

L'art du verrier :

des nanotechnologies
depuis l'Antiquité !

Le verre est l'un des matériaux les plus anciens du monde et il est toujours utilisé massivement dans les sociétés modernes. À travers l'évolution de l'art du verrier et des applications du verre depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, nous montrerons que, même si pour comprendre et maîtriser les propriétés d'un verre, il est nécessaire d'entrer dans l'univers des nanotechnologies – technologies réalisées à l'échelle du milliardième de mètre ! – et des techniques qui y sont associées, cette maîtrise de l'art a été réussie de manière empirique depuis des temps très anciens.

Parlons donc de nanotechnologie, à travers une histoire de l'art du verre...

1 Au commencement du verre

Un document original (*Figure 1*) montre une scène où, selon le récit de Pline l'Ancien⁵⁴, du verre aurait été produit pour la première fois de manière accidentelle par des marchands de natron [1]. Il raconte qu'il y a environ 3500 ans av. J.-C., des marchands phéniciens circulaient autour de la Méditerranée pour vendre du

54. Pline l'Ancien (23 après J.-C. – 79 après J.-C.) était un écrivain et naturaliste romain, auteur d'une monumentale encyclopédie intitulée *Histoire naturelle*, qui compte trente sept volumes. Ce document a longtemps été la référence en matière de connaissances scientifiques et techniques.



Figure 1

D'après la légende, le verre serait né il y a environ 3 500 ans av. J.-C. en Mésopotamie, par chauffage du sable et du natron sur un feu de bois. « [...] un navire portant des marchands de nitre vint y aborder, et, comme les marchands dispersés sur le rivage préparaient leur repas et ne trouvaient pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils les remplacèrent par des mottes de nitre [natron] tirées de leur cargaison. Quand celles-ci furent embrasées, mêlées avec le sable du rivage, des ruisseaux translucides d'un liquide inconnu se mirent à couler et telle fut l'origine du verre », *Pline l'Ancien* [1]. Photo : découverte de la vitrification – *Les arts et métiers illustrés*, Jules Rouff et Cie éditeurs, Paris, 1890-1900.

natron. Rappelons qu'à cette époque, la momification était une industrie florissante non seulement en Égypte mais également tout autour de la Méditerranée, et nécessitait des apports réguliers d'un sel desséchant tel que le natron, c'est-à-dire du carbonate de sodium hydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Sur le document, on voit ces marchands campant sur une plage et utilisant des blocs de natron pour supporter la marmite dans laquelle ils faisaient bouillir de la soupe. C'est alors qu'ils virent couler un liquide translucide, qui n'était autre que du verre fondu !

La vraisemblance de ce récit a été confirmée par une expérience similaire pratiquée il y a quelques années, prouvant qu'on pouvait observer ce phénomène avec un simple feu de bois. Ceci est aujourd'hui bien expliqué par les scienti-

fiques. Le verre est issu de la fusion de la silice SiO_2 , principal constituant du sable, qui ne fond qu'à une température très élevée (1 800 °C), difficile à atteindre dans un four classique et donc encore plus à cette époque, ce qui aurait dû présenter la principale limitation à la production du verre. Mais en ajoutant du natron, celui-ci abaisse la température de fusion de la silice vers 1 300 °C, jouant ainsi un rôle de fondant du verre. Ainsi, en lisant le récit de Pline l'Ancien, on comprend que sous l'action du feu, le sodium du natron avait réagi avec la silice du sable pour former du verre.

2 Et l'on maîtrisa peu à peu la coloration du verre

2.1. Des verres de plus en plus transparents

Bien que le verre ait été découvert de manière fortuite, les techniques de fabrication se sont ensuite très rapidement développées et ont connu de nombreuses applications, en particulier esthétiques. On a ainsi retrouvé de nombreux produits verriers phéniciens datant du VI^e siècle av. J.-C. Pour la plupart, ces objets étaient très colorés mais peu transparents (Figure 2). Mais rapidement, les verriers ont développé de nouvelles techniques permettant de rendre le verre transparent et de maîtriser sa coloration. Plus tard, à l'époque romaine, la technique du soufflage du verre a permis une plus grande maîtrise des formes (Figure 3).



Figure 2

Les verres phéniciens étaient très colorés et peu transparents.

Le verre est constitué essentiellement de silice ; les autres ingrédients ajoutés au mélange de base permettent d'abaisser sa température de fusion (le fondant), d'obtenir sa coloration et de contrôler toutes sortes d'autres propriétés. L'utilisation de matières premières purifiées a permis la maîtrise de la composition



Figure 3

Verrerie romaine (musée de Toulouse), une verrerie transparente et aux formes élaborées

des mélanges et la progression de la discipline, comme en témoigne la beauté de la verrerie romaine exposée au musée de Toulouse (**Figure 3**), à la fois transparente, très mince et avec des couleurs relativement variées, ou encore plus tard les vitraux de la cathédrale de Chartres (XIII^e siècle) (**Figure 4**).

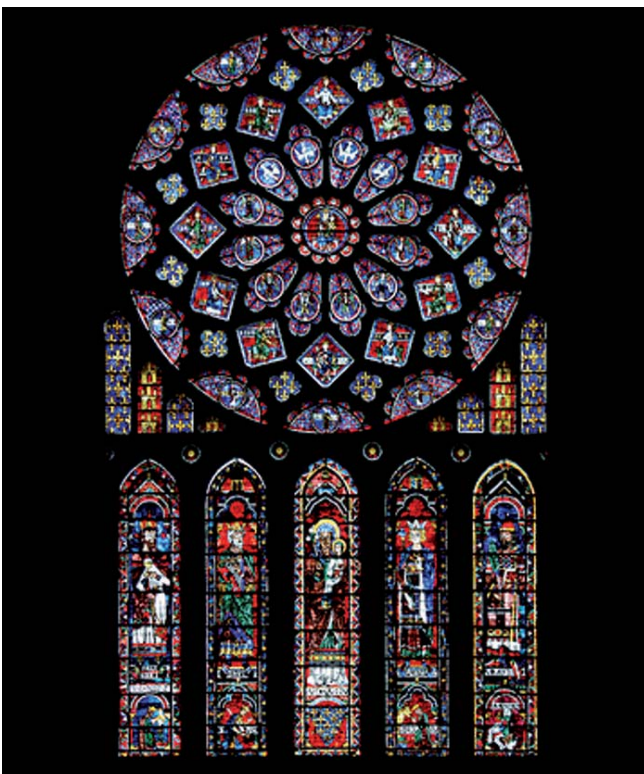


Figure 4

Les vitraux de la cathédrale de Chartres, XIII^e siècle. Une impressionnante maîtrise de la coloration du verre.

2.2. La chimie, pour des effets de couleurs inédits

La richesse des couleurs est obtenue par une technique aujourd'hui encore largement utilisée, qui consiste à introduire dans la matrice verrière des ions métalliques de la famille des métaux de transition, tels que le cuivre, le titane, le vanadium... La coloration obtenue dépend non seulement de la nature du métal ajouté mais aussi de son degré d'oxydation.

Pour expliquer le phénomène, lorsque les ions métalliques reçoivent de la lumière, ils absorbent une partie de l'énergie transportée par les photons lumineux, provoquant une excitation des électrons de leurs couches superficielles. Ces électrons évoluent alors de leur état d'énergie fondamental vers des niveaux d'énergie supérieure. En fonction des écarts entre les niveaux d'énergie, l'ion absorbera une certaine fréquence de la lumière reçue, puis réémettra la couleur complémentaire. Donc autant d'écarts d'énergie possibles, autant de couleurs possibles, ce qui contribue à la richesse de la palette de couleurs pouvant être obtenue par cette méthode (pour aller plus loin sur la perception de la couleur, voir le **Chapitre de B. Valeur**).

Typiquement, le cuivre permet de faire des verres bleus, le titane permet le violet, le vanadium pour le vert, le chrome pour le vert ou jaune, le nickel pour le brun, etc. Les verriers ont toute une panoplie de technologies d'introduction de métaux de transition pour produire les couleurs qu'ils veulent.

3 La coloration du verre par les agrégats métalliques... place à la nanotechnologie

Mais il ne tarda pas à apparaître d'autres types de colorations séduisantes et intrigantes, colorations que l'on ne peut obtenir traditionnellement avec les ions de métaux de transition. À l'origine de ces colorations se cachent des agrégats de très petite taille, de l'ordre du nanomètre ; ce sont donc des nanoparticules ayant la propriété de donner au verre une coloration très particulière... mais par quel miracle ? Examinons à la loupe plusieurs objets d'art auxquels la nanotechnologie a donné naissance.

3.1. Des effets de coloration extraordinaires : exemples historiques

3.1.1. La coupe de Lycurgue

La coupe de Lycurgue, datée du IV^e siècle, présente des propriétés optiques surprenantes et une coloration que l'on n'obtiendrait pas par ajout d'ions de métaux de transition. Lorsqu'elle est éclairée depuis l'extérieur elle apparaît verte (**Figure 5**), alors qu'éclairée de l'intérieur elle est de couleur rouge !

Le fait d'obtenir une coloration différente selon le mode d'observation s'explique par les propriétés optiques du verre. Quand celui-ci est éclairé de l'intérieur, la partie verte du rayonnement est réfléchi et reste emprisonnée à l'intérieur ; il ne sort donc que le rouge, la couleur complémen-

taire du vert, celle que nous voyons de l'extérieur. Puis le phénomène est inversé si on éclaire la coupe de l'extérieur. Mais de là à obtenir une différence de coloration aussi marquée, cela est tout à fait spectaculaire ; et le fait d'avoir pu obtenir empiriquement cet effet au IV^e siècle est encore plus remarquable.

Les scientifiques savent maintenant que cet effet résulte d'une méthode originale de fabrication du verre de la coupe : le verre est coloré par adjonction d'or et d'argent, introduits dans la composition lors de sa fabrication, et surtout à des conditions de recuit du verre assez particulières, qui conduisent à la formation de petits agrégats d'or et d'argent, état physique de la matière totalement inconnu à cette époque, et dont la technique de production était pourtant maîtrisée empiriquement.

3.1.2. Le verre « ruby »

Plus récemment sont apparus sur le marché des objets en verre d'une coloration très particulière également, développés entre autres par les verriers de Murano⁵⁵. C'est le cas du « verre ruby ». Le flacon de la **Figure 6** est caractérisé par sa couleur rouge sombre, très profonde, qu'il est impossible à obtenir en utilisant une technique de coloration par les ions de métaux de transition. Quel secret cache-t-il ?

55. Les artisans de l'île de Murano, située au nord de Venise, sont spécialisés dans le soufflage du verre et ont une renommée internationale.



Figure 5

De l'or et de l'argent étaient introduits dans la composition de la coupe de Lycurgue (IV^e siècle). Éclairée de l'intérieur, elle apparaît verte ; éclairée de l'extérieur, elle apparaît rouge.

Son secret est le même que celui de la coupe de Lycurgue, mais il a été complètement perdu pendant la période du IV^e au XVII^e siècle, avant d'être redécouvert en Bohême, puis développé dans plusieurs villes productrices de produits verriers. La technique de sa fabrication a été décrite de manière très détaillée en 1612 dans l'*Arte Vetraria*, un ouvrage écrit par Antonio Neri pour les vénitiens, et que les verriers considèrent en quelque sorte comme la Bible de leur métier. Ce livre fournit de nombreux détails sur la façon de colorer le verre, notamment le verre ruby à l'or, principalement fabriqué à



Figure 6

Le « verre ruby » de Murano.

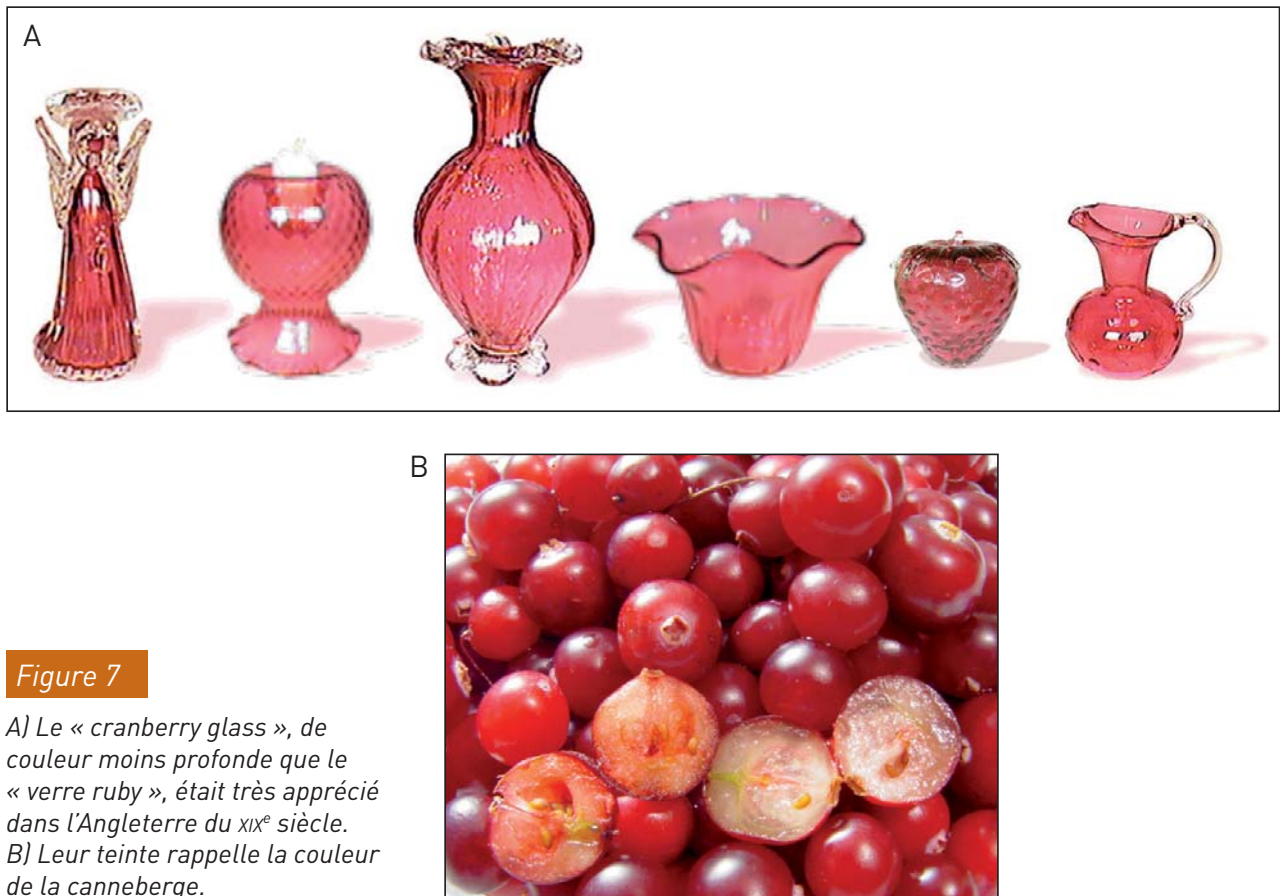


Figure 7

A) Le « cranberry glass », de couleur moins profonde que le « verre ruby », était très apprécié dans l'Angleterre du XIX^e siècle.
 B) Leur teinte rappelle la couleur de la canneberge.

Venise, mais aussi à Gibraltar, en Nouvelle-Zélande, ou encore au Japon et en Chine.

Au XIX^e siècle, est apparue une variante du verre ruby : le verre ruby Victorien ou « cranberry glass », très appréciée en Angleterre. Ce type de verre ruby se démarque de son ancêtre par une teinte rouge plus légère, qui rappelle la couleur de la canneberge (« *cranberry* » en anglais). Il s'agit d'un fruit que l'on trouve essentiellement en Amérique du Nord, portant une couleur rose très particulière. Les **Figure 7** donnent des exemples typiques de produits en cranberry glass.

3.2. Quelle chimie se cache derrière ces couleurs ?

Quelle chimie explique couleurs aussi remarquables que le verre ruby ou le cran-

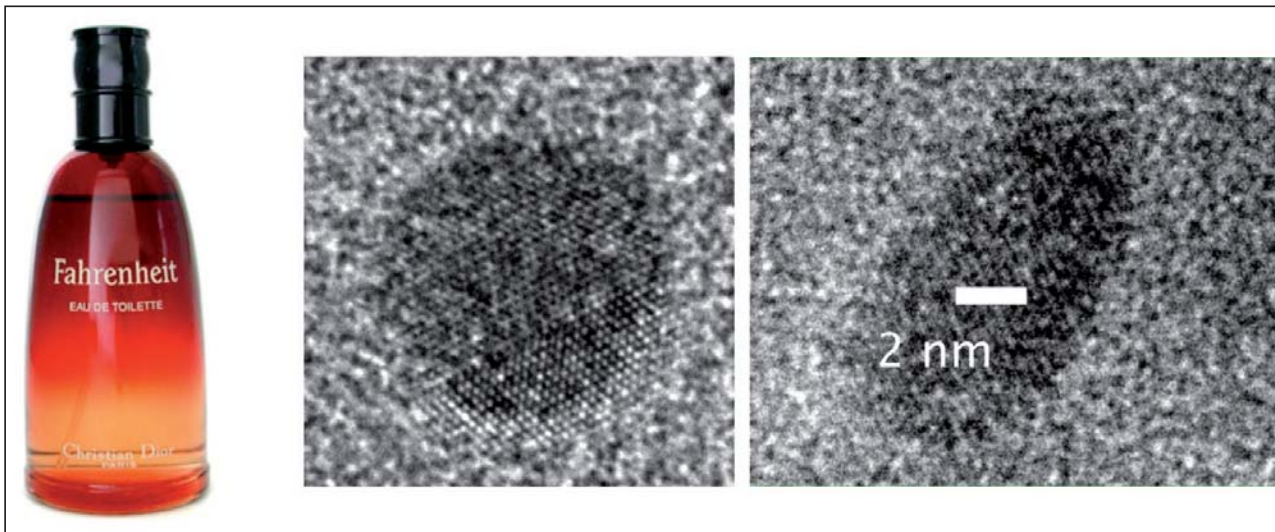
berry glass ? La réponse est à trouver dans les agrégats nanoparticulaires qui les composent. Explorons la structure de ces verres.

3.2.1. Des agrégats nanométriques

Au moment de la fabrication de ces verres, de l'or⁵⁶ a été introduit dans la matrice verrière. L'ensemble a ensuite été fondu à 1 300 °C, de sorte que le métal se répartisse de manière homogène dans le mélange, après un traitement préalable à l'eau régale (traitement acide de l'or).

Puis le liquide obtenu a été lentement refroidi. À un certain moment, aux alentours de 600 à 800 °C, le

56. On peut également envisager d'introduire d'autres métaux dans la matrice verrière, comme le cuivre ou l'argent.



verre devient visqueux, ce qui offre toute la possibilité de le travailler, le souffler, et donc lui donner toute forme souhaitée. Cet état a été maintenu pendant un certain temps avec une température constante, état qui permet de relâcher toute tension existant au sein du verre. Il s'agit-là de la phase dite de « **recuit** ». Cette phase est très importante, car si au contraire le verre était refroidi trop brutalement, par plongée dans un liquide froid, on obtiendrait du verre dit « trempé », qui se casse facilement. En revanche, la phase de recuit permet aux atomes d'or de se déplacer encore légèrement dans le verre, puis lorsqu'ils se rencontrent, ils s'accrochent les uns aux autres, et de là se produit une **croissance cristalline** conduisant petit à petit à la formation d'agrégats de plusieurs centaines voire de quelques milliers d'atomes métalliques.⁵⁷

57. Notons que d'autres techniques pour former de tels agrégats ont été développées plus récemment, tels que l'implantation ionique, l'échange d'ions ou encore l'irradiation laser.

Ces agrégats constituent dès lors la structure moléculaire particulière des fameux verres ruby et des cranberry glass. Mais qu'en est-il chimiquement et physiquement de leur couleur si particulière ?

3.2.2. Le secret de la coloration « ruby »

Il suffit d'admirer certains flacons de parfum pour comprendre à quel point la dimension et la nature des agrégats métalliques sont cruciales pour la teinte du verre. Le célèbre flacon de parfum pour homme Fahrenheit en est un bel exemple : il présente une teinte dont l'intensité varie de haut en bas du flacon (**Figure 8**). Son histoire est insolite : le premier flacon a été recuit chez Saint-Gobain dans un four mal réglé : la température n'était pas la même en haut et en bas du four ! Par conséquent les agrégats qui se sont formés au cours du recuit étaient plus gros en haut et plus petits en bas. À la vue de ce résultat inattendu, la Société Dior, qui en a apprécié la beauté, a demandé que cet échantillon soit reproduit à l'identique pour tous les flacons

Figure 8

Le célèbre flacon de parfum pour homme Fahrenheit est constitué d'agrégats de cuivre. Le microscope électronique permet de distinguer des centaines d'atomes de cuivre (au milieu) ou de molécules d'oxyde de cuivre (à droite), ayant des tailles de 5-6 nm.

Fahrenheit... or, il n'a pas été évident de reproduire à l'identique ce résultat accidentel.

Afin d'expliquer pourquoi la taille des agrégats métalliques influence la couleur du verre au sein duquel ils sont dispersés, il faut regarder de près leurs structures et s'intéresser à leurs propriétés optiques. On a ici non plus une absorption atomique de la lumière (absorption par des atomes de métaux ou ions métalliques, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.2.), mais une absorption optique très particulière par des agrégats entiers cette fois, et reposant en fait sur deux phénomènes concurrents.

D'une part, il faut voir qu'un agrégat d'atomes de métal, c'est un métal, et à ce titre, il absorbe la lumière d'une manière qui est bien connue des métallurgistes : c'est ce que l'on appelle en physique l'« **absorption inter-bandes** ». Elle a lieu dans le volume de l'agrégat (on a une transition électronique entre la bande dite de valence et la bande dite de conduction du

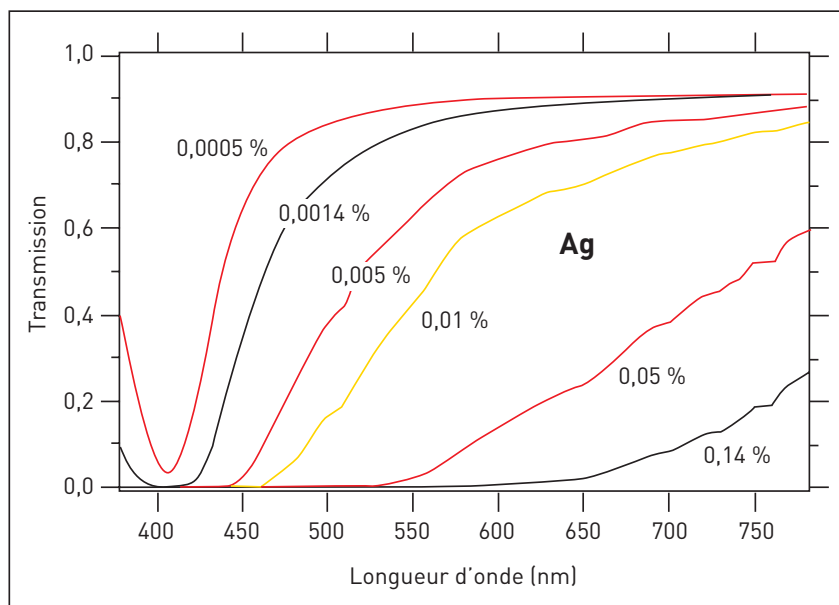
métal), et se produit généralement à des longueurs d'ondes assez lointaines, vers l'ultra-violet (entre 10 et 400 nanomètres).

Autre phénomène : comme les agrégats sont petits, le nombre d'atome en surface est important par rapport au nombre d'atomes à l'intérieur de la particule métallique. Ceci a pour conséquence que les atomes en surface forment avec leurs électrons libres une sorte de gaz, capable d'entrer en résonance avec tout rayonnement magnétique, en l'occurrence la lumière, et de produire ce qu'on appelle une « **résonance plasmon** ». Pour schématiser, les électrons se mettent à vibrer collectivement et permettent à l'ensemble d'absorber la lumière à une longueur d'onde bien particulière, qui, associée à l'absorption inter-bande, conduit aux teintes observées pour le verre ruby.

Des calculs précis ont été effectués pour quantifier ces absorptions par effet plasmon en fonction de la longueur d'onde de la lumière et de la quantité d'agrégats qui absorbe. Dans un exemple de verre constitué d'agrégats d'argent, on observe que lorsque la proportion d'argent est faible (0,0005 %), la bande d'absorption a une allure plutôt classique pour les scientifiques, alors que lorsque l'on en augmente la proportion (0,14 %), la bande d'absorption s'apparente à une marche d'escalier (Figure 9). C'est cette absorption en marche d'escalier qui donne la coloration si particulière que présentent les verres ruby.

Figure 9

Absorption par effet plasmon, en fonction de la longueur d'onde absorbée de la lumière.



4 Les applications actuelles des nanotechnologies dans l'industrie du verre

L'histoire des nanotechnologies du verre a vu le jour très tôt, comme en témoignent les agrégats métalliques des verres ruby. Mais elle n'est pas encore finie : l'industrie actuelle du verre utilise à son tour d'autres types de nanotechnologies, de plus en plus maîtrisées, et l'on sait maintenant que l'on fait de la nanotechnologie... pour notre bien-être.

4.1. Le vitrage à translucidité contrôlée

Un vitrage dénommé Privalite a été développé pour l'utiliser de manière très astucieuse dans les bureaux modernes : il est au départ translucide, c'est-à-dire ne laisse passer qu'une lumière diffuse, sans permettre de distinguer les objets au travers ; puis il suffit d'appuyer sur un bouton de télécommande pour qu'il devienne transparent, cette manœuvre étant réversible (**Figure 10**). Quelle technique se cache derrière ce tour de passe-passe ?

Le vitrage est constitué de deux plaques de verre, entre lesquelles on a introduit une lame de **polymère** (plastique) contenant de petites gouttes de **cristaux liquides**. Or, ces gouttes de cristaux liquides sont capables de s'orienter dans un sens précis sous l'effet d'un champ électrique. Afin de pouvoir créer ce champ entre les deux plaques de verre, on recouvre le verre d'une couche conductrice transparente. Au moment d'appliquer le champ, les gouttes de cristaux liquides vont toutes adopter la même orientation, c'est-à-dire celle parallèle au champ électrique. C'est en contrôlant la taille des gouttes de cristaux liquides, de manière à ce qu'ils acquièrent le même indice de réfraction que celui du polymère où ils baignent, que l'on obtient un milieu homogène. Autrement dit, l'ensemble laisse parfaitement passer la lumière : on a un vitrage transparent. En l'absence de champ électrique, les cristaux liquides reprennent une orientation aléatoire, donc leur indice de réfraction devient différent de

Figure 10

Privalite, le vitrage translucide (A), qui devient transparent en un simple clic (B).



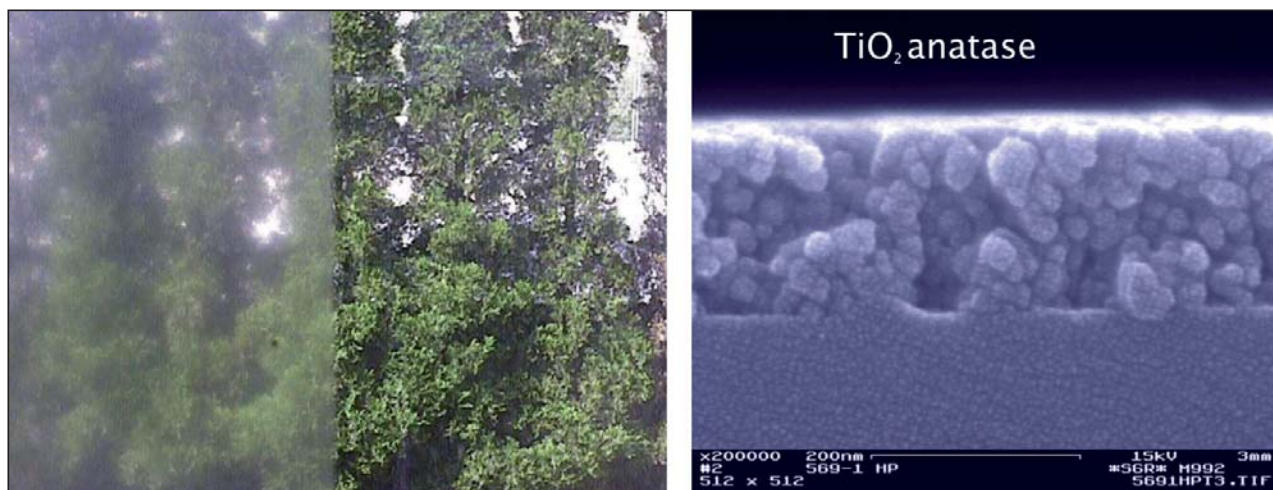


Figure 11

Le verre autonettoyant se débarrasse des dépôts de graisse par une réaction catalytique sous le simple effet de la lumière : au cours d'une expérience, la partie gauche de la vitre n'a pas été traitée, et se trouve au bout d'un an recouverte de salissure, tandis que la partie droite qui a été traitée reste intacte. Le miracle provient de la présence de nanoparticules d'oxyde de titane TiO_2 anatase.

celui du polymère : le milieu est alors dispersif et translucide, comme l'est un verre dépoli.

Ce principe est utilisé par des artistes qui cherchent à faire apparaître des figures sur la surface du verre. C'est aussi celui utilisé pour l'affichage par cristaux liquides que l'on trouve dans nombreux appareils comme les réveils, les ordinateurs, ou encore des panneaux d'annonces dans les gares, etc.

4.2. Le verre autonettoyant

Le principe du verre autonettoyant repose sur une propriété caractéristique de l'oxyde de titane TiO_2 quand il est sous la forme cristalline appelée anatase. En effet, l'oxyde de titane anatase est un « photocatalyseur », c'est-à-dire que toute tache de graisse déposée sur sa surface se décompose quand elle est éclairée par un rayonnement ultraviolet ou même visible. Cette réaction ne détériore ni l'oxyde de titane ni le verre sur lequel ce catalyseur est déposé. Afin de créer un verre autonettoyant, on dépose donc sur le

verre une couche d'anatase de l'ordre d'une centaine de nanomètres, qui permet la décomposition catalytique des graisses (**Figure 11**).

4.3. Le vitrage moderne : un filtre sophistiqué

Afin d'obtenir de nouvelles propriétés adaptées aux besoins de l'architecture et du confort modernes, le développement des verres actuels passe par la recherche de filtres sophistiqués à propriétés spécifiques. Ces filtres sont constitués par la superposition de différentes couches très minces (nanocouches) de métal, tel que l'argent, et d'oxydes métalliques déposés sur le verre. Ces couches ont une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres et peuvent aller jusqu'à une centaine de nanomètres. On peut superposer jusqu'à plus de vingt couches pour former un filtre interférentiel, calculé et ajusté pour obtenir les propriétés recherchées (**Figure 12**).

Ceci a permis de développer plusieurs types d'applications.

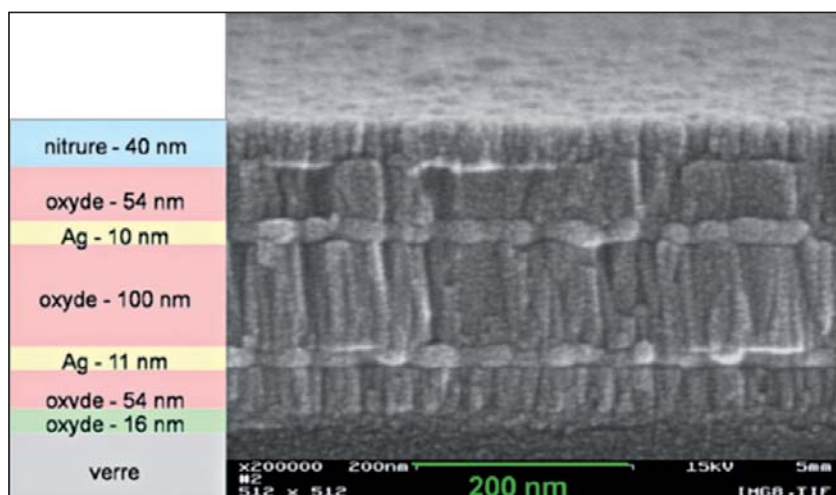


Figure 12

Micrographie d'un vitrage moderne : sur le verre sont déposées sept couches superposées.

4.3.1. Le contrôle solaire : un filtre aux rayonnements de l'infrarouge proche

Le contrôle solaire a pour objectif la fabrication d'un verre capable de réfléchir les radiations lumineuses de l'infrarouge proche (longueur d'onde 0,78 à 1,4 micromètres). Ces verres sont obtenus par la superposition de couches métalliques formant un filtre sophistiqué. La majeure partie de l'énergie solaire est contenue dans son rayonnement infrarouge. Si le rayonnement solaire est réfléchi à la surface du

verre il ne pénètre à l'intérieur du bâtiment et donc la chaleur non plus. Ce type de verre permet donc de diminuer considérablement les dépenses en matière de climatisation en particulier pour les immeubles d'entreprises, qui comportent souvent de grandes façades vitrées (**Figure 13**).

4.3.2. Le contrôle solaire et thermique

En revanche, le vitrage de la **Figure 14** a été conçu avec d'autres types de couches, de telle sorte qu'il acquiert



Figure 13

Le vitrage de ce bâtiment joue un rôle important dans le contrôle thermique pour ses occupants !



Figure 14

Un vitrage qui maintient les habitant bien au chaud en hiver.

la propriété de réfléchir des rayonnements situés dans l'infrarouge lointain (vers 10 micromètres), ce qui correspond au rayonnement des corps noirs à 20 °C. C'est ainsi que lorsque l'on chauffe les pièces à 20 °C en hiver, la chaleur ainsi émise sous forme de rayonnement est réfléchiée par la vitre vers l'intérieur, ce qui permet de conserver la chaleur. D'où des économies de chauffage en hiver !

Figure 15

La partie gauche est un vitrage antireflet, contrairement à la partie droite.

Aujourd'hui, on est capable de fabriquer des vitrages dont le filtre réalise à la fois un contrôle thermique et un contrôle solaire.

4.3.3. Le vitrage anti-reflet

Ce dernier exemple illustre la multitude de propriétés pouvant être obtenues grâce à la confection de ces filtres interférentiels. L'obtention de ces verres est toujours basée sur le principe du dépôt de nanocouches de matériaux adaptés, superposées à la surface du verre et permettant d'éviter le phénomène de réflexion d'une partie de la lumière visible, souvent observé sur la surface d'une vitre, et donc l'effet miroir qui y est associé (Figure 15).

D'autres types de vitrages ont été également développés qui permettent de répondre à des besoins de plus en plus divers (Encart : « L'anecdote du verre anti-agression »).

L'ANECDOTE DU VERRE ANTI-AGRESSION

La société Saint-Gobain voulant tester un verre anti-agression a demandé à l'ouvrier le plus costaud de l'usine de frapper sur la vitre avec une hache. Celle-ci est restée plantée dans le verre.



La nanotechnologie et l'avenir des verres

Le verre est l'un des matériaux les plus anciens élaboré par l'homme, et, depuis l'Antiquité, celui-ci cherche empiriquement à en contrôler et à en maîtriser les propriétés optiques, alors même que ces propriétés dépendent de la structure de ces matériaux à l'échelle nanométrique : elles ne se comprennent et ne se maîtrisent normalement qu'au moyen des plus récentes découvertes de la physique et de la chimie. Pourtant, grâce au génie créatif de leur imagination, à la transmission d'un savoir-faire accumulé depuis des millénaires et transmis à travers le brassage des diverses cultures, les maîtres verriers ont su très tôt, pour la beauté de l'art, réaliser des innovations technologiques extraordinaires par une approche purement empirique leur permettant en particulier la maîtrise parfaite de la coloration des verres, bien que cette propriété optique dépende de paramètres physiques et chimiques très complexes dont ils ignoraient totalement l'existence.

Ce génie de la manipulation de la matière vitreuse s'est perpétué à travers les siècles et les cultures jusqu'aux maîtres verriers d'art modernes qui jouent expérimentalement avec les propriétés optiques des verres et de leurs interfaces avec les matériaux les plus divers, avec la subtilité des mélanges ajoutés aux pâtes vitreuses, avec la science des recuits et réussissent à fabriquer de fabuleux objets d'art aux couleurs et aux propriétés optiques extraordinaires. Qu'obtiendraient-ils encore donc si ces artistes maîtres verriers étaient en plus chimistes ou physiciens ?

Pourtant, cette collaboration des chimistes et des physiciens, qui a permis la compréhension et la maîtrise de la structure des verres à l'échelle

nanométrique, a révolutionné l'industrie du verre et l'a transformée en une industrie de haute technologie dont les applications se développent de plus en plus, non seulement dans la construction et l'habitat, comme cela a été décrit dans ce chapitre, mais dans les transports, l'électronique, la sécurité... Les « verres intelligents » au service de l'homme ont donc encore un grand avenir.

Bibliographie

[1] Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, Livre XXXVI, LXV, Les Belles Lettres, 1919.

Crédits photographiques

Fig. 5 : The Trustees of the British Museum.

Fig. 10 : d'après *Coloration des verres par des nanoparticules*, par

Jacques Lafait «Verre» vol.12, N°4 Août 2006.

Fig. 11, 12, 14 et 15 : Saint Gobain.