trois dimensions. La résistance de cette liaison chimique explique la température relativement élevée de la fusion du quartz (au-dessus de 1 600 °C). Pour passer à l'état liquide, il faut rompre certaines liaisons. Pour rompre alors toutes les liaisons du verre, il faut atteindre son point d'ébullition, à la température de 2 250 °C. Cela explique aussi la dureté et la résistance mécanique du verre, et la raison de sa durabilité : même exposé aux intempéries, le verre résiste des milliers d'années aux outrages du temps. Pour autant, même si sa résistance mécanique est bonne, le verre est fragile. La fragilité est une propriété différente de la résistance mécanique, elle se caractérise entre autres par la résistance au choc. Il faut donc différencier la dureté – la résistance à la pénétration d'une pointe par exemple –, de la fragilité qui voit le matériau se rompre lors d'une faible déformation. Dans le cas du verre, nous savons tous qu'il se casse facilement, en particulier lors d'un choc, il est donc fragile. C'est une des limites aux applications du verre et nous verrons que les industriels ont, de tous temps, trouvé des méthodes pour pallier à cet inconvénient. Le verre se casse aussi avec l'augmentation de la température, ceci est dû à une autre raison : le verre est faiblement conducteur de la chaleur et si on le chauffe de façon non homogène, ce qui est pratiquement toujours le cas<sup>7</sup>, il se dilate davantage aux endroits où la température est élevée ; les différences de dilatation, liées à l'augmentation locale de la température, introduisent des contraintes mécaniques qui provoquent la cassure du verre. Les scientifiques ont trouvé des solutions pour compenser ce défaut avec le verre trempé ou la vitrocéramique qui seront discutées ultérieurement.

La robustesse de la liaison chimique reliant silicium et oxygène est aussi la raison pour laquelle le verre résiste bien à la plupart des produits chimiques. Il est donc très utilisé dans les laboratoires pour contenir, mélanger, faire réagir des produits chimiques. Son caractère inerte en fait aussi un matériau exceptionnel pour conserver les aliments.

---

<sup>7</sup> Du verre introduit dans un four est chauffé de façon inhomogène même si le four est à une température homogène. En effet le verre ne transmettant pas bien la chaleur, l'extérieur sera à une température élevée alors que l'intérieur sera encore froid.

Une autre propriété très intéressante du verre est de pouvoir solubiliser (dissoudre) de nombreux composés ioniques, un peu comme l'eau. En effet, la silice peut se transformer aisément en silicates ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ) en s'associant avec des ions métalliques positifs (nous avons vu le cas du sodium ( $\text{Na}^+$ ) ou du potassium ( $\text{K}^+$ ) qui sont utilisés comme fondant ; pratiquement tous les ions métalliques sont solubles dans le verre liquide et restent ainsi piégés dans le verre solide à l'état vitreux<sup>8</sup>. Ainsi les déchets nucléaires ultimes, résidus de la fission dans les centrales nucléaires utilisant de l'uranium (principalement :  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ...) sont dissous dans de la silice fondue à haute température avant d'être incorporés sous forme de verre (figure 9). Comme nous le verrons, cette capacité de solvater des cations est aussi l'origine principale de la couleur des verres.

---

<sup>8</sup> Si le verre cristallisait, ses éléments solubles seraient le plus souvent rejetés comme des impuretés, car trop énergétiquement défavorables pour s'associer au réseau cristallin.



# 3

## L'utilisation incontournable du verre

### Les marchés historiques du verre

Le verre est d'abord apparu comme un produit de luxe. Les premiers verres fabriqués étaient naturellement colorés, à cause des nombreuses impuretés contenues dans les matières premières que l'on n'avait pas encore appris à purifier. Du fait de ces impuretés également, ces verres n'étaient pas réellement transparents. Leur première utilisation a été de servir de pierres décoratives dans des bijoux : ils étaient souvent aussi précieux que les premières pierres précieuses découvertes (figure 16). Au fur et à mesure de la diminution du coût de fabrication, les bijoux en verre ont perdu de leur valeur, mais il a toujours existé des bijoux en verre (la verroterie) et il en existe encore de nos jours. Principalement du fait que le verre pouvait être formé facilement par soufflage, il a été possible de fabriquer de petits récipients utilisés en premier lieu comme objets décoratifs. Aujourd'hui, le verre est toujours un matériau décoratif avec de splendides œuvres réalisées par des artistes.

### Le verre pour l'habitat

Il était aussi courant que du verre soit incorporé à du mobilier, mais il était moins courant qu'il constitue le matériau principal d'un meuble. C'est en 1937 pour l'Exposition internationale que René Coulon conçut, en collaboration avec le décorateur Jacques Adnet (voir biographie B4), des meubles en verre trempé et bombé : une illustration de la variété d'objets que l'on peut obtenir (figure 17).



**FIGURE 16.** Les anciens verres ont été beaucoup utilisés comme objets décoratifs colorés. Avant que l'on apprenne à purifier les matières premières, ces verres étaient très souvent colorés. Ils servaient de bijoux ou de récipients fonctionnels et décoratifs. À gauche : bracelet en verre du <sup>v</sup><sup>e</sup> siècle avant notre ère et coupe décorative. À droite : deux gobelets provenant d'une tombe princière à Torslunde, East Zealand, Danemark (210-310 apr. J.-C.). Photo : Line Thorup, reproduit avec l'accord du Musée Kroppedal.



**FIGURE 17.** Fauteuil en verre de René Coulon pour l'Exposition universelle de 1937. Ces objets font partie de la collection privée de l'entreprise Saint-Gobain. René Coulon a longtemps collaboré avec cette entreprise. © René Coulon / Archives de Saint-Gobain.

Utilisé pour fabriquer des récipients en tous genres, le verre a toujours été un matériau privilégié pour contenir des aliments, des boissons, des fleurs, etc., et comme objet à la fois usuel et décoratif.

Mais il a surtout acquis ses lettres de noblesse dans le domaine de l'architecture. Il permet, en effet, aux parois des bâtiments de laisser pénétrer la lumière tout en participant à la séparation physique de l'intérieur et de l'extérieur. Il est devenu depuis le Moyen Âge, mais surtout depuis le <sup>xvii</sup><sup>e</sup> siècle, l'élément noble des bâtiments. Bien que cette utilisation soit apparue relativement

tardivement dans l'histoire du verre, elle s'est généralisée et a connu son apogée avec les immeubles à structure linéaire (métallique ou en béton). Même si l'on retrouve des exemples d'utilisation du verre comme vitrage dès l'époque romaine (figure 18), du fait de son prix élevé, il n'est devenu une partie importante de la construction des maisons qu'à partir du XV<sup>e</sup> siècle.



**FIGURE 18.** Exemple de vitrage retrouvé dans les ruines d'Herculanum. C'est une des premières découvertes où l'on identifie le verre comme élément d'un ensemble d'habitation. L'utilisation plus répandue du verre comme élément de fenêtre n'a réellement été développée à grande échelle qu'au XVII<sup>e</sup> siècle. © DR.

## Les vitraux : l'entrée du verre par la grande porte

Le cas très particulier et emblématique des vitraux dans les édifices religieux est une remarquable histoire. L'arrivée de l'architecture gothique dès le XII<sup>e</sup> siècle a été une révolution. Les édifices religieux sont devenus de plus en plus spectaculaires en permettant, entre autres, de réaliser des ouvertures grâce à la technologie de l'arc-boutant. Afin de rendre encore plus impressionnantes les églises et les cathédrales, les religieux ont systématiquement utilisé une technologie nouvelle et spectaculaire, le vitrail, qui permet d'utiliser les couleurs et la lumière pour « diriger la pensée des fidèles par des moyens matériels vers ce qui est immatériel » (figure 19). C'est ainsi que l'abbé Suger, historien et conseiller des rois Louis VI et Louis VII (voir biographie B5), exprimait sa pensée et qu'il fit commander des vitraux de la basilique Saint-Denis en l'an 1144.



**FIGURE 19.** Exemple de vitrail. L'utilisation largement répandue de vitraux pour décorer les églises s'est développée au XII<sup>e</sup> et surtout XIII<sup>e</sup> siècle grâce à l'arrivée de l'architecture gothique qui permettait d'avoir une large portion des murs extérieurs non portante.

La technologie du vitrail s'est développée à un niveau artistique exceptionnel, en particulier en France. Elle a donné lieu à de grandioses réalisations dont, aujourd'hui encore, nous gardons de magnifiques exemplaires. L'art du vitrail résultait d'un savoir-faire des verriers qui avaient appris avec le temps à contrôler les couleurs du verre. En effet, on s'était aperçu que la purification des matières premières permettait d'améliorer la transparence et d'atteindre la perfection : on parle d'une transparence parfaite sans coloration résiduelle<sup>9</sup>. Suite

<sup>9</sup> En fait, le verre n'est jamais complètement transparent, car il existe toujours des résidus ioniques qui absorbent la lumière : le plus courant est le fer qui selon le degré du potentiel redox du verre est sous forme  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$  (c'est lui qui donne la couleur légèrement verte au verre et que les architectes aiment supprimer (le verre Diamant de la pyramide du Louvre est, par exemple, un verre à très faible teneur en fer).

à la purification du verre qui entraîna la disparition de la couleur, un nouveau savoir-faire apparut, en réintroduisant la couleur de façon maîtrisée. L'ajout de certains composés d'oxydes métalliques de manière contrôlée permet de produire de nouvelles couleurs magnifiques<sup>10</sup> (voir figure 20). Le fer conduit à des couleurs vertes ou brunes selon la nature du verre (en fait selon le degré d'oxydation), le cobalt au bleu, le manganèse au pourpre, etc. En utilisant le plus souvent des mélanges, et en s'appuyant sur un savoir-faire impressionnant, le maître verrier pouvait ainsi obtenir de nombreuses nuances de couleur.

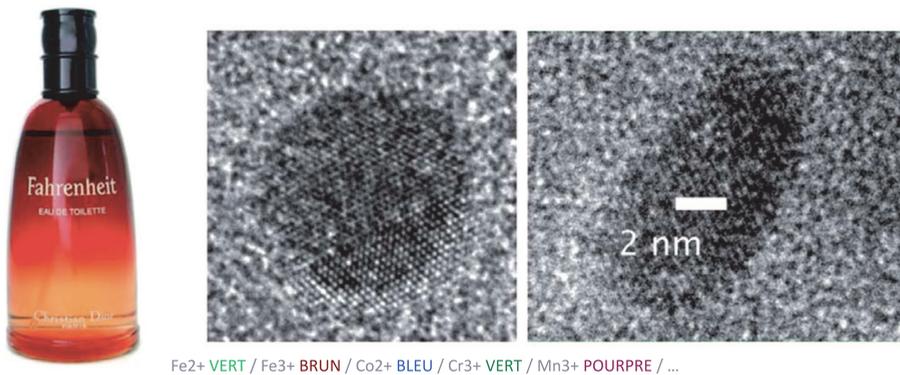


**FIGURE 20.** Les couleurs du verre, exemples de billes de verre. Le verre peut être coloré dans de nombreuses couleurs grâce à l'ajout d'ions métalliques qui selon leur nature et leur environnement permettent de nombreuses nuances de verres colorés.

Le cas du verre rubis est un peu à part et mérite d'être conté. Inventé par un artiste inconnu, le procédé conduisant au verre rubis consiste à introduire un peu de chlorure d'or de façon parfaitement contrôlée dans le verre en fusion : on obtient alors un verre d'une couleur rouge groseille exceptionnellement belle. Cette technique semble très ancienne, comme en témoigne la coupe de Lycurgue retrouvée avec des objets datant du IV<sup>e</sup> siècle. Elle fut ensuite probablement perdue pour être retrouvée au XVII<sup>e</sup> siècle en Bohême et à Florence. L'origine de cette couleur est sensiblement différente de celle des techniques classiques d'ajout de l'oxyde métallique. On peut s'en convaincre par le fait que cette couleur rubis apparaît seulement lors d'un recuit du verre. Alors que les couleurs

<sup>10</sup> Les ions métalliques sont des atomes ionisés qui selon leur environnement absorbent la lumière à des longueurs d'onde précises dépendant en partie de leur environnement et de leur degré d'oxydation. Cette absorption de photons est due à des transitions électroniques entre différents niveaux d'énergie de l'atome.

du verre sont dues à l'absorption de la lumière par les ions métalliques dans leur environnement de silicates, la couleur du verre rubis est d'une tout autre origine (figure 21). L'or (ou le cuivre dans certains cas) se retrouve, après le recuit, à l'état métallique et non ionique, dispersé dans la matrice verrière sous la forme de nanoparticules (contenant quelques centaines d'atomes d'or). Sous cette forme, ces petits agrégats métalliques donnent lieu à un phénomène quantique qui est de nos jours bien compris. Les électrons de surface de ces particules (plasmons) ont des états énergétiques collectifs et passent d'un état énergétique à un autre en absorbant des photons à une longueur d'onde précise : ce phénomène qui est à l'origine des couleurs observées dépend entre autres de la taille des particules.



**FIGURE 21.** Agrégats métalliques dans une matrice verrière. C'est ce type d'agrégats qui est à l'origine de la couleur rouge du verre rubis. En effet, en ajoutant à du verre fondu (à 1 400 °C) un mélange de chlorure d'or et de chlorure d'étain (on obtient un résultat semblable avec le cuivre) suivi d'une trempe rapide et d'un réchauffement lent, on voit apparaître une couleur rouge profond. Ce procédé conduisant au verre rubis utilisé dans l'Antiquité a probablement été perdu puis redécouvert au XVII<sup>e</sup> siècle et a eu un grand succès. On voit ici une photo d'un flacon de parfum de luxe coloré de cette façon, ainsi qu'une photo de microscopie électronique montrant l'arrangement cristallin d'une nanoparticule de cuivre dans une matrice de verre. Source : La chimie et l'art, p. 213, 978-2-7598-0527-3, EDP Sciences.

## Les verres et l'astrophysique

C'est grâce au verre que les premières observations des merveilles du ciel ont pu être observées. Bien que l'on trouve mention de lunettes d'observation du ciel dès le XVI<sup>e</sup> siècle, c'est probablement au début du XVII<sup>e</sup> siècle que la qualité de polissage du verre a permis de réaliser les premières lunettes astronomiques en Italie. C'est grâce à ces objets que Galilée et Kepler, par leurs observations, ont marqué le début de l'astronomie moderne. L'adjonction de lentilles de qualité de plus en plus grande a ainsi pu faire rapidement des progrès à cette

science tout au long du XVII<sup>e</sup> siècle. Même si l'on retrouve les premiers télescopes utilisés à partir de la moitié du XVII<sup>e</sup> siècle (Newton en fut un des premiers utilisateurs), c'est réellement au XVIII<sup>e</sup> siècle que l'on a vu l'explosion de leur utilisation. La supériorité des télescopes sur les lunettes est essentiellement due au fait que l'on peut réaliser des miroirs concaves de plus grande taille que des lentilles. Aujourd'hui, on arrive à fabriquer des miroirs de plusieurs mètres de diamètre (voir figure 2), mais il existe des télescopes encore plus grands obtenus en combinant plusieurs miroirs avec des techniques dites d'optique adaptative.



# 4

## Le contrôle des propriétés

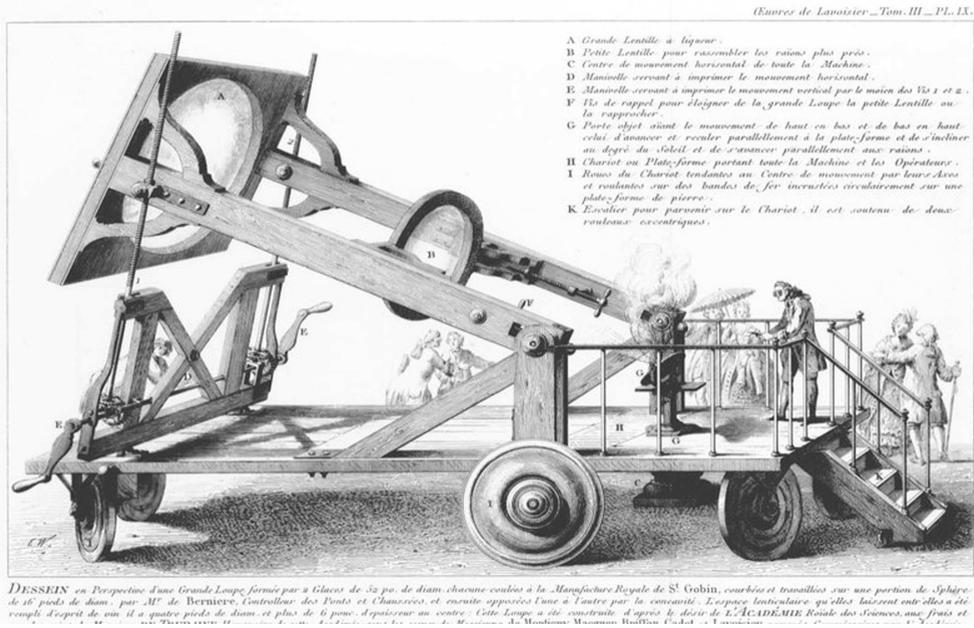
### Les propriétés optiques

Au début de son utilisation, le verre n'était pas transparent. En parvenant à utiliser des matières premières de plus en plus pures, les verriers ont appris à contrôler cette propriété essentielle à la base du développement et de l'utilisation du verre en optique. On peut voir sur la gravure de la figure 22 comment l'utilisation d'une lentille de grande taille permet, en concentrant les rayons du soleil sur un point, d'atteindre des températures exceptionnelles. Le four d'Odeillo, situé dans les montagnes pyrénéennes en France, fonctionne sur un principe légèrement différent : il utilise des miroirs pour concentrer les rayons du soleil sur une cible. L'ensemble de ces miroirs forme un arrangement parabolique et concentre la lumière sur le four permettant d'atteindre 3 500 °C. De nombreux équipements permettant de produire de l'électricité d'origine solaire se sont développés récemment. Bien que transparent, le verre n'a pas le même indice que l'air. L'indice optique (plus précisément l'indice de réfraction) est une grandeur sans dimension qui indique que la lumière ne se propage pas à la même vitesse dans le vide ou dans un matériau. Si dans le vide, la vitesse de la lumière est de  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , elle est plus faible dans tous les matériaux qu'elle traverse. La définition de l'indice de réfraction est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et sa vitesse dans le matériau considéré. Il est égal à 1 dans le vide et supérieur à 1 dans les autres cas<sup>11</sup>. Le verre a un indice de réfraction

---

<sup>11</sup> Cette définition simple cache une réalité plus complexe, il faudrait plus justement parler de la vitesse de phase dans le matériau et non de la vitesse de l'onde elle-même. Ce qui laisse la possibilité d'avoir des indices plus petits que 1 bien que la vitesse de la lumière (onde) dans le vide ne puisse pas être dépassée. De plus pour un matériau absorbant, l'indice est représenté par un nombre complexe.

qui, selon les compositions, varie typiquement de 1,45 à 1,6. Un rayon lumineux qui pénètre dans le verre est dévié d'un angle lié à la différence des indices entre l'air et le verre. Cette propriété a été mise à profit pour utiliser le verre comme instrument de base de l'optique. Dans le cas d'une lentille, la forme biconvexe d'un morceau de verre permet de faire converger les rayons lumineux dans un petit volume de l'espace (figure 22).

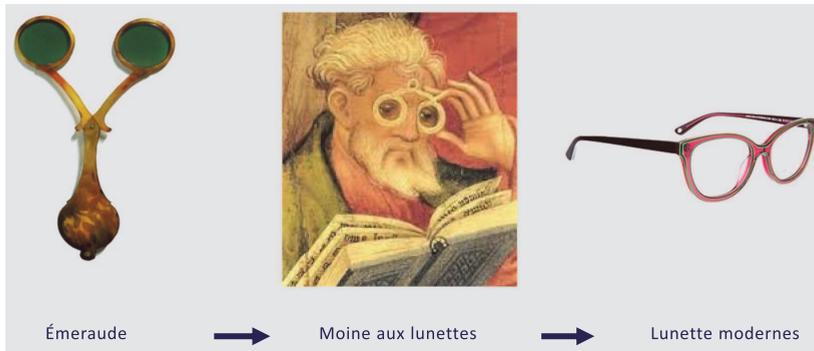


**FIGURE 22.** Une figure représentant un montage optique utilisé par Lavoisier pour obtenir des températures élevées à partir de l'énergie du Soleil. L'utilisation de lentilles permet de concentrer la lumière et, en faisant l'image du Soleil, on arrive ainsi à des températures très élevées. On peut aussi utiliser des miroirs comme dans le four d'Odeillo ou dans les centrales solaires à concentration.

On fait remonter le début de cette utilisation au savant arabe Ibn al-Haytham (X<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècles, voir biographie B6). De nombreux scientifiques se sont ensuite penchés sur les lois de la réfraction et de la diffraction, mais il a fallu attendre les travaux de Snell et Descartes au cours des années 1620-1640 pour que ces lois soient proprement établies. Par contre, comme souvent en technologie, les utilisations ont été développées bien avant la parfaite compréhension scientifique du phénomène. C'est au XIII<sup>e</sup> siècle que le télescope a été inventé par Roger Bacon (1214-1294, voir biographie B7). Depuis, de très nombreux instruments d'optique sont utilisés dans la vie quotidienne comme dans de nombreux appareils scientifiques. Les travaux de Christian Huygens (voir

biographie B8) ont été par la suite très utiles pour asseoir l'ensemble des propriétés optiques.

L'effet « loupe », quant à lui, a été découvert par Robert Grossetête (1175-1253, voir biographie B9), un savant anglais du XIII<sup>e</sup> siècle. Son application a permis de développer les lunettes de vue en corrigeant principalement la presbytie (figure 23).



**FIGURE 23.** Évolution des lunettes permettant d'améliorer la vue : l'émeraude utilisée dès l'époque romaine a été remplacée par du verre, puis aujourd'hui, dans plus de deux tiers des cas, par des lunettes en matière plastique (polymères) comme le polycarbonate.

## Les propriétés mécaniques : résistant, dur, cependant fragile

Comme nous l'avons vu, le verre est un matériau solide. Pour autant, s'il résiste aux charges et s'il est dur (figure 8), il reste un matériau fragile. Il ne faut pas confondre la résistance mécanique (résistance à des forces de compression ou de traction) avec la dureté, caractérisée par la capacité d'un matériau à en rayer un autre et qui peut être testée en essayant de l'endommager avec une pointe.

La fragilité du verre est due en partie à sa rigidité, c'est-à-dire à sa résistance à changer de forme sous l'effet d'une sollicitation mécanique. Chacun d'entre nous a fait l'expérience de laisser tomber au sol un objet en verre : il se brise en « mille morceaux ». De plus, les morceaux sont coupants, offrant des aspérités et des pointes pouvant blesser la personne qui les manipule. De tous temps, on a essayé de trouver une solution à ce problème et de rendre le verre moins fragile.

On a découvert ainsi plusieurs techniques. Le trempage à chaud est l'une des plus utilisées. Il s'agit de chauffer le verre vers 600 °C (avant qu'il ne se ramollisse trop) puis de le refroidir par l'extérieur très rapidement par un souffle d'air froid ou un jet d'eau. Le verre ainsi obtenu se trouve soumis à

des contraintes de compression en sa surface. Ces tensions renforcent le produit et le rendent plus résistant aux chocs. De plus, lorsqu'il se casse, il se forme de très nombreux morceaux qui présentent moins de parties tranchantes. On qualifie ainsi le verre trempé de verre de sécurité. L'inconvénient majeur de ce traitement est que le verre, une fois trempé, ne peut plus être coupé ni percé facilement. Cette opération doit donc être exécutée sur la pièce finale : ceci limite son usage au verre plat pour le bâtiment ou le mobilier. Ce verre dit « incassable » a donné de nombreuses applications (vitre latérale des voitures, objets de cuisine (verre Duralex, voir biographie B10), vitrage pour meubles, etc.). La figure 24 montre un exemple d'escalier en verre trempé.



**FIGURE 24.** Exemple d'utilisation du verre trempé : escalier en verre trempé. L'amélioration des propriétés mécaniques du verre permet ainsi l'utilisation dans des conditions de sécurité et de durabilité bien meilleures que pour du verre ordinaire.

Cet équilibre entre compression extérieure et tension interne peut être aussi obtenu à froid par échange d'ions lorsque l'on ne peut pas effectuer un trempage à chaud. On parle alors de trempage chimique. On l'obtient en plongeant un verre, sodocalcique par exemple, dans une solution aqueuse contenant des ions potassium (d'autres ions peuvent être utilisés). Le sodium est partiellement remplacé dans le verre par le potassium. Le potassium étant plus volumineux que le sodium, la couche extérieure du verre est comprimée alors que la couche interne n'est pas modifiée : on obtient ainsi un effet similaire au trempage thermique. Cette technologie, plus onéreuse, est utilisée pour traiter des verres trop minces pour être soumis au trempage thermique (inférieur à 2 mm) ou lorsque l'on veut obtenir des résistances plus importantes. Le verre Gorilla de Corning (voir biographie B11), qui sert à la protection des téléphones portables et des

tablettes digitales, est fabriqué ainsi. Son épaisseur peut atteindre la centaine de micromètres.

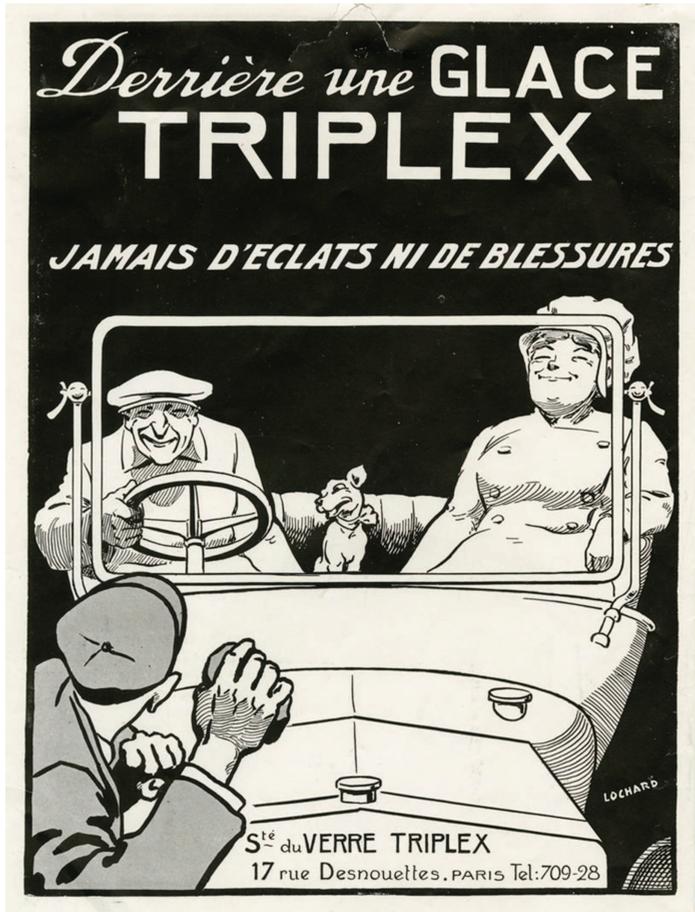
Indépendamment du trempage, une autre technique a été largement utilisée pour renforcer les propriétés mécaniques du verre et diminuer les risques de coupures : il s'agit du verre feuilleté. Son obtention est une intéressante histoire d'innovation, résultat d'une découverte accidentelle.

Édouard Bénédictus est un artiste chimiste (voir biographie B12) travaillant sur les suspensions de collodion, une solution de nitrocellulose dissoute dans l'éther et l'alcool. En séchant, le collodion forme un film élastique. Lors d'une de ses manipulations, Édouard laisse échapper un récipient en verre qui avait servi de nombreuses fois à préparer des solutions et dont les parois internes étaient tapissées d'un film de collodion. Le récipient se brise en touchant le sol, mais au lieu d'éclater en mille morceaux, il se fêle en restant approximativement entier : les morceaux de verre restent solidaires du film qui s'était formé, au cours des utilisations précédentes, par dépôt du collodion. Édouard remarque le phénomène, mais n'en fait rien à ce stade. Nous sommes au début du XX<sup>e</sup> siècle et l'automobile devient de plus en plus populaire. Quelques années plus tard, le même Bénédictus est témoin d'un accident de la route lors duquel une dame est blessée au visage par des éclats de verre du pare-brise de la voiture accidentée dans laquelle elle se trouve. Marqué par cet accident, Bénédictus se rappelle alors son récipient, fêlé, mais encore entier, malgré le choc sur le sol. Il pense alors à fabriquer un pare-brise confectionné à partir de deux vitres en verre entre lesquelles on intercale un film de nitrocellulose. Il dépose un premier brevet en 1909 suivi d'autres et il crée en 1911 la Société du Verre Triplex (figure 25) pour exploiter ces brevets. Les premiers pare-brise sont fabriqués et montés avec succès, puis de nombreuses licences sont vendues de par le monde.

Cette société Triplex a été rachetée un peu plus tard par la Compagnie de Saint-Gobain. Elle est devenue l'ancêtre de la société Sekurit, depuis leader dans le domaine des pare-brise automobiles.

Nous pouvons citer un autre événement ayant contribué au succès de la technologie découverte par E. Bénédictus.

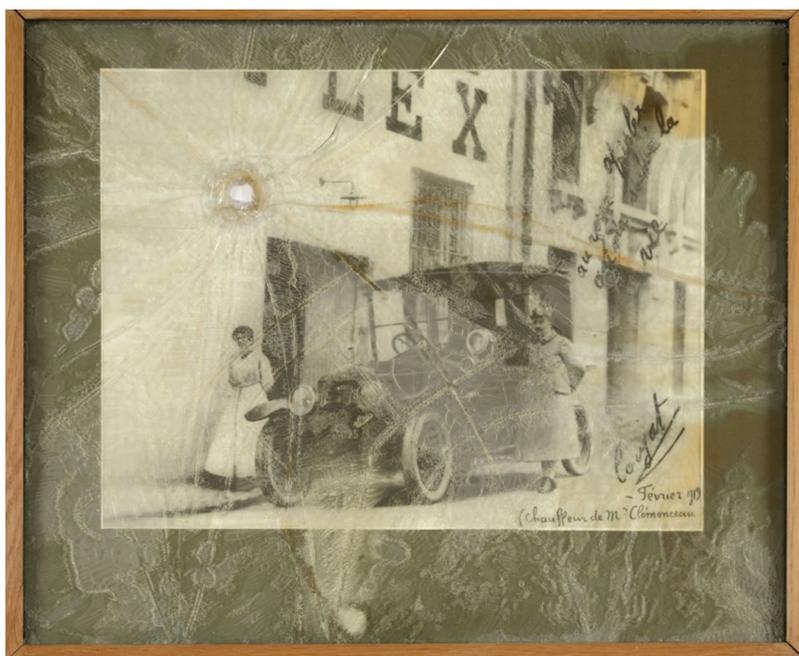
Le 19 février 1919, la voiture de Clémenceau conduite par son chauffeur quitte le domicile du président du Conseil pour rejoindre le ministère de la Guerre. Un jeune anarchiste tire sur la voiture par dix fois. Trois balles atteignent Clémenceau, une autre est arrêtée par le pare-brise en verre Triplex. Clémenceau survivra et sera rétabli pour la conférence de la paix de Versailles en juin 1919. Quant au chauffeur, il sera éternellement reconnaissant au pare-brise Triplex, car il lui sauva la vie, comme en témoigne cette photo (figure 28).



**FIGURE 25.** Affiches de l'époque vantant les avantages du verre Triplex. Ce verre a été tout d'abord conçu pour remplacer la vitre ordinaire faisant office de pare-brise des premières automobiles. Il améliore très sensiblement la sécurité en évitant de projeter des éclats de verre en cas d'accident. © Lochard / Archives de Saint-Gobain.

### Encadré 5 – Sekurit, Securit et la bande dessinée

On retrouve ce fameux verre Securit dans la bande dessinée de *Tintin* (« Le Sceptre d'Ottokar » – page 28). Lorsque pour la première fois Tintin rencontre la Castafiore, elle se met à chanter dans la voiture où ils ont pris place. C'est le sigle « Securit » sur les vitres latérales qui rassure Tintin. Celui-ci craignait de voir celles-ci se briser sous l'effet du chant puissant et aigu de la cantatrice. Securit s'écrivait pour les Français avec un c et pour les Allemands avec un k : ce nom de la célèbre marque de Saint-Gobain pour l'automobile a été unifié en choisissant aujourd'hui l'orthographe allemande.



**FIGURE 26.** Photo encadrée avec les restes du pare-brise Triplex montrant l'incrustation de la balle et avec cette dédicace signée du chauffeur : « Au verre Triplex qui m'a sauvé la vie ». Cette photo a été prise à travers les restes du pare-brise de la voiture de Clémenceau après un attentat qui a failli lui coûter la vie ainsi qu'à son chauffeur. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Nous avons vu précédemment que le verre éclatait lors des chocs. De la même façon, le verre éclate lorsqu'il est chauffé de façon non uniforme.

En effet, une dilatation locale due à la chaleur (qui se propage assez mal dans le verre) conduit à des tensions importantes entre les parties chaudes et froides et génère des fractures conduisant à l'éclatement du verre. Plusieurs solutions ont été imaginées pour prévenir ce phénomène.

Pour fabriquer les enveloppes en verre des lampes d'Edison (voir biographie B13), Corning met au point un verre à faible dilatation thermique qui résiste à la montée en température. Il s'agit de remplacer une partie du sodium par du bore. Le verre obtenu a un coefficient de dilatation plus faible que le verre sodocalcique, il est donc moins sensible à la température. Le verre est appelé verre borosilicate. Il a eu un succès croissant au cours du temps. Ce verre ainsi produit a permis à Corning de développer une grande partie du marché des enveloppes des lampes électriques, des verres de signalisation ferroviaire puis des télévisions. Une version particulièrement performante de ce verre a donné le Pyrex grâce auquel on a pu développer des instruments de cuisine en verre, résistants au feu.

Une autre découverte encore plus ancienne a donné lieu à un verre tout à fait exceptionnel : la vitrocéramique. Son origine remonte au début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

René-Antoine Ferchault de Réaumur (membre de l'Académie des sciences, voir biographie B14) décrit un nouveau procédé pour faire de la porcelaine à partir du verre. Ce procédé a permis de fabriquer ce que l'on appelle la porcelaine de Réaumur : un verre dévitrifié (voir ci-dessous) qui résiste au feu (comme la porcelaine). Incomplètement maîtrisé, ce procédé a été relativement peu développé par la suite.

Deux siècles plus tard, l'effet de dévitrification fut redécouvert accidentellement par un chercheur de Corning : Donald Stookey (voir biographie B15). Stookey travaillait sur des verres photosensibles contenant des particules d'argent lorsque, par erreur, il laissa un échantillon de ce verre dans un four qui monta à 900 °C pendant la nuit, température plus élevée que ce qu'il avait prévu. Le lendemain, il fut très surpris de voir que le verre, non seulement n'était pas cassé comme il s'y attendait, mais avait perdu sa transparence pour devenir blanchâtre. En le laissant tomber, il remarqua qu'il ne se cassait pas. Ce verre, bien qu'opaque, avait en effet perdu sa transparence, mais résistait à la fois à la température et au choc. Stookey avait redécouvert une forme de la porcelaine de Réaumur : la vitrocéramique. Le phénomène en jeu est une dévitrification : un verre une fois fabriqué, réchauffé et refroidi à nouveau (recuit) peut générer *in situ* des nanocristaux. Dans le cas présent, ce sont des nanocristaux de silicate d'aluminium et de lithium naturellement dispersés de façon homogène dans le verre<sup>12</sup>. Il s'avère que la contraction des cristaux avec la température compense exactement la dilatation de la matrice vitreuse qui l'entoure, de sorte que le matériau ne se dilate plus du tout avec la température. Les nanoparticules permettent aussi de renforcer les propriétés mécaniques, d'où la résistance au choc exceptionnelle de ce verre. On peut aujourd'hui observer au microscope électronique directement ces nanocristaux (figure 29).

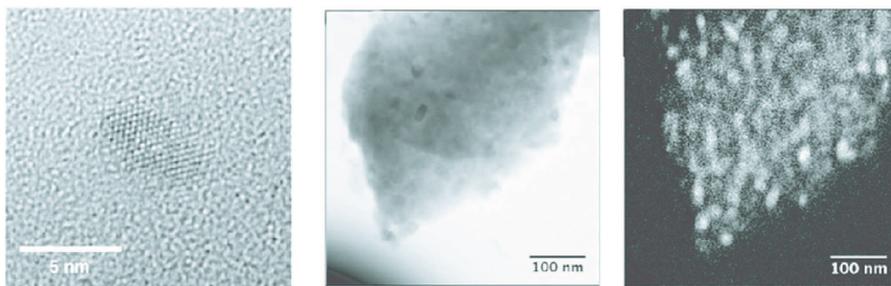
## Le contrôle de la surface du verre est à la source de nombreuses propriétés

Initialement, le traitement de la surface du verre a permis de fabriquer des miroirs.

Les premiers miroirs de l'humanité ont probablement été les eaux des lacs et des étangs qui reflétaient « les personnes, la nature... » se trouvant à proximité,

---

<sup>12</sup> La présence de nanocristaux répartis de façon homogène explique à la fois l'opacité et la couleur blanche de ce verre. En effet ces nanocristaux ont un indice différent de la matrice en verre et diffusent fortement la lumière.



(a) image MET haute résolution d'un cristal de  $ZrO_2$  dans une matrice vitreuse  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  (b) et (c) images EFTEM d'une nanofibrille de cordiérite contenant  $TiO_2$ . La présence de cristaux riches en titane apparaît sur l'image filtrée au seuil du titane (c) par rapport à l'image intégrée globalement (b).

**FIGURE 27.** Images en microscopie électronique de vitrocéramique où l'on voit les nanocristaux dispersés dans une matrice vitreuse. Ces nanocristaux permettent de compenser la dilatation de la matrice verrière par une compression lorsque la température du matériau augmente, conduisant ainsi à une vitrocéramique ne se dilatant pas avec la température. Ceci évite au verre de se briser lors de changements de température. © DR.

comme le mythe de Narcisse le décrit fort bien. L'homme a ainsi voulu fabriquer des « objets » pour y retrouver son image. L'utilisation de pierres polies permettait d'obtenir une image de qualité médiocre, sans le rendu des couleurs réelles. L'arrivée du métal a permis une amélioration certaine : le cuivre et l'étain (dont l'alliage constitue le bronze), l'argent et même l'or permettaient d'obtenir des images de bien meilleure qualité. Par contre, les objets confectionnés avec ces matériaux étaient très chers ; de plus, le métal s'oxydait rapidement et devait être régulièrement nettoyé pour garder sa capacité de réflexion.

Ce problème a pu être résolu en protégeant le métal par du verre. C'est ainsi que l'on vit apparaître les premiers miroirs en verre sous forme d'une feuille métallique collée à un morceau de verre. Toutefois, c'est une innovation majeure apparue à la Renaissance qui permit le développement des miroirs modernes. On a observé que l'on pouvait déposer à l'arrière d'une plaque de verre un amalgame d'étain et de mercure. Cet amalgame a la double propriété d'adhérer au verre et de garder un éclat métallique tout en protégeant le film métallique de l'oxydation : le miroir moderne était né.

La couleur chaude liée aux propriétés optiques de l'amalgame en fait des miroirs extrêmement appréciés. Les miroirs de la galerie des Glaces à Versailles sont des miroirs au mercure et 70 % des miroirs d'origine sont encore en place. Malheureusement, la manipulation du mercure pour la fabrication de l'amalgame est dangereuse, car le mercure est très toxique. Les ouvriers manipulant cet amalgame mourraient souvent très jeunes du fait de la toxicité des vapeurs de mercure. Les miroirs au mercure ont été fabriqués jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle et on en trouve encore de nos jours.

Au XIX<sup>e</sup> siècle en Allemagne, un procédé concurrent vit le jour : il consistait à précipiter un film d'argent au dos d'une feuille de verre. Ce procédé a rapidement détrôné celui à l'amalgame d'étain et de mercure qui fut par ailleurs interdit au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle dans plusieurs pays (Angleterre, France...).

La qualité du verre s'est révélée être un point essentiel de la qualité du miroir. Nous verrons par la suite comment les procédés industriels ont influencé cette qualité. À cette époque et jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, il existait une distinction importante entre le verre à vitre et le verre pour les miroirs. Bien que le verre soit fabriqué par le même procédé (soufflage) jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, la qualité du verre à vitre était nettement moindre que celle du verre pour les miroirs, dont le nom était d'ailleurs différent. Pour différencier de façon claire ces deux types de plaques de verre, on utilisait le terme « glace » pour désigner le verre destiné aux miroirs. Aujourd'hui, ce terme désigne encore les miroirs de grande taille.

#### **Encadré 6 – La glace et la vitre : la galerie des Glaces de Versailles en est une magnifique illustration**

La galerie des Glaces de Versailles, voulue par Louis XIV et réalisée par Jules Hardouin-Mansart, est l'une des plus célèbres et importantes commandes de la Manufacture royale des glaces (devenue ensuite la Compagnie de Saint-Gobain). Cette galerie des Glaces illustre magnifiquement les fonctions respectives des vitres et des glaces.

La lumière du soleil entre par des fenêtres s'ouvrant sur les jardins et se reflète dans 357 miroirs situés à l'exact opposé des 17 fenêtres (figure E4). La grande qualité des miroirs, qui furent fabriqués en France, était directement liée à la volonté de Colbert de créer une industrie française pour limiter les importations de produits de luxe qui déséquilibraient la balance commerciale de la France. La Manufacture royale des glaces a ainsi « importé » les technologies vénitiennes pour fabriquer des miroirs de grande taille. La Manufacture royale des glaces, après avoir tenté brièvement (de 1665 à 1667) d'importer ces technologies, développe ses fabrications dans une glacerie du Cotentin, à Tourlaville, aux portes de Cherbourg, rachetée à une talentueuse lignée de verriers, les Lucas de Néhou. Ce qui a fait dire à Voltaire : « On commença dès 1666 à faire d'aussi belles glaces qu'à Venise qui en avait fourni toute l'Europe. Et bientôt on en fit dont la grandeur et la beauté n'ont jamais pu être imitées ailleurs » (Voltaire, *Le Siècle de Louis XIV*). La saga des débuts de la manufacture royale des glaces, créée en 1665, est décrite dans le livre de Maurice Hamon et relate une aventure passionnante digne d'un roman. Des ouvriers vénitiens ont été

débauchés pour venir travailler en France. Les détails rocamboliques de leur débauchage à Murano sont relatés dans le livre de Maurice Hamon. Le séjour des verriers vénitiens à Paris a été très bref. Indisciplinés, querelleurs et refusant de transmettre leurs savoirs à des apprentis, ils sont renvoyés dans leurs foyers dès 1667. Colbert et les actionnaires de la Manufacture royale des glaces rachètent alors à la famille Lucas de Néhou leur glacerie de Tourlaville, qui faisait du très beau verre blanc soufflé en manchon, « façon Venise ». Le mystère est que Colbert la connaissait très bien, grâce à des rapports des intendants de Normandie et en avait demandé des échantillons dès 1665 ! La glacerie est reconstruite à neuf à partir de 1667 et fournit bientôt des glaces de bonne qualité, ce qui permet à Colbert d'interdire l'importation de celles de Venise dès 1672. Cette course contre la montre coïncide avec le démarrage du chantier de Versailles (première vague de 1672-1674) qui donne le départ aux commandes royales de la surintendance des bâtiments. Celle de la galerie des Glaces en 1682-1683 (appelée alors Grande Galerie) est la plus importante et la plus spectaculaire, mais pas la première. Voir le merveilleux livre de Maurice Hamon sur l'histoire de Saint-Gobain, *Du Soleil à la Terre*<sup>13</sup>.



**FIGURE E4.** – La galerie des Glaces de Versailles. Cette galerie est une parfaite illustration des deux grandes familles de produits faits avec le verre : les vitres s'ouvrant sur les jardins et leur faisant face, des miroirs de grande taille reflétant l'extérieur. À cette époque, la qualité du verre à vitre était très différente de celle du verre pour miroir (appelé encore glace).

<sup>13</sup> ISBN : 9782709619332.

## Les verres spéciaux

Aujourd'hui, afin d'améliorer les performances du vitrage, le traitement de la surface de verre est employé très couramment. Dans de nombreux cas, on utilise un traitement antireflet dont l'objectif est de supprimer les reflets qui se produisent lorsque l'on regarde à travers une plaque de verre. Celle-ci ayant un indice plus élevé que l'air, elle réfléchit plus ou moins, selon l'angle de vue, une partie des rayons lumineux, ce qui crée les reflets. Afin de diminuer cette réflexion, il faut déposer à la surface un matériau d'indice intermédiaire afin de diminuer l'indice de réfraction entre l'air et le verre. Le traitement classique consiste à déposer des couches de matériaux transparents d'indices intermédiaires permettant une variation continue de l'indice entre celui de l'air et celui du verre et diminuant ainsi la réflexion lumineuse. Il est aussi possible de déposer un matériau poreux qui a un indice intermédiaire entre le verre et l'air à cause de sa porosité. Ce traitement de surface a de nombreuses applications, allant des lunettes au verre des vitrines de magasins (voir figure 28).

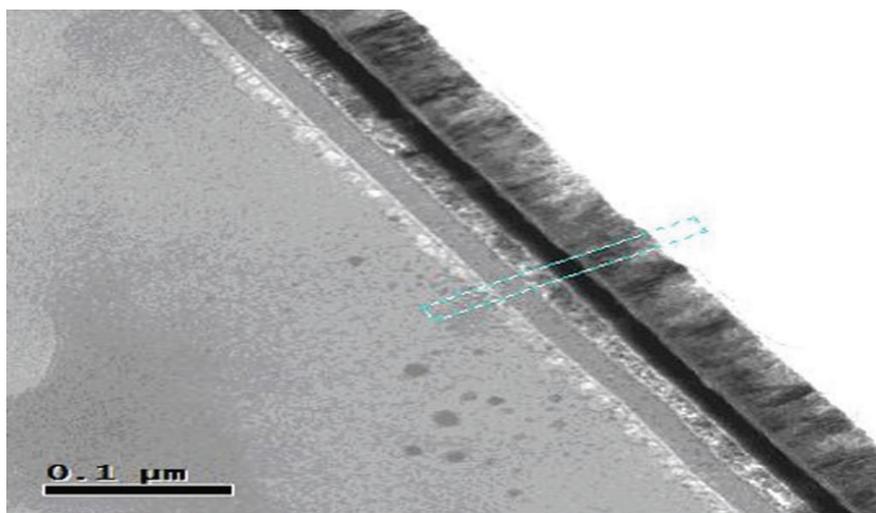


**FIGURE 28.** Effet antireflet par traitement de la couche extérieure d'un vitrage. Cet effet est obtenu par le dépôt de couches de surface ayant un indice de réfraction intermédiaire entre l'air et le verre. © DR.

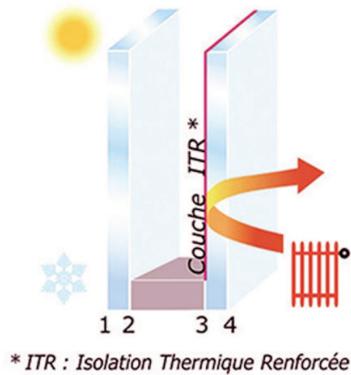
Une application plus récente se développant rapidement consiste à déposer des couches transparentes pour contrôler les pertes énergétiques des bâtiments. Dans ce cas, il s'agit de transformer le verre en une sorte de filtre (en fait, un

interféromètre) laissant passer la lumière visible, mais réfléchissant la lumière infrarouge.

En effet, tous les corps portés à une température donnée émettent un rayonnement infrarouge lié à cette température. Par exemple, la surface du Soleil, d'une température d'environ 6 000 °C, émet un rayonnement centré autour de 600 nm de longueur d'onde et s'étalant de 200 nm à plusieurs micromètres. En été, afin d'éviter une trop grande surchauffe de l'intérieur de nos habitats par les baies vitrées (surtout celles orientées au sud), un vitrage moderne réfléchit les longueurs d'onde au-dessus de 800 nm (limite du visible) et minimise ainsi les apports de chaleur extérieurs. Inversement, en hiver, l'intérieur de nos habitats émet un rayonnement infrarouge correspondant à une température d'environ 20 °C, soit une longueur d'onde ayant un maximum d'émission de l'ordre de 9 à 10 micromètres. Dans ce cas, il s'agit d'empêcher ce rayonnement infrarouge de traverser le vitrage (et donc d'être perdu, on parle de l'effet de « paroi froide ») en le réfléchissant vers l'intérieur, ce qui améliore fortement l'impression de confort. Le traitement conduisant à ce miroir à infrarouge est obtenu par le dépôt de couches très fines et régulières de matériaux diélectriques et conducteurs (généralement des couches d'argent). On peut ainsi, pour en augmenter l'efficacité, déposer jusqu'à une dizaine de couches nanométriques successives, comme cela est montré sur les figures 29 et 30.



**FIGURE 29.** Photo de microscopie électronique de couches déposées sur un vitrage bas émissif. Il s'agit de déposer une succession de couches de matériaux conducteurs (argent en général) et semi-conducteurs afin de construire un interféromètre laissant passer la lumière visible et réfléchissant les infrarouges. © DR.



**FIGURE 30.** Illustration du fonctionnement d'un vitrage bas émissif. La lumière provenant du Soleil passe partiellement à travers le vitrage (dans le domaine du visible) et les infrarouges sont réfléchis empêchant la chaleur de trop pénétrer en été et la gardant en hiver à l'intérieur du bâtiment. © DR / Archives de Saint-Gobain.



**FIGURE 31.** Effet autonettoyant d'un vitrage. Une mince couche d'oxyde de titane déposée à l'extérieur d'un vitrage permet de garder l'hydrophilicité du verre en oxydant par catalyse et sous l'action des UV les salissures d'origine organique. De ce fait, au lieu de gouttes d'eau s'accrochant au vitrage, la pluie constitue un film continu gardant ainsi la vitre propre. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Récemment, on a mis au point une nouvelle fonction qui permet au verre extérieur de se nettoyer plus facilement. Le dépôt d'une mince couche d'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) permet, sous l'action conjuguée du soleil (les ultraviolets) et de l'eau, de maintenir un niveau d'hydrophilicité de la surface du verre permettant la constitution d'un film uniforme d'eau. La pluie élimine de façon naturelle une partie des saletés tout en facilitant ensuite grandement le nettoyage (figure 31). Ce verre, qualifié d'autonettoyant, est particulièrement adapté aux vérandas et à toutes les installations où le verre est exposé à la pluie et au soleil.

D'autres propriétés s'appuient sur l'utilisation de couches d'argent déposées sur du verre qui, une fois connectées à une source d'électricité, permettent de chauffer le verre par effet Joule. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de pare-brise dégivrants ou de vitrages chauffants dans les pays où les hivers sont très rudes. Le verre chauffant est un des premiers exemples de verre actif, c'est-à-dire de verre dont on peut contrôler de façon active (le plus souvent avec de l'électricité) les propriétés.

#### **Encadré 7 – Comment déposer des couches minces sur le vitrage ?**

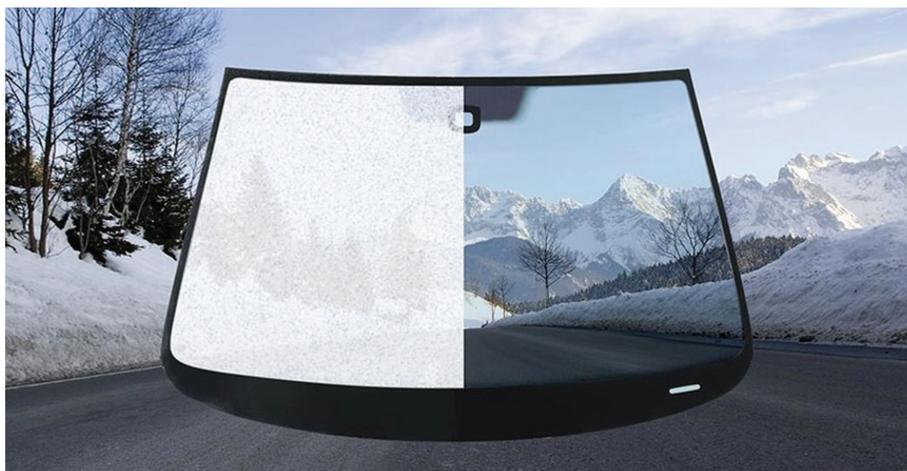
Il existe plusieurs procédés pour déposer des couches très fines sur le vitrage. Dans cet ouvrage, on décrira les deux principaux procédés développés industriellement : la CVD (*Chemical Vapor Deposition* : dépôt chimique en phase vapeur) et le *Sputtering* ou dépôt magnétron. Les deux méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients, mais sont toutes deux utilisées largement dans l'industrie verrière.

Le dépôt magnétron, ou encore pulvérisation cathodique, est composé d'une cible, la cathode, placée dans une atmosphère raréfiée d'un gaz inerte ionisé dans un champ électromagnétique intense. Sous l'effet du bombardement d'ions, le matériau de la cible est arraché sous forme neutre et se dépose sur la paroi que l'on veut recouvrir. L'avantage de cette technique est la capacité de déposer directement le matériau de la cible (qui ne subit aucune transformation chimique) sous forme de film très régulier et très mince (quelques nanomètres). On peut ainsi déposer jusqu'à plusieurs dizaines de couches de matériaux différents empilées les unes au-dessus des autres. Chaque couche est déposée dans un appareil spécifique (traitement hors ligne), il faut donc autant d'appareils que de couches.

La technique CVD consiste à mettre en place une atmosphère gazeuse composée d'un mélange de produits chimiques qui vont réagir sur la surface du substrat en déposant le film désiré. Les films sont relativement plus épais que dans le dépôt magnétron, mais la technologie peut être plus simple à mettre en œuvre industriellement. Dans le cas du verre, on peut même la mettre en ligne sur le ruban de verre encore chaud juste après sa fabrication. On garde alors un procédé continu jusqu'au verre recouvert de sa couche.

La capacité à déposer des couches qui conduisent l'électricité ouvre de nouvelles perspectives au contrôle des propriétés optiques du vitrage. Un certain nombre de nouvelles fonctions pilotables par l'extérieur ont été découvertes et préfigurent le vitrage du futur.

On peut en citer deux exemples : le verre électrochrome et le verre dépoli sur commande.



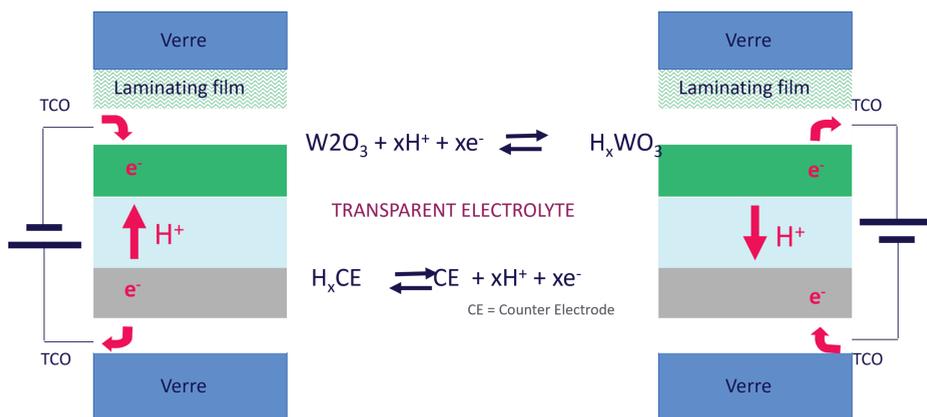
**FIGURE 32.** Pare-brise autodégivrant. Il s'agit de déposer une très fine couche d'un matériau conducteur (d'oxyde d'indium et d'étain ou d'argent) puis, en faisant passer un faible courant, on chauffe de façon homogène le pare-brise. Ce système est acceptable pour un pare-brise qui, pour des raisons de visibilité, ne peut pas accepter de fils conducteurs comme le vitrage arrière d'une automobile. © DR.

Concernant le verre électrochrome, il s'agit de construire une véritable pile électrochimique entre deux parois de verre. Comme le montre la figure 33, on construit par couches successives un empilement de matériaux comprenant alternativement une couche conductrice, un matériau réactif correspondant à l'anode, un matériau électrolytique permettant le rééquilibrage des charges par déplacement ionique lors de la production ou de l'absorption d'électrons, puis la cathode et la seconde couche électrique. Lorsque la pile est « chargée », l'oxyde de tungstène, qui constitue le matériau réactif, est dans le degré d'oxydation 6 et est bleu foncé. Lorsque la pile est déchargée, l'oxyde de tungstène, dans un degré d'oxydation moindre, est transparent.

Cela donne la possibilité de passer continûment d'un vitrage transparent à un vitrage bleu foncé, comme illustré sur la figure 34.

Il faut noter que cette propriété est différente de celle des verres photochromes utilisés pour les lunettes qui foncent en présence de lumière ultraviolette, ce qui correspond aussi à deux états d'oxydation différents d'une molécule organique ou minérale, mais sous l'action de photons plutôt que d'électrons. Notons qu'il existe aussi des verres thermochromes qui changent de teinte sous l'action de la chaleur.

Une autre propriété permet de passer d'un verre transparent à un verre dépoli, qui diffuse la lumière dans toutes les directions. Contrairement au verre électrochrome dont la transmission diminue quand il fonce, cette technologie



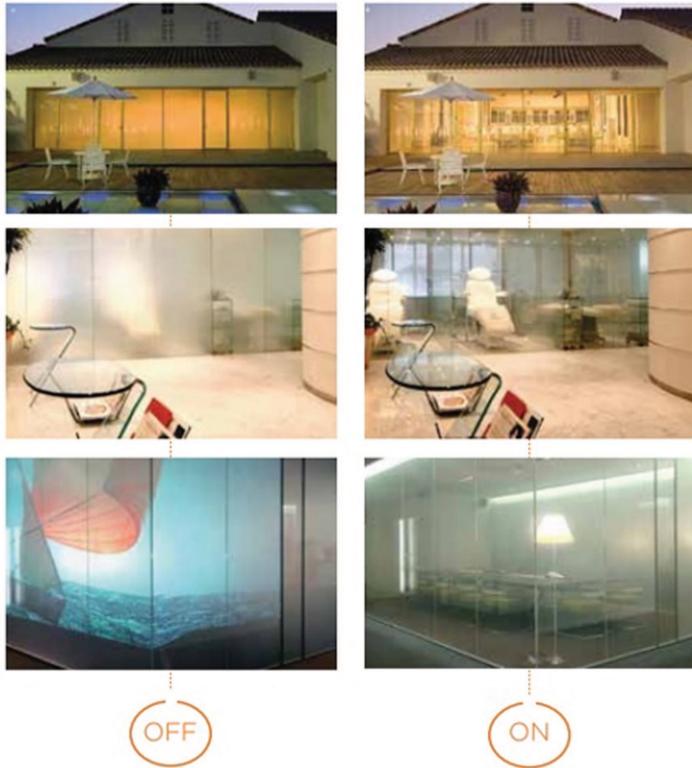
**FIGURE 33.** Élaboration des couches formant un empilement électrochrome. Le principe de ce verre, qui passe de transparent à bleu foncé, est d'installer une pile très mince entre deux plaques de verre conducteur : selon que la pile est chargée ou déchargée, l'état d'oxydation des ions la composant change de couleur. © DR / Archives de Saint-Gobain.



**FIGURE 34.** Illustration de l'effet électrochrome. Par un simple contrôle électrique, on peut passer d'un vitrage transparent à un vitrage foncé permettant de réguler la quantité de lumière entrant dans une pièce. © DR / Archives de Saint-Gobain.

permet au verre de conserver une transmission à peu près équivalente, mais en diffusant la lumière, ce qui empêche de voir les objets derrière une vitre ou permet de s'isoler visuellement, tout en recevant de la lumière. Il est possible de passer d'un verre transparent à un verre dépoli en plaçant un film dit PDLC (Polymer Dispersed Liquid Crystal) entre deux plaques de verre

recouvertes d'une couche conductrice. Ce film est constitué de petites gouttelettes de cristal liquide dans une matrice polymère. En jouant sur l'orientation du cristal liquide dans un champ électrique et sur le fait que l'indice de réfraction est différent selon que le cristal liquide est orienté ou désorienté, on peut ainsi passer d'un état orienté (dans lequel l'indice des gouttelettes est identique à celui du polymère, ce qui donne l'état transparent) à un état désordonné (dans lequel les indices sont différents et la lumière diffusée par les gouttelettes). Ce phénomène est illustré par la figure 35.



**FIGURE 35.** Illustration du verre Privalite. Dans cette application, un film polymère contenant des gouttelettes cristal liquides (nématiques) qui peuvent passer, sous l'effet d'un champ électrique, d'un état orienté (transparent) à désorienté (turbide). Cela permet, tout en transmettant la lumière, de voir à travers le vitrage ou de donner un aspect « dépoli » interdisant de voir ce qui se passe de l'autre côté de la vitre. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Cette possibilité de contrôle des propriétés optiques du verre par la combinaison de dépôts de couches et l'utilisation d'un courant électrique ouvre d'immenses perspectives bien plus riches que les exemples existants décrits ci-dessus.

# 5

## La fabrication du verre

### La composition du verre

Nous avons vu que le verre était constitué le plus souvent de silice, de carbonate de sodium et de carbonate de calcium. Pour fabriquer du verre, il faut donc faire fondre ensemble ces trois matières premières initialement sous forme de poudres (en ajoutant plusieurs autres additifs en quantité moindre). Bien que ce procédé ait été étudié depuis des centaines d'années, la description précise de cette fusion n'est pas encore entièrement comprise aujourd'hui. Cette fusion donne lieu à une succession de réactions chimiques et physico-chimiques qui conduisent au matériau tel que nous le connaissons. Comme on l'a récemment<sup>14</sup> démontré, cette transformation débute par la réaction de particules solides sur d'autres particules solides formant un mélange qui fond à plus basse température que chacun des constituants séparément. Sur cette base et dans un mélange de solides en train de fondre, des réactions chimiques en milieu solide et liquide produisent un dégagement de gaz. On est donc en présence d'un milieu d'une grande complexité : solide, liquide et gaz sont mélangés en donnant lieu à des réactions chimiques. Les cinétiques des différents processus ont lieu avec des temps caractéristiques différents, ce qui entraîne que, même fondu, le verre continue d'être élaboré (les réactions chimiques se poursuivent) et les bulles de gaz doivent être éliminées (on appelle affinage du verre la disparition des bulles

---

<sup>14</sup> E. Gouillart, M. J. Toplis, J. Grynberg, M.-H. Chopinet, E. Sondergard, L. Salvo, M. Suéry, M. Di Michiel, and G. Varoquaux, *Journal of the American Ceramic Society* 95. P. 1504 (2012).

jusqu'à une stabilité chimique du verre, un peu comme l'affinage des produits alimentaires).

La fabrication de verre dans un four prend plusieurs heures voire plusieurs jours et dépend beaucoup de la nature du procédé utilisé. Nous allons décrire l'évolution des procédés et ainsi comprendre pourquoi ce matériau reste si particulier à fabriquer.

## L'élaboration du verre : une histoire humaine

Revenons sur une des propriétés essentielles du verre : sa viscosité. Elle dépend continûment de la température. Nous avons vu précédemment que, contrairement à la plupart des matériaux, le verre chauffé passe progressivement de l'état solide (à température ambiante) à l'état liquide (au-dessus de 1 000 °C environ). Contrairement à d'autres solides qui passent généralement brutalement de l'état solide à l'état liquide à une température bien déterminée (température de fusion, par exemple le fer fond à 1 538 °C), le verre s'amollit dès 600 °C, ensuite il devient pâteux puis se transforme en un liquide visqueux qui finit à très haute température par être un liquide relativement fluide. À 1 500 °C, sa viscosité est une dizaine de fois celle de l'eau (comparable à celle du miel). Cette propriété exceptionnelle a été mise à profit dans les procédés de fabrication du verre et surtout dans sa mise en forme. Nous devons la garder en tête pour comprendre comment l'ingéniosité humaine a su l'utiliser afin de s'en faire une alliée dans la mise au point de procédés originaux.

## Les fours

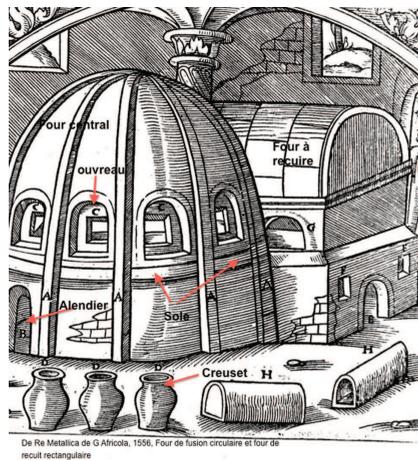
Revenons à l'étape d'élaboration du verre lui-même au cours de l'histoire.

L'homme, plusieurs milliers d'années av. J.-C., avait appris à travailler puis à élaborer des métaux à partir de minerais : le cuivre puis le bronze et enfin plus récemment le fer. Les bas fourneaux étaient alors des fours dans lesquels étaient fabriqués ces métaux et alliages. Des couches successives de charbon de bois et de minerais entraient dans l'élaboration du métal. À ces premiers fours succédèrent les fours verriers qui ont alors participé au développement d'une véritable industrie autour de la Méditerranée (figure 36).

L'invention du creuset s'est révélée particulièrement importante. Contrairement à la métallurgie où il est nécessaire de mélanger intimement le minerai et le charbon de bois (ou le charbon) pour produire une réaction de réduction donnant lieu au métal, le verre nécessite juste de la chaleur pour être élaboré. La possibilité de préparer le verre dans un récipient réfractaire, en premier lieu



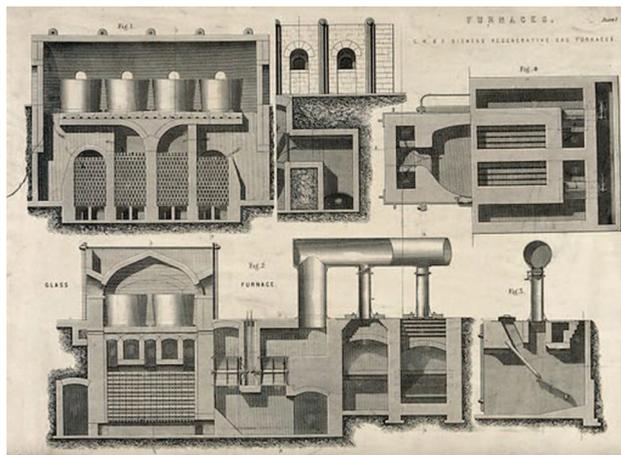
**FIGURE 36.** Fours à verre découvert en Israël. On retrouve des fours verriers tout autour de la côte méditerranéenne. Ces fours servaient à fabriquer du verre qui ensuite voyageait et était vendu dans les pays limitrophes. Ces fours étaient installés à proximité des sources de matière première nécessaires à la fabrication du verre. Adapté de <https://www.hisoma.mom.fr/recherche-et-activites/les-ateliers-de-verriers-et-de-faienciers-de-legypte-greco-romaine>.



**FIGURE 37.** Le creuset, une invention utile au verre. La figure de gauche représente un four du Moyen Âge, celle de droite, un four du XIX<sup>e</sup> siècle. On élaborait le verre dans des creusets pour pouvoir ensuite le transporter afin de pouvoir par la suite l'utiliser encore liquide pour élaborer des objets en verre. © DR.

fait d'argile, chauffé à haute température dans un four, a permis de fabriquer du verre de très bonne qualité, en le séparant de la source de chauffage (figure 37).

Tout au long des centaines d'années où ils ont été utilisés, les fours verriers ont subi des évolutions lentes et continues. Au XIX<sup>e</sup> siècle, le four Siemens préfigure les fours modernes en introduisant un système de récupération de chaleur (figure 38).



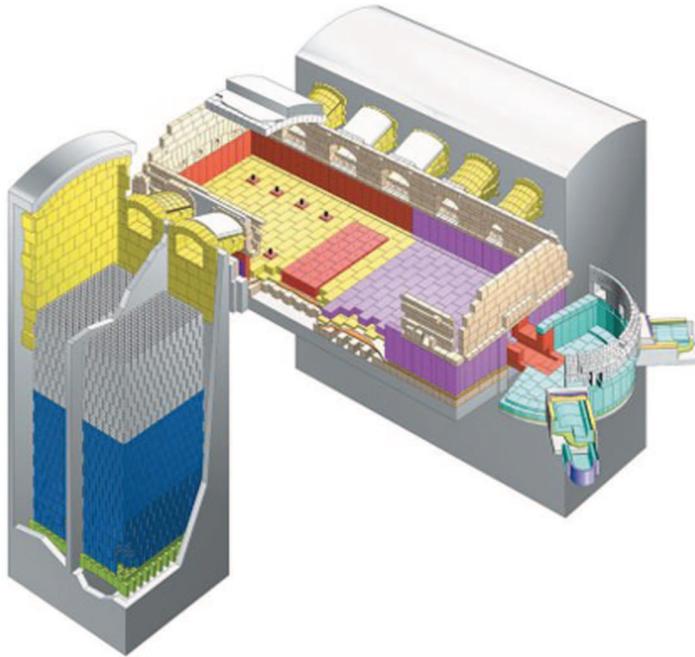
**FIGURE 38.** Schéma du four Siemens. Au XIX<sup>e</sup> siècle, les fours sont devenus industriels avec l'arrivée des premiers fours de grande taille. On voit ici un four muni de récupérateur de chaleur. De chaque côté sont situées des chambres réfractaires permettant alternativement d'évacuer les fumées chaudes puis de faire arriver les gaz combustibles. En alternant l'arrivée des gaz combustibles de chaque côté, on peut ainsi les réchauffer et économiser de l'énergie. Ce procédé est toujours utilisé dans les fours modernes (voir figure 39).

Aujourd'hui, un four verrier permet de préparer le verre en continu. Le verre plat est élaboré dans d'énormes fours pouvant, pour les plus gros, fabriquer jusqu'à environ 1 000 tonnes de verre par jour, dans une piscine de verre fondu (contenant 1 000 à 2 000 tonnes de verre) porté à 1 500 °C (figure 39).

La voûte du four est chauffée par des brûleurs transversaux<sup>15</sup> qui fonctionnent en alternance de chaque côté du four, dans un premier temps en brûlant du combustible pendant 20 min d'un côté et en laissant les gaz s'échapper par l'autre côté, ce qui permet de réchauffer un ensemble de réfractaires en utilisant la chaleur des gaz d'échappement. Ensuite, en renversant alimentation et échappement, le mélange combustible passe par l'échappement précédent, ce qui a pour effet de réchauffer les gaz injectés, en utilisant les réfractaires encore chauds. Ce mélange combustible est lui-même consommé pour s'échapper par l'autre côté et ainsi de suite. Ceci permet d'économiser l'énergie nécessaire pour porter les gaz à la température de combustion.

Un four moderne n'est donc rien d'autre qu'un réacteur chimique, mais avec certaines limitations compte tenu des températures et des volumes traités.

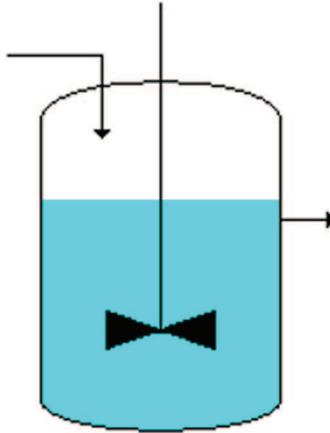
<sup>15</sup> Dans le cas le plus fréquent pour la fabrication du verre plat. Il existe aussi des fours à boucle où l'échappement se fait en entrée du four. Ils sont souvent utilisés pour la fabrication de bouteilles de verre.



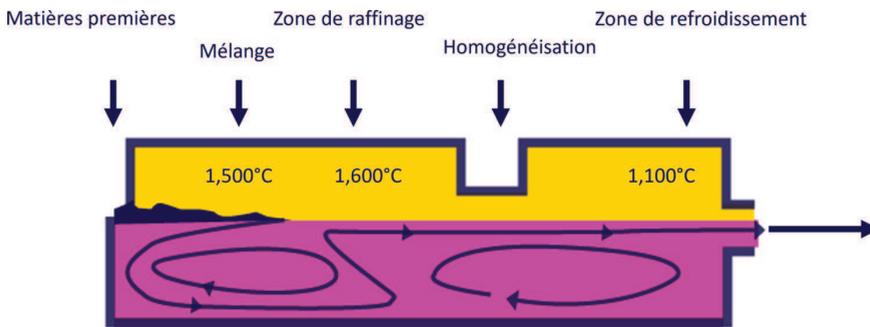
**FIGURE 39.** Four verrier moderne. Les brûleurs permettant la combustion des gaz arrivent par un des côtés, les fumées de combustion repartent par l'autre côté. Les fumées passent par des chambres réfractaires permettant de stocker la chaleur et, en alternant toutes les 20 min environ l'arrivée des gaz d'un côté ou de l'autre, on réchauffe les gaz de combustion, économisant ainsi de l'énergie (voir figure 38). © DR / Archives de Saint-Gobain.

La science du génie chimique s'est développée dès le XIX<sup>e</sup> siècle. Elle a appris à contrôler, dans des réacteurs développés à cet effet, des réactions chimiques complexes. En ajustant le temps de mélange (généralement contrôlé par des agitateurs adaptés) et le temps de séjour qui dépend essentiellement du flux entrant et sortant de la matière pour les procédés continus, les ingénieurs chimistes ont appris ainsi à maîtriser la qualité de la production en s'adaptant au temps caractéristique propre de la réaction chimique (figure 40).

Malheureusement, on ne peut pas mettre en place des agitateurs dans un four verrier compte tenu de la température et de la taille du four. À cause de cette température très élevée, seuls des agitateurs en matériaux réfractaires ou en platine peuvent être raisonnablement utilisés. Mais, d'une part, la taille de ces objets construits avec ces matériaux réfractaires, combinée à une usure rapide, rend leur utilisation difficile ; d'autre part, sur des fours de cette taille, le coût du platine étant élevé, son utilisation n'est pas envisageable. C'est donc sur des phénomènes de convection naturelle (mouvement des liquides sous l'effet de différences de température) qu'il faut s'appuyer pour s'assurer du mélange à



**FIGURE 40.** Schéma d'un réacteur chimique. Dans un réacteur chimique, on élabore des produits en jouant sur trois temps caractéristiques : le temps propre de la réaction chimique, le temps de mélange (qui dépend de l'agitation) et le temps de séjour (dépendant du flux de matière entrant et sortant du four).



**FIGURE 41.** Schéma des mouvements de convection de la masse vitreuse en fusion à l'intérieur d'un four. Dû à la différence de température à l'intérieur du four, un phénomène naturel de convection (mouvement du liquide allant du chaud vers le froid) se produit, déclenchant des « courroies » qui transportent le verre d'un endroit à l'autre du four, permettant ainsi un certain niveau de mélange du verre fondu. © DR / Archives de Saint-Gobain.

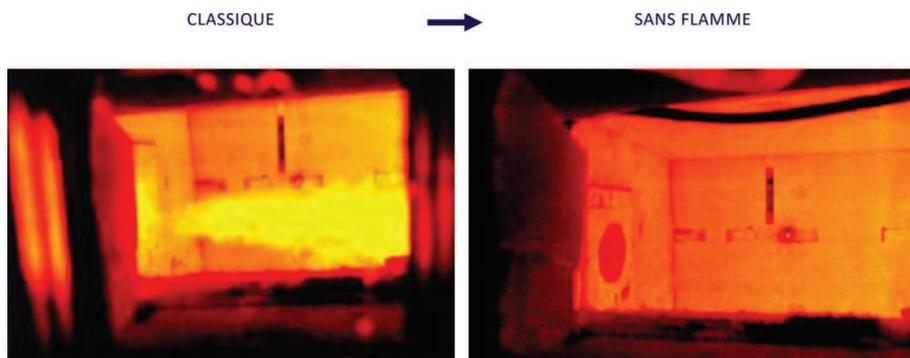
l'intérieur du verre en fusion. Ces phénomènes sont partiellement contrôlés par la géométrie des fours et les différences de température, mais ils ne permettent pas la maîtrise qu'offriraient des mélangeurs mécaniques (figure 41).

De ce fait, le temps de séjour du verre dans un four verrier varie de quelques heures à quelques jours selon l'endroit où le verre se trouve dans le four. Le temps de mélange est très dépendant des mouvements hydrodynamiques de la masse liquide de verre. En conséquence, ce temps est hétérogène et difficile à contrôler. À cause de sa complexité dans la conception et le pilotage des fours,

le métier de verrier, qui pourtant bénéficie de centaines d'années de savoir-faire, reste un art tout autant qu'un métier de technicien ou d'ingénieur. C'est la raison pour laquelle les fours verriers n'évoluent que très lentement et que toute modification doit se faire avec une grande prudence. Récemment, la modélisation numérique a permis de faire des progrès importants dans la maîtrise des fours, mais la fusion du verre reste un art à part entière.

Comme nous venons de le voir, les évolutions des fours verriers sont très lentes. En raison de la complexité des phénomènes hydrodynamiques, thermiques, chimiques et physico-chimiques qui ont lieu dans un four, il est très compliqué d'envisager des évolutions drastiques. Malgré tout, des recherches dans ce domaine se sont développées, sans interruption, depuis l'avènement des fours modernes.

Citons par exemple les nombreuses améliorations concernant les processus de combustion, évoluant ultimement vers la disparition des flammes au-dessus du verre en fusion pour laisser la place à une combustion homogène ayant de nombreux avantages, en particulier d'un point de vue des rejets de fumées (figure 42).



**FIGURE 42.** Combustion homogène dans un four dit four « sans flamme ». Dans un four sans flamme, la combustion des gaz se fait de manière homogène et non turbulente. Ceci permet d'avoir une température des gaz plus homogène et d'éviter les très hautes températures génératrices de produits polluants dans les fumées. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Il existe aussi des fours électriques dans lesquels la chaleur est apportée par effet Joule directement à l'intérieur du bain de verre fondu (l'électricité se propage à cause des nombreux ions en solution dans le verre). Ceci est évidemment très attrayant, mais les fours de ce type ne sont réellement performants industriellement que si le coût de l'électricité est compétitif par rapport au gaz <sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Remarquons que la mise en œuvre d'une taxe CO<sub>2</sub> bénéficierait au four électrique si l'électricité est produite de façon décarbonée.

Des idées plus radicales ont été aussi envisagées et mises en œuvre. Par exemple, au lieu de disposer les brûleurs au-dessus du bain de verre fondu pour chauffer la voûte qui ensuite par rayonnement chauffe le verre, comme dans un procédé classique, les brûleurs sont immergés directement dans le bain de verre. La chaleur est ainsi générée au sein même du verre en fusion et les bouillonnements liés à la combustion brassent fortement le verre liquide. La fusion est rapide et les surfaces de four réduites, environ d'un facteur 10 (figure 43) pour le même débit (la tirée).



**FIGURE 43.** Four à brûleurs immergés. Dans un four à brûleurs immergés, les gaz de combustion arrivent par le bas à l'intérieur du verre en fusion et, en générant des « bouillons », permettent un mélange très efficace de la composition verrière en fusion. Ceci permet de diminuer sensiblement la taille des fours pour la même productivité. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Si cette technologie paraît attractive, elle ne résout malheureusement pas la problématique de l'affinage qui correspond à la disparition totale des bulles de gaz liées aux réactions chimiques à l'intérieur du verre fondu.

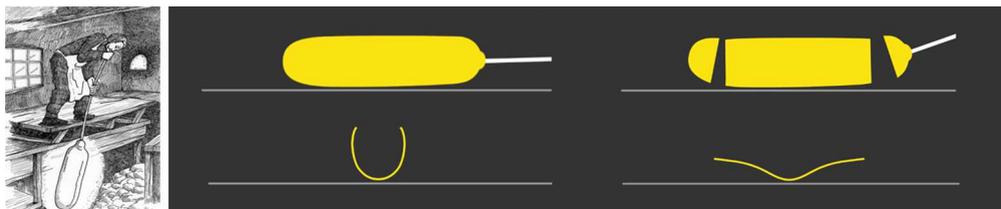
## La glace et la vitre : un procédé initial commun qui se différencie

Tout à ses débuts, le verre a servi à fabriquer des bijoux. Puis l'apparition des vitraux au Moyen Âge a rendu spectaculaire l'utilisation des propriétés de transparence, de protection et de décoration du verre. Pour autant, l'utilisation systématique du verre en tant que vitre n'a été qu'assez tardive pour équiper les fenêtres et amener la lumière naturelle tout en protégeant des intempéries les habitats. Réservée au départ aux familles les plus riches, la démocratisation de la vitre n'a eu lieu qu'au XVII<sup>e</sup> siècle et encore relativement lentement.

Avant cette période, la grande et noble utilisation du verre plat était celle de la fabrication de miroirs. C'était aussi l'utilisation qui avait la plus forte valeur ajoutée, car ces miroirs étaient des objets de luxe tout en étant relativement répandus dans les demeures des nobles et des bourgeois. Nous verrons ultérieurement pourquoi le terme de glace est un peu tombé en désuétude, bien qu'il soit toujours utilisé dans la galerie des Glaces de Versailles ou dans l'expression « se regarder dans la glace ». Les termes « vitre » ou « glace » correspondent à des produits différents, mais trouvent tous les deux leur origine dans le verre soufflé : procédé utilisé depuis l'Antiquité pour fabriquer des objets en verre. Cette fabrication utilise pleinement la variation en température de la viscosité du verre. Elle consiste à prélever une boule de verre en fusion au bout d'une canne creuse lorsque le verre est encore pâteux (la paraison). Ensuite, un ouvrier hautement qualifié souffle dans cette pâte tout en opérant un mouvement de rotation afin de respecter la symétrie de l'objet soumis à la gravité. En maintenant, par un ajustement constant de la température, la viscosité idéale (cela se fait en réchauffant périodiquement), le souffleur de verre peut ainsi former un objet creux que l'on peut à loisir transformer en récipient (bouteille, carafe, pot...) ou en une multitude d'objets décoratifs.

Ce procédé peut être aussi utilisé pour fabriquer du verre plat. Dans ce cas, on obtient des cylindres en imprimant à la boule de verre creuse, formée au bout de la canne, non seulement un mouvement de rotation, mais aussi un mouvement de balancier. En utilisant ainsi la gravité, l'objet en verre creux s'allonge pour former un cylindre (le manchon). Une fois réalisé, ce cylindre à deux bouts hémisphériques est refroidi, puis coupé au niveau des deux hémisphères, souvent en appliquant un fil ou une barre métallique de température différente, le choc de température provoquant la cassure du verre. Pour terminer, il est fendu selon une génératrice du cylindre, le long de la hauteur du cylindre. Ce cylindre creux fendu est ensuite placé sur un reposoir plat dans un four autour de 600-700 °C pour le « ramollir » et, sous l'effet de son propre poids, il s'aplatit pour former un objet rectangulaire plat (figure 44). Cette dernière opération est réalisée dans un four appelé « l'étenderie », terme toujours en vogue bien qu'il ait perdu sa signification dans la dernière étape des procédés modernes de fabrication du verre.

Cette étape de fabrication de verre plat par soufflage a longtemps été commune à la fabrication du verre à vitre ou de la glace (verre pour miroir). La suite des procédés de fabrication différait selon que l'on voulait obtenir l'un ou l'autre. Pour le verre à vitre, le verre plat était utilisé tel quel en le coupant aux dimensions voulues pour la fenêtre. Notons que dans sa version la plus élaborée, cette technique pouvait permettre de fabriquer des plaques de verre de près de 2 m de côté (figure 45).

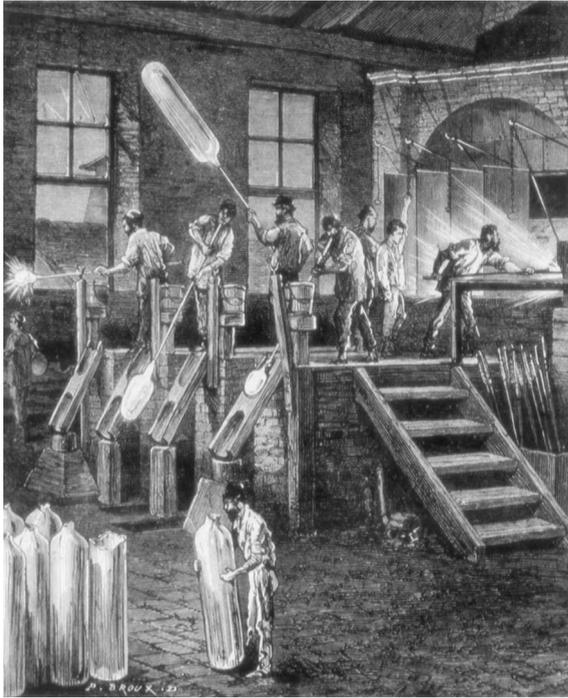


**FIGURE 44.** Fabrication d'une plaque de verre à partir d'un cylindre fendu préparé par soufflage. Après avoir fabriqué un cylindre par soufflage (figure de droite), on coupe les deux extrémités, puis il est procédé à une ouverture du cylindre selon l'axe principal, puis un réchauffement dans un four appelé l'étenderie à une température où le verre se ramollit sans fondre pour qu'il s'aplatisse (figure de gauche). © DR / Archives de Saint-Gobain.

Ce verre à vitre avait cependant un certain nombre de défauts. Bien que transparent, il contenait un certain nombre de bulles dues à un affinage du verre incomplet. Ces bulles étaient allongées du fait du procédé de formage<sup>17</sup> (le cylindre est étiré par gravité). De plus, la planéité du verre était loin d'être parfaite : les faces du verre étaient imparfaitement parallèles, résultat d'une épaisseur irrégulière et d'un gondolement de la plaque. Ce verre à vitre, bien qu'assurant ses fonctions principales (protection contre les intempéries et transparence), avait donc des qualités optiques limitées, comme on peut le voir sur la figure 46. Mais ces limitations optiques ne posaient en fait pas vraiment de problème au quotidien : n'oublions pas que lorsque nous regardons à travers une fenêtre nous focalisons notre vue à l'infini (sur un paysage ou des objets situés loin de nous) et sommes donc relativement peu sensibles aux défauts inhérents à cette fabrication situés à proximité de nos yeux.

À ce stade du procédé, à cause de ces imperfections, la qualité n'est pas suffisante pour former du verre pour des miroirs (glace). S'il est acceptable d'avoir des vitres de qualité médiocre, mais qui n'entravent ni la quantité de lumière pénétrant dans la maison ni la protection contre la pluie et le vent (et le froid ou la chaleur...), il est inacceptable de se regarder dans un miroir pour y voir son visage ou sa silhouette déformés. Dans ce dernier cas, nous focalisons notre vue sur l'image, juste au niveau du vitrage et donc le moindre défaut nous apparaît. La préparation de « glaces » est donc plus complexe que celle du verre à vitre. Il faut tout d'abord partir d'une qualité de verre meilleure et sans bulles. Il s'agit donc de laisser affiner le verre suffisamment longtemps lorsqu'il est fondu, pour que le matériau de départ soit exempt de ces bulles préjudiciables à la qualité espérée. Cette technique particulière avait été développée par les verriers

<sup>17</sup> Cela est facilement observable sur les vitrages anciens où, en se rapprochant, on peut remarquer de nombreuses bulles de forme allongées.



(a)



(b)

**FIGURE 45.** (a) Cylindres préparés par soufflage pour verre à vitre. Des cylindres de très grande taille pouvaient être préparés (environ 150 cm de long au maximum). Ce procédé permettait de fabriquer des vitres jusqu'à l'arrivée des procédés par étirage. Il est encore utilisé dans certaines occasions. (b) Ouvrière de l'usine d'Aniche (Hauts-de-France) portant des cylindres de verre (appelés aussi canons) de grande taille. © DR / Archives de Saint-Gobain.

vénitiens au cours du temps et demande un réel savoir-faire qui a longtemps été jalousement protégé par les autorités de la Sérénissime. Une fois le verre affiné, en utilisant la même technique que pour le verre à vitre, il faut fabriquer un cylindre plus épais, car, comme nous le verrons, les étapes suivantes seront consommatrices de matière. Du fait de cette épaisseur plus importante, la surface de l'objet est plus petite, car elle est limitée par le poids de la paraison que peut manier manuellement un ouvrier. On est donc arrivé à fabriquer, grâce à la même technologie que pour le verre à vitre, une plaque de verre plus petite et plus épaisse.

Vient ensuite l'étape de « doucissage » qui consiste à rendre parallèles les deux faces de la plaque par une abrasion de ces deux faces. Il en résulte une plaque sans bulles avec deux faces parallèles. Par contre, cette étape de doucissage produit un verre dépoli, ce qui implique qu'il est difficile de voir à travers



**FIGURE 46.** Vitrage ancien muni de vitres préparées par soufflage. Les vitres préparées par soufflage étaient irrégulières et souvent pleines de bulles. Ce phénomène n'était pas trop gênant pour laisser entrer la lumière ou voir de loin au travers du vitrage (l'œil accomode la vision et n'est pas sensible aux défauts situés à proximité). Par contre, en regardant de près les vitres, on s'aperçoit aisément des défauts. On peut retrouver ce type de vitres dans des bâtiments anciens. © DR.

cette plaque. Il faut donc ensuite polir finement ce verre pour qu'il retrouve sa transparence. Pour cela, on utilise un abrasif très fin (de l'oxyde de fer) avec lequel, pendant des heures, les ouvriers frottent la surface du verre pour retrouver la transparence perdue. Ce long traitement s'effectuait autrefois manuellement, puis il s'est ensuite progressivement mécanisé au cours du temps.

Jusqu'au  $XX^e$  siècle, ces différentes étapes nécessitaient de nombreux jours et demandaient un labeur intensif de la part des ouvriers attelés à ces tâches.

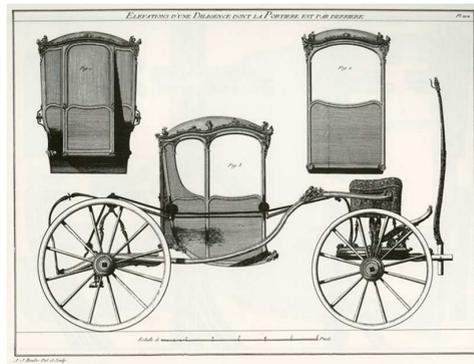
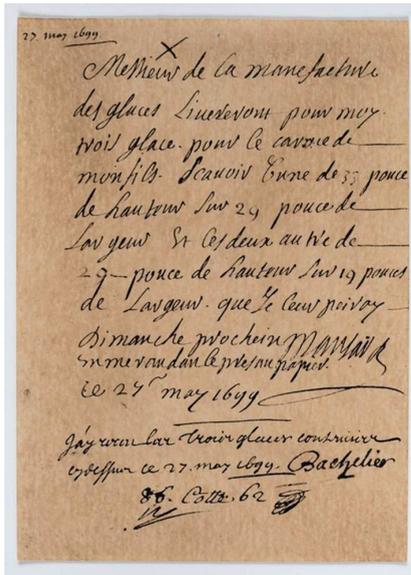
Après ces différents traitements, la glace pour miroir était enfin prête à être étamée (c'est le terme technique employé), avec un amalgame d'étain et de mercure jusqu'au milieu du  $XIX^e$  siècle, puis avec un procédé de dépôt d'argent ensuite.

On réalise aisément que le coût de la glace est sensiblement plus élevé que celui du verre à vitre (d'un facteur 10 environ). La glace a donc plus de valeur que la vitre. La fabrication de la glace est le métier le plus noble et les deux métiers de fabricant de verre à vitre et fabricant de glace resteront séparés jusqu'au milieu du  $XX^e$  siècle.

On remarquera sur la figure 47 une publicité des années 1950 vantant la qualité de la glace par rapport à celle de la vitre. Pratiquement sans défaut de parallélisme (le défaut de parallélisme déforme les objets) et avec beaucoup moins de défauts internes (en particulier des bulles), la glace offre une qualité optique sans commune mesure avec la vitre.

## Encadré 8 – La glace utilisée comme vitre : le début du verre automobile

Les propriétés optiques bien meilleures de la glace par rapport à la vitre avaient bien entendu été remarquées par les gens riches. Ainsi, pour les carrosses de la famille royale, on pouvait utiliser non pas du verre à vitre, mais de la glace. La Compagnie de Saint-Gobain en a encore la trace dans ses archives avec cette commande de glace pour le carrosse du Dauphin en 1699. C'était le début d'une longue histoire de l'utilisation du verre dans l'automobile.

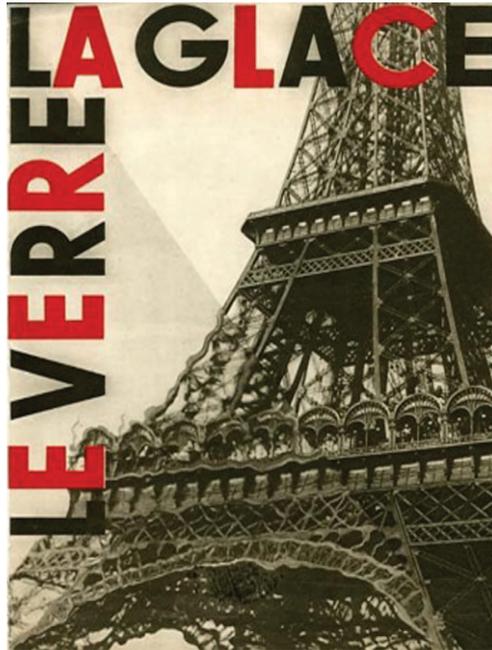


**FIGURE E5.** – Commande du carrosse du Grand Dauphin en 1699 (figure de gauche). Plan d'un coupé (figure de droite), une voiture légère raccourcie au ras des portières, pour circuler plus facilement dans les rues étroites et les encombrements des villes (époque Louis XV). © Archives de Saint-Gobain.

## Le verre en plaque, la coulée sur table

Dans la deuxième moitié du XVII<sup>e</sup> siècle, une innovation historique allait bouleverser le procédé de fabrication de la glace : l'invention de la coulée sur table et sa mise en œuvre dans l'usine de la Manufacture royale des glaces, entreprise installée à Saint-Gobain en Picardie depuis 1693. Comme nous l'avons déjà noté dans d'autres cas, cette invention provient historiquement d'une découverte que l'on peut considérer de nouveau comme accidentelle.

Bernard Perrot, un maître verrier orléanais d'origine italienne, travaillant en France, titulaire de différents privilèges industriels, laisse par accident



**FIGURE 47.** Illustration par cette publicité de Saint-Gobain de la différence entre la vitre et la glace. Cette publicité de 1930 montre bien que, même au siècle dernier, les différences entre la vitre et la glace étaient notables. Elles ont disparu avec l'arrivée du procédé Float dans les années 1960. © DR / Archives de Saint-Gobain.

s'échapper un morceau de verre en fusion. Celui-ci tombe sur une pièce métallique dont il prend la forme. Bernard Perrot a alors l'idée de développer une technologie nouvelle pour fabriquer des médaillons en verre. Le procédé consiste à couler du verre sur un modèle en relief fait en plâtre. Puis, en dorant le côté lisse en creux, on obtient une sorte de camé donnant l'impression d'un relief. Il a développé cet art pendant plusieurs années. Actuellement, il reste trois exemplaires en France de portraits royaux fabriqués par Perrot : deux du roi Louis XIV et un de Monsieur son frère (figure 48).

Il semble, mais ceci reste un sujet de controverse, que c'est Louis Lucas de Néhou (voir biographie B16) qui mit au point ce procédé pour fabriquer des glaces de grande taille, procédé qu'il apporta à la Manufacture royale des glaces et devint directeur de l'usine du même nom. Ce fut l'invention de la coulée sur table<sup>18</sup>. Le procédé consiste à couler le verre sur une table en fonte. La coulée

<sup>18</sup> Louis Lucas de Néhou fut en procès avec la Compagnie de Saint-Gobain jusqu'en 1720, en réclamant la paternité exclusive du procédé et, par conséquent, le partage des bénéfices... Il a été d'abord à Tourlville, a disparu un temps, puis a refait surface à Saint-Gobain.



**FIGURE 48.** Portrait du roi Louis XIV par Bernard Perrot par verre coulé en creux sur une sculpture.  
© Archives de Saint-Gobain.

du verre est délimitée par deux réglettes placées de chaque côté de la table. Un rouleau permet d'aplanir la plaque de verre tout en fixant son épaisseur en s'appuyant sur les réglettes. On a pu fabriquer de cette façon des glaces épaisses de plus grande taille que celles obtenues par soufflage. La plaque de verre préparée était ensuite doucie pour égaliser les deux surfaces et les rendre bien parallèles. En dernier lieu, intervenait le polissage exécuté comme dans les procédés précédents pour retrouver la transparence.

Louis Lucas de Néhou apporta ce procédé à la Compagnie de Saint-Gobain et devint directeur de l'usine. Il passa ensuite beaucoup de temps à améliorer ce procédé qui, jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, a continué à être utilisé pour la fabrication des glaces. Un célèbre tableau (figure 49) montre la visite de la duchesse de Berry à l'usine de Saint-Gobain en 1824. Une spectaculaire reconstitution de ce procédé peut aussi être visionnée sur Internet<sup>19</sup>.

Le procédé de coulée sur table s'appliquait essentiellement à la fabrication de la glace qui avait la plus grande valeur marchande. Les vitres continuaient, elles, à être fabriquées par soufflage. La fabrication de la glace a subi au fil du temps de nombreuses améliorations, mais toujours en gardant les trois étapes : fabrication du verre plat, doucissage et polissage. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on

<sup>19</sup> <http://www.saint-gobain350ans.com/#!/fr/manufacture>.



**FIGURE 49.** Visite de la duchesse de Berry à l'usine de Saint-Gobain en 1822. On y voit une démonstration de la coulée sur table, invention de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Le dépôt de verre fondu sur une table en acier bordée par des réglettes fixant l'épaisseur puis laminé par un rouleau permettait de faire des plaques de verre épaisses de grande taille qui, une fois doucies et polies, permettaient d'obtenir des miroirs de taille impressionnante et de qualité exceptionnelle. © Edouard Pingret / Archives de Saint-Gobain.

arrivait ainsi à fabriquer des glaces de plus de 8 m de long alors qu'au début du siècle elles n'atteignaient pas 3 m (figure 50).

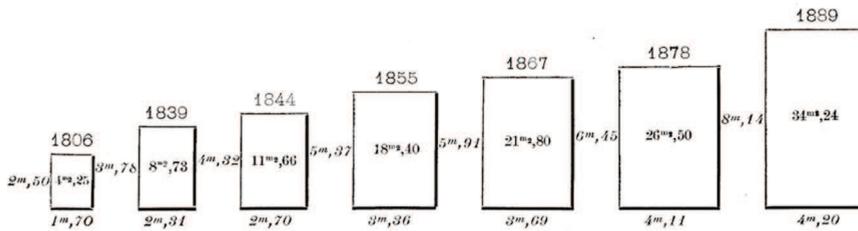
Il a fallu ensuite attendre le début du XX<sup>e</sup> siècle pour voir arriver la première amélioration notable qui a ouvert la voie aux procédés continus. En 1918, Max Bicheroux (figure 51), entrepreneur belge puis directeur de l'usine de Saint-Gobain d'Herzogenrath, eut l'idée de ne plus verser directement le verre sur la table, mais par l'intermédiaire d'une trémie, d'alimenter l'espace situé entre deux rouleaux et de laminier le verre encore pâteux, ce qui permettait d'augmenter encore la taille des glaces et de les découper en ligne<sup>20</sup>.

De plus, avec ce système, on pouvait aussi imprimer un motif sur le verre en utilisant l'un des rouleaux pour former le verre plat et l'autre pour imprimer.

La taille des glaces continua donc à augmenter, comme le montre cette photo prise en 1878 à l'usine de Manheim (figure 52).

L'augmentation de la taille des glaces demandait une mécanisation plus importante des procédés de doucissage et de polissage. Ces opérations se

<sup>20</sup> <http://www.saint-gobain350ans.com/#!/fr/transformation-de-la-matiere/verre-plat/detail/le-procede-bicheroux>.

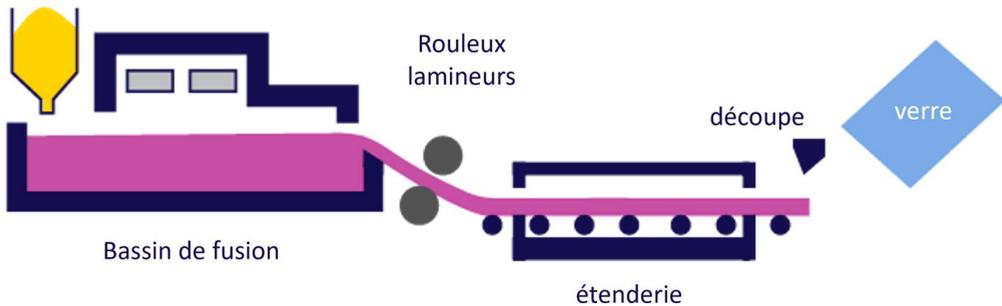


Les Glaces de Saint-Gobain aux Expositions universelles Françaises de 1806 à 1889.

Fig. 13

**FIGURE 50.** Évolution des tailles de glaces en fonction du temps. Ces glaces étaient obtenues par le procédé de coulée sur table. On peut apprécier ainsi les progrès technologiques faits en moins d'un siècle. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Matière première



**FIGURE 51.** Principe du procédé Bicherox. L'idée principale a été de remplacer la coulée sur table par une série de rouleaux, les premiers (lamineurs) permettant de régler l'épaisseur du verre et les suivants de véhiculer le verre jusqu'à ce qu'une fois refroidi, il puisse être découpé. Ceci a permis de passer d'un procédé « batch » à un procédé en continu améliorant grandement la productivité. © DR / Archives de Saint-Gobain.

poursuivaient sur des machines de plus en plus grandes, mais elles furent longtemps exécutées à la main, comme on peut le voir sur ces films vidéo accessibles sur Internet<sup>21</sup>.

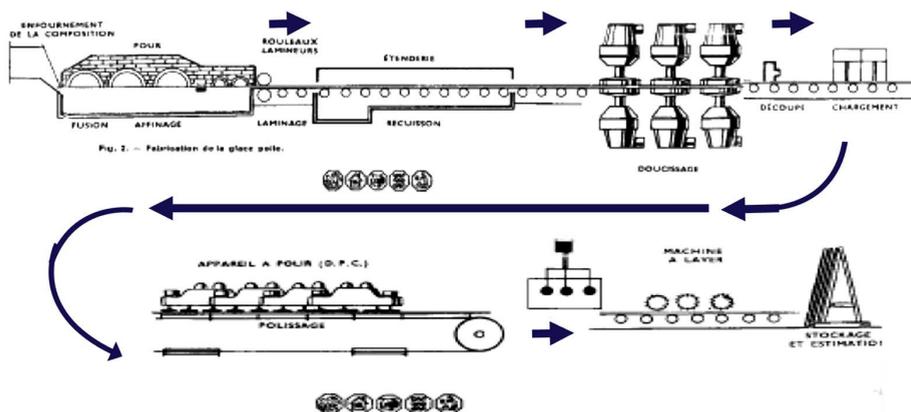
<sup>21</sup> <http://www.saint-gobain350ans.com/#!/fr/transformation-de-la-matiere/verre-plat/detail/danse-des-sabots>.



**FIGURE 52.** Une grande glace avant doucissage en 1878. © DR / Archives de Saint-Gobain.

Louis Boudin est à l'origine de la mise au point du premier procédé de coulée continue. En améliorant le procédé Bicheroux, en lui procurant une source plus importante de verre branché sur un four alimenté en continu, il fut ainsi possible de fabriquer des glaces de façon continue et de les découper au fur et à mesure. L'amélioration s'est poursuivie jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle et jusqu'au moment où le procédé Jusant, qui peut être considéré comme l'aboutissement ultime du procédé de coulée sur table, a été développé par Saint-Gobain. Il s'agissait de compléter la fusion dans un four, de poursuivre la lamination du verre entre des rouleaux puis d'opérer une première opération de doucissage en continu sur les deux faces du verre (procédé Twin-Doucis inventé par Pilkington), pour terminer par un polissage en continu toujours sur les deux faces. Ainsi, à partir des matières premières déversées dans un four, l'opération complète de production de la glace en continu jusqu'à l'obtention de sa qualité finale était devenue possible (figure 53).

Nous sommes arrivés à la fin des années 1950 et la Compagnie de Saint-Gobain peut fièrement considérer qu'elle produit la meilleure glace du monde à l'usine de Chanteraine (glace réputée dans le monde entier comme « la qualité Chanteraine »). Mais c'est sans compter avec l'arrivée prochaine d'une



**FIGURE 53.** Procédé Jusant, l'ultime évolution de la coulée sur table en continu. Dernière et ultime évolution du procédé de coulée sur table, le procédé Jusant permettait de fabriquer des plaques de verre doucies et polies en ligne. Il a existé jusqu'au début des années 1960 pour être ensuite détrôné par le procédé « Float » de Pilkington. © DR / Archives de Saint-Gobain.

innovation de rupture développée par Pilkington qui allait révolutionner la fabrication du verre et rendre le procédé Jusant obsolète.

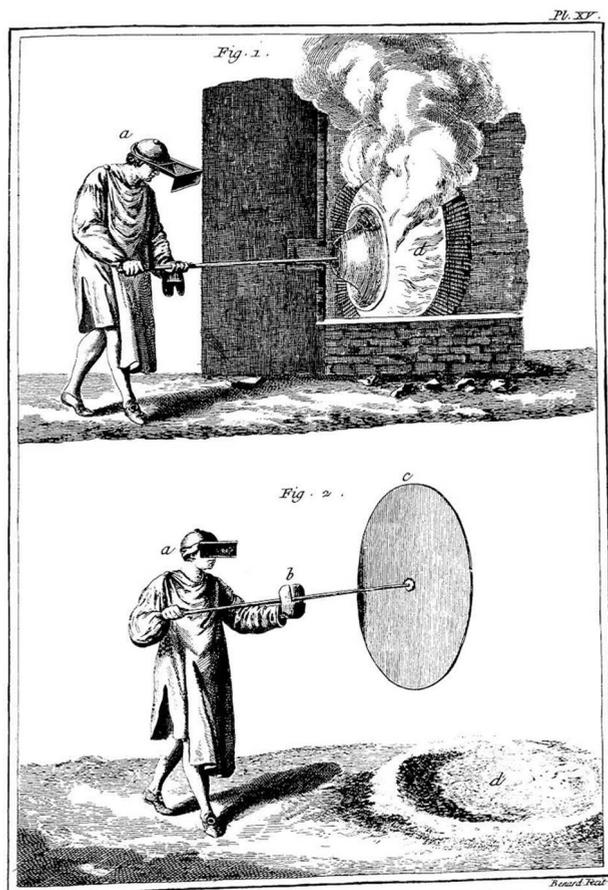
Avant d'aborder ce point, revenons pour un temps à la fabrication du verre à vitre.

## Innovations dans les procédés de fabrication du verre à vitre

Comme nous l'avons vu, le verre à vitre s'est développé depuis le Moyen Âge, mais n'a été systématiquement utilisé qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle. Sa méthode principale de fabrication, commune avec celle de la glace, était le soufflage qui permettait de fabriquer de grands cylindres, comme expliqué précédemment. Il existait cependant un autre procédé, mis en œuvre principalement dans le nord de l'Europe : le verre couronne (verre *crowm*) ou soufflage en plateau.

Toujours en utilisant la possibilité de mettre en forme le verre par adaptation de la température tout comme pour le procédé de soufflage, il s'agissait de former une plaque circulaire en aplatissant une boule de verre située au bout d'une tige puis d'induire une rotation rapide qui par effet de centrifugation permettait de former un disque plat, comme les figures 54 et 55 le montrent.

Il est très facile de reconnaître la signature de ce procédé dans les verres à vitre anciens (ou des vitraux anciens), car on retrouve dans le verre les traces circulaires de la formation du plateau en verre, comme le montre la figure 55.



*Verrerie en bois, opération de chauffer la  
Bosse pour l'ouvrir et en faire le Plat et le porter à la platte.*

**FIGURE 54.** Procédé historique de fabrication de verre couronne (*crown glass*). Ce procédé concurrent du procédé par fabrication de cylindres par soufflage débutait aussi par la fabrication d'une bulle soufflée, mais ensuite la bulle était écrasée sous forme de disque. © DR.

Comparativement à la glace, le verre à vitre a beaucoup moins bénéficié d'innovations. Ceci est dû à la moindre valeur attribuée à ce verre et à la productivité des souffleurs de verre. On aurait pu penser que le verre plat fabriqué par la technique de la coulée sur table aurait pu aussi servir à fabriquer du verre à vitre, mais ce ne fut pas le cas (sauf dans de très rares exceptions pour des clients très riches). En effet, le verre soufflé ou même le verre couronne pouvaient être utilisés tels quels : même si leur qualité optique n'était pas parfaite, elle était suffisante pour laisser passer la lumière et voir à travers le vitrage. Au contraire, dans le procédé de coulée sur table, le contact du verre avec le métal



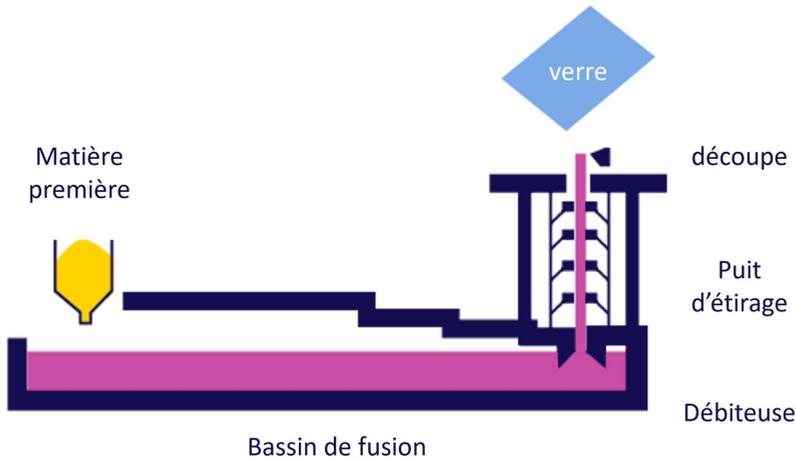
**FIGURE 55.** Vitrages utilisant des vitres fabriquées en verre couronne, on peut voir les traces circulaires liées à l'écrasement du verre encore pâteux.

produisait un verre dépoli qui nécessitait d'être ensuite douci puis poli pour retrouver sa transparence. L'avantage du verre obtenu par soufflage était que le verre ne touchait, lors de sa fabrication, aucun autre matériau. Ce procédé de fabrication d'un verre dont la surface n'a été en contact qu'avec l'air s'appelle « poli au feu ». Le fait que l'on obtienne un verre sans rugosités, donc transparent, est dû à la tension superficielle entre le verre et l'air : lorsque le verre est encore pâteux, l'air « gomme » les aspérités responsables du dépolissage du verre, car, comme pour un liquide, la surface du verre en fusion est la plus lisse possible.

Les opérations supplémentaires de doucissage et de polissage faisaient perdre non seulement de la matière, mais elles étaient longues et fastidieuses à mettre en œuvre et elles augmentaient sensiblement le coût au mètre carré du verre plat. Seule la production de la glace pour les miroirs permettait de supporter un tel coût.

Ce n'est qu'au début du  $xx^e$  siècle qu'un procédé innovant permettant de concurrencer le soufflage est apparu pour la fabrication du verre à vitre : le procédé Fourcault, du nom de son inventeur.

Émile Fourcault était un ingénieur belge (voir biographie B17). À cette époque, en Belgique, l'environnement était propice à l'innovation et les maîtres verriers belges étaient reconnus pour leur compétence. Émile Fourcault eut l'idée de développer un procédé qui continuerait d'utiliser le « polissage au



**FIGURE 56.** Principe du procédé Fourcault. Une lame de verre est étirée verticalement à partir d'un four. Cela permettait d'obtenir des plaques de grande taille : « polie au feu », c'est-à-dire avec un verre qui n'avait été en contact qu'avec de l'air. © DR / Archives de Saint-Gobain.

feu » tout en permettant directement la fabrication de grandes surfaces de verre plat. De façon très astucieuse, le procédé consiste à accrocher à une barre métallique du verre en fusion et à le tirer mécaniquement vers le haut afin d'entraîner un ruban plat qui refroidit en prenant de la hauteur pour pouvoir ensuite être découpé (figure 56).

Ce procédé donnera lieu à de multiples améliorations qui portent le nom des entreprises qui les ont mises au point. Ce sont les procédés : COLBURN, LIBBEY-OWENS, PITTSBURGH. . . Ils continueront à être exploités jusque dans les années 1960-1970.

## Le verre flotté (procédé Float), une véritable innovation de rupture

Nous venons de voir comment, sur les bases d'un procédé unique, le soufflage du verre, l'industrie du verre plat s'est développée autour de deux produits principaux : la glace, permettant de fabriquer les miroirs, avec une très forte valeur ajoutée, et le verre à vitre, de moindre valeur, mais correspondant à des volumes de plus en plus importants. Cette différenciation entre les deux marchés s'est poursuivie assez tardivement, jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

Par exemple, Saint-Gobain (la Manufacture royale des glaces devenue ensuite la Manufacture de Saint-Gobain) a été connu longtemps comme étant un fabricant de glaces et ne s'est diversifié dans le verre à vitre que dans les années

1930. On a pu noter que d'un point de vue du marché, la différence principale entre les deux produits était leur qualité optique. D'un point de vue industriel, alors que le verre à vitre était fabriqué directement et vendu avec une qualité de fabrication suffisante, mais limitée, liée au procédé de soufflage dans un premier temps puis d'étirage au XX<sup>e</sup> siècle, la glace au contraire nécessitait un coûteux travail de doucissage et de polissage. Même si la fabrication s'était beaucoup automatisée, cela impactait fortement le coût de la production et expliquait le prix de vente élevé (environ 5 à 10 fois plus cher que le verre à vitre).

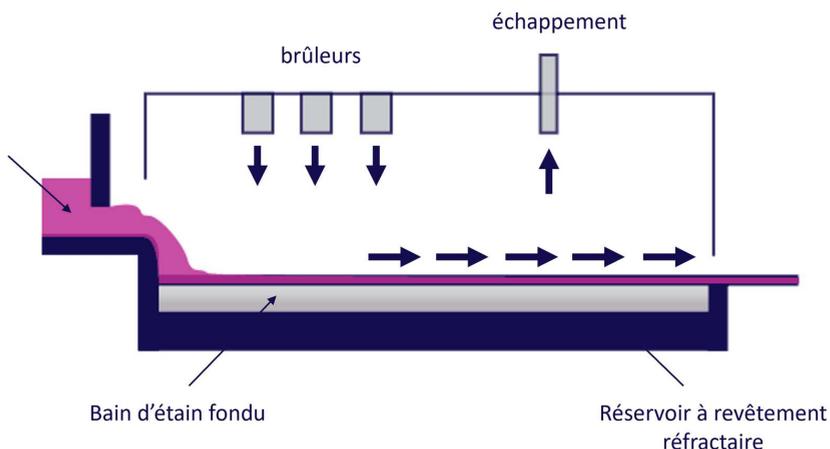
Au début des années 1960, on a vu apparaître un procédé révolutionnaire : l'histoire de la genèse et du succès de ce procédé est passionnante et mérite d'être racontée.

Dans les années 1950, le coulage en continu avec deux rouleaux laissait des traces sur le verre qu'il fallait ensuite effacer par les opérations de doucissage et de polissage.

Pilkington, une entreprise verrière anglaise, eut l'idée d'effacer ces traces en déposant le verre plat sur un bain d'étain fondu à une température assez élevée pour « recuire » ce verre. Du fait de la tension superficielle entre le verre et l'étain (deux liquides), ceci devait aplanir la surface. Cette idée fut appliquée avec un succès modéré, mais déboucha sur l'idée beaucoup plus innovante de fabriquer un ruban de verre directement sur un lit d'étain en fusion (l'étain fond à 231 °C et bout à 2 602 °C). L'objectif était de préparer le verre dans un four, de le déverser encore liquide et en continu sur un bain d'étain, pour former un ruban de verre. En refroidissant et en se solidifiant au fur et à mesure qu'il avance, le ruban de verre était alors tiré (sans marquer le verre) puis découpé en ligne (figure 57). Ainsi, l'une des faces était en contact avec l'air alors que l'autre face restait en contact avec le bain d'étain. Dans les deux cas, le contact du verre encore liquide avec un matériau solide qui en aurait détérioré la surface était évité.

À partir de ce moment-là, il était possible d'imaginer un procédé continu pour fabriquer du verre à vitre (pensait-on) avec une meilleure productivité que les procédés d'étirage. Bien sûr, assez vite, l'idée de fabriquer un verre à vitre ayant la qualité optique de la glace était dans l'air, mais la réalisation en était encore loin. De façon intéressante, comme cela a plusieurs fois existé dans l'histoire des innovations de grandes sociétés, il a fallu mettre en place une équipe distincte, entièrement dévolue à cet objectif, pour pouvoir le réaliser. Cette équipe s'est retrouvée souvent en opposition avec les laboratoires centraux et il a fallu de l'entêtement et de la chance pour que le projet aboutisse.

Alistair Pilkington, responsable du projet chez Pilkington (voir encadré 9), avait de très nombreux problèmes à résoudre. Le moment décisif est survenu lorsque le besoin d'investissement dans une nouvelle usine s'est profilé et qu'Alistair Pilkington a réussi à convaincre la direction d'utiliser ce nouveau



**FIGURE 57.** Schéma du procédé Pilkington de fabrication de verre flotté (Float). L'innovation radicale a été de déverser du verre en fusion sur un lit d'étain fondu, ce qui permettait au verre de n'avoir été en contact qu'avec de l'air ou un liquide et donc de garder la qualité nécessaire à conserver la transparence. Ce procédé a rapidement remplacé les anciens procédés et unifié les préparations de la glace et de la vitre. © DR / Archives de Saint-Gobain.

procédé, qui n'était pas encore tout à fait au point, plutôt que l'ancien. Son argumentation était essentiellement basée sur un coût d'investissement prévu deux fois plus faible que celui d'une usine classique, ce qui s'est révélé faux à court terme (l'usine a coûté trois fois le prix prévu...), mais vrai à long terme. Parmi les problèmes à résoudre, il y avait le fait que le bain d'étain, contrairement à ce qui avait été espéré et aux essais en laboratoire, laissait malheureusement des marques. L'équipe du projet réalisa que cela était dû à la formation d'oxyde d'étain entre l'étain chaud et l'oxygène de l'air. Cet oxyde d'étain surnageait, marquant ainsi le verre encore en fusion. Un progrès important fut réalisé en remplaçant partiellement l'air, au-dessus du bain, par de l'hydrogène et en évitant ainsi cette oxydation. En conséquence, les marques disparurent.

Vint ensuite le problème de l'épaisseur. L'épaisseur naturelle était de 6 mm<sup>22</sup>, mais il était inconcevable de ne fabriquer que des plaques de verre de cette épaisseur. Il fallut donc inventer un procédé dans lequel le ruban de verre encore pâteux, déposé sur son bain d'étain, pouvait être tiré ou poussé latéralement avec des roulettes (*Top-roll*) pour pouvoir en faire varier l'épaisseur. Enfin, il fallut concevoir astucieusement la forme du déversoir (la gorge) permettant au verre du four de se répandre sur le bain d'étain pour former le ruban. En effet, le verre ayant été en contact avec les réfractaires du four devait se retrouver non pas à la surface, où les traces des réfractaires auraient perturbé sa qualité,

<sup>22</sup> Le verre liquide sur de l'étain en fusion prend naturellement une épaisseur de 6 mm du fait de l'équilibre des tensions superficielles du verre et de l'étain.

mais à l'intérieur du ruban de verre. Voilà quelques-unes des problématiques techniques qu'il a fallu résoudre, bien d'autres problèmes ont dû aussi être surmontés pour aboutir au procédé final.

Le succès fut enfin au rendez-vous en 1964. Très vite, on s'aperçut que ce procédé était largement supérieur à tous les procédés existants et qu'il pouvait être utilisé à la fois pour le verre à vitre, mais aussi pour la glace, sans besoin supplémentaire de doucissage ou de polissage. Le rêve de certains de voir se rejoindre enfin les procédés de fabrication du verre à vitre et de la glace était enfin réalisé. On a vu disparaître cette distinction multicentenaire entre ces deux qualités de verre plat. Plusieurs faits ont sans doute contribué au succès de cette innovation de rupture qui a mis plus de treize ans à émerger : d'une part Pilkington ait été à l'époque une entreprise familiale et d'autre part une équipe « projet spécifique » en marge de la recherche de l'entreprise ait été constituée. Notons que son chef de projet appelé Alistair Pilkington n'était cependant pas un membre de la famille propriétaire de cette même industrie verrière (voir encadré 9).

## Le procédé « Fusion Draw »

Le procédé Float, bien que dominant depuis les années 1970, n'est pas le seul procédé à s'être développé depuis. La mise au point et le succès du procédé appelé « Fusion Draw » est encore une intéressante histoire d'innovation.

Tout commence dans les années 1970. Corning, la grande société verrière américaine, décide de développer un procédé pour fabriquer des pare-brise automobiles. Afin de contrôler au mieux la qualité optique du verre. Il fallait imaginer un procédé qui, sans avoir à être poli, permettrait une qualité encore meilleure que celle qui existait alors avec le verre Float. Celui-ci, même s'il n'avait pas besoin d'être poli, gardait une des faces (celle qui avait été en contact avec le bain d'étain) d'un peu moins bonne qualité que celle à l'air (polie au feu). L'idée fut de déverser du verre en fusion sur une poutre triangulaire en matériau réfractaire, ceci afin que, lors de son débordement, se constituent deux nappes parallèles qui, en se rejoignant et en s'écoulant par gravité, ne fassent plus qu'une seule et même nappe. Ainsi, le verre en contact avec le réfractaire se retrouvait à l'intérieur et les surfaces extérieures n'avaient été en contact qu'avec de l'air (figure 58). Elles étaient donc parfaitement polies au feu<sup>23</sup>.

---

<sup>23</sup> On appelle « poli au feu » du verre encore visqueux qui, en contact direct avec l'air, reste plat (à cause de la tension de surface) et donc d'une qualité voisine du verre poli. Ceci par comparaison au verre qui a été en contact avec un autre matériau et qui est rugueux et dépoli, et qu'il faut donc polir ensuite pour retrouver la transparence du matériau.

### Encadré 9 – Pilkington *versus* Pilkington

Qui donc est Alistair Pilkington ? Contrairement à ce que son nom laisse supposer, il ne fait pas partie de la famille Pilkington qui a créé et a possédé longtemps la société verrière anglaise qui porte son nom. L'histoire est intéressante et mérite d'être racontée<sup>24</sup>.

Le père d'Alistair Pilkington s'intéressait à la généalogie de sa famille. Pour approfondir ses recherches, il avait demandé un rendez-vous à Mr Pilkington qui portait le même nom et qui était le propriétaire de l'entreprise en question afin d'en apprendre un peu plus sur l'histoire de leurs deux familles. Il souhaitait savoir si elles avaient eu un lien dans le passé. Ils se retrouvèrent et convinrent rapidement que leurs deux familles n'avaient rien à voir l'une avec l'autre. Cependant, le père d'Alistair mentionna qu'il avait un fils, du nom d'Alistair, qui finissait ses études d'ingénieur. Le patron de Pilkington décida de le rencontrer puis de l'embaucher. Alistair intégra donc cette entreprise pour, par la suite, devenir le patron du projet de verre flotté (Float), avec les difficultés et le succès décrits dans ce livre. Pour résoudre les multiples problèmes auxquels il eut à faire face et prendre la décision risquée, mais réussie, d'investir dans une nouvelle usine avec ce nouveau procédé, son nom a-t-il été une aide précieuse ? L'histoire ne le dit pas...



FIGURE E6. – Photo d'Alistair Pilkington.

<sup>24</sup> Je tiens cette histoire de Maurice Hamon, ancien directeur des relations générales de Saint-Gobain et grand historien de cette compagnie. Il a eu l'occasion de rencontrer sir Alistair Pilkington avant sa mort, qui lui a raconté l'histoire de vive voix.



**FIGURE 58.** Schéma du procédé de « Fusion Draw ». Ce procédé permet en déversant du verre fondu dans la gorge d'une poutre réfractaire de préparer une feuille de verre très mince. Du fait de la géométrie de la poutre, le verre ayant été en contact avec le réfractaire se retrouve à l'intérieur et les deux surfaces extérieures de la feuille de verre restent en contact uniquement avec l'air et sont donc : « polies au feu ». On prépare comme cela le verre très mince des téléphones portables. © Corning Incorporated.

Ce procédé donnait effectivement un verre de qualité, mais, pour la première application visée par Corning (le verre automobile), il restait trop cher comparativement au verre Float qui avait lui-même fait beaucoup de progrès pendant son temps de développement (plus de 10 ans). Malgré bien des efforts et un succès technique indéniable, le procédé de Corning a été, pendant plusieurs années, considéré comme un échec commercial, car non compétitif pour l'application envisagée. Le développement fut arrêté et le procédé mis aux oubliettes.

Au début des années 2000, la société Apple, sous l'impulsion de Steve Jobs, décide de se lancer dans la téléphonie en amenant un objet révolutionnaire : l'iPhone, convergence de la téléphonie, de l'ordinateur et d'Internet. Pour ce faire, il a besoin d'un matériau transparent très fin qui permette de visualiser l'ensemble du cadran : il s'agit d'avoir un appareil sans clavier (ou au pire un clavier numérique intégré) avec une très large surface transparente d'interaction avec l'utilisateur. Steve Jobs n'avait pas beaucoup de choix, car, comme nous l'avons vu, les matériaux transparents sont rares. Le plastique se raye trop



**FIGURE 59.** Verre Gorilla pour les téléphones portables et les tablettes. Ce verre préparé par les procédés « Fusion Draw » ou Float est très mince. Il est ensuite trempé chimiquement (par échange d'ions en surface) et résiste ainsi mieux aux chocs. De nombreuses versions successives existent (voir le texte).

facilement et le verre restait la seule possibilité<sup>25</sup>. Il fallait un verre très mince et particulièrement résistant (en particulier aux chocs...) qui n'existait pas sur le marché.

Steve Job entend parler du verre de Corning qui a été développé dans les années 1970-1980 et ne trouve pas de marché... Il téléphone aussitôt au patron de Corning et le convainc de reprendre le développement du procédé Fusion Draw. Comme il lui faut un verre très mince et de très bonne qualité optique, ce verre semble particulièrement adapté, d'autant plus qu'il est possible de renforcer sa résistance par trempage chimique (le trempage thermique étant exclu du fait de la minceur du verre). C'est ainsi que le verre Gorilla (le nom de marque du verre de Corning, voir la figure 59) fut utilisé dans les premiers Iphone. Depuis, de multiples générations ont été développées et améliorées (en particulier la résistance aux chocs, qui a toujours été un problème). Il faut noter que l'épaisseur actuelle du verre pour les téléphones portables est de moins de 100 micromètres, de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu. Cette histoire fait dire à Corning : « le Fusion Draw, 10 ans de recherche et développement, 10 ans d'échec et 10 ans de succès... ».

---

<sup>25</sup> En fait il est aussi possible d'utiliser des plaques de saphir (oxyde d'aluminium monocristallin dont on fait certaines fenêtres nécessitant une résistance exceptionnelle), mais il est trop cher.

## Conclusion

Le verre est un matériau dont les propriétés exceptionnelles ont permis son utilisation de multiples façons. Nous nous sommes concentrés dans ce livre essentiellement sur le verre plat avec les applications dans le bâtiment (le vitrage) et les miroirs (la glace qui, avec l'arrivée du procédé Float, a perdu de sa différenciation multiséculaire avec le verre à vitre).

Nous venons de survoler plusieurs millénaires d'histoire du verre. Ce matériau aux propriétés uniques a toujours motivé les hommes pour inventer de multiples applications. Nous avons vu aussi que ses propriétés permettaient de concevoir des procédés très particuliers en bénéficiant de la propriété unique d'avoir une viscosité qui varie continûment avec la température et qui permet une mise en forme adaptée.

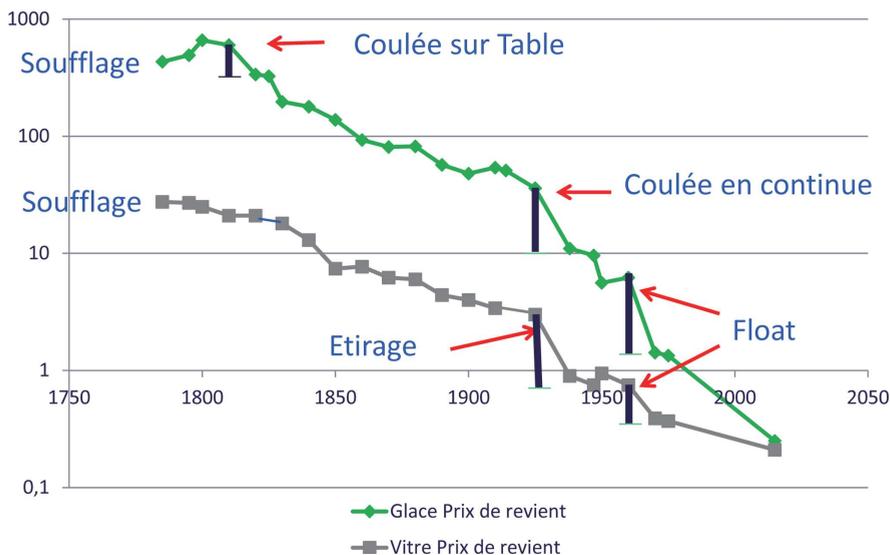
D'un point de vue économique, nous avons insisté sur les innovations des procédés qui ont conduit à un gain de productivité et par conséquent à une baisse du coût de production du verre plat, ce qui a permis de faire passer ce matériau de niches de luxe à une production et une utilisation à grande échelle, partout dans le monde.

Examinons plus précisément cette notion de coût et en particulier l'influence des innovations sur ce coût de fabrication.

Nous disposons pour ce faire d'un travail très intéressant de Mathieu Boaglio. Dans une thèse au CNAM<sup>26</sup>, il a retracé l'historique des procédés et l'évolution des coûts de production et des prix du verre sur une période allant de la Révolution française à nos jours.

---

<sup>26</sup> « Évolution des conditions de production dans l'industrie du verre en France de la Révolution à nos jours. Contribution à l'étude des prix sur le long terme », <http://www.theses.fr/1990CNAM0107>.



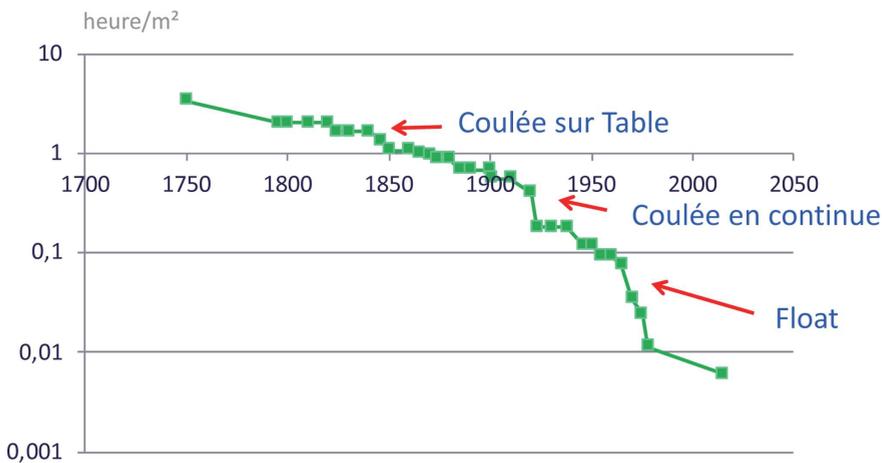
**FIGURE 60.** Évolution des prix de revient de fabrication de la glace et de la vitre en fonction du temps. Chaque barre noire verticale correspond à la mise en place d'un nouveau procédé qui provoque un saut quantitatif du prix de revient suivi d'une diminution continue par l'amélioration graduelle du procédé. © DR.

Mathieu Boaglio a fait l'effort de calculer ces coûts en tenant compte de la valeur de l'argent (coût constant tenant compte de l'inflation entre autres). En reprenant ses tableaux de coûts pour la glace et la vitre, qui diffèrent selon les époques d'un facteur allant de 5 à 10, et en les traçant sur un graphe, on obtient la figure 60. Nous avons replacé sur ce graphe les dates d'introduction industrielle des procédés dont nous avons parlé. De façon intéressante, nous constatons qu'à chaque introduction d'un procédé nouveau (la coulée sur table, la coulée continue, le verre Float pour la glace, l'étirage et le Float pour la vitre) il y a une baisse de coût rapide lié au nouveau procédé, suivi d'une diminution continue liée aux améliorations et aux gains de productivité qui ont suivi.

La figure 61 retrace la même évolution en volume horaire d'ouvrier nécessaire pour produire un mètre carré de verre glace. On peut en déduire que la productivité vient en grande partie de l'économie de temps de travail nécessaire à la production.

L'innovation dans le domaine du verre n'est pas terminée, que ce soit au niveau des utilisations de ce matériau ou bien des procédés mis en œuvre.

Aujourd'hui, il est possible de fabriquer du verre tellement mince qu'il est pliable et vendu en rouleaux. Une équipe du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a conçu récemment une imprimante 3D pouvant utiliser du verre



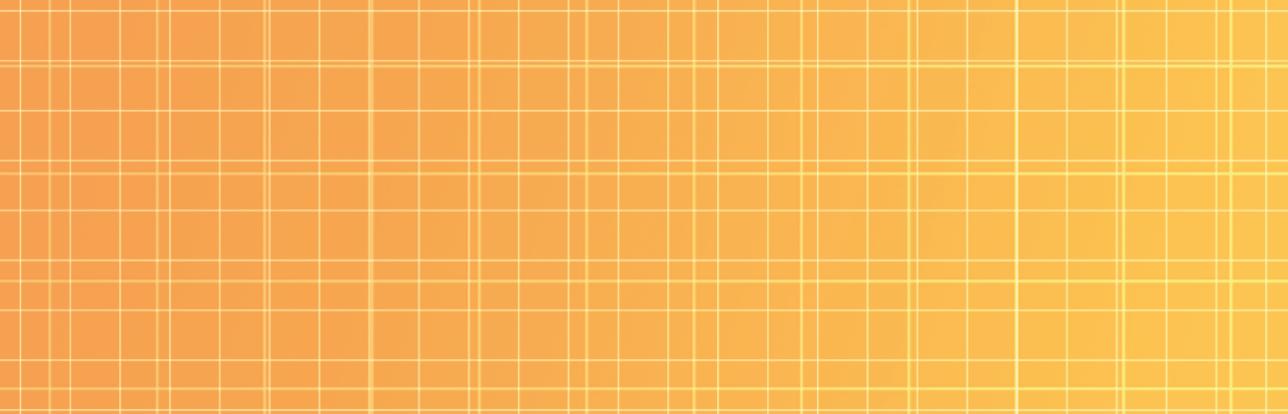
**FIGURE 61.** Évolution du temps de travail pour fabriquer un mètre carré de verre en fonction du temps. Ceci correspond à un gain de productivité qui se retrouve dans le coût de fabrication (voir figure 60). © DR.

pour la fabrication d'objets grâce à cette technologie additive. Nous n'avons pas encore épuisé les possibilités du verre.

Sans doute, le plus intrigant dans cette merveilleuse histoire est le fait que même si ce matériau est fabriqué et utilisé depuis plusieurs milliers d'années, la nature profonde de sa structure physique fait encore l'objet de débats scientifiques pointus. La science moderne n'a toujours pas la véritable compréhension de sa structure et de ses propriétés : elle hésite encore entre un état hors d'équilibre de liquide en surfusion ou bien un nouvel état de la matière<sup>27</sup>...

<sup>27</sup> « First-order susceptibility unveils growth of thermodynamic amorphous order in glass-formers » S. Albert, Th. Bauer, M. Michl, G. Biroli, J.P. Bouchaud, A. Loidl, P. Lunkenkelheimer, R. Tourbot, S. Wiertel-Gasquet and F. Ladieu (June 9, 206) Science **352** (6291), 1308-1311, DOI : 10.1126/science.aaf3182.





---

## Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mes collègues et amis de Saint-Gobain qui m'ont permis de découvrir ce merveilleux matériau et son histoire à la fois riche scientifiquement, mais aussi d'aventures humaines. J'aimerais plus particulièrement mentionner de nombreuses discussions passionnantes avec Maurice Hammon, Marie de Laubier, Anne Alonzo qui m'ont aidé à appréhender cette riche et merveilleuse histoire. J'ai été aidé et soutenu par de nombreux relecteurs parmi lesquels je mentionnerai tout d'abord mon épouse Marie Lise, ma première relectrice, et bien d'autres ayant contribué à améliorer la qualité de ce livre : Pascale Fabre, Étienne Ghys, Michel Le Bellac, Michèle Leduc.



# Bibliographie

Maurice Hamon, *Du Soleil à la Terre : une histoire de Saint-Gobain*, Lattès, 1999, ISBN : 978-2-7096-1933-2.

Marie de Laubier, *Saint-Gobain : le passé du futur*, Albin Michel, 2015, ISBN: 978-2-2263-4407-6.

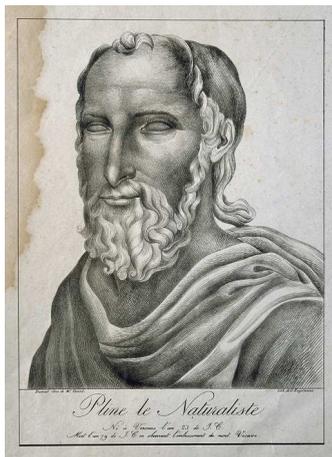
Davis Dyer, Daniel Gross, *The Generations of Corning : The Life and Times of a Global Corporation*, Oxford University Press, 2001, ISBN : 978-0-1951-4095-8.

<https://www.saint-gobain.com/fr/articles/scoopit/saint-gobain-350>



# Biographies

## B1 : Pline l'Ancien



Titus Pline, communément appelé Pline l'Ancien, était un écrivain, naturaliste et officier romain du 1<sup>er</sup> siècle apr. J.-C. Né vers 23 ou 24 apr. J.-C. à Novum Comum (aujourd'hui Côme, en Italie), il a laissé un héritage durable grâce à son œuvre monumentale *Histoire naturelle* (*Naturalis Historia*). Ce livre est considéré comme l'une des premières encyclopédies scientifiques de l'histoire occidentale, couvrant une vaste gamme de sujets allant de la géographie et la zoologie à la botanique et la physique.

L'une des nombreuses découvertes mentionnées dans *Histoire naturelle* est celle du verre. Pline l'Ancien aborde le sujet dans le Livre XXXVI, chapitre 26 de

son ouvrage. Voici une description de sa découverte du verre : « La découverte du verre remonte à une époque ancienne, vers le début de la civilisation. L'histoire qu'il rapporte est celle d'un groupe de marchands phéniciens qui se trouvaient sur le rivage de la rivière Bélus, en Syrie. Ces marchands cherchaient un endroit pour allumer un feu et cuisiner leurs repas. N'ayant pas de pierres pour soutenir leurs casseroles, ils ont eu l'idée d'utiliser des blocs de natron, un minéral naturel alcalin, pour soutenir leurs pots. Pendant qu'ils faisaient leur repas, un feu s'est allumé au-dessus des blocs de natron. Le feu a été si intense que les blocs de natron ont fondu sous la chaleur et se sont mêlés au sable présent sur le rivage. Les Phéniciens, qui avaient l'habitude de transporter des matières fondues dans des creusets, ont été surpris de voir une nouvelle substance apparaître après le refroidissement. Cette substance était transparente, brillante et solide. Ainsi, le verre fut découvert par accident, grâce à cette fusion inattendue de natron et de sable due à la chaleur du feu. »

Pline l'Ancien souligne que les Phéniciens ont été les premiers à réaliser les possibilités du verre nouvellement découvert. Ils ont commencé à produire des objets en verre en utilisant des méthodes de soufflage et de coulage, créant ainsi des récipients, des perles et divers objets décoratifs.

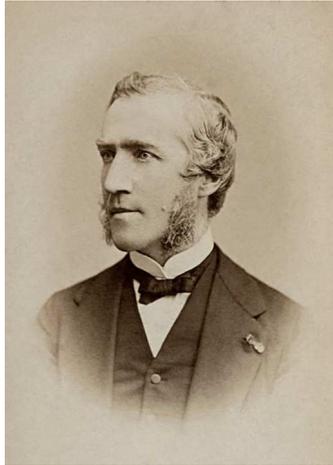
Il est important de noter que, bien que l'histoire rapportée par Pline offre une belle anecdote sur la découverte du verre, les archéologues et les historiens modernes s'accordent pour dire que la production du verre remonte à des millénaires avant la période de Pline. Des preuves archéologiques indiquent que les Égyptiens et les Mésopotamiens fabriquaient déjà du verre vers 3000 av. J.-C., soit bien avant la période de Pline.

Quoi qu'il en soit, *Histoire naturelle* reste une source précieuse d'informations sur les connaissances et les croyances de l'époque romaine, y compris la manière dont les anciens Romains percevaient la découverte et la production du verre.

## B2 : Augustin Cochin

Augustin Cochin, né le 12 décembre 1823 à Paris, était un homme aux multiples facettes. À la fois écrivain, homme politique, administrateur et philanthrope, il a laissé une empreinte forte sur l'histoire de son époque.

Fils du baron Jean-Denis Cochin et descendant indirect du fondateur de l'hôpital Cochin, Augustin a suivi les traces de son père en s'impliquant dans des questions d'éducation et de bienfaisance dès son jeune âge. Doté d'une curiosité intellectuelle précoce, il s'intéressa très tôt aux enjeux économiques et politiques et contribua avec des articles aux *Annales de Charité* et au *Correspondant*.



En 1850, il amorça sa carrière politique en étant élu adjoint au maire, puis accéda en 1854 au poste de maire du X<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Toutefois, il démissionna en 1858 suite à une condamnation du *Correspondant*, et M. de Fresne le remplaça. Profondément attaché aux valeurs du catholicisme libéral, il entretenait des amitiés avec des personnalités influentes telles qu'Alfred de Falloux, Charles de Montalembert et Henri Lacordaire. En tant qu'opposant au Second Empire, il cherchait à concilier la foi catholique et la liberté politique, tout en dénonçant inlassablement les vices de la société bourgeoise, en particulier la cupidité.

En 1861, il publia un ouvrage marquant sur l'abolition de l'esclavage, où il relatait le démantèlement du système esclavagiste et célébrait les initiatives menées par le prince Victor de Broglie et ses alliés, dont Alphonse de Lamartine, Hippolyte Passy, Victor Destutt de Tracy, Charles de Rémusat et Alexis de Tocqueville. Pour Augustin Cochin, l'esclavage était avant tout une négation de la famille, puisque les esclaves étaient systématiquement séparés de leurs proches. Cependant, il considérait que l'abolition ne pouvait être purement philosophique et devait être liée au divin. Dans son ouvrage, il reprochait à la séance du 16 pluviôse an II – 4 février 1794 –, qui avait marqué la première abolition française de l'esclavage, d'avoir ignoré Dieu, le considérant totalement absent du discours de l'intervenant principal, Danton.

En 1855, sa reconnaissance fut honorée par sa nomination au rang de chevalier de la Légion d'honneur. En 1865, ses publications lui valurent d'être élu à l'Académie des sciences morales et politiques.

Augustin Cochin fut également lié à l'histoire de Saint-Gobain, la célèbre entreprise. Son amitié avec Albert de Broglie, établie à travers leur collaboration

au journal catholique social, le *Correspondant*, joua un rôle important dans son association avec Saint-Gobain. En 1864, Albert de Broglie l'intégra au conseil d'administration de Saint-Gobain, où il apporta sa passion pour les questions industrielles et administratives. Il fut un précieux soutien lors de la négociation de la fusion avec Perret-Olivier et dans l'organisation du siège social de l'entreprise. Cependant, il ne se cantonna pas seulement aux préoccupations économiques, car il accordait une grande attention à la question ouvrière et au développement des institutions sociales. Un événement significatif illustrant son état d'esprit eut lieu en 1866 lors d'une crise de cherté du pain, où il préconisa une augmentation des salaires plutôt que des distributions de farine. Selon lui, cette mesure préserverait la liberté et la dignité des ouvriers, évitant ainsi de les réduire à la mendicité, et elle contribuerait à renforcer l'attachement des travailleurs envers la Compagnie et non pas seulement envers la société coopérative.

Augustin Cochin, au-delà de ses activités politiques et administratives, était un homme de lettres au cœur noble. Ses lettres et ses écrits témoignent de son désir ardent de bien public et de progrès social. Il s'impliquait activement dans des œuvres charitables et se préoccupait des conditions de vie des plus démunis, notamment la population indigente de Paris, des salles d'asile, du paupérisme en Angleterre et de la situation des ouvriers français atteints d'infirmités incurables. Il portait également un grand intérêt aux institutions de prévoyance et aux sociétés coopératives.

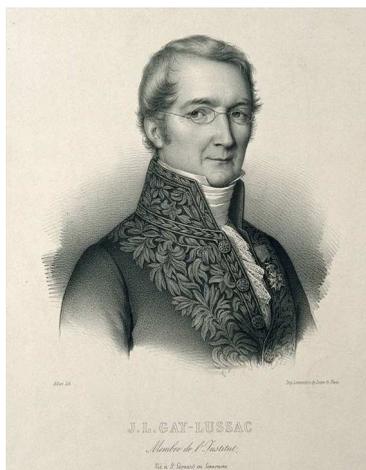
Ses contributions intellectuelles et son engagement politique ont profondément marqué l'histoire du Second Empire, notamment sur des questions religieuses, politiques et sociales, à travers ses collaborations avec des personnalités influentes.

### **B3 : Gay-Lussac**

Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) était un chimiste et physicien français, célèbre pour ses études sur les propriétés des gaz. Né le 6 décembre 1778 à Saint-Léonard-de-Noblat, il est décédé à Paris le 9 mai 1850 à l'âge de 71 ans.

Gay-Lussac fit ses premiers pas dans l'éducation auprès de l'abbé Bourleix, qui lui enseigna le latin. À l'âge de 16 ans, il partit étudier à Paris et fut admis à l'École polytechnique en 1797. Il se passionna pour la chimie et la physique et fut notamment influencé par les enseignements de Fourcroy, Vauquelin, Chaptal, et Berthollet.

Ses travaux scientifiques le menèrent à des découvertes importantes, dont la loi de dilatation des gaz en 1802 et les lois volumétriques qui portent son nom,



montrant que les gaz se combinent entre eux selon des rapports volumétriques simples. En 1804, il réalisa avec Jean-Baptiste Biot une expédition en ballon pour étudier la variation du magnétisme dans l'atmosphère, mais il collecta également des échantillons d'air atmosphérique à différentes altitudes, révélant des variations de température et d'humidité.

Dans le domaine de la chimie, il travailla avec Louis Jacques Thénard et découvrit le potassium et le sodium en 1808, ainsi que le bore. En 1815, il découvrit le cyanogène et l'acide cyanhydrique.

Gay-Lussac occupa divers postes d'enseignant et de chercheur, notamment à l'École polytechnique, à la Sorbonne, et au Muséum d'histoire naturelle. Il fut également impliqué dans le conseil industriel et devint conseiller scientifique de la Compagnie des glaces de Saint-Gobain en 1832. Il joua un rôle clé dans l'amélioration des procédés de fabrication de l'acide sulfurique et de l'acide oxalique, ainsi que dans la mesure exacte de la concentration en alcool des boissons.

Parallèlement à ses activités scientifiques, Gay-Lussac s'engagea en politique et fut élu député de l'arrondissement de Limoges en 1831, puis pair de France en 1839.

Sa carrière industrielle avec Saint-Gobain fut marquée par des recherches sur la fusion du verre et des améliorations dans la production de l'acide sulfurique. Il introduisit la « tour Gay-Lussac », un dispositif permettant de prévenir la libération des oxydes d'azote dans l'atmosphère.

Gay-Lussac fut également membre de nombreuses sociétés savantes et obtint de nombreuses distinctions et décorations pour ses contributions à la science.

Il décéda des suites d'une insuffisance cardiaque à l'âge de 71 ans et fut inhumé au cimetière du Père-Lachaise à Paris.

Le travail de Gay-Lussac dans les domaines de la chimie et de la physique continua d'avoir un impact durable sur le développement de la science et de l'industrie. Ses découvertes, lois et contributions restent un héritage important dans le monde scientifique.

## **B4 : René Coulon et Jacques Adnet**

René Coulon et Jacques Adnet : Les architectes et designers qui révolutionnèrent le mobilier en verre.

René Coulon et Jacques Adnet étaient deux figures emblématiques de l'architecture et du design français au XX<sup>e</sup> siècle. Leurs collaborations conjointes dans la création de meubles en verre ont marqué une étape importante dans l'histoire du design et ont contribué à faire évoluer l'esthétique et la fonctionnalité des meubles modernes.

René Coulon est né le 27 juin 1908 dans le XV<sup>e</sup> arrondissement de Paris et est décédé le 23 février 1997 à l'âge de 88 ans, dans le XIII<sup>e</sup> arrondissement de la même ville. Architecte de profession, Coulon a été récompensé par le prix général Muteau décerné par l'Académie française en 1942, alors qu'il était prisonnier de guerre. Outre son talent d'architecte, Coulon s'est également illustré en tant que designer novateur.

Dans les années 1930, alors qu'il était encore un jeune architecte, Coulon a collaboré avec l'entreprise Saint-Gobain en proposant un pavillon pour l'Exposition universelle de 1937. C'est au cours de cette collaboration qu'il a conçu des meubles en verre très innovants, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle approche du design mobilier. Cette association avec Saint-Gobain l'a conduit à créer le pavillon Saint-Gobain pour l'Exposition internationale des arts et techniques de 1937, en collaboration avec Jacques Adnet.

Quant à Jacques Adnet, il est né le 20 avril 1900 à Châtillon-Coligny et est décédé le 29 octobre 1984 à l'âge de 84 ans, dans le XVI<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Architecte, décorateur et designer français, Adnet a reçu une formation aux arts décoratifs à l'École nationale supérieure des beaux-arts. Il a travaillé aux côtés de son frère jumeau, Jean Adnet, et ensemble, ils ont reçu de prestigieuses récompenses.

En 1927, Jacques Adnet remporte la bourse Blumenthal, ce qui marque le début d'une carrière fructueuse. Il a dirigé la Compagnie des arts français à partir de 1928 jusqu'à sa fermeture en 1959. L'année 1937 fut particulièrement importante pour Adnet, car il a collaboré avec René Coulon pour créer le pavillon Saint-Gobain pour l'Exposition internationale des arts et techniques de cette année-là, remportant ainsi le grand prix d'architecture.

Le pavillon Saint-Gobain était une véritable réussite dans l'esprit moderne et technique de l'Exposition de 1937. Coulon et Adnet ont réalisé un exploit en utilisant exclusivement le verre, même pour l'ameublement. Ils ont exploité toutes les possibilités du verre, y compris les dalles de verre coulées sur lit de sable, les pavés de verre, le verre trempé et bien d'autres produits mis au point par Saint-Gobain. Cette exposition a été un tournant dans l'histoire du mobilier en verre et a permis d'explorer de nouvelles perspectives dans l'utilisation de ce matériau.

Leur collaboration a continué dans les années suivantes, avec Coulon et Adnet réalisant ensemble plusieurs projets de mobilier en verre. Leurs créations modernistes des années 1930 ont été saluées pour leur audace et leur innovation, marquant ainsi leur place dans l'histoire du design français.

René Coulon et Jacques Adnet ont contribué de manière significative au développement du design mobilier en verre et à l'intégration de nouvelles techniques et matériaux dans leur travail. Leur héritage perdure dans les meubles en verre et les réalisations architecturales contemporaines, inspirant de nombreux designers et architectes du monde entier.

## B5 : L'abbé Suger



L'Abbé Suger, né en 1080 ou 1081 à Chennevières-lès-Louvres et décédé le 13 janvier 1151 à Saint-Denis, était un homme d'État et abbé français. Il fut un personnage important dans la cour royale des rois Louis VI le Gros et Louis VII le Jeune. Il est surtout connu pour ses ambitions théologiques et artistiques, qui l'ont conduit à entreprendre la reconstruction de la basilique de Saint-Denis,

considérée comme la première construction d'architecture ogivale, et à contribuer au développement de l'art gothique.

L'origine de Suger est disputée parmi les historiens. Certains pensent qu'il était issu d'une famille de serfs, tandis que d'autres estiment qu'il venait d'une famille assez aisée de la région de Chennevières-lès-Louvres. Quoi qu'il en soit, il fut placé dès son jeune âge comme oblat voué à saint Denis à l'abbaye de Saint-Denis.

Suger a étudié pendant dix ans au prieuré d'Estrées pour devenir moine. Il s'est ensuite impliqué dans des affaires diplomatiques et politiques, représentant l'abbaye de Saint-Denis lors de différentes conférences et différents conciles.

En 1122, après la mort de l'abbé Adam, Suger est élu abbé de Saint-Denis, malgré l'absence d'accord préalable du roi Louis VI. Suger devient rapidement un conseiller proche du roi et un ministre influent, contribuant au renforcement de l'autorité royale et aux droits des bourgeois.

L'une de ses plus grandes réalisations a été la reconstruction de l'abbatiale de Saint-Denis. Suger a commencé par la façade occidentale vers 1135, en utilisant des façades harmoniques inspirées des constructions normandes. Il a également ajouté la première rose pour éclairer la nef.

La reconstruction du chevet de l'abbatiale a été entreprise après la consécration de la façade occidentale en 1140. Suger avait une vision précise de ce qu'il souhaitait obtenir : faire entrer la lumière dans l'église. Il a utilisé des techniques de construction modernes de l'époque pour élever le chevet avec sa parure de vitraux resplendissants.

Suger avait une profonde influence spirituelle, inspirée notamment par les écrits du Pseudo-Denys l'Aréopagite, qui ont façonné sa vision du monde et de la lumière divine. Il a également exprimé sa vision artistique dans la décoration intérieure de l'église, notamment avec les sculptures du portail royal et les vitraux magnifiques.

Après sa mort, les travaux de l'abbatiale se sont poursuivis, mais Suger est resté un personnage emblématique de l'abbaye de Saint-Denis et de l'art gothique naissant. La basilique, premier édifice de style gothique, reste un symbole de la royauté française et la nécropole des rois de France. La tombe de Suger a été déplacée dans le bras sud du transept en 1259.

L'héritage de Suger réside dans sa contribution à l'évolution architecturale et artistique de l'abbaye de Saint-Denis, qui a marqué le début de l'art gothique et a laissé un héritage durable dans l'histoire de l'architecture médiévale française.

## B6 : Ibn al-Haytham



Ibn al-Haytham, également connu sous le nom latinisé Alhazen, est un scientifique musulman du  $X^e$  siècle né en 965 à Bassora, dans l'Irak actuel. Il est considéré comme le père de l'optique moderne et a grandement contribué à l'avancement des sciences, notamment dans les domaines de la physique, des mathématiques, de l'astronomie et de la médecine.

Sa vie a été marquée par des circonstances exceptionnelles. Alors qu'il travaillait sur un projet impossible, la maîtrise des inondations du Nil pour le calife fatimide Al-Hâkim, il feignit la folie pour échapper à la colère du calife. Cette simulation lui valut d'être assigné à résidence en 1011 au Caire. Pendant cette période de pénitence, qui dura dix ans, il mit à profit son temps pour développer ses connaissances et sa maîtrise dans divers domaines scientifiques.

Son œuvre la plus célèbre est son *Traité d'optique* (*Kitab al-Manazir*), qu'il acheva en 1021 après six années d'écriture. Dans ce traité en sept volumes, complété par le *Traité de la lumière* (*Risala fi l-Daw*), Ibn al-Haytham formula la loi de la réflexion et de la réfraction de la lumière. Il réfuta également la théorie de la vision des célèbres savants de l'Antiquité, Ptolémée et Euclide, en affirmant que les rayons de lumière provenaient de l'objet lui-même, et non des yeux comme on le croyait jusqu'alors.

Grâce à ses observations courantes et ses arguments logiques, Ibn al-Haytham a radicalement transformé la compréhension de la lumière et de la vision, posant ainsi les bases de l'optique moderne. Il devint le premier scientifique à énoncer clairement les étapes de la démarche expérimentale dans le processus de vérification des théories, faisant de lui un pionnier de la méthode scientifique moderne.

Outre ses contributions majeures en optique, Ibn al-Haytham a également laissé un héritage significatif dans d'autres domaines scientifiques. Il a été un mathématicien accompli, travaillant sur des problèmes de géométrie, des coniques, des nombres parfaits, et introduisant des concepts qui seront utilisés plus tard dans le calcul infinitésimal. En astronomie, il remit en question le modèle de Ptolémée et présenta un modèle planétaire alternatif, ouvrant ainsi la voie à de futures études et innovations dans ce domaine.

Son influence a été considérable, et ses travaux ont été diffusés en Europe par l'intermédiaire de traductions latines et ont inspiré des scientifiques tels que Roger Bacon et Kepler. L'année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière en 2015 a été l'occasion de célébrer ses réalisations et de mettre en lumière l'importance de son héritage scientifique pour l'humanité.

Ibn al-Haytham était un chercheur curieux et critique, appliquant la méthode scientifique dans ses études et soulignant l'importance de la recherche de la vérité à travers l'expérimentation et le doute. Sa conception moderne de la science et son rapport avec la foi reflétaient sa quête incessante pour comprendre la création de Dieu et sa place dans l'Univers.

Aujourd'hui, bien qu'il soit parfois méconnu du grand public, Ibn al-Haytham reste une figure majeure de l'histoire des sciences, et son héritage continue d'influencer et d'inspirer les chercheurs et les scientifiques du monde entier. L'Unesco a d'ailleurs choisi de célébrer sa mémoire dans le cadre de l'année internationale de la lumière, mettant ainsi en lumière l'importance de son travail pour l'humanité.

## B7 : Roger Bacon



Roger Bacon, né vers 1220 à Ilchester ou Bisley et mort vers 1292 à Oxford, était un philosophe, savant, alchimiste, et l'un des pères de la méthode scientifique. Surnommé le « Docteur admirable » pour ses connaissances exceptionnelles, Bacon a marqué l'histoire par ses travaux en optique et ses idées novatrices sur la méthode scientifique.

Bacon a commencé ses études à l'université d'Oxford à l'âge de 14 ans. Il a étudié sous la direction d'Edmond Rich d'Abingdon, également connu sous le nom de saint Edme. En 1236, il obtient le grade de maître ès arts.

Plus tard, il enseigne à Paris à la faculté des arts, où il rencontre des intellectuels éminents tels qu'Alexandre de Hales, Guillaume d'Auvergne, Robert Kilwardby et Pierre de Maricourt. Sa première grande période de production (1237-1250) est marquée par ses commentaires et critiques sur les œuvres d'Aristote.

Vers 1247, il retourne à Oxford où il se concentre sur l'étude des langues « sapientielles » telles que l'hébreu, le grec, l'arabe et le chaldéen, ainsi que sur les sciences telles que l'optique, les mathématiques et l'astronomie. Il s'intéresse particulièrement aux travaux de Robert Grossetête, un grand homme de science, sur l'optique et les mathématiques.

En 1256, Bacon rejoint l'ordre des Franciscains, voué à la pauvreté. Il retourne ensuite à Paris, où il rencontre saint Bonaventure, le ministre général des Franciscains. Cependant, il est probable qu'il ait été restreint dans ses activités d'enseignement et d'écriture à cette époque, peut-être en raison de différends avec ses supérieurs religieux.

Sa seconde grande période de production (1260-1292) débute en 1265, lorsque le pape Clément IV, qu'il connaissait bien, lui demande d'envoyer ses travaux. Bacon envoie plusieurs œuvres au pape, dont l'*Opus majus* et l'*Opus tertium*, dans lesquels il expose ses idées sur une université parisienne fondée sur la connaissance non seulement d'Aristote, d'Avicenne et d'Averroès, mais aussi des sciences arabes et des langues arabes.

Cependant, après la mort de Clément IV en 1268, Bacon fait face à des rétorsions, notamment de la part de l'évêque de Paris, Étienne Tempier, qui interdit certaines de ses thèses philosophiques et théologiques en 1277. Il est également critiqué par le maître général des Franciscains, Jérôme d'Ascoli, futur pape Nicolas IV, qui condamne ses travaux et interdit son œuvre chez les Franciscains.

Bacon est mis en prison à Ancône entre 1277 et 1279, mais il ne passe probablement pas les quatorze années légendaires en prison. Pendant cette période, il rédige son étude sur le *Secretum secretorum* (*Le Secret des secrets*), un ouvrage occultiste qu'il attribue à tort à Aristote.

Vers 1280, il retourne à Oxford où il continue ses travaux, mais il est vraisemblablement emprisonné à nouveau jusqu'en 1292, année probable de sa mort.

Les contributions majeures de Bacon en optique sont notables. Il a fait d'ingénieuses observations sur l'optique et la réfraction de la lumière. Il est le premier à avoir eu l'idée de la trichromie et à avoir décrit le mécanisme de la formation de l'arc-en-ciel par l'action des rayons réfléchis et réfractés dans un milieu diaphane. Il a également étudié l'action des lentilles et des verres connexes, inventant même des lunettes pour les presbytes.

En conclusion, Roger Bacon, le « Docteur admirable », était un philosophe et savant anglais du Moyen Âge, considéré comme l'un des précurseurs de la méthode scientifique. Ses travaux en optique, notamment ses observations sur la lumière et l'arc-en-ciel, ont été particulièrement remarquables et ont contribué à l'avancement des sciences de son époque.

## B8 : Christian Huygens



Christian Huygens, né le 14 avril 1629 à La Haye, est un grand mathématicien, physicien et astronome néerlandais du XVII<sup>e</sup> siècle. Fils du poète et diplomate Constantijn Huygens, il est éduqué par des précepteurs et se passionne très tôt pour les mathématiques et l'astronomie.

Dès l'âge de 16 ans, Huygens se lance dans l'observation astronomique à l'aide d'un télescope qu'il améliore lui-même. En 1655, il découvre le premier satellite de Saturne, Titan, et établit que les « oreilles » de Saturne observées précédemment par Galilée sont en réalité un anneau plat et mince entourant la planète.

Il consacre également des travaux importants à l'horlogerie, mettant au point les premières horloges utilisant un pendule pour une mesure plus précise du

temps. En 1673, il publie son travail majeur sur le pendule, intitulé *Horlogium oscillatorium*, où il présente ses découvertes sur l'isochronisme de la cycloïde.

En 1666, Huygens est invité par Colbert à rejoindre l'Académie royale des sciences à Paris, nouvellement créée par Louis XIV. Il y poursuit ses observations astronomiques et découvre des nébuleuses et des étoiles doubles. Il s'intéresse également à la nature de la lumière et présente en 1690 sa théorie ondulatoire de la lumière dans son ouvrage *Traité de la lumière*, qui sera négligé en raison de la popularité de la théorie corpusculaire de Newton.

En raison de la révocation de l'Édit de Nantes en 1685, Huygens retourne aux Pays-Bas où il passe le reste de sa vie. Il développe alors l'idée d'autres formes de vie autour d'autres soleils dans son ouvrage *Cosmotheoros*. Il décède à La Haye le 8 juillet 1695.

Christian Huygens est reconnu pour ses contributions en mathématiques, en physique, en astronomie et en horlogerie. Son travail sur la nature de la lumière et son engagement à l'Académie royale des sciences témoignent de son influence dans le domaine scientifique de son époque.

## B9 : Robert Grossetête



Robert Grossetête, également connu sous le nom de Robert de Lincoln, était un érudit anglais du XIII<sup>e</sup> siècle, né vers 1175 à Stowe dans le comté de Suffolk et décédé le 9 octobre 1253 à Buckden. Il était un membre séculier proche de l'Ordre franciscain et devint évêque de Lincoln en 1235, fonction qu'il occupa jusqu'à sa mort en 1253.

Grossetête est considéré comme l'un des plus grands penseurs de l'époque médiévale en Angleterre et l'un des précurseurs de la science moderne. Il était profondément admiratif de l'enseignement d'Aristote et a traduit et commenté plusieurs de ses œuvres. En plus de ses travaux sur Aristote, il écrivit de nombreux traités sur des sujets tels que la théologie, la philosophie, les mathématiques et la physique (optique).

Il joua un rôle essentiel dans la Première Renaissance des XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles, qui débuta avec Pierre Abélard. Les centres intellectuels de l'Europe à cette époque étaient l'École de Chartres, Paris et Oxford, où Grossetête enseigna et fut même chancelier de l'université en 1224.

En tant que scientifique, Grossetête s'intéressa particulièrement à la lumière et à l'optique. Dans son ouvrage *De luce* (Sur la lumière), il avança que la lumière était à l'origine de toute chose, incluant la lumière visible, la chaleur et la matière. Il utilisa les travaux d'Ibn al-Haytham, également connu sous le nom d'Alhazen, pour étudier les rayons lumineux et les phénomènes optiques tels que la réfraction de la lumière à travers un récipient sphérique rempli d'eau.

Par ailleurs, Grossetête s'intéressa aux mathématiques et à l'astronomie. Il développa une conception de l'infini et eut l'intuition que certains infinis étaient plus grands que d'autres. Bien que son raisonnement ait été erroné concernant l'infinité des nombres pairs et des entiers, il eut l'idée révolutionnaire de considérer l'infini comme une quantité mesurable. Cette idée ne sera formalisée que bien plus tard par Georg Cantor.

En tant que philosophe et théologien, Grossetête traduisit et commenta de nombreux ouvrages religieux et classiques. Il élaborait une théorie sur la lumière, considérant qu'elle était la source de toute chose et jouait un rôle dans l'illumination de la foi. Il défendit également ailleurs la supériorité de la volonté sur l'intellect, une thèse reprise plus tard par le courant franciscain.

Outre ses travaux scientifiques, philosophiques et théologiques, Grossetête écrivit des poèmes allégoriques sur la création du monde et la rédemption, ainsi que des ouvrages théologiques, dont un Hexaméron.

En tant qu'évêque de Lincoln, Grossetête entreprit des réformes importantes dans la morale et la discipline de son diocèse, ce qui le mit en conflit avec certains membres de sa communauté et même avec le roi et la papauté. Il défendit l'indépendance de l'Église d'Angleterre et plaida pour que les postes ecclésiastiques soient occupés par des Anglais plutôt que des Italiens.

Robert Grossetête laissa une marque indélébile sur l'histoire intellectuelle du Moyen Âge et fut un précurseur dans de nombreux domaines scientifiques et philosophiques. Ses idées et ses travaux influencèrent des générations de penseurs après lui, et il est aujourd'hui reconnu comme l'une des figures éminentes du XIII<sup>e</sup> siècle.

## B10 : Duralex, une histoire française



Dans la France de 1945 en pleine reconstruction, chaque entreprise cherche à innover et à apporter des solutions nouvelles. C'est dans ce contexte que l'immense institution Saint-Gobain invente le verre trempé, un procédé révolutionnaire rendant le verre incassable. Pour porter cette découverte qui marquera une nouvelle ère dans l'histoire de la vaisselle, Saint-Gobain crée la marque Duralex.

Duralex se présente comme une marque « dure à cuire ». Ses gobelets sont utilisés dans toutes les cantines de France et ne se brisent plus, assurant une grande durabilité. Ses produits s'empilent facilement, ses gammes évoluent avec la mode, et ses prix restent abordables pour tous.

Avec la naissance de Duralex, c'est un nouvel état d'esprit qui voit le jour : celui d'un quotidien joyeux, simple et facile à vivre. Les fameux verres Duralex traversent les époques, se transmettent de génération en génération et se retrouvent sur toutes les tables, que ce soit au bistro ou à la maison.

La marque Duralex est étroitement liée à deux de ses produits emblématiques : le verre Gigogne, lancé en 1946, et le verre Picardie, créé en 1954. Le verre Gigogne est devenu un véritable objet culte en France, notamment grâce à son utilisation dans les cantines scolaires. Chaque verre possède un numéro gravé au fond, correspondant au moule qui l'a façonné. Le verre Picardie, quant à lui, est célèbre pour son design à neuf facettes et est devenu l'un des produits français les plus connus dans le monde.

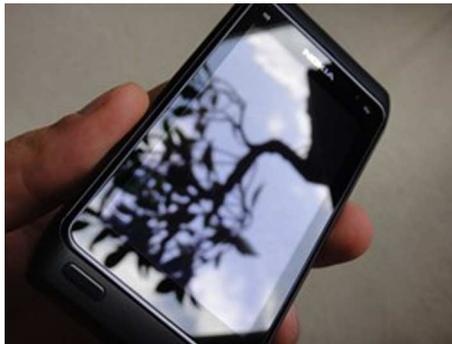
Au cours des années 1960, Duralex connaît son âge d'or, avec l'ouverture d'un second site de production à Rive-de-Gier et une renommée internationale grandissante. Cependant, dans les années 1970, la marque commence à

rencontrer des difficultés financières et change plusieurs fois de propriétaires. En 2008, l'entreprise est même placée en liquidation judiciaire.

Finalement, en janvier 2021, le groupe français international Cookware, déjà établi à Châteauroux et vendant des produits sous la marque américaine Pyrex, prend le contrôle de Duralex. Cette acquisition permet à Duralex de bénéficier d'investissements importants pour moderniser son usine et lui ouvre de nouvelles perspectives commerciales grâce aux synergies avec Pyrex.

Avec son image vintage et son savoir-faire dans la fabrication du verre trempé, Duralex renoue avec le succès et retrouve sa place sur les tables des foyers français et internationaux. Malgré les aléas économiques et industriels qu'elle a traversés, la marque Duralex reste attachée à son héritage et à sa fabrication en France, proposant des produits durables et intemporels qui continuent d'apporter une véritable liberté d'esprit et de mouvement à tous les moments de notre vie.

## **B11 : Gorilla Glass : le verre révolutionnaire qui protège nos appareils électroniques**



Depuis plusieurs années, le marché des appareils électroniques portables, tels que les smartphones et les tablettes, a connu une expansion considérable. Avec l'avènement des écrans tactiles, la demande pour des matériaux de protection solides et résistants est devenue primordiale. C'est dans ce contexte que le Gorilla Glass, un verre renforcé chimiquement, développé par Corning, a révolutionné l'industrie en offrant une protection inégalée aux écrans des appareils électroniques. Cet article se penche sur l'évolution du Gorilla Glass depuis ses débuts jusqu'à sa version la plus récente, en passant par les avancées technologiques qui ont permis de rendre nos appareils plus résistants que jamais.

## I. Les débuts du Gorilla Glass

Corning, un fabricant de verre, a commencé le développement du Gorilla Glass en 2005. L'objectif était de proposer un verre de protection pour les écrans tactiles et non tactiles des appareils électroniques portables. Ce verre a été conçu en remplaçant les ions de sodium par des ions de potassium, ce qui a permis d'accroître la résistance et la solidité du matériau. Dès son lancement en 2006, le Gorilla Glass a été utilisé sur plus de 250 modèles de smartphones, dont l'iPhone d'Apple, propulsant ainsi sa notoriété sur le marché.

## II. L'évolution du Gorilla Glass

Gorilla Glass 2 : en 2012, Corning a lancé la deuxième version du Gorilla Glass, qui était 20 % plus mince que la version originale tout en conservant la même résistance aux rayures et une meilleure sensibilité au toucher. Cette avancée a permis d'équiper plus de 600 millions de smartphones dans le monde.

Gorilla Glass 3 : en 2013, le Gorilla Glass 3 a été introduit, offrant une résistance accrue aux rayures grâce à une « résistance native aux dommages » multipliée par trois par rapport à la version précédente. Il a été utilisé sur près d'un millier de produits de différentes marques.

Gorilla Glass 4 : en 2014, Corning a mis l'accent sur la résistance aux chutes en lançant le Gorilla Glass 4. Celui-ci était deux fois plus résistant aux chutes simulées d'une hauteur d'un mètre, réduisant ainsi le risque de casse en cas de chute accidentelle.

Gorilla Glass 5 : en 2016, le Gorilla Glass 5 a été présenté, résistant à 80 % des chutes d'une hauteur de 1,6 mètre sur une surface rugueuse. Cette version a été utilisée sur des smartphones populaires tels que le Samsung Galaxy S7 et le Huawei P20.

Gorilla Glass 6 : le Gorilla Glass 6, lancé en 2018, a été conçu pour résister à 15 chutes d'une hauteur de un mètre, soit deux fois plus que la génération précédente. Bien que la résistance aux rayures n'ait pas été améliorée, cette version a permis de protéger les appareils électroniques contre des chutes encore plus vertigineuses.

## III. Les avancées futures du Gorilla Glass

Corning continue de repousser les limites de ses technologies de verre renforcé. Une version pliable ultrafine de Gorilla Glass, d'environ 0,1 mm d'épaisseur, a été développée pour les futurs smartphones à écran pliable. Cette prouesse technique permettra aux écrans pliables d'être protégés par un verre solide tout

en conservant leur flexibilité. En outre, le Gorilla Glass trouve de nouvelles applications dans l'automobile, avec des écrans tactiles incurvés et des vitres de voiture transformées en écrans utilisables.

## Conclusion

Le Gorilla Glass de Corning a révolutionné l'industrie des appareils électroniques portables en offrant une protection solide et résistante aux écrans tactiles et non tactiles. Depuis ses débuts, il a connu plusieurs avancées technologiques, augmentant sa résistance aux chutes et aux rayures. Avec une version pliable en développement et de nouvelles applications dans l'automobile, le Gorilla Glass continue d'évoluer pour répondre aux besoins en constante évolution du marché.

## B12 : Édouard Bénédictus

Édouard Bénédictus était un chimiste, décorateur, peintre et compositeur français, né le 29 juin 1878 à Paris et décédé le 28 janvier 1930 dans la même ville. Il est surtout connu pour son invention du verre feuilleté en 1903 et pour ses créations de style Art déco dans les années 1920.

Issu d'une famille d'origine néerlandaise, Édouard Bénédictus était le descendant de Spinoza, le célèbre philosophe. Sa tante, Judith Gautier, fille de l'écrivain Théophile Gautier, tenta de le détourner d'une carrière artistique qu'elle jugeait peu sérieuse et l'orienta plutôt vers la chimie. Malgré cela, Bénédictus ne renonça pas à ses inclinations artistiques et poursuivit ses études à Darmstadt, en Allemagne, tout en s'adonnant à la peinture et à la composition musicale.

En 1909, Édouard Bénédictus déposa un brevet pour son invention révolutionnaire du verre feuilleté. Cette découverte est le fruit du hasard : en faisant tomber accidentellement un bocal en verre contenant une solution celluloïdique, il remarqua que le verre étoilé ne se brisait pas en éclats coupants. Cette nouvelle technologie, baptisée « verre Triplex », constituait un verre de sécurité qui allait trouver de nombreuses applications, notamment dans l'industrie automobile, réduisant ainsi les risques de blessures liées aux éclats de verre en cas d'accident.

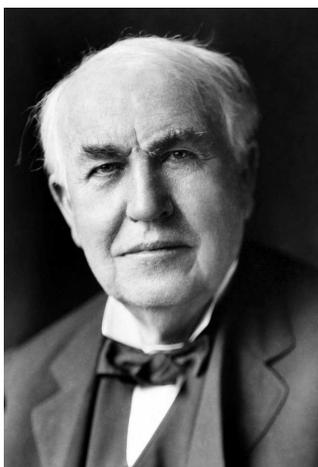
Le 7 juillet 1911, Bénédictus fonda la Société du Verre Triplex, qui prit son essor et fut plus tard reprise par Saint-Gobain en 1927. Cette invention fut essentielle pour le développement des pare-brise de voitures, notamment en équipant les modèles Ford dès 1929 et en devenant obligatoire pour les voitures britanniques en 1932.

Cependant, dans les années 1920, Édouard Bénédicteus délaissa les sciences appliquées pour se consacrer aux arts, devenant réputé pour ses créations de style Art déco. Il travailla notamment aux côtés de Jean Saudé dans le domaine de la décoration théâtrale et conçut des décors, des costumes, ainsi que des tissus d'ameublement dans ce style. Sa renommée artistique fut telle qu'en 1925, Laure Albin Guillot réalisa son portrait photographique.

Le 17 janvier 1930, Édouard Bénédicteus se maria en secondes noces avec Marguerite Jeanne Violette Gounin, une cantatrice et fille du peintre Henri Gounin. Malheureusement, sa santé déclinant, il décéda onze jours plus tard. Son éloge funèbre fut prononcé par Paul Léon.

L'héritage d'Édouard Bénédicteus perdure jusqu'à aujourd'hui, tant par sa contribution à l'industrie du verre que par son apport artistique dans le mouvement Art déco. Une exposition itinérante lui rendit hommage en 1986, mettant en lumière ses créations dans divers domaines tels que les fresques, les gouaches, les pochoirs et les tissus imprimés. De plus, son invention du verre feuilleté continue de jouer un rôle essentiel dans la construction et l'industrie automobile, offrant une sécurité accrue grâce à ses propriétés uniques.

## B13 : Thomas Edison



Thomas Alva Edison, né le 11 février 1847 à Milan dans l'Ohio, est un inventeur, scientifique et industriel américain. Il est considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'ère moderne, ayant déposé plus de 1 000 brevets au cours de sa carrière.

Son enfance autodidacte et son intérêt pour la science ont jeté les bases de ses futures réalisations. Enfant, il était hyperactif et curieux, ce qui l'a conduit à être éduqué à domicile par sa mère. Il a passé beaucoup de temps à la bibliothèque et s'est plongé dans des ouvrages de science et de littérature.

À l'âge de 15 ans, Edison possédait déjà un petit laboratoire de chimie dans le sous-sol de la maison familiale, où il menait des expériences en reproduisant des expériences décrites dans des livres scientifiques. Il a également développé ses compétences en télégraphie et a travaillé comme télégraphiste itinérant dans différentes villes des États-Unis.

En 1869, à l'âge de 22 ans, Edison a fondé son entreprise industrielle appelée Menlo Park, où il s'est entouré d'une équipe de chercheurs salariés pour travailler sur ses inventions. Menlo Park est devenu un lieu emblématique pour les innovations, où Edison a déposé un grand nombre de ses brevets, dont le célèbre phonographe en 1878 et la lampe à incandescence en 1879.

La découverte de l'ampoule électrique a été l'une des réalisations les plus marquantes de sa carrière. Edison a réussi à produire une lampe à incandescence fonctionnelle en faisant passer du courant à travers un filament de carbone dans une ampoule sous vide. Cette invention a été un tournant majeur dans l'histoire de l'éclairage, marquant le début de l'utilisation généralisée de l'électricité pour l'éclairage dans le monde entier.

Il a également continué à travailler sur d'autres inventions importantes, notamment le phonographe, le kinétoscope, le télégraphe amélioré et de nombreuses autres avancées dans le domaine de l'électricité et de la communication.

Au cours de sa vie, Thomas Edison a contribué de manière significative à l'industrie et à la technologie, fondant la General Electric, l'une des plus grandes entreprises industrielles mondiales. Il a également reçu de nombreuses distinctions pour ses contributions scientifiques et a été surnommé le « sorcier de Menlo Park ».

Thomas Edison est décédé le 18 octobre 1931 à West Orange dans le New Jersey, laissant derrière lui un héritage durable en tant qu'un des inventeurs les plus prolifiques et influents de tous les temps.

## **B14 : René-Antoine Ferchault de Réaumur**

René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), communément appelé Réaumur, était un physicien et naturaliste français du XVIII<sup>e</sup> siècle. Né à La Rochelle en 1683, il étudia le droit à Poitiers et Bourges avant de se consacrer aux sciences à Paris.



En 1708, à l'âge de 25 ans, Réaumur fut élu à l'Académie des sciences grâce à ses mémoires de géométrie. Sa persévérance dans les arts et métiers lui valut la responsabilité de diriger l'édition de la *Description générale des arts et métiers* pour l'Académie.

Cependant, Réaumur ne se limitait pas aux arts et métiers. Il était un observateur remarquable des matériaux vivants, fasciné par la nacre, les fils d'araignée et les coraux. Il s'intéressa également à la métallurgie et à la sidérurgie, jetant les bases de la sidérurgie scientifique dès les années 1720. Il proposa la possibilité de transformer la fonte en acier en ajoutant du fer métallique ou de l'oxyde, démontrant ainsi que l'acier n'est pas simplement du fer épuré.

En 1729, Réaumur fit une contribution significative à l'art du verrier en inventant un verre blanc opaque appelé « porcelaine de Réaumur ». Cette porcelaine n'était en fait qu'un verre dévitrifié par chauffage et refroidissement, mais ses recherches ouvrirent la voie aux travaux ultérieurs sur la vraie porcelaine.

Un autre domaine dans lequel Réaumur excella fut celui de la thermométrie. Vers 1730-1731, il proposa un modèle de thermomètre à alcool avec une échelle de 80 parties égales entre la température de congélation de l'eau et la température d'ébullition de l'éthanol. Son thermomètre à alcool fut un progrès notable avant le thermomètre centigrade.

Réaumur fut également un précurseur de l'éthologie, étudiant les comportements animaliers. Il s'intéressa aux invertébrés, en particulier les insectes, et contribua à la parasitologie des invertébrés.

Son travail était vaste et varié, couvrant de nombreux domaines scientifiques, et il est considéré comme l'un des plus grands naturalistes de son époque. Il

est décédé le 17 octobre 1977 à l'âge de 74 ans, laissant derrière lui un héritage important pour la science et la recherche.

## B15 : Donald Stookey

Stanley Donald Stookey (23 mai 1915 - 4 novembre 2014) était un inventeur américain, reconnu pour ses 60 brevets liés au verre et à la céramique. Ses découvertes et inventions ont contribué au développement de la céramique, des lunettes, des verres de soleil, des ustensiles de cuisine, des systèmes de défense et de l'électronique.

Né le 23 mai 1915 à Hay Springs, dans le Nebraska, Stanley Donald Stookey était l'aîné de quatre enfants de Stanley et Hermie Stookey. Ses parents étaient tous deux enseignants, et son père avait également travaillé comme employé de banque à un moment donné. Vers l'âge de 6 ans, la famille déménagea à Cedar Rapids, dans l'Iowa.

Stookey poursuivit ses études au Coe College de 1934 à 1936, où il obtint son premier diplôme en arts libéraux en chimie et mathématiques. Son grand-père, Stephen Stookey, avait été professeur de botanique et de géologie dans le même collège. En 1937, il rejoignit le Lafayette College à Easton, en Pennsylvanie, où il obtint une bourse de 1 000 \$ pour couvrir ses frais de subsistance et travailler comme assistant de laboratoire d'enseignement en chimie. En 1938, il obtint sa maîtrise en chimie du Lafayette College, puis se rendit au Massachusetts Institute of Technology à Cambridge, où il obtint un doctorat en chimie en 1940. La même année, il épousa sa femme Ruth. En 1984, il reçut un diplôme honorifique de l'Alfred University.

La carrière de Stookey démarra en 1940, lorsqu'il rejoignit Corning Glass Works. Il se consacra à la recherche sur le verre et la céramique, ce qui conduisit à plusieurs inventions marquantes. L'une de ses premières innovations fut le verre FotoForm, reconnu par la communauté scientifique vers 1948. Le verre FotoForm est utilisé dans la fabrication d'ordinateurs et de technologies de communication.

Cependant, la découverte la plus remarquable de Stookey fut accidentelle. En 1953, en chauffant par erreur un morceau de verre FotoForm à 900 °C au lieu de 600 °C, il créa par hasard le premier verre céramique, appelé plus tard Pyroceram<sup>®</sup>. Cette invention révolutionnaire devint la base du célèbre produit CorningWare, lancé en 1958. CorningWare devint l'une de ses inventions les plus lucratives et influença le développement de VisionWare, un matériau transparent utilisé pour les ustensiles de cuisine. Pyroceram<sup>®</sup> possède des propriétés uniques, telles qu'une résistance thermique exceptionnelle, une faible dilatation

et une grande résistance mécanique, ce qui le rendit précieux pour des applications militaires, notamment pour les cônes de nez des dômes radar supersoniques dans les missiles guidés utilisés en défense.

En outre, Stookey développa également le verre photochromique, utilisé pour fabriquer des verres ophtalmiques qui s'assombrissent en cas de forte luminosité, et inventa un verre photosensible utilisant de l'or pour produire des photographies permanentes en couleur.

Tout au long de sa carrière à Corning Glass Works, Stookey obtint plus de 60 brevets. En 1986, il reçut la médaille nationale de la technologie des mains du président Ronald Reagan pour ses inventions du verre photochromique, du verre photosensible et de la vitrocéramique. Il prit sa retraite en 1987 en tant que directeur de recherche chimique fondamentale chez Corning, laissant derrière lui un héritage tangible.

Après sa disparition en novembre 2014, Stanley Donald Stookey fut honoré à travers le prix Stookey, attribué chaque année à un scientifique de Corning pour ses exploits uniques en recherche exploratoire, témoignant de son impact durable sur le domaine de la science des matériaux en verre et céramique.

## **B16 : Louis Lucas de Néhou**

Louis Lucas de Néhou, sieur de Néhou, est un gentilhomme verrier originaire de Normandie, né à une date inconnue et décédé le 12 juillet 1728 à la Manufacture de Saint-Gobain, à l'âge d'environ 75 ans. Il est surtout connu pour son rôle essentiel dans l'invention du procédé de fabrication du verre par coulage en 1691, qui allait révolutionner l'industrie du verre.

La Manufacture royale de glaces de miroirs, fondée par Louis XIV en 1665, avait pour objectif de réduire la dépendance de la France vis-à-vis des productions de verre vénitiennes. C'est dans ce contexte que Richard Lucas de Néhou, oncle de Louis Lucas, devint l'inventeur du verre blanc et des glaces. En 1667, il possédait déjà une manufacture de verre à Tourlaville, près de Cherbourg, au lieu-dit La Glacerie. Cette verrerie fut plus tard transférée à Tourlaville, où Louis Lucas de Néhou commença sa carrière en tant que maître verrier.

Après avoir travaillé dans la verrerie familiale, Louis Lucas de Néhou poursuivit son parcours dans les verreries parisiennes. En 1688, il rejoignit la Compagnie Bagneux, puis fut embauché par la Compagnie Thevert, qui acquit la verrerie Saint-Gobain en 1693. C'est à cette époque qu'il prit en main la direction de la Manufacture de Saint-Gobain, un rôle qu'il assura avec brio jusqu'en 1696, puis de nouveau de 1711 à sa mort en 1728.

La Manufacture de Saint-Gobain fut au cœur de grands projets, notamment la participation à la construction de la célèbre galerie des Glaces du château de Versailles entre 1678 et 1684. En 1693, la Manufacture s'installa à Saint-Gobain, en Picardie.

Louis Lucas de Néhou était réputé pour son énergie et sa conscience de sa valeur. Sous sa direction, la Manufacture de Saint-Gobain mit au point le procédé de coulage du verre en table pour la fabrication des grandes glaces. Il s'agissait d'une innovation majeure, résultat de tâtonnements et de perfectionnements successifs.

Avant même l'invention du coulage, des recherches actives étaient menées dans le domaine du verre en France. En particulier, Bernard Perrot, un verrier piémontais installé à Orléans, réalisait déjà des objets décoratifs en verre coulé dans les années 1670. Toutefois, c'est Louis Lucas de Néhou qui parvint à perfectionner ce procédé et à l'adapter à la fabrication de grandes glaces.

La réputation de Louis Lucas de Néhou en tant qu'inventeur du procédé de coulage du verre lui valut d'être nommé à la tête de la Manufacture de Saint-Gobain à deux reprises, et son influence dans l'industrie verrière perdura jusqu'à sa mort en 1728.

Aujourd'hui, Louis Lucas de Néhou est honoré par un lycée spécialisé dans les arts du verre et les structures verrières, situé à Paris, qui porte son nom. Son héritage en tant que pionnier de l'industrie du verre demeure et continue d'influencer le domaine de la verrerie et de la miroiterie.

## B17 : Émile Fourcault



Émile Fourcault, né le 1<sup>er</sup> juin 1862 à Saint-Josse-ten-Noode en Belgique et décédé le 11 octobre 1919 à Lodelinsart, est un ingénieur, industriel et inventeur belge qui a joué un rôle essentiel dans le développement de l'industrie verrière en Belgique au XX<sup>e</sup> siècle. Fils d'Amédée Fourcault-Frison et d'Emma Frison, il est issu d'une famille de la grande bourgeoisie carolorégienne.

Son père, Amédée Fourcault-Frison, fut d'abord officier dans l'armée belge avant de prendre la direction des verreries fondées par son beau-père, Jules Frison, à Lodelinsart en 1836. Émile Fourcault étudie d'abord au lycée de Metz puis intègre l'École spéciale des mines et des arts et manufactures de Liège (aujourd'hui intégrée à l'Université de Liège), où il obtient un diplôme d'ingénieur des mines en 1885.

Passionné par les avancées technologiques, Émile Fourcault devient le directeur des Verreries de Dampremy en 1900. Il croit fortement à la science, à l'enseignement et à la mécanisation pour le progrès de la société. Avec l'aide d'Émile Gobbe, un ingénieur qui travaille sur la fabrication mécanique du verre, il met au point un nouveau procédé d'étirage mécanique du verre à vitre.

Avant leur invention, le verre à vitre était obtenu par soufflage manuel, ce qui produisait un verre de qualité variable. Grâce à leur brevet déposé en 1901, ils révolutionnent l'industrie du verre en développant un procédé d'étirage mécanique permettant d'obtenir des feuilles de verre parfaitement planes et d'épaisseur uniforme. Cela rend le verre plus solide et moins cher à produire, ce qui attire l'attention du patronat verrier.

Toutefois, Émile Fourcault rencontre de nombreuses difficultés, notamment le manque de soutien des autres maîtres verriers, qui sont réticents à adopter cette nouvelle technologie. Malgré cela, il parvient à créer la SA des Verreries de Dampremy en 1912 grâce à des financements extérieurs en provenance d'Autriche et d'Allemagne. L'entreprise commence alors la production avec huit machines étireuses.

La Première Guerre mondiale met un frein à l'effort industriel en Wallonie, mais Émile Fourcault accepte de collaborer avec l'occupant allemand pour permettre la survie de l'industrie verrière en Belgique. Après la guerre, il est poursuivi en justice pour collaboration économique avec l'ennemi, mais il ne survit pas longtemps à ces épreuves et décède en 1919 à l'âge de 57 ans.

Malgré les difficultés, le procédé Fourcault continue de se développer, permettant à l'industrie verrière belge de soutenir la concurrence internationale. L'invention d'Émile Fourcault a été essentielle pour l'essor de la verrerie dans le Pays de Charleroi et en Belgique au XX<sup>e</sup> siècle. Son nom est associé à une rue de Dampremy et à la bibliothèque Centre Émile Fourcault dans la même localité. En 1955, la poste belge a même édité un timbre à son effigie pour commémorer son travail et celui d'Émile Gobbe.