

Les verres ophtalmiques

De la protection à la correction

Christel Pierlot, Arnaud Vanrobaeys et Alain Colonna de Lega

Résumé Le pouvoir de dispersion (nombre d'Abbe ou constringence (v_e)) et l'indice de réfraction (IR) sont des paramètres caractéristiques des verres ophtalmiques. Les verres minéraux qui possèdent des indices de réfraction élevés (IR = 1,7-1,8) sont progressivement remplacés par des polymères organiques (polycarbonate de bisphénol A (IR = 1,6 ; v_e = 30), poly(diéthylène glycol bisallylcarbonate) (IR = 1,5 ; v_e = 54-60)) de plus faibles densités et de meilleures résistances mécaniques, et plus récemment par des résines de type polyuréthanes, polyamides, polyacryliques et par des polymères à base de soufre. Les revêtements anti-reflet et anti-salissure sont réalisés par évaporation sous vide tandis que des nanoparticules de silice assurent le traitement anti-rayure.

Mots-clés Verre ophtalmique, indice de réfraction, nombre d'Abbe, constringence, polycarbonate, CR 39.

Abstract **Ophthalmic lenses: from protection to corrective function**
Optical dispersiveness (Abbe number or constringence (v_e)) and refractive index (RI) are characteristic parameters of ophthalmic glasses. Inorganic glasses with high refractive index (RI = 1.7-1.8) are progressively replaced by polymeric organic materials (polycarbonate (RI = 1.6, v_e = 30), diethylene glycol bis(allyl carbonate) (RI = 1.5, v_e = 54-60)) which have lower density and better impact resistance, and more recently by polyurethane, polyamide, polyacrylic and sulfur based polymers. Anti-reflection and soil-resistant coating via evaporation under high vacuum conditions are developed, whereas nanoparticles of silica are used for the resistance to abrasion.

Keywords Ophthalmic glass, lens, refractive index, Abbe number, constringence, polycarbonate, CR 39.

Réaliser la lunette du myope ou du presbyte implique que l'on dispose d'une large gamme de moyens, afin de sélectionner ceux qui satisfont au mieux à la double exigence :

- produire et conserver les résultats prévus par la formule prescrite par l'ophtalmologiste,
- être adapté aux données spécifiques morphologiques et psychologiques de la personne à laquelle elle est destinée, ces moyens étant essentiellement les instruments de mesure, les verres de lunettes et les montures.

Le verre ophtalmique est constitué par un matériau transparent, auquel il a été donné une forme et des dimensions calculées pour que la combinaison résultante produise sur la lumière les effets désirés. Ce matériau transparent est le verre minéral ou organique ; chacun d'eux apportant, à côté de propriétés optiques voisines, des propriétés mécaniques et chimiques spécifiques.

Cet article va essayer de montrer de quelles évolutions (influencées par la mode ou bien par les progrès de diverses industries, chimiques essentiellement) le verre ophtalmique a bénéficié à la fois tant pour son substrat que pour ses traitements.

Rôle des verres ophtalmiques

Entre la source lumineuse et l'œil, un verre ophtalmique peut être correcteur ou protecteur, ou les deux à la fois.

La **correction** concerne les amétropies connues telles l'hypermétropie, la myopie, liées ou non à l'astigmatisme ou à la presbytie (voir *figure 1* et *glossaire*).

Hormis cette dernière qui concerne un manque de mise au point en vision de près, le verre ophtalmique est celui qui donne à l'œil la possibilité de voir nettement des objets éloignés sans accommoder (situation de repos). Pour ce faire, les surfaces utilisées en optique ophtalmique sont sphériques, planes, asphériques le plus souvent elliptiques. Elles peuvent également être associées à des surfaces cylindriques ou toriques pour le cas de l'astigmatisme et progressives en cas de presbytie.

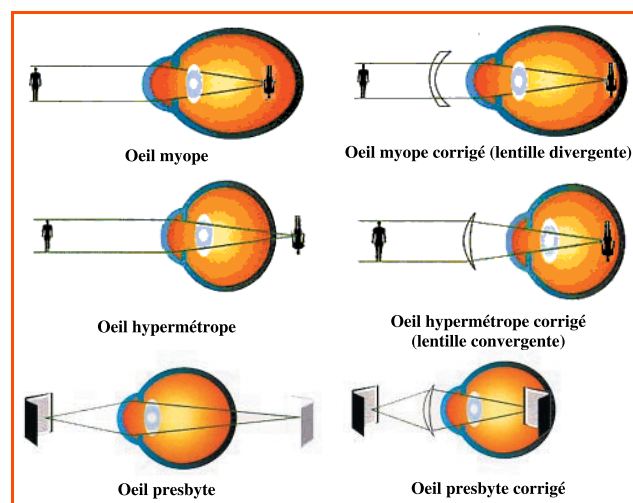


Figure 1.

Glossaire

Astigmatisme

L'astigmate voit de façon médiocre de près comme de loin, il confond souvent des lettres proches comme le H et M. Un astigmate a une vision déformée des objets. L'astigmatisme est un défaut de la courbure de la cornée (ou du cristallin) qui agit sur un axe (horizontal, vertical ou oblique) et dénature la vision.

Dispersion chromatique, constringence ou nombre d'Abbe

La variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde est à l'origine du phénomène de la dispersion chromatique. Pour caractériser le pouvoir de dispersion d'un matériau, on utilise une quantité appelée constringence ou nombre d'Abbe (v_e) :

$$v_e = (n_e - 1) / (n_F - n_C)$$

où n_e , n_F et n_C sont les indices du verre respectivement pour $\lambda_e = 546,07 \text{ nm}$, $\lambda_F = 579,99 \text{ nm}$ et $\lambda_C = 643,85 \text{ nm}$.

Hypermétropie (figure 1, milieu)

L'hypermétrope voit mieux de loin que de près. A l'inverse de la myopie, l'œil est trop petit. Le foyer image se forme derrière la rétine, le cerveau reçoit une image floue. Toutefois en fonction de la capacité à accommoder, l'œil peut ramener cette image sur la rétine au prix d'un certain effort.

Myopie

La myopie se traduit par une gêne pour voir de loin. Un œil myope est un œil trop long. Le foyer image se forme en avant de la rétine, le cerveau reçoit une image floue.

Presbytie (figure 1, bas)

La presbytie n'est pas un défaut de réfraction mais un vieillissement inévitable du cristallin. Au fil du temps, ce dernier perd de son élasticité et ne peut plus assurer l'accommodation pour des objets proches. La presbytie se combine avec les autres défauts optiques de l'œil. Le presbyte est obligé de lire son journal à bout de bras, mais voit distinctement des objets éloignés.

La **protection**, quant-à-elle, concerne de manière très large les corps étrangers froids ou chauds qui peuvent être des gouttelettes de liquide, de grosses particules de poussière ou bien du métal fondu, mais également les UV et l'éblouissement.

Propriétés optiques

Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un milieu transparent (n) est le rapport $n = c/v$, où c est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et v , la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu.

Cet indice est un nombre compris entre 1,5 et 1,9 pour les verres usuels, qui permet de quantifier la déviation d'un faisceau lumineux au passage de l'air à ce milieu et inversement (figure 2), selon la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Constringence (v_e)

L'indice de réfraction étant plus élevé pour les courtes longueurs d'onde, il s'ensuit un processus de dispersion chromatique ou constringence (voir glossaire et figure 2). Plus la constringence est faible, plus les phénomènes gênants d'irisations qui entourent les objets vus au travers des verres relativement puissants ont tendance à augmenter. D'une façon générale, v_e diminue avec l'augmentation de l'indice de réfraction du matériau.

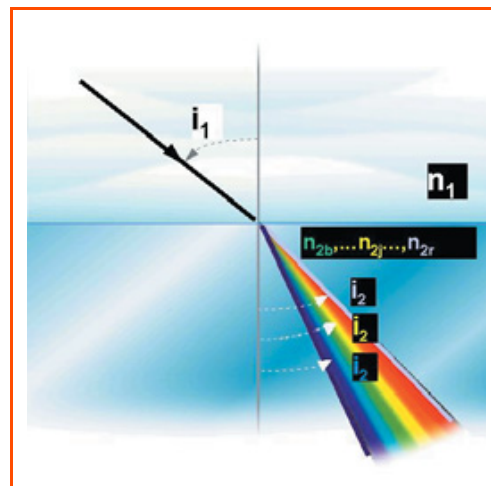


Figure 2 - Modification de la trajectoire d'un rayon lumineux par passage d'un milieu d'indice n_1 vers un milieu d'indice n_2 .

Relation entre dioptrie, indice de réfraction et rayon de courbure

La dioptrie (D) est l'unité de puissance que possède un milieu ou un objet de dévier les rayons lumineux. Le nombre de dioptries pour corriger un défaut visuel conditionne la réalisation du verre optique. En effet, l'équation simplifiée (1) montre la relation entre le rayon de courbure de cette surface (R), son épaisseur (liée à l'indice de réfraction n) et la dioptrie (D) :

$$D = (n-1)/R \tag{1}$$

Remarque

D'après l'équation (1), l'intérêt d'obtenir des verres avec un indice de réfraction élevé est double car de tels verres permettent la correction du défaut visuel avec des verres correcteurs esthétiques plus fins et pratiquement plats (rayon de courbure élevé). Malheureusement, de tels verres sont également caractérisés par une irisation importante car la constringence diminue. Il y a là une incompatibilité que les verriers s'efforcent de surmonter.

Le verre minéral (tableau I)

Une définition générale des verres minéraux pourrait être celle-ci : « solide non cristallin obtenu par figeage d'un liquide surfondu ». C'est l'« état vitreux » de la matière à côté des états liquide, solide et gazeux mieux connus.

On peut regrouper les oxydes entrant dans la composition des verres en deux grandes catégories :

- les oxydes formateurs de réseau, qui sont à la base de toute composition et qui pourraient presque à eux seuls constituer un verre (ex : SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5) ;
- les oxydes modificateurs, qui ont pour fonction de modifier les propriétés de base apportées par les oxydes formateurs ; il peut s'agir aussi bien de la viscosité (pour le coulage dans les moules) que des propriétés électriques, de la résistance chimique ou du coefficient de dilatation (ex : K_2O , Na_2O , CaO , BaO).

Certains oxydes se comporteront, selon la composition, soit comme formateurs, soit comme modificateurs : il s'agit des oxydes intermédiaires (ex : Al_2O_3 , ZnO , TiO_2).

Tableau I - Composition chimique pondérale indicative des principaux verres ophtalmiques minéraux.

	Sodocalcique	Borosilicate	Titane/ lanthane	Lanthane/ niobium	Lanthane/ niobium
Indice de réfraction (n)	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Constringence (v_e)	60	50	41	34	30
Composant					
Silice (SiO ₂)	70	57	36	29	7
Alumine (Al ₂ O ₃)	1	6			
Oxyde de bore (B ₂ O ₃)	1	18	10	2	17
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	11	4	2		
Oxyde de potassium (K ₂ O)	5	6			
Oxyde de lithium (Li ₂ O)		2	6	4	
Oxyde de magnésium (MgO)	1				
Oxyde de calcium (CaO)	9		9	15	14
Oxyde de barium (BaO)	2				
Oxyde de zirconium (ZrO)		5	5	5	8
Oxyde de titane (TiO ₂)		2	6	9	9
Oxyde de niobium (Nb ₂ O ₅)			9	15	21
Oxyde de lanthane (La ₂ O ₃)			14	21	24
Oxyde de strontium (SrO)			3		

Pour qu'un verre dirige la lumière suivant un trajet bien précis, il faut qu'il soit homogène, c'est-à-dire qu'il ait les mêmes caractéristiques d'indice dans tout son volume. Cette homogénéité est obtenue à la fabrication par un mélange continu et régulier du verre dès sa fusion.

L'élément de base du verre minéral usuel est la silice qui entre pour 55 à 80 % dans la composition du mélange. Les autres oxydes sont sélectionnés surtout pour fixer les deux grandeurs qui jouent le rôle essentiel dans le cheminement de la lumière, l'indice de réfraction et la constringence. Les matériaux « sodocalciques », contenant des proportions significatives de sodium et de calcium, sont traditionnellement utilisés en optique : la variété Crown contient le pourcentage le plus élevé de silice, tandis que la variété Flint contient une part non négligeable d'oxyde de plomb. Leur indice de réfraction ($n = 1,5$) est peu élevé, mais leur constringence (60) est importante. Les matériaux « borosilicates » à forte teneur en bore sont utilisés pour la fabrication des verres photochromiques et pour les verres minéraux moyens d'indice $n = 1,6$.

La coloration dans la masse des matériaux minéraux est obtenue par l'incorporation de sels métalliques aux propriétés spécifiques (sels de nickel et cobalt (pourpre), chrome (vert)...). Ces matériaux teints masse sont utilisés essentiellement pour la fabrication de séries des verres afocaux solaires ou de protection.

Les efforts continus de la recherche dirigée vers la mise au point de verres avec indice de réfraction élevé tout en maintenant une constringence acceptable ont permis l'introduction de nouveaux éléments chimiques dans la composition des matériaux. Ainsi sont apparus, vers 1975, les verres au titane, puis vers 1990, les verres au lanthane et enfin, vers 1995, les verres au niobium. L'incorporation de ces trois additifs en proportion contrôlée permet de compléter la gamme de verre avec différents indices de réfraction et constringences ($n = 1,7$, $v_e = 41$; $n = 1,8$, $v_e = 34$; $n = 1,9$, $v_e = 30$). Ces matériaux permettent la réalisation de verres de plus en plus minces, mais sans

réduction significative du poids étant donné l'augmentation de la densité.

Le verre minéral, dans ses types très variés, peut être encore amélioré par différents traitements que nous verrons plus loin et possède des propriétés qui en ont fait, pendant de très nombreuses années, le seul matériau de base valable pour réaliser des verres de lunettes. Cependant, sous l'influence de données nouvelles, propres à notre vie moderne, deux de ses inconvénients combinés ont pris une importance jusque là négligeable :

- son poids, très accru par les dimensions des verres actuels, devient contraire à un confort de plus en plus recherché ;
- sa fragilité, prise davantage en considération depuis que se sont multipliés les risques de casse.

Pour répondre plus complètement aux nouvelles exigences, un autre matériau transparent devait être créé ou utilisé. D'où l'avènement et le développement fulgurant du verre organique dans le monde entier.

Les verres organiques (tableau II)

Deux groupes de matériaux peuvent être utilisés pour synthétiser les verres organiques (figure 3) :

- Les résines thermoplastiques, qui peuvent se ramollir sous l'action de la chaleur pour pouvoir être formées à chaud ou moulées par injection. Le polyméthacrylate de méthyle et le polycarbonate de bisphénol A en sont des exemples.
- Les résines thermodurcissables, qui ont la propriété de durcir sous l'action de la chaleur et de ne plus pouvoir être ramollies par la suite. La plupart des résines utilisées en optique appartiennent à ce groupe, telle celle obtenue par polymérisation du bisallylcarbonate.

Le PMMA

Chronologiquement, le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), plus connu sous les noms de marque Plexiglas ou

Tableau II - Densité, indice de réfraction, constringence et température de transition vitreuse des principaux polymères organiques utilisés en optique oculaire.

Polymère	Densité (g/cm ³)	Indice de réfraction n	Constringence v _e	Température de transition vitreuse T _g (°C)
PMMA	1,18	1,493	58	80-100
Polycarbonate de bisphénol A	1,20	1,591	28-30	140-166
CR 39	1,32	1,498	54-60	80

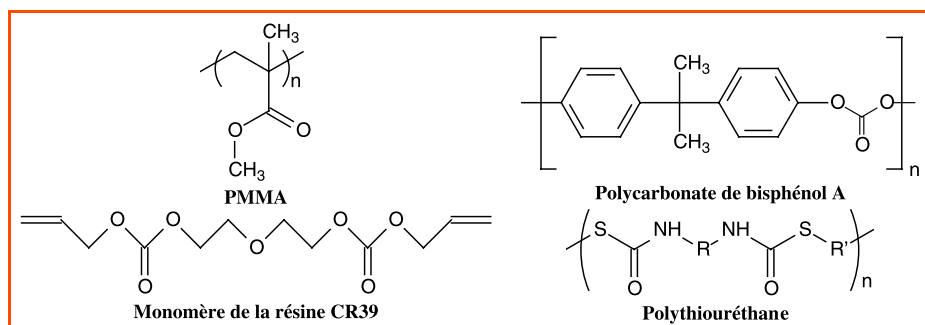


Figure 3 - Principaux monomères et polymères utilisés pour la fabrication des verres organiques.

remarquée dans notre monde moderne avec l'apparition du « compact-disc » et a commencé à prendre place dans la fabrication des verres ophtalmiques dans les années 80, surtout aux États-Unis.

D'abord boudé en Europe, à cause de ses inconvénients (mauvaise résistance à l'abrasion et constringence faible), les évolutions technologiques au niveau des traitements ont permis de maîtriser ces défauts et ont fait du polycarbonate de bisphénol A un rival des organiques classiques, le plaçant dans les matériaux d'avenir.

Perspex, est apparu en premier sur le marché et a été le principal polymère organique utilisé dans l'élaboration des verres ophtalmiques de 1937 à 1958.

C'est une résine thermoplastique, très légère, de densité égale à 1,18, d'un indice de réfraction (n = 1,493) voisin de celui du verre minéral, très résistante aux chocs. Sa température de transition vitreuse, voisine de 80 °C, permettait d'introduire le polymère chauffé dans des moules en acier. Si ce procédé était relativement intéressant industriellement, la qualité du verre obtenu souffrait entre autres d'une trop faible résistance à l'abrasion. D'abord réservé à la production des verres de fortes puissances pour myopes et aphaques (personne ne possédant plus de cristallin), il a surtout connu un fort développement dans le domaine des verres solaires.

Le CR39

Toutefois, le PMMA a démontré le grand intérêt du verre organique en optique oculaire et a préparé l'introduction du poly(diéthylène glycol bisallylcarbonate), plus connu sous le nom de CR39, qui est le matériau organique de base utilisé pour la fabrication de la majorité des verres organiques. Mis au point dans les années 40 par Columbia Corporation, division de la société PPG (Pittsburg Plate Glass), il en hérite le nom pour avoir été le « Columbia Resin n° 39 ».

Grâce aux deux fonctions insaturées, la molécule est réticulée lors de la polymérisation et offre ainsi une très grande résistance aux produits chimiques. Les propriétés optiques de cette résine thermodurcissable sont satisfaisantes puisque l'indice de réfraction est de 1,5 (similaire au verre de type Crown) pour une constringence de 58. Avec une densité de 1,32 (près de la moitié du verre minéral standard) et une bonne résistance aux chocs, le CR39 est pratiquement un verre ophtalmique obligatoire pour les enfants.

Le polycarbonate de bisphénol A

Ce polymère thermoplastique, initialement conçu en 1957 pour l'industrie aérospatiale, a fait une entrée

Plus récemment, dans la catégorie des matériaux thermodurcissables, des résines de type polyuréthane, polythiouréthane, polyamide et polyacrylique, ont permis d'atteindre des indices de réfraction compris entre 1,67 et 1,74. Ces performances sont dues à l'incorporation d'atomes lourds (soufre) ou de groupes aromatiques dans la chaîne macromoléculaire. Le polymère obtenu par polycondensation d'un diisocyanate avec un dithiol est représenté figure 3. Le nombre important de brevets sur les cinq dernières années confirme que cette génération de polymères est actuellement en plein essor.

Modes de fabrication

Le verre minéral

Après mélangeage, les différents constituants du verre sont portés à très hautes températures (1 100 °C-1 500 °C) pour atteindre la fusion. Le filet de verre qui sort du tube de coulée est coupé par des ciseaux, puis moulé à l'aide d'une presse pour obtenir des palets. Ces disques, d'une épaisseur de 1 cm et de 6 à 7 cm de diamètre, subissent ensuite une étape de recuisson.

Ces palets seront revendus aux surfaceurs (Essilor, BBGR, A.O., Rodenstock, Zeiss, etc.) qui, après avoir imposé la qualité des composants, vont usiner le verre minéral (figure 4). Cet usinage va transformer le palet initial en un verre ophtalmique ayant les caractéristiques optiques désirées. Il comporte trois phases distinctes, chacune exigeant machines, outils et procédés adéquats :

- L'ébauchage consiste à user le verre avec un outil diamanté pour lui donner l'épaisseur définitive ainsi que les rayons de courbures précis désirés.
- Le doucissage (« douci ») consiste à affiner le grain du verre de chaque face sans modifier les rayons de courbure.
- Le polissage : cette opération est identique à la précédente ; l'outil est recouvert d'un feutre à polir, l'émeri est remplacé par un abrasif encore plus fin (de l'oxyde de cérium ou de titane mélangé à l'eau).

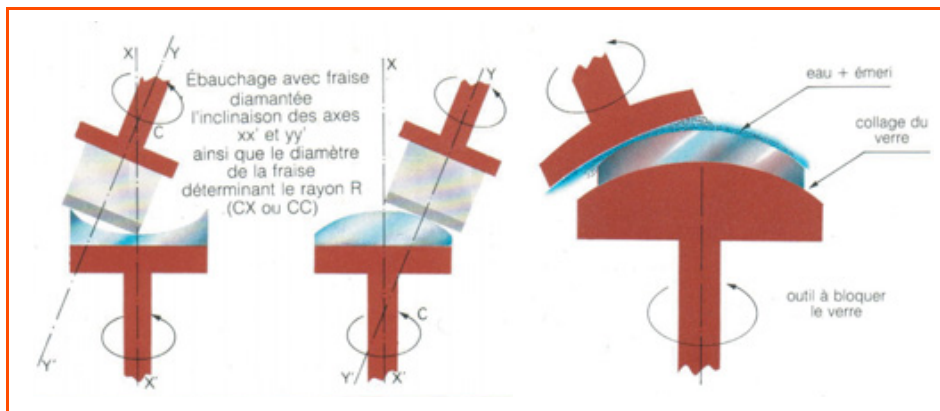


Figure 4 - Étapes d'ébauchage, de doucissage et de polissage du verre minéral.

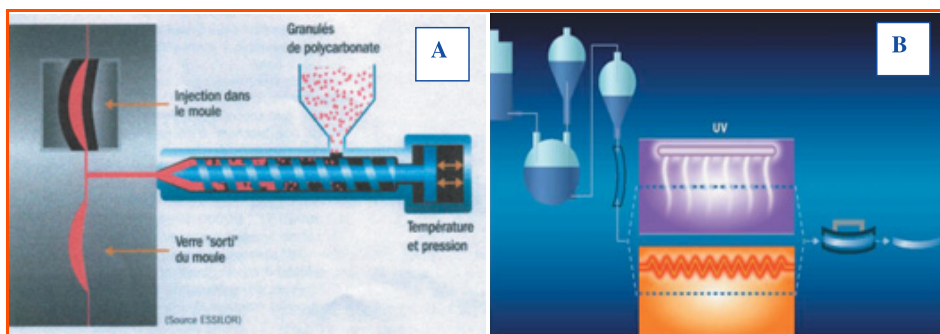


Figure 5 - (A) extrusion du polycarbonate de bisphénol A ; (B) polymérisation du CR39 dans les moules.

Les verres organiques

Pour les résines thermoplastiques, le procédé de fabrication utilise le matériau de base sous forme de granulés qui sont ramollis par chauffage pour être injectés à l'aide d'une extrudeuse dans des moules.

Les verres organiques thermodurcissables sont obtenus par polymérisation directe dans des moules, du monomère liquide préalablement filtré et dégazé (figure 5).

Les traitements

Trempe du verre minéral

Le traitement de trempe consiste à modifier les couches de verres sur les surfaces avant et arrière du verre minéral, pour augmenter leur résistance mécanique.

La trempe thermique est basée sur le refroidissement brutal du verre de 650 °C à la température ambiante, provoqué par des jets d'air froids sur les deux faces du verre.

Dans la trempe chimique (figure 6), le verre est immergé dans un bain de sels. Il se produit alors un échange de

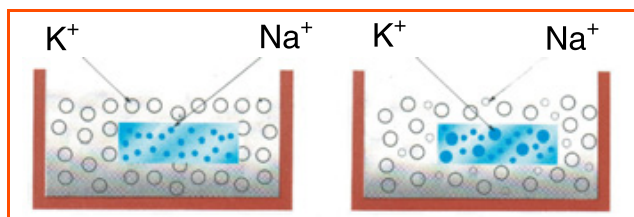


Figure 6 - Trempe chimique d'un verre minéral.

cations puisque le verre est constitué par un squelette de silicium et d'oxygène autour duquel est greffé un réseau de cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}). Dans le cas de la famille optique des Crown (riche en silice), l'ion Na^+ du verre est échangé par le cation K^+ . La couche superficielle ainsi obtenue forme une zone en compression (figure 7) responsable d'une grande résistance aux chocs.

Trempe thermique et chimique visent le même objectif, mais la résistance mécanique obtenue est meilleure dans le cas du traitement chimique.

Traitement anti-reflet

Le principe du traitement anti-reflet consiste à déposer sur le verre nu une couche d'un produit avec un indice de réfraction différent de celui du verre. Le rayon incident est partiellement réfléchi sur la couche déposée, puis partiellement réfléchi sur le verre. L'objectif anti-reflet est atteint lorsque les deux rayons réfléchis sont en opposition de phase (figure 8).

Historiquement, les physiciens ont commencé par déposer des « monocouches » de fluorure de magnésium (MgF_2), dont l'indice de

réfraction ($n_1 = 1,38$) et les propriétés physico-chimiques sont les plus appropriées, sur les verres minéraux par évaporation dans des cloches à vide. Puis les progrès technologiques apportés dans les machines d'évaporation sous vide par le développement rapide de la micro-électronique (pour l'élaboration des « puces » des ordinateurs) ont permis la mise au point de traitements anti-reflet multicouches applicables d'abord sur les verres minéraux, puis ensuite sur les verres organiques. Les opérations se déroulent en « salle blanche » afin d'éliminer

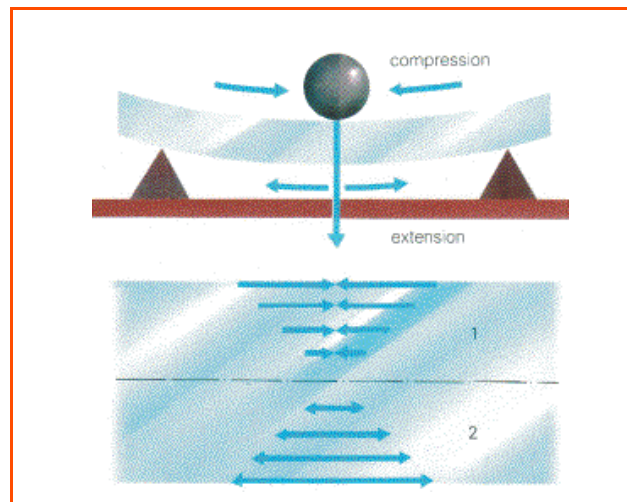


Figure 7 - Zones de compression et d'extension dans un verre minéral suite à la chute d'une bille d'acier.

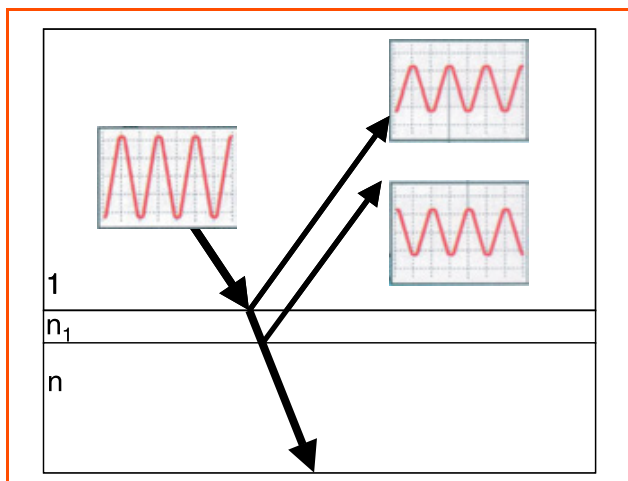


Figure 8 - Opposition de phase des ondes réfléchies après dépôt de fluorure de magnésium sur la surface du verre provoquant l'interférence destructrice : tout se passe comme si l'œil ne voyait plus aucun reflet.

les risques de dépôts de poussières qui feraient écailler le traitement, créant un point brillant ou piquûre, et sous contrôle de la température et du degré hygrométrique.

Traitement anti-salissure

Une trace de graisse ou une empreinte digitale reviennent à ajouter une couche supplémentaire à la surface du verre, détruisant alors le fonctionnement du système anti-reflet en créant souvent un « effet miroir » ou « effet de pétrolage ». Ce phénomène est à rapprocher des « anneaux de Newton » qui sont des franges d'interférences générées par les deux épaisseurs de supports ayant des indices différents (comme celles que l'on peut voir à la surface des bulles de savon, par exemple). Comment réduire cet inconvénient ?

La connaissance de la structure microscopique des couches minces anti-reflet est maintenant assez précise : il s'agit d'une juxtaposition de colonnes denses séparées par des interstices vides – une couche mince de silice a une densité environ égale à 0,6 fois celle d'un cristal de quartz.

Les pollutions grasses dont on a parlé s'incrûstent dans les interstices de la dernière couche et il est alors très difficile de les en déloger et de nettoyer la saleté qui en résulte.

Les traitements de surface des textiles (waterproof : capacité du textile à ne pas être mouillé) ainsi que des techniques utilisées, là encore, au cours de la fabrication des composants pour l'électronique permettent d'enduire la surface avec un revêtement ultra mince qui reste parfaitement sans action sur l'effet anti-reflet. Il s'agit généralement de polysilazanes ou polysiloxanes fluorés dont les molécules, fortement dissymétriques, ont une structure linéaire de barreau. Une extrémité du barreau comporte des groupes polaires qui favorisent une bonne adhérence sur la silice. L'autre extrémité est constituée de chaînes alkyles perfluorées, responsables d'une forte répulsion chimique vis-à-vis de l'eau et des graisses.

Ces molécules sont déposées par des procédés de trempage, de spray, de centrifugation ou par évaporation sous vide. Le revêtement superficiel ainsi constitué agit de deux façons complémentaires :

- l'obturation des interstices empêche la graisse de s'infiltrer

et de subsister : il est donc plus facile de l'évacuer par essuyage ;

- la composition du revêtement modifie la tension interfaciale entre le support anti-reflet et l'eau ou la graisse : cela signifie que l'eau ou la graisse – à quantité égale – ont une adhérence beaucoup moins forte sur le verre car la surface de contact est sensiblement réduite d'un facteur 2,5. C'est le mécanisme mis en jeu dans les revêtements imperméabilisants.

Ces adhérences sur le support peuvent être caractérisées par la mesure de l'angle de contact que forme le liquide après dépôt. Pour l'eau, cet angle est compris entre 40 et 60 ° sur un support anti-reflet classique, et il peut atteindre 115 ° après traitement par des molécules fluorées (figure 9).

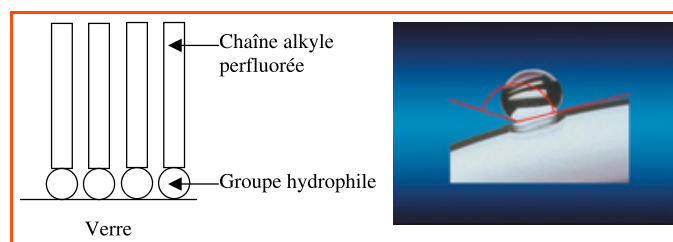


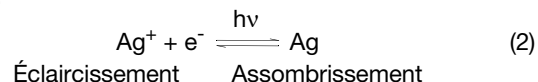
Figure 9 - Traitement chimique anti-salissure et angle de contact entre une goutte d'eau et un verre traité.

Grâce à ce traitement anti-salissure, il est devenu facile d'essuyer les verres traités avec un chiffon sec, tandis qu'un nettoyage régulier à l'eau et au savon permet de maintenir la transparence de l'équipement à un niveau optimal.

L'effet photochrome

La protection contre les rayons solaires par un verre consiste à diminuer la transmission de la lumière entre 400 et 800 nm. Si le verre est de teinte fixe, cette protection est certes efficace, mais présente l'inconvénient de ne pas pouvoir être utilisée en toute circonstance. En effet, de tels verres apparaîtront trop foncés pour un usage d'intérieur, où la luminosité est moins importante qu'à l'extérieur. Les verres photochromiques, dont la teinte varie avec l'intensité lumineuse, permettent de pallier ce problème. Ces verres présentent la double particularité de s'assombrir sous l'action de rayonnement ultraviolet et de retrouver leur teinte initiale sous faibles radiations UV.

Le principe du photochromisme dans les verres minéraux, connu depuis 1964 avec les premiers verres Photogray® (Corning), repose sur l'introduction d'halogénures d'argent :



L'incompatibilité des sels d'argent avec les matrices organiques a retardé l'essor des verres photochromiques organiques jusqu'en 1991 avec l'apparition des verres Transitions® (PPG et Essilor).

Plusieurs molécules photosensibles sont utilisées, comme les spiro-oxazines ou les pyranes. Les modifications chimiques causées par la lumière sont des ruptures de liaisons ou des isomérisations cis-trans.

Le spiropyranne est peu coloré car les deux systèmes électroniques des plans indolique (P) et benzopyranique (P')

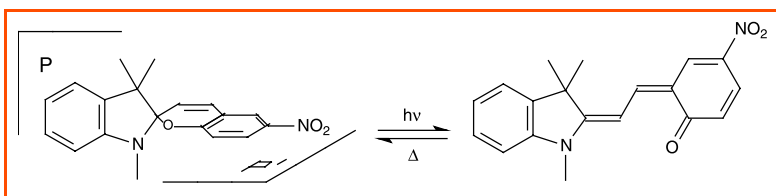


Figure 10.

sont orthogonaux et ne sont donc pas conjugués entre eux. En revanche, sous l'action de la lumière ultraviolette, le cycle pyranique s'ouvre pour donner une molécule de mérocyanine colorée parce que tous les électrons sont délocalisés et que la conjugaison augmente (figure 10).

Les verres photochromiques utilisent simultanément plusieurs types de molécules, leurs effets combinés permettent d'obtenir les teintes grise ou brune demandées par les porteurs de lunettes. Ces colorants sont introduits après polymérisation, par imbibition sur la surface avant du verre. Ce verre est ensuite recouvert, de manière systématique, d'un traitement anti-rayure.

Des efforts sont actuellement portés sur des systèmes organiques parfaitement réversibles qui évitent l'obtention d'une teinte permanente après de nombreux cycles d'éclaircissement-assombrissement, et sur la diminution des temps de « switch » pour ne pas maintenir des verres teintés trop longtemps après une diminution brutale de la luminosité extérieure.

Traitement anti-rayure

Parmi les agressions auxquelles les verres de lunettes sont quotidiennement soumis, l'une des plus redoutables est l'action des poussières abrasives (constituées principalement de silice) provenant de l'essuyage.

Le quartzage

La première méthode de protection du verre est venue de la notion de dureté. Le verre minéral ne se raye pas car il est plus dur. L'idée était alors de déposer sur le verre organique une couche de silice par évaporation sous vide. Mais le mariage entre le quartz et le verre organique s'avéra difficile en raison d'un trop grand écart entre les coefficients de dilatation.

Le vernissage

Les premiers vernis déposés par trempage ou par centrifugation étaient des polyalkylsiloxanes. Les atomes de silicium confèrent une dureté de surface intermédiaire entre le verre organique pur et le minéral. D'autre part, l'existence de longues chaînes hydrocarbonées maintient l'élasticité et le coefficient de dilatation à des valeurs nécessaires à une bonne cohésion de l'ensemble vernis-polymère. Mais ce traitement ne s'avère pas compatible avec la protection anti-reflet.

Pour répondre aux problèmes posés par le traitement anti-reflet, les recherches se sont tournées vers des matériaux nanocomposites transparents à la lumière visible. Ces vernis sont constitués d'une résine en polyalkylsiloxane dans laquelle sont dispersées des nanoparticules de silice de 10 à 20 nm invisibles à la lumière. La taille de ces nanoparticules doit impérativement être inférieure à 50 nm, sinon il apparaît un phénomène de diffusion (voile laiteux à la surface du verre, altérant la qualité de la vision pour le porteur).

Ce revêtement ainsi obtenu confère au verre des propriétés mécaniques bien supérieures à celles du vernis traditionnel.

Conclusions

La multiplication d'activités nouvelles de loisirs ou professionnelles suggère la possession de plusieurs lunettes correctrices spécialisées (neige, chasse, conduite, lecture d'écrans...) et induit une demande plus fréquente de protections diverses et de prévention. Ainsi aujourd'hui, 850 millions de verres sont vendus par an dans le monde ; le renouvellement des verres représente 90 % du marché et la périodicité du renouvellement est de 3 à 4 ans. La figure 11 indique la répartition mondiale en 2003 des verres ophtalmiques, où le verre minéral laisse progressivement la place au verre organique.

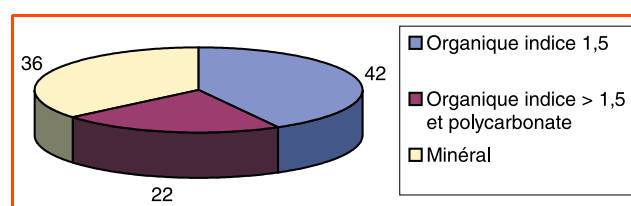


Figure 11 - Marché mondial des verres ophtalmiques en 2003 (source Essilor).

Si beaucoup d'avancées technologiques ont été réalisées dans l'élaboration des verres organiques, l'un des défis technologiques pour les années à venir reste la fabrication de verres organiques de haut indice (1,8 et 1,9) en maintenant une constringence à un niveau acceptable, de l'ordre de 35, mais pas en dessous.

Bibliographie

- Cahier d'optique oculaire, n° 1 et n° 9, Essilor, 1997.
- Colonna A., Réflexions sur le verre correcteur, *Points de vue*, 2003, 48, p. 21-35.
- *Le verre et l'optique oculaire*, Corning, 1998.
- Phalippou J., *Verres : aspects théoriques*, AF 3 600, Techniques de l'Ingénieur, 2001.
- Phalippou J., *Verres : propriétés et applications*, AF 3 601, Techniques de l'Ingénieur, 2001.
- Association nationale pour l'amélioration de la vue, <http://www.asnav.org>
- Corning, <http://www.corning.com>
- Essilor, <http://www.essilor.com>



C. Pierlot

Christel Pierlot

est maître de conférences à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Lille¹.

Arnaud Vanrobaeys

est enseignant à l'École d'Optique Lunetterie de Lille².



A. Vanrobaeys

Alain Colonna de Lega

est un ancien ingénieur d'Essilor, ingénieur de recherches « traitements anti-reflet », puis ingénieur marketing « stratégie coating »³.



A. Colonna de Lega

¹ École Nationale Supérieure de Chimie de Lille, Laboratoire d'oxydation et de formulation, BP 108, 59652 Villeneuve d'Ascq.

Tél. : 03 20 33 63 65.
Courriel : Christel.pierlot@univ-lille1.fr

² École d'Optique Lunetterie, 239 rue du Jardin des Plantes, 59000 Lille.
Tél. : 03 20 49 05 05. Fax : 03 20 49 08 08.

Courriel : accueil@ecoleoptiquelille.com
³ Essilor international, 147 rue de Paris, 94227 Charenton Cedex.
Tél. : 01 49 77 42 24.