



Super
KIMY

LES LUNETTES

PHENOMENES DE BASE

Quand la lumière passe d'un milieu transparent à un autre, sa vitesse de propagation varie (elle est plus lente dans l'eau que dans l'air). Il s'ensuit que les rayons lumineux changent de direction. La figure 1 montre par exemple que nous voyons un poisson en P' alors qu'en fait il est en P. Mathématiquement, les angles d'incidence (i) et de réfraction (r) dépendent de l'indice de réfraction (n) du milieu selon la loi :

$$\sin i = n \cdot \sin r \quad n = 1 \text{ dans l'air (milieu de référence) et } n \sim 1,3 \text{ dans l'eau}$$

On voit tout de suite qu'en regardant à la verticale il n'y a pas de déviation : $i = r$. Le héron vise donc plus aisément un batracien situé sous son cou qu'à 80 cm de distance !

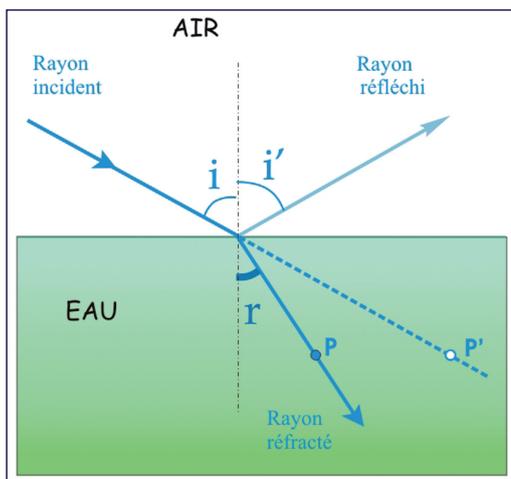


Fig. 1 - Les angles d'incidence (i) et de réfraction (r) dépendent de l'indice de réfraction (n) du milieu

Pour une autre partie de la lumière, il y a réflexion (quelques %), sous le même angle cette fois (fig. 1) ; mais si c'est le soleil qui est la source de lumière, les reflets empêchent bel et bien de distinguer ce qui se passe sous l'eau. S'il y a sur le trajet lumineux de petites particules, très fines, le phénomène de diffusion atténue un peu plus encore le faisceau en renvoyant de la lumière dans toutes les directions (exemple des particules d'argile soulevées par un poisson : elles diffusent et dispersent la lumière).

LES LUNETTES

Ceux qui portent des lunettes ont de solides raisons pour cela : elles améliorent considérablement leur vision. Deux cas sont particulièrement répandus : la correction des anomalies de la vision et la protection contre les lumières agressives.

I - LA VISION ET SES ANOMALIES

1- FONCTIONNEMENT NORMAL

En simplifiant beaucoup, l'œil (fig. 2) est optiquement équivalent à une loupe. Le cristallin (rempli d'un liquide transparent), concentre les images d'objets (situés à différentes distances) sur la rétine. Celle-ci joue le rôle d'écran au fond de l'œil, avant transmission au cerveau pour traitement (ce dernier comporte une étape de redressement, car l'image se forme renversée : le haut est en bas et la gauche se trouve à droite), puis interprétation. Le rôle du cristallin tient à sa capacité de modifier sa convergence C pour l'adapter à la distance d'observation d'un objet donné : il se courbe plus ou moins afin que l'image se forme exactement sur la rétine. La convergence C d'une



loupe ou d'une lentille (en dioptries) est l'inverse de la distance focale f exprimée en mètres. La pupille est un diaphragme dont l'ouverture s'adapte à la quantité de lumière reçue.

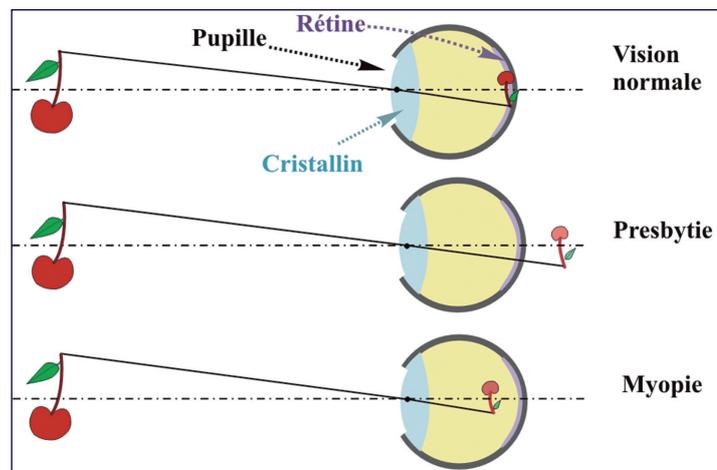


Fig. 2 - Fonctionnement de l'œil

2- PRESBYTIE

Lorsque le cristallin ne parvient pas à se courber suffisamment pour rendre nets les objets proches (ce qui demande les plus gros efforts), l'image se forme en arrière de la rétine (trop loin). Ceci se produit chez les personnes âgées pour lesquelles le cristallin durcit avec le vieillissement. Les personnes hypermétropes ont le même type d'inconvénient. Dans ces deux cas, il faut ajouter de la convergence, avec des verres correcteurs assimilables à des loupes (n'oublions pas que les convergences s'ajoutent). Souvent, les corrections pour l'œil droit et le gauche sont différentes.

3- MYOPIE

C'est l'inverse du cas précédent : l'image se forme en avant de la rétine. Il faut alors retirer de la convergence (algébriquement, on additionne toujours la nouvelle convergence, mais on la compte négativement) ; en d'autres termes, on utilise des verres correcteurs divergents.

4- ASTIGMATISME

Il s'agit là d'une déformation des images reçues, en raison de variations de courbure du cristallin. Les verres correcteurs doivent donc, eux aussi, avoir une courbure variable, parfois en forme de simple cylindre, ou encore de tore (forme ressemblant à un pneumatique).

II - LUMIERES AGRESSIVES

Il en existe de plusieurs types, en particulier les rayonnements « invisibles » (voir la figure 2 de la fiche laser sur les rayonnements) et les reflets.

1- LE DOMAINE ULTRAVIOLET

Invisibles pour l'œil humain, les rayons ultraviolets (UV) sont particulièrement dangereux pour la peau et les yeux. Il s'agit de la partie du rayonnement solaire dont la longueur d'onde est inférieure à $0,4 \mu\text{m}$ (le violet correspond à l'intervalle $0,40 - 0,43 \mu\text{m}$). L'atmosphère de la terre ne les arrête que partiellement, en fonction de son épaisseur (fig. 3). Ainsi, dans les régions du nord ou au soleil couchant, les rayons solaires, très inclinés sur l'horizon, sont-ils plus absorbés qu'à midi ou près de l'équateur. Il faut tenir compte de tous les effets : latitude, heure de la journée, saison.

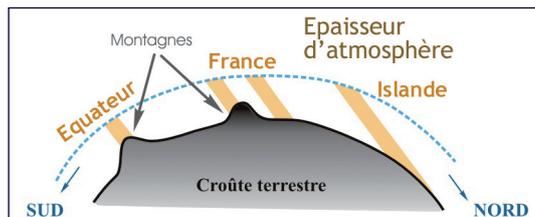


Fig. 3 - Les UV et l'atmosphère de la terre

La distinction entre UV_A (0,32 - 0,40 μm) et UV_B (0,28 - 0,32 μm) repose surtout sur l'augmentation des risques encourus quand la longueur d'onde diminue (les limites citées sont floues, et les risques varient en continu dans tout le domaine, mais plus rapidement pour les UV_B).

2- L'INFRAROUGE

Les couleurs visibles sont, dans l'ordre : violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, et la longueur d'onde associée passe de 0,4 μm à 0,75 μm . Qu'y a-t-il au-delà ? L'expérience de Herschel l'a montré en 1800. La température d'un thermomètre sensible, noirci (cette couleur ne renvoie guère de lumière, et donc absorbe beaucoup), et balayant le spectre solaire, commence à augmenter au-delà du rouge, bien que l'œil ne détecte plus rien ! Le même résultat est observé à l'aide d'un poêle. En effet, les rayons infrarouges sont très bien absorbés par l'eau, constituant essentiel de notre corps, ce qui les rend efficaces pour nous chauffer, et toute source portée à température assez importante rayonne dans l'infrarouge. La longueur d'onde de ce domaine se situe entre 0,75-0,8 μm et quelques centaines de micromètres.

3- UNE SOLUTION : FILTRER LES RAYONNEMENTS NUISIBLES

Il suffit en principe d'interposer entre la lumière et l'œil un écran jouant le rôle d'un filtre pour absorber ces rayons indésirables, (comme un filtre à café retient la mouture). Les substances sont colorées parce qu'elles absorbent une partie du spectre visible (l'ensemble des rayons). Par exemple, une solution d'un sel de nickel (Ni^{2+}) paraît verte parce qu'elle absorbe une bonne partie du rouge. On dit que vert et rouge sont des couleurs complémentaires, de même que le violet du permanganate (MnO_4^-) et le jaune, ou encore le bleu d'un sel cuivrique (Cu^{2+}) et l'orangé. Lorsqu'une substance absorbant l'ultraviolet est introduite dans le verre, les rayons UV sont arrêtés. Et, comme l'œil ne voit pas ces rayons, les lunettes seront toujours transparentes.

Pour des verres minéraux, de l'oxyde de cérium (CeO_2) introduit au cours de la fabrication joue ce rôle (les sels correspondants sont jaunes et absorbent à partir du violet). Le même principe s'applique en chimie organique et de nombreuses molécules absorbent très fortement l'ultraviolet. Attention ! Les verres de lunettes ne sont pas colorés dans le seul but d'absorber les UV : comme ces rayons sont invisibles à l'œil, qu'ils soient ou non présents ne change rien à la couleur. Il y a donc d'autres raisons de colorer les verres (y compris suivre la mode) : par exemple, on colore en gris plus ou moins foncé pour atténuer l'ensemble du spectre (personnes sensibles, lunettes de montagne), ou encore en jaune (couleur à laquelle l'œil est particulièrement sensible), pour mieux voir en conditions de diffusion par des brumes, la diffusion dépendant de la longueur d'onde, ou encore le bleu d'un sel cuivrique (Cu^{2+}) et l'orangé.

Ce qui vaut pour l'UV est valable pour l'infrarouge : ce sont simplement d'autres composés, absorbants dans ce domaine, qu'il faut mettre en œuvre.

4- LES REFLETS

Si l'on regarde en plein soleil la surface de la mer, on la voit couverte de vaguelettes qui brillent comme de petits miroirs éphémères, imparfaits et à faible rendement. Imparfait, car leur surface est plus complexe qu'un simple plan, à faible rendement parce que chacun ne renvoie qu'une petite partie de la lumière intense qu'il reçoit ; ce phénomène empêche de voir correctement dans cette direction. Une photographie derrière une vitre renvoyant une partie de la lumière ne se voit pas bien non plus. Cligner des yeux pour les fermer au maximum n'est pas suffisant.

Que faire ?

Trois solutions sont possibles :

- **Absorber une partie du rayonnement** : les lunettes ont alors une couleur grise, plus ou moins foncée, et le paysage voit sa luminosité diminuée d'autant ; ce qui peut paraître gênant à la mer est au contraire une bonne mesure en haute montagne, avec l'importante luminosité de la neige (dont les cristaux blancs réfléchissent efficacement la lumière). On peut aussi absorber les deux extrémités de la partie visible pour laisser passer une dominante jaune (les brumes sont alors moins gênantes), ou d'autres couleurs encore, adaptées à chaque cas clinique.
- **Utiliser la polarisation de la lumière** : la lumière réfléchie par une surface n'est pas de la lumière « naturelle », car elle est partiellement polarisée, c'est-à-dire qu'elle n'est plus aussi symétrique. Un « polaroïd » produit un tel phénomène de polarisation : c'est une surface plane sur laquelle on a orienté, tous dans le même sens, des cristaux qui laissent passer la lumière dans une seule direction (ils sont appelés dichroïques) - par exemple des cristaux en forme d'aiguilles dans la direction de leur plus grande dimension. Ces cristaux, en revanche, absorbent énormément dans la direction perpendiculaire. En regardant la lumière au bord de l'eau (partiellement polarisée par réflexion sur la surface), on voit son intensité varier lorsque l'on tourne dans son plan le polaroïd devant l'œil. Ce qui est spectaculaire, c'est la disparition quasi totale du reflet pour un certain angle (incidence de Brewster : 53° pour l'eau, 57° pour le verre). Pour toute une série de petites vagues d'orientations variées, la moyenne reçue par l'œil à chaque instant sera nettement plus faible.
- **Utiliser le phénomène d'interférences** : si l'on dépose une mince couche, d'épaisseur e et de faible indice n , sur la face extérieure d'un verre d'indice N (fig. 4), le parcours de deux rayons réfléchis est différent, à la fois par la longueur et l'indice des milieux : ils sont déphasés. Et pour deux ondes qui vont s'ajouter, il existe des valeurs du déphasage qui diminuent au maximum la lumière réfléchie en fonction de paramètres variables que nous pouvons donc choisir ; par exemple l'indice de la couche et son épaisseur. L'indice N du verre traité a aussi son importance. Pour une valeur faible ($N = 1,4$), le facteur de réflexion n'est que deux fois plus faible, alors qu'une valeur plus importante ($N = 1,6$) le divise par 17 !

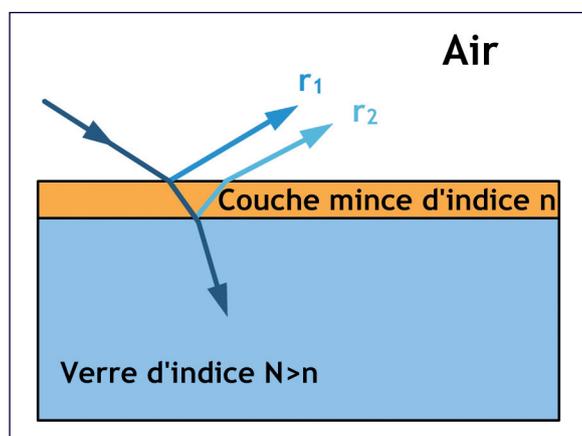


Fig. 4 - Effets, sur les rayons lumineux, d'un verre d'indice $N > n$ recouvert d'une couche mince d'indice n

En résumé, il faut bien comprendre que l'intérêt de ce type de traitement n'est pas dans l'augmentation de la lumière transmise – le facteur de réflexion reste faible quoi qu'on fasse – mais bien dans l'élimination des halos et autres lumières parasites provenant de réflexions multiples sur les deux surfaces d'un verre.

III - EFFET PHOTOCHROME

Plutôt que de changer de lunettes lorsque la luminosité varie, on a mis au point des verres qui s'adaptent automatiquement à la quantité de lumière reçue : c'est l'effet photochrome. Un matériau bien choisi est introduit dans le verre (fig. 5). Sa structure change sous l'effet de la lumière, le rendant plus ou moins foncé de façon réversible. Toutefois, ce changement n'est pas instantané (de l'ordre de quelques dizaines de secondes, ce qui est trop long lorsque l'on entre dans un tunnel par exemple !).

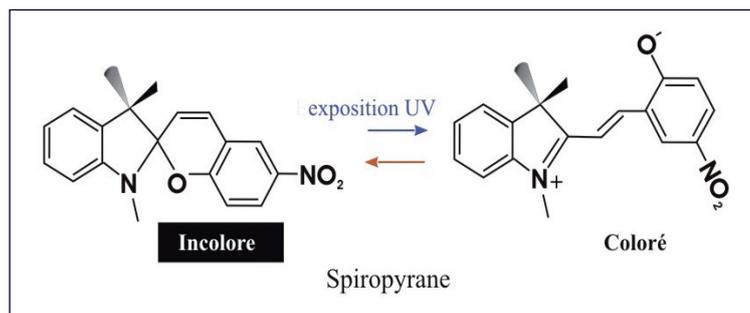


Fig. 5 - L'effet photochrome

Le système le plus classique est l'équivalent du développement photographique en image latente des films argentiques : dans un halogénure d'argent $Ag^+ X^-$, l'irradiation fait varier le nombre d'oxydation des deux éléments, qui échangent un électron : le plus oxydé (Ag^+) est réduit en métal colloïdal Ag^0 , et le plus réduit (X^-) s'oxyde en halogène X^0 (on obtient $Ag^0 X^0$, l'halogène restant prisonnier dans la structure), et les colloïdes d'argent sont gris sombre. Ils reviennent à leur état initial lorsque la lumière baisse. Plus récemment, un autre système a été étudié, l'équivalent du « bleu de molybdène » : le molybdène associé à des composés organiques peut être réduit de l'état d'oxydation six (Mo^{VI}) à l'état cinq (Mo^V) (couleur pourpre). Le maximum de l'effet n'est pas non plus atteint instantanément, et le retour reste progressif, plus rapide si la température est élevée. L'intensité de l'irradiation intervient dans cette cinétique : il ne faut que 10 μs dans le cas d'une explosion thermonucléaire.

Les recherches continuent activement pour diminuer ce temps de réaction.

PROPRIETES GENERALES DES VERRES

Les verres sont des matériaux solides qui ont la double caractéristique de ne pas présenter d'ordre à grande distance dans l'arrangement des atomes de leur structure (les verres sont donc des matériaux amorphes) et de se ramollir sans fondre vraiment lorsqu'on les chauffe. Ils ne présentent donc pas de fusion franche comme les matériaux cristallisés. Au lieu d'un effondrement de leur structure à la température de fusion, c'est un ramollissement progressif que l'on observe à partir d'une température T_g – appelée température de transition vitreuse – lors d'un chauffage. Inversement, leur structure devient rigide quand on les refroidit à une température inférieure à T_g . Pour tous les verres d'optique, T_g est nettement supérieure à la température d'utilisation (température ambiante), si bien qu'ils restent rigides.

Les « verres minéraux », comme les verres silicatés, sont préparés par fusion à une température de l'ordre de 1 400 - 1 500 °C d'un mélange d'oxydes et de carbonates, suivie d'un refroidissement rapide afin d'éviter tout risque de cristallisation partielle – qui serait nuisible pour les applications optiques – au sein du liquide tant que la température reste supérieure à T_g . Dans le cas des verres d'optique, les verriers veillent particulièrement à utiliser des matières premières très pures (et donc très chères !) de façon à éviter toute coloration parasite que pourraient apporter des impuretés colorantes, riches en fer par exemple. Ils veillent également, lors de la fusion, à bien brasser le mélange fondu afin que ce dernier soit le plus homogène possible pour obtenir au final, après refroidissement rapide (encore appelé « trempe »), un verre très homogène. Cela est primordial car l'indice de réfraction des verres est très sensible à de faibles fluctuations de composition.

Les « verres organiques » sont obtenus par polymérisation d'un liquide à des températures bien plus basses que les verres d'oxydes. Ils sont fabriqués selon un procédé dit de moulage (fig. 6).

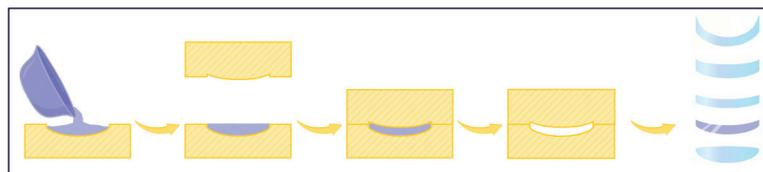


Fig. 6 - Procédé de moulage des verres

On ajoute aux substances initiales divers adjuvants, par exemple un amorceur, un absorbant d'UV. L'amorceur sert

au déclenchement de la réaction chimique de polymérisation qui entraîne le durcissement du matériau. L'absorbant d'UV empêche le jaunissement des verres sous l'action de ce rayonnement. Une fois remplis, les moules de coulée sont traités thermiquement jusqu'à l'obtention du polymère souhaité, donc du verre organique.

COMPOSITION DES VERRES POUR L'OPTIQUE

Chacun des types de verre (minéral ou organique) présente des avantages et des inconvénients, que ce soit pour le fabricant ou l'utilisateur.

I - LES VERRES MINÉRAUX

Ce sont des oxydes complexes (aluminoborosilicates), à base de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de bore (B_2O_3), à l'état vitreux. Les atomes y sont organisés à courte distance (de l'ordre du nanomètre), mais pas à longue distance. Par exemple (fig. 7), dans la silice amorphe (« vitreuse ») il y a toujours quatre atomes d'oxygène autour d'un atome de silicium, mais ces groupements SiO_4 ne se répètent pas de manière régulière les uns par rapport aux autres comme ils le font dans de la silice cristallisée (quartz). Au fond, un cristal est comparable à un papier peint : le motif de base se retrouve à intervalles réguliers, avec les mêmes distances et les mêmes angles entre les divers éléments, il est périodique. Si d'un motif à l'autre, à la fois le dessin du motif, les distances, les angles, sont modifiés au hasard, nous aurons « un papier peint entièrement amorphe » (il y a des étapes intermédiaires où il ne sera que partiellement amorphe : à 30 % par exemple).

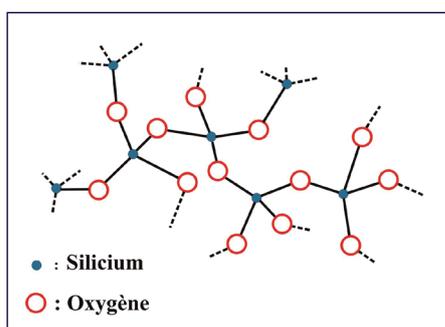


Fig. 7 - Verre SiO_2 (amorphe)

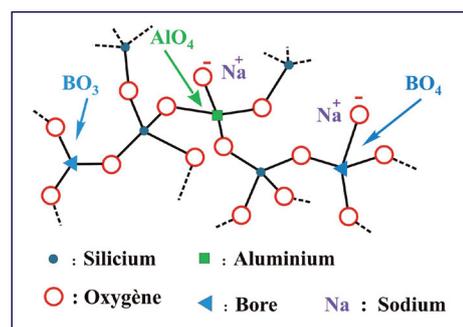


Fig. 8 - Des charges (ions) apparaissent dans la structure

Le constituant de base des verres aluminosilicatés est la silice vitreuse. Or, elle ne se ramollit qu'en chauffant beaucoup (sa température de transition vitreuse est voisine de $1\ 200^\circ\text{C}$) et ses caractéristiques physiques ou physicochimiques ne sont pas forcément idéales pour les applications recherchées. C'est pourquoi l'on ajoute à la silice divers composés contenant :

- du sodium, qui abaisse la température nécessaire pour fondre le mélange. Des charges (ions) apparaissent dans la structure (fig.8). Le sodium a cependant comme inconvénient d'augmenter la solubilité du verre dans l'eau ;
- du calcium et du magnésium, qui diminuent la solubilité du verre dans l'eau,
- de l'aluminium, qui agit sur l'arrangement local des atomes dans la structure (les nombres d'oxydation de Al et Si sont de trois et quatre respectivement),
- du bore, qui améliore très nettement la résistance aux chocs (d'origine mécanique ou thermique). Qui ne connaît pas la réputation du verre « pyrex », verre borosilicaté utilisé aussi bien dans les cuisines que dans les laboratoires de chimie ?
- du plomb, constituant essentiel du « verre de cristal », qui augmente très largement l'indice de réfraction du verre, alors appelé « flint ».

	n	SiO ₂	K ₂ O	BaO	PbO	Al ₂ O ₃
Flint léger	1,58	60,6	13,9	2,5	22,5	0,1
Flint lourd	1,65	27,3			71,0	0,1

Exemples de compositions (% massiques) de verres au plomb

D'autres éléments apportent par exemple la coloration. Ainsi, le fer ferreux (Fe²⁺) colore-t-il les verres en bleu alors que le fer ferrique (nombre d'oxydation : trois) conduit à une coloration jaune pâle. L'origine de la couleur verte des bouteilles est due à la présence simultanée de fer ferreux et ferrique dans la composition des verres (nombres d'oxydation : deux et trois). On peut maîtriser la coloration du verre (par exemple lui donner une teinte jaune ou bleue) en ajoutant dans le mélange d'oxydes qu'on va fondre des éléments plus ou moins oxydants (favorisant la présence de fer ferrique) ou réducteurs (favorisant la présence de fer ferreux). Autrefois, lors de la fabrication des vitraux par exemple, les verriers ajoutaient de l'oxyde de manganèse MnO₂ : un agent oxydant (appelé à l'époque savon des verriers car il permettait d'éliminer la forte coloration bleue due au fer ferreux). Notons que la présence d'oxyde de chrome Cr₂O₃ permet de rehausser la coloration verte des verres.

La liste est loin d'être épuisée. Elle témoigne d'un savoir-faire déjà ancien, et toujours en pleine évolution.

Un des inconvénients des verres minéraux, c'est qu'ils sont plus chers et longs à usiner car le poli de surface s'obtient par abrasion à l'aide de poudres de plus en plus fines, (l'une des premières utilisées a été l'émeri, mélange d'oxy-hydroxydes ferriques de cristallinité variable). En revanche, la qualité de la surface et la résistance à la rayure sont excellentes. Les verres minéraux modernes ne sont plus fragiles comme autrefois, mais bien sûr ont une densité supérieure à celle des verres organiques.

II - LES VERRES ORGANIQUES

Le domaine des composés organiques offre une gamme de possibilités très étendue. Les matériaux utilisables sont aussi bien thermoplastiques (se ramollissant par chauffage) que thermodurcissables (polymérisés in situ une fois pour toutes). Le choix des divers additifs (colorants, filtres, couches minces, polarisants,...) est également très vaste.

Dans la très grande majorité des cas, le matériau organique de base utilisé pour la fabrication des verres correcteurs est le CR 39. Ce polymère fut découvert dans les années 40 par des chimistes de la Columbia Corporation qui étudiaient toute une série de polymères. L'un d'eux, auquel ils avaient donné le nom de Columbia Resin n° 39 (en abrégé CR 39) a été utilisé pour la fabrication de verres de lunettes à la fin des années 50. Ce polymère est dit thermodurcissable, c'est-à-dire que, contrairement à d'autres polymères organiques, il ne se ramollit pas lorsqu'il est chauffé ; il devient plus dur. Ce matériau s'est imposé parce qu'il répond bien aux exigences des fabricants et des porteurs de lunettes :

- propriétés optiques proches de celles d'un verre minéral (indice de réfraction proche de 1,5),
- parfaite transparence,
- légèreté (faible densité),
- bonne résistance aux chocs.

Il est à base du monomère « Allyl-Diglycol-Carbonate » (ADC) ou carbonate de diglycol allylique (fig.9).

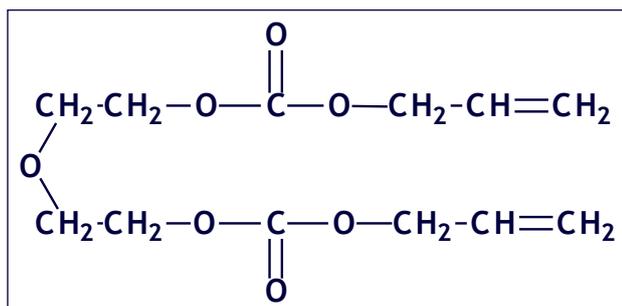


Fig. 9 - Carbonate de diglycol allylique

Récemment, d'énormes progrès ont été accomplis dans le domaine des verres organiques à haut indice de réfraction (n compris entre 1,6 et 1,67). On utilise pour cela, non pas un seul, mais l'association de deux monomères qui conduit à ce qu'on appelle une réaction de poly-addition. La réaction de polymérisation est alors bien plus lente (jusqu'à 48 heures).

L'important est que l'on peut mouler ces matériaux à température nettement plus basse : on allie ainsi rapidité et simplicité. Par exemple, dès les années 60, c'est par coulée du monomère et polymérisation in situ que l'on obtenait le poly-méthacrylate de méthyle de qualité optique (fig.10). Leur utilisation n'a cessé de croître depuis.

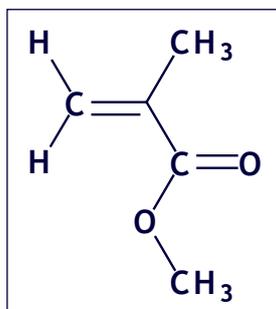


Fig. 10 - Méthacrylate de méthyle

CONCLUSION

La fabrication des verres correcteurs, organiques ou minéraux, montre la nécessité de bien analyser le lien étroit entre composition chimique et propriétés. Les combinaisons sont multiples et peuvent être optimisées pour chaque cas, suivant que l'on désire, par exemple, un prix de revient moindre ou des lunettes plus légères plutôt qu'une meilleure résistance aux rayures (mais aussi des lunettes un peu plus lourdes). La gamme des éléments chimiques utilisables est très grande et permet d'adapter les propriétés des verres à leur destination. Le savoir-faire technique est maintenant assez ancien, ce qui n'empêche pas les recherches de se poursuivre dans le but d'améliorer encore les performances (par exemple dans le cas des verres photochromes) aussi bien que le confort de vision.

PROPOSITIONS D'EXPERIENCES SUR LES LUNETTES

On illustre le thème du fonctionnement du corps humain à travers un de ses aspects : le sens de la vue. Les actions bénéfiques et nocives de nos comportements vis-à-vis de la lumière solaire sont abordées par le biais des verres optiques.

Les échanges transcrits ci-dessous, entre le professeur P et ses élèves E, sont donnés à titre indicatif pour illustrer les étapes possibles du travail de classe et pourront être adaptés si nécessaire à l'âge et au niveau de connaissance des élèves.

Remarque : on a écrit en italique les notions que le professeur peut aborder, sans toutefois que les connaissances et le vocabulaire spécifique correspondant soient à maîtriser et à retenir par les élèves.

I - MATERIEL REQUIS :

- un morceau de vitre, du papier abrasif,
- une bassine à remplir d'eau, un bâton,
- des loupes à grossissements variés,
- une feuille de papier calque,
- feutres de couleur jaune, rouge, marron,
- lunettes de myopie,
- lunettes de soleil de couleur jaune, de couleur marron, incolores (verres en matière plastique),
- lunettes polaroid, 2 verres polaroid,
- reproduction de l'image d'arbres se reflétant dans l'eau d'un étang,
- schéma de la réflexion et de la réfraction sur l'eau,
- schéma de la réflexion totale,
- schéma du fonctionnement d'une loupe,
- schéma du fonctionnement de l'œil, dans le cas général, dans le cas de la presbytie, dans le cas de la myopie,
- schéma du spectre visible,
- schéma du cercle chromatique,
- éventuellement, matériel nécessaire à la réalisation d'un spectroscope : vieille paire de jumelles, à prismes de Porro par exemple. La démonter pour récupérer les objectifs, les oculaires, les prismes, lame à rasoïr, rondelle métallique adaptée au diamètre des objectifs (vide infra), marteau, petites pinces, limes, papier abrasif, règle graduée, ruban adhésif, papier noir (feuilles de format A4), colle à bois, bois contreplaqué (planchette d'environ 25 à 30 cm x 10 à 15 cm, d'épaisseur 7-8 mm, petits morceaux d'épaisseur 5 mm), petits clous (\varnothing 1 à 2 mm, longueur 10 - 20 mm).

II - CONNAISSANCES ABORDEES :

- Les principaux phénomènes relatifs au comportement de la lumière : transmission, réflexion, diffusion, réfraction.
- Le phénomène de vision et ses principales anomalies (myopie, presbytie).
- Le fonctionnement d'une loupe et ses caractéristiques physiques (focale et convergence).
- Les actions bénéfiques et nocives du rayonnement UV.
- Le spectre visible, les six couleurs fondamentales et leurs complémentaires.
- Les lunettes de soleil : un moyen de se protéger du rayonnement UV.
- Les lunettes polaroid : un moyen de se protéger des reflets éblouissants.

DUREE APPROXIMATIVE DE LA SEANCE COMPLETE : 1H30 À 2H

Remarque : la construction éventuelle d'un petit spectroscopie n'est pas compatible avec la durée de la séance.

I - PHENOMENES FONDAMENTAUX

A l'aide de considérations expérimentales très simples, on aborde les phénomènes de base régissant les propriétés de la lumière.

P : pourquoi pouvons-nous voir à travers la vitre mais pas à travers les murs ?

E : parce que la vitre est transparente !

P : oui. Et malgré tout, on peut, en s'y prenant bien, se recoiffer en se regardant dans cette même vitre.

E : mais on se voit mal, avec un visage très sombre.

P : oui, c'est parce que, des deux phénomènes mis en jeu, la **transmission** de la lumière et sa **réflexion**, le premier est majoritaire (plus de 90 %), et le second beaucoup plus faible. De même, les arbres sur la rive d'un étang sont visibles « dans l'eau » du côté opposé.

Et si je raye la vitre avec du papier « de verre » abrasif ?

E : on ne voit plus rien, ni « devant », ni « derrière » la vitre !

P : effectivement. Il y a alors **diffusion** de la lumière : elle est renvoyée dans toutes les directions. C'est la même chose qui se passe avec les minuscules gouttes d'eau de la brume.

Qu'y a-t-il de changé quand on regarde l'eau d'une rivière peu profonde, bien calme ?

E : divers avis possibles : rien de changé, on ne voit pas les poissons de la même manière, la couleur n'est plus la même, etc.

P : on voit bien les arbres de la rive opposée (réflexion ; on les voit « la tête en bas »).

Regardons ce qui se passe lorsque l'on trempe dans l'eau (jusqu'au fond) un bâton.

E : les élèves remplissent d'eau une bassine et trempent un bâton dans l'eau.

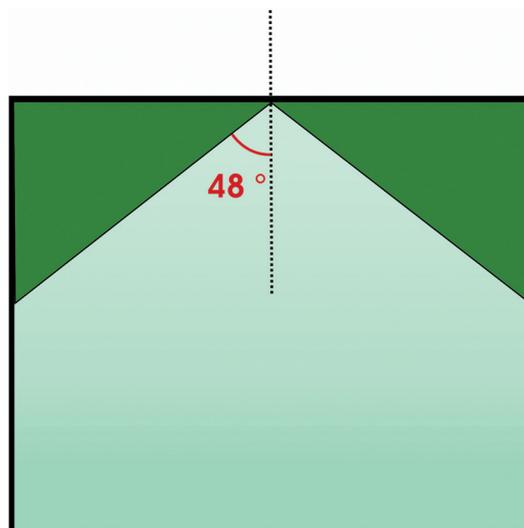
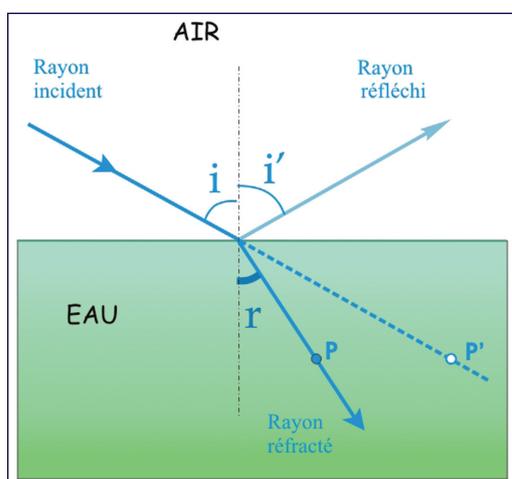
P : que voyez-vous ?

E : on ne voit correctement le bâton (en un seul morceau) que s'il se trouve juste à côté de notre pied. Plus loin, il apparaît comme brisé en deux morceaux.

P : oui. Vous voyez que les deux morceaux font un angle dont le sommet se trouve à la surface de l'eau. Comment cela se fait-il ?

E : diverses réponses.

P : ceux qui ont parlé de **réfraction** ont raison. A la surface séparant deux milieux différents (air-eau, air-verre, eau-verre,...) cet effet se manifeste (on dit que l'eau est plus réfringente que l'air). Une conséquence est que, si l'on cherche à harponner un poisson, il ne faut pas viser dans la direction où notre œil croit le voir (P'), mais nettement plus près (P). De plus, si l'on voit bien les poissons proches de nous, ceux qui sont nettement plus loin ne sont pas visibles : si l'angle i d'incidence peut dans l'air varier normalement de 0 à 90° , l'angle de réfraction r ne peut dépasser 48° environ dans l'eau : aucun poisson ne sera visible s'il se trouve dans la partie vert foncé.



II - LE PHENOMENE DE LA VISION ET SES PRINCIPALES ANOMALIES

On aborde le fonctionnement général de la vision et les anomalies qui peuvent en découler (myopie, presbytie) et leurs corrections.

P : pourquoi l'œil voit-il en général aussi bien de près que de loin ?

E : diverses réponses...

P : ceux qui ont répondu que l'œil se comportait comme une sorte de loupe ont raison, mais à une condition : c'est que la « loupe-œil » puisse s'adapter à la distance où se trouve l'objet regardé.

Etudions tout d'abord le fonctionnement d'une loupe.

E : regardent un lampadaire situé à plusieurs mètres, interposent une loupe (pas trop forte) entre le lampadaire et leur œil, puis un papier calque sur la surface de la loupe.

P : que se passe-t-il lorsque vous éloignez ce papier de la loupe, ce qui revient à dire que vous le rapprochez de votre œil ?

E : l'image du lampadaire apparaît de plus en plus nette, mais renversée.

P : et si vous faites la même expérience avec une loupe moins « forte » ?

E : on voit l'image du lampadaire plus grande et plus loin de la loupe.

P : oui. C'est exactement ce qui se passe avec l'œil. Ce dernier fonctionne comme une loupe, mais une loupe de grandissement variable qui s'adapte suivant la position de l'objet par rapport à lui.

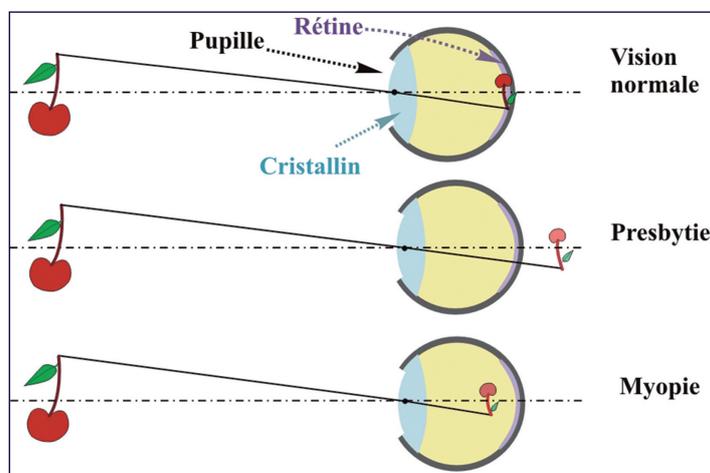
P projette l'image du fonctionnement de l'œil.

La pupille joue le rôle de la loupe qui peut se déformer pour s'adapter à la distance de l'objet regardé ; l'image se forme sur la rétine qui joue le rôle de la feuille de papier et envoie ses informations au cerveau dont le rôle est de les interpréter. L'image est renversée par rapport à l'objet, mais notre cerveau sait comment la redresser.

P : que se passe-t-il alors pour les personnes âgées ?

E : diverses réponses...

P : ceux qui ont dit **presbytie** ont raison. L'œil n'a plus la force nécessaire pour réaliser une loupe puissante, et l'image se forme au-delà de la rétine : elle est floue. Il se passe la même chose pour les jeunes qui voient flous les objets rapprochés : on dit alors qu'il s'agit d'**hypermétropie**, mais c'est le même défaut. Que faut-il faire ?



E : ajouter une loupe, parmi d'autres solutions.

P : effectivement, on regarde avec une paire de lunettes qui rapprochent l'image de la rétine (vers la gauche ici) pour la former sur la rétine : on dit que les verres sont convergents. Est-ce un verre analogue pour chaque œil ?

E : peut-être que les yeux ne sont pas exactement pareils ?

P : c'est cela. La loupe sera plus forte pour l'œil plus faible, et chacun verra de la même manière.

Et pour la **myopie**, que se passe-t-il ?

E : ?

P : c'est l'inverse de la presbytie... On regarde avec une paire de lunettes qui ont des propriétés inverses de celles des loupes et donc repoussent l'image (vers la droite ici), pour la former sur la rétine : on dit que les verres sont **divergents**.

Vous allez maintenant calculer ce qu'on appelle *la distance focale d'un verre*. Vous observez avec votre loupe

l'image de la lumière du lampadaire sur une feuille de papier blanc jusqu'à ce qu'elle soit la plus nette possible. Puis vous mesurez la distance f entre cette image et le verre : c'est ce qu'on appelle la distance focale. Si vous exprimez f en mètres, la convergence du verre est l'inverse de la distance focale f .

E : font l'expérience avec 2 loupes à grossissements différents, avec les lunettes portées par leurs camarades. Ils calculent ainsi la distance focale de chacun des verres et leur convergence.

III - BRONZAGE ET LUMIERES AGRESSIVES

Les actions bénéfiques et nocives de nos comportements vis-à-vis de la lumière solaire sont abordées par le biais des verres optiques. On décrit les six couleurs fondamentales du spectre visible et leurs complémentaires.

P : est-il anodin d'essayer de bronzer en restant sur la plage sur le coup de midi ?

E : non, c'est dangereux : on devient tout rouge dès le premier jour, on a mal, et plus tard la peau va peler, on pourrait même attraper plus tard un cancer de la peau.

P : vous avez raison. Alors, comment faut-il faire ?

E : il faut se badigeonner de crème solaire.

P : effectivement, en n'oubliant pas de renouveler le même geste plusieurs fois par jour. Et si nous oublions la crème, est-ce que tout est fichu pour aujourd'hui ?

E : on peut rester moins longtemps ou attendre la fin d'après-midi.

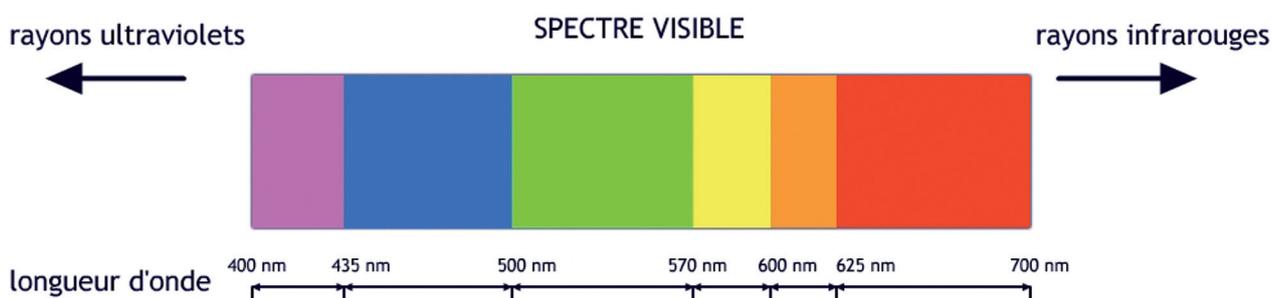
P : exact. De ces deux solutions, la deuxième est plus efficace. Pourquoi ?

E : la première est plus dangereuse : on ne sait pas quel temps choisir.

P : parfaitement. En fait, c'est parce que dans ce premier cas la source même du danger est intégralement conservée : il s'agit des rayons UV. Quelqu'un pour me dire de quoi il s'agit ?

E : les rayons ultra-violet.

P : mais oui ! Ce sont des rayons de même nature que les rayons visibles ; simplement, leur longueur d'onde est plus petite et ils transportent plus d'énergie. P projette la figure du spectre visible et insiste sur la partie UV du rayonnement.

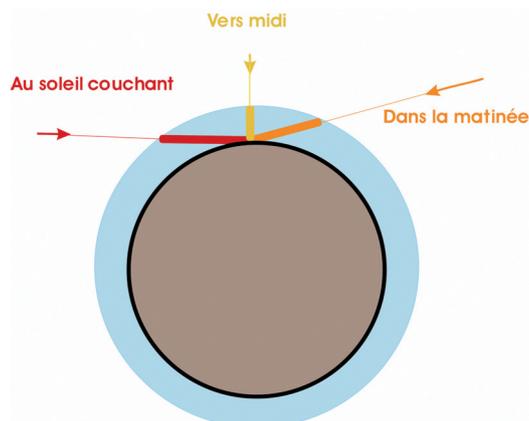


On ne voit pas ces UV, mais ils font des dégâts sous la peau si l'on en reçoit trop. En faible quantité, ils permettent au contraire la production de vitamine D par l'organisme. Le mieux est donc de ne pas en abuser. Or, lorsque le soleil est plus bas sur l'horizon (le soir ou le matin), il est aussi plus rouge. Pourquoi ?

E : il doit contenir moins d'UV !

P : certainement ! La longueur d'atmosphère traversée par les rayons du soleil est nettement plus grande (en France) lorsque le soleil est bas sur l'horizon (le matin et le soir), ce qui absorbe évidemment davantage les UV qu'en milieu de journée. Pratiquement, quand la longueur de notre ombre devient supérieure à celle de notre corps, les UV deviennent déjà moins dangereux. On peut alors se passer de crème si l'on sait attendre, et de plus on bronze bien mieux.

Vous pourrez vous-mêmes faire cette constatation en mai-juin, quand le soleil commence à monter très haut sur l'horizon et qu'il rayonne beaucoup d'UV, en notant dans votre cahier d'expériences l'heure à partir de laquelle la longueur de votre ombre devient supérieure à la taille de votre corps. A partir de cette heure, vous ne craignez plus autant les rayons UV !!



Y a-t-il d'autres matériaux capables d'arrêter les UV sur d'autres parties, plus fragiles, de notre corps ?

E : les lunettes de soleil pour protéger les yeux.

P : oui, bien sûr. Comment sont colorées ces lunettes ?

E : en jaune,... en marron,... pas colorées du tout.

P : tout le monde dit une partie de la vérité, et nous allons voir pourquoi en faisant nous-mêmes l'expérience. Nous en apprendrons par la même occasion davantage sur toute la lumière.

Vous avez pu constater que le spectre visible paraît composé de six couleurs : rouge, orange, jaune, vert, bleu et violet. En réalité, l'œil humain peut distinguer deux fois plus de fréquences colorées, c'est-à-dire douze couleurs différentes allant du rouge au violet. Ces couleurs peuvent être représentées sur un cercle qu'on appelle « cercle chromatique ».



A chaque couleur sur le cercle est opposée sa couleur complémentaire : une couleur donnée absorbe sa couleur complémentaire.

P : Pouvez-vous me dire quelle couleur de verre de lunette pourra le mieux absorber le violet (qui contient beaucoup de rayonnement UV) ?

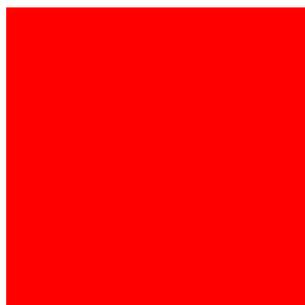
E : la couleur jaune.

P : oui. Vous allez pouvoir le vérifier directement. Coloriez en jaune un petit carré sur une feuille de papier blanche. Fixez le carré jaune durant une minute. Vous verrez alors apparaître la couleur complémentaire, c'est-à-dire le violet, sous forme d'une tache violette.

E : font l'expérience.

P : et si on prend des verres de lunettes colorés en rouge ?

E : font la même expérience avec un carré coloré en rouge et observent une tache de couleur verte.



P : et si on prend des verres de lunettes colorés en marron ?

E : font l'expérience avec un carré coloré en marron et observent une tâche très peu colorée, difficile à définir

P : en fait, la couleur marron atténue presque toutes les couleurs ; c'est pour cela qu'il est difficile de définir sa couleur complémentaire. Le verre de couleur marron, dit « verre fumé », que l'on voit parfois sur des lunettes de soleil a pour effet de diminuer fortement la luminosité du soleil.

P : savez-vous qu'il existe des lunettes de soleil entièrement transparentes ?

E : oui.

P : c'est vrai. Les verres de ces lunettes sont fabriqués avec une matière plastique spéciale qui a pour propriété d'absorber très fortement les rayons UV. Vous pouvez le vérifier avec les lunettes que vous avez apportées

P : voyons maintenant comment atténuer les reflets éblouissants. Pouvez-vous me citer quelques exemples de reflets gênants ?

E : diverses réponses, les vaguelettes éblouissantes sur la mer, les reflets sur les voitures qui scintillent au soleil, les immeubles largement vitrés, etc.

P : oui. Pour les atténuer, on utilise des verres « polaroid ». Prenez-en un et regardez à travers. Que voyez-vous ?

E : un paysage grisâtre, non modifié.

P : oui. Prenez-en un autre que vous allez faire tourner sur le premier. Qu'observez-vous pour une certaine valeur de l'angle de rotation ?

E : on voit que la luminosité diminue fortement.

P : oui. Ainsi fonctionnent les verres de lunettes polaroid qui ont pour propriété d'atténuer très fortement les reflets éblouissants.

Remarque : Pour les professeurs qui se sentent capables de construire un petit spectroscope eux-mêmes, voire avec l'aide de quelques élèves, les expériences décrites ci-dessus seront plus spectaculaires. La construction d'un tel appareil et ses applications à l'observation de l'absorption des couleurs sont décrites ci-dessous.

Au cas où l'Etablissement dispose de crédits suffisants, on peut aussi se procurer un petit spectroscope auprès des fabricants.

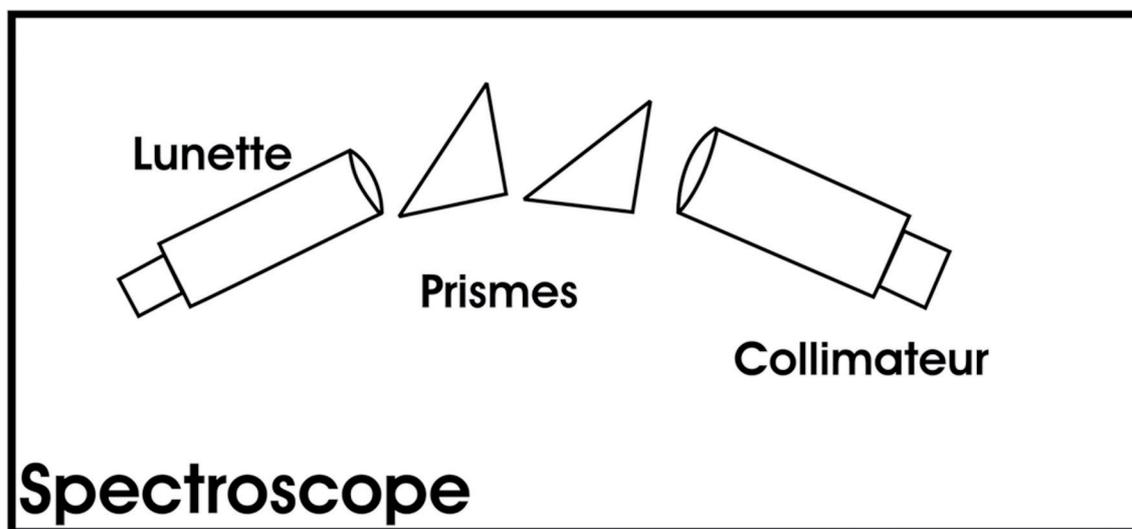
a - Construction du spectroscope

Il y a **trois parties principales**, dont les deux premières sont essentielles. Tout d'abord, une fente d'entrée située au foyer d'un **collimateur** pour obtenir un faisceau de lumière parallèle, ensuite un système **dispersif** (deux prismes ici), enfin une petite **lunette** de sortie pour observer.

En cas de nécessité, l'œil peut suffire si l'on regarde correctement, (mais l'image observée est moins belle...).

• Collimateur

Commencer par la fente d'entrée. Couper la lame de rasoir en deux. Coller l'une des moitiés sur une rondelle métallique assez large et coller la seconde parallèlement pour obtenir une fente de un ou deux dixièmes de mm. On assure ainsi une bonne luminosité mais en sacrifiant la dispersion. Laisser sécher.

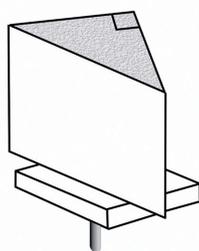
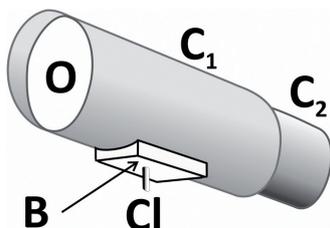


Mesurer le diamètre des objectifs O de la paire de jumelles récupérée. Si un gabarit de même diamètre est disponible, enrouler et coller dessus une bande de papier noir (longueur : celle de la focale des objectifs) pour obtenir un premier cylindre C1. Sinon, utiliser les objectifs eux-mêmes comme gabarit (un à chaque extrémité). La manœuvre est un peu plus délicate : les objectifs sont placés sur la bande de papier posée sur une table et maintenus en enroulant. Deux centimètres de colle sur la longueur du papier assurent une tenue correcte après séchage (1 min.). Il faut enlever l'un des objectifs pour presser avec les doigts sur toute la longueur les deux parties à coller. On remet l'objectif en place et continue d'enrouler en encollant régulièrement.

Même si le résultat manque d'esthétique, la fonction de collimation est assurée. Un deuxième cylindre C2, pratiquement de même diamètre, enserre ensuite la rondelle : choisir les dimensions de cette rondelle assez voisines (plus petites malgré tout) de celles des objectifs pour éviter de grosses épaisseurs de papier à encoller. En effet, il faut s'arrêter de faire grandir le diamètre du cylindre de rondelle lorsqu'il peut coulisser tout juste dans le cylindre des objectifs. Ainsi, l'ajustement de la distance entre les objectifs et la fente peut se faire très précisément : réunir (après séchage) les deux objectifs à l'extrémité de leur cylindre de manière symétrique (souvent, on trouve l'équivalent d'un montage de Ramsden, l'une des faces étant peu courbée : placer ce «plan» à l'extérieur). Faire alors coulisser le cylindre portant la fente jusqu'à voir nette l'image d'un objet situé très loin et contrasté. Pour cela, regarder avec une grosse loupe un tout petit morceau de papier calque plaqué par du ruban adhésif sur la fente. On se trouve exactement au foyer de l'ensemble des deux objectifs. Prendre un petit rectangle (3 cm x 6 cm environ) de bois contreplaqué B (épaisseur : environ 8 mm, obtenue au besoin en collant plusieurs épaisseurs de bois de plus faible épaisseur), entamer à la lime grossièrement et finir au papier abrasif, en utilisant pour gabarit le premier cylindre en papier collé (bien nettoyer ensuite pour éviter le contact de la poudre abrasive avec l'optique !) ou, mieux encore, un autre cylindre de même diamètre. Percer au centre du rectangle et installer un clou Cl époiné garni de colle au contact du bois. Le but est de faire un trou de même diamètre dans la planchette de bois d'environ 25 à 30 cm de long, 10 à 15 cm de large (qui porte l'ensemble des appareils et sert donc de plan de référence) : le collimateur gardera son axe parallèle au plan de référence, à une distance connue, et tournera aisément autour du clou (axe vertical). Coller la cale (B) sur le collimateur, au voisinage du centre de gravité.

• Prismes

Monter chaque prisme sur une cale de bois d'épaisseur suffisante pour que le centre de l'épaisseur (entre les deux plans dépolis) se trouve à la même distance du plan de référence que l'axe du collimateur. Coller cette cale au prisme (partie dépolie, en grisé sur la figure) après l'avoir percée du même trou que pour le collimateur. Le clou ne sera collé qu'ensuite, après les réglages préliminaires. On équipe ainsi deux prismes.



• Lunette d'observation

Il ne nous reste que deux oculaires de la paire de jumelles pour faire cette lunette : l'un nous servira d'objectif, le second d'oculaire (sauf si l'on peut récupérer ces deux éléments par ailleurs). Avec du papier noir collé, faire deux cylindres coulisant (assez fermement), les engager pour rapprocher l'objectif de l'oculaire et régler sur un objet lointain. Trouver le centre de gravité pour placer convenablement le même type de cale en bois équipée d'un trou (comme précédemment : clou à coller après réglages préliminaires). Coller la cale sur la lunette.

● Montage sur la planchette

A environ 6 cm de l'extrémité droite de la planchette mise à plat, au tiers de la largeur à partir du **fond**, percer un trou et y engager le clou du collimateur. Ce dernier peut tourner autour de son axe, et c'est par rapport à lui que se feront les autres positionnements. Le premier prisme pourra être déplacé par translation et rotation pour observer le **minimum de déviation**. Comme source de lumière, prendre le fond du ciel. Pour commencer les réglages, placer le prisme très près du collimateur, l'un des côtés de l'angle droit perpendiculaire à l'axe optique (milieu du côté dans l'axe) et l'hypoténuse à gauche. Il n'y a pas de lumière dans cet axe. Faire tourner légèrement le prisme (sens inverse des aiguilles d'une montre) jusqu'à observer la lumière **rouge** en regardant vers le collimateur et déplaçant peu à peu le regard vers la droite. Il suffit ensuite de déplacer par petits incréments le prisme (rotation et translation) sans perdre contact avec le rouge déjà observé. Ce dernier se déplace vers la droite, passe par un **extremum** (que l'on appelle le **minimum de déviation**) avant de rebrousser chemin. S'y arrêter, en profiter pour fixer le prisme (en l'équipant du clou) sur la planchette que l'on perce au bon endroit. Régler de la même manière le second prisme à quelques cm sur la gauche : la lumière arrive toujours par un côté de l'angle droit et ressort par l'hypoténuse. Pour régler plus facilement, on peut se placer dans l'obscurité. Il suffit alors de bloquer l'arrivée de la lumière sur 10 cm autour du collimateur (trou dans une feuille de papier noir et élimination de tout le papier qui est plus bas que la planchette). On vérifie la direction prise par la (très faible) lumière observée sur un petit morceau de papier calque (blanc par réflexion) et place en conséquence la face du prisme qui doit la collecter au maximum. Equiper le 2^e prisme réglé de son clou. Ne tenter de regarder à la lunette qu'après ces étapes maîtrisées. Suivant le degré de confiance acquis, coller éventuellement les divers objets sur la planchette. On observe finalement le spectre (« arc-en-ciel »).

b - Application aux lunettes (expériences en même temps)

P : nous pouvons maintenant répondre à la question de la coloration des verres de lunettes pour bien protéger les yeux des UV. Certains veulent-ils modifier leur réponse après avoir vu le spectre visible ?

E : diverses réponses...

P : en interposant un verre de lunette (ou une feuille de matière plastique) jaune entre le 2^e prisme et la lunette, nous constatons qu'une bonne partie du violet a disparu. Le violet correspond aux plus courtes longueurs d'onde visibles, celles qui diffusent le plus la lumière. De telles lunettes permettent de voir les lointains plus nets, notamment tôt le matin. Voyons d'autres teintes, le vert par exemple. Où voyons-nous l'absorption ? (au besoin, utiliser des papiers transparents colorés).

E : dans le rouge.

P : effectivement. Et pour les verres rouges ?

E : dans le vert.

P : bravo. Pour le marron des lunettes de soleil maintenant ?

E : toutes les couleurs sont atténuées, un peu moins au milieu du spectre.

P : il faut donc conclure à une diminution globale de la très forte luminosité du soleil. Mais cela ne nous dit pas grand-chose sur les UV. Qui veut m'aider ?

E : plusieurs possibilités d'orientation : UV pas visibles ici ; en les supprimant, cela ne changera pas la teinte visible,...

P : *il existe effectivement des lunettes anti UV entièrement transparentes, car certaines matières plastiques absorbent très fortement dans ce domaine. Il est souvent utile d'atténuer en plus la forte luminosité, surtout si l'on habite dans le sud. D'où l'intérêt des verres «fumés» ou marron, dont chacun choisit la nuance pour des raisons esthétiques. Voyons maintenant les reflets gênants avec la polarisation. Quelqu'un sait-t-il de quoi il s'agit ?*

E : ?

P : *c'est un phénomène qui donne à la lumière des propriétés différentes suivant la direction. Une plaque de « polaroid » nous montre le paysage grisâtre, sans autre modification apparente. Mais si l'on en prend une seconde, l'intensité varie suivant l'angle, jusqu'à devenir nulle (polaroids dits croisés). Maintenons horizontal un morceau de verre d'une vingtaine de cm de long, éclairé par la lumière du ciel, et regardons sa surface éclairée à travers une telle plaque, tenue de l'autre main, à 45° environ de la perpendiculaire à la surface du verre. Un globe lumineux regardé au travers de la feuille après réflexion sur le verre est un peu moins lumineux mais peut servir tout aussi bien. Tourner le polaroid dans son plan : la luminosité varie ; plus forte ou plus faible suivant le départ, elle finit par passer par un minimum spectaculaire. En restant à ce minimum, faire varier l'inclinaison du polaroid sur le verre : là aussi, on observe un second minimum (pour l'angle d'incidence de Brewster : 57° ici). Tous les reflets peuvent ainsi être atténués, y compris les vaguelettes éblouissantes sur la mer.*