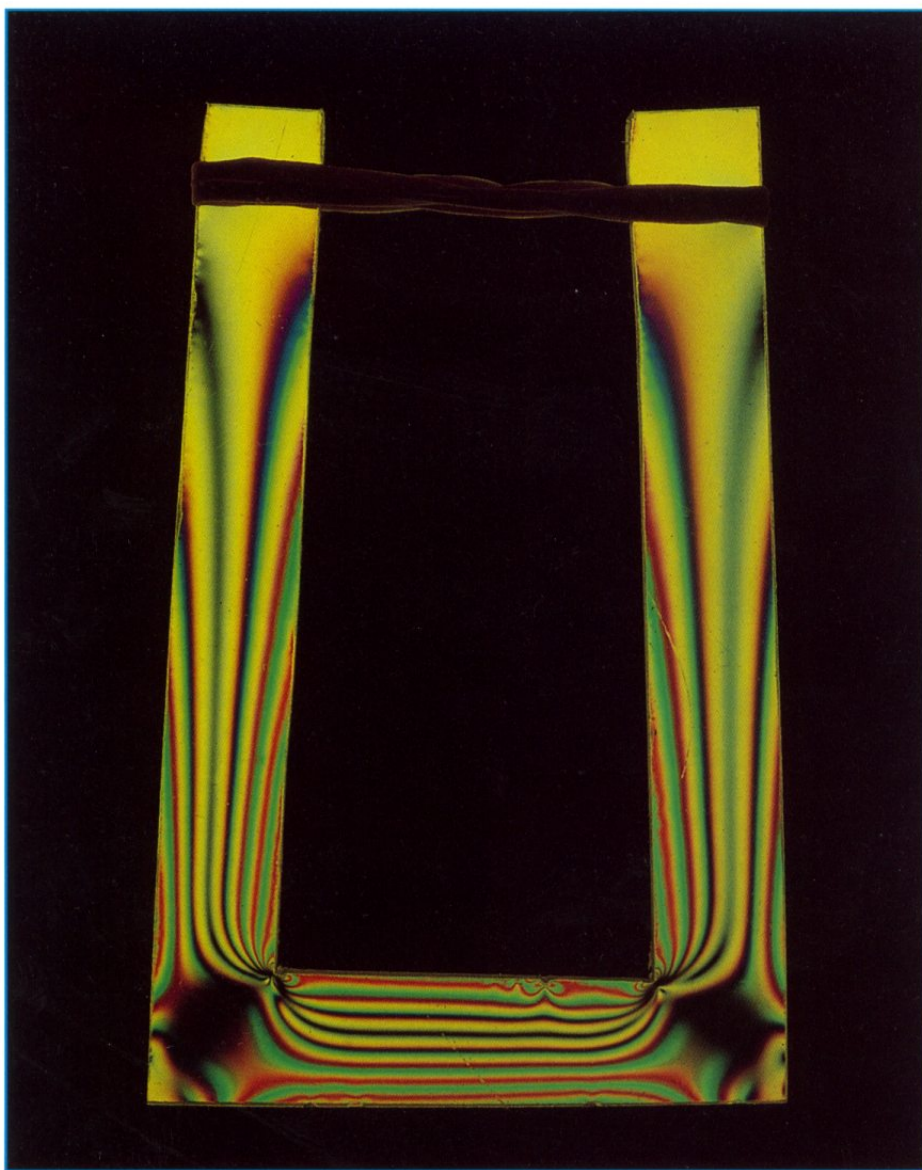




Visualisation des contraintes subies par une maquette en plexiglas en lumière polarisée.
(Photoélasticimétrie)

tion. On observe les changements de couleurs avec des lames de plus en plus épaisses.

Si l'épaisseur de la lame est très faible (c'est à dire telle que $\delta = (n'' - n')e$ soit très inférieur à la longueur d'onde λ des radiations visibles), on peut considérer que cette lame est **onde** pour toutes les couleurs ($\delta \approx 0$), de sorte qu'on obtient du noir. Si l'on prend des lames de plus en plus épaisses, il arrive un moment où la différence de marche δ devient voisine de $\lambda/2$; d'abord pour les courtes longueurs d'onde (bleu). La lame est alors demi-onde : les couleurs correspondantes sont transmises, d'abord un gris bleuté, puis un blanc verdâtre, puis du blanc quand l'ensemble du spectre est à peu près restitué. Ensuite la lame devient **onde** pour les courtes longueurs d'onde et les couleurs correspondantes sont éteintes : on observe des teintes jaune, orangé, rouge... Quand l'épaisseur est telle que $\delta = 565 \text{ nm}$ la lame est onde pour la radiation vert jaune qui est éteinte : on observe alors une couleur

en plus difficile car la lame peut être plusieurs fois onde et demi-onde pour des radiations visibles dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 700 nm. Il est alors nécessaire de consulter l'échelle des teintes de NEWTON (à centre noir) si l'on veut évaluer la différence de marche (voir tableau). Quand la différence de marche est de l'ordre de 4 ou 5 fois la longueur d'onde, les couleurs deviennent pâles et de moins en moins discernables. Elles disparaissent ensuite complètement.

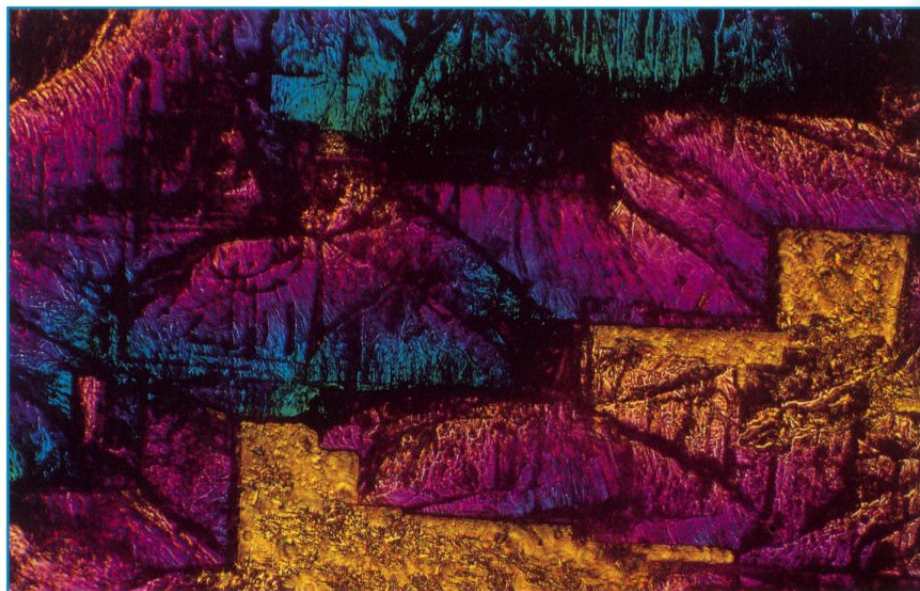
Si l'on analyse la lumière transmise avec un spectroscope on observe un spectre comportant une cannelure noire à l'emplacement de la radiation absente. Si l'épaisseur de la lame augmente, il arrive un moment où la condition $(n'' - n')e = k \lambda$ (avec k entier) peut être satisfaite pour plusieurs valeurs de λ réparties dans le spectre correspondant à des entiers k successifs.

On observe alors plusieurs cannelures noires dans le spectre et la couleur observée est moins "pure" : elle est dite "lavée à blanc". Au delà de 5 ou 6 cannelures, la couleur résultante est pratiquement blanche (blanc dit d'ordre supérieur).

Les couleurs obtenues sont les mêmes que celles des lames minces à centre noir. En réalité il est beaucoup plus facile d'observer les couleurs en lumière polarisée car les lames utilisées sont résistantes et d'un maniement commode. On opère en effet avec des lames solides dont l'épaisseur varie entre 1/10 de mm et plusieurs mm selon leur nature.

Parmi les applications de ce phénomène notons la photoélasticimétrie qui utilise la propriété qu'ont certaines substances (comme le verre ou le plexiglas) de devenir biréfringentes sous l'action de contraintes méca-

pourpre qui est caractéristique, dite **teinte sensible**, car une faible variation de la différence de marche fait virer la couleur du rouge au bleu. L'explication permettant ensuite de justifier les couleurs devient de plus



Cristaux en lumière polarisée.

niques. Les lignes isochromes observées permettent de suivre les lignes d'égale contrainte dans une maquette soumise à des efforts et d'en tirer de nombreuses informations.

On ne négligera pas non plus les nombreuses possibilités, parfois d'ordre esthétique, que nous offre l'étude des cristaux, comme en témoignent les

photographies ci-dessous (grossissement x 50 environ).

- (1) On peut remplacer les trous par des fentes parallèles, ce qui permet d'obtenir des phénomènes beaucoup plus lumineux.
- (2) Le trajet «optique» s'obtient en multipliant le trajet géométrique par l'indi-

ce de réfraction du milieu par rapport au vide. En effet, il est nécessaire de comparer des trajets qui auraient été parcourus pendant le même temps dans le vide (la longueur d'onde a été définie dans le vide) où la vitesse de la lumière est C .

Dans le milieu la vitesse est $v = C/n$. Pendant le temps t , durée du trajet dans le milieu, la lumière a parcouru $x = Ct = Ce/v = ne$.



Cristaux de sel de Seignette en lumière polarisée.

	δ en nm	POLAROIDS CROISES	POLAROIDS PARALLELES	ORDRE DE FRANGE
Premier ordre	0	Noir	Blanc	→ 0
	40	Gris de fer	Blanc	
	97	Gris lavande	Blanc jaunâtre	
	158	Bleu gris	Blanc brunâtre	
	218	Gris plus clair	Brun jaune	
	234	Blanc verdâtre	Brun	
	259	Blanc	Rouge clair	
	267	Blanc jaunâtre	Rouge carmin	
	275	Jaune paille pâle	Brun rouge sombre	
				→ 1/2
	281	Jaune paille	Violet sombre	
	306	Jaune clair	Indigo	
	332	Jaune vif	Bleu	
	505	Orangé rougeâtre	Vert bleuâtre	
Deuxième ordre	536	Rouge chaud	Vert pâle	
	551	Rouge plus foncé	Vert jaunâtre	
				→ 1
	565	Pourpre	Vert plus clair	
	575	Violet	Jaune verdâtre	
	589	Indigo	Jaune d'or	
	664	Bleu de ciel	Orangé	
	728	Bleu verdâtre	Orangé brunâtre	
	747	Vert	Rouge carmin clair	
	826	Vert plus clair	Pourpre	
				→ 3/2
	843	Vert jaunâtre	Pourpre violacé	
Troisième ordre	866	Jaune jaunâtre	Violet	
	910	Jaune pur	Indigo	
	948	Orangé	Bleu sombre	
	998	Orangé rougeâtre vif	Bleu verdâtre	
	1101	Rouge violacé foncé	Vert	
				→ 2
	1128	Violet bleuâtre clair	Vert jaunâtre	
	1151	Indigo	Jaune sale	
	1258	Bleu (teinte verdâtre)	Couleur chair	
	1334	Vert de mer	Rouge brun	
	1376	Vert brillant	Violet	
				→ 5/2
Quatrième ordre	1426	Jaune verdâtre	Bleu violacé grisâtre	
	1495	Rose (nuance clair)	Bleu verdâtre	
	1534	Rouge carmin	Bleu vert	
	1621	Carmin pourpre	Vert terne	
	1658	Gris violacé	Vert jaunâtre	
				→ 3
	1682	Bleu gris	Jaune verdâtre	
	1711	Vert de mer	Jaune gris	
	1744	Vert bleuâtre	Mauve gris rouge	
	1811	Beau vert	Carmin	
	1927	Gris vert	Gris rouge	
				→ 7/2
Cinquième ordre	2007	Gris presque blanc	Bleu gris	
	2048	Rouge chair	Vert	
				→ 4
	2338	Vert bleu pâle	Rose pâle	
	2680	Rose pâle	Vert bleu pâle	

Les verres colorés et leur histoire

par Roland Jouanisson

Les verres colorés sont pratiquement nés en même temps que le verre ordinaire, par suite de la présence d'impuretés dans les matières premières utilisées, comme le sable. Par la suite il n'est pas douteux que les hommes ont cherché à imiter les pierres précieuses, de tous temps très recherchées pour leurs couleurs remarquables.

Sans doute inventés par les Egyptiens du Moyen Empire, les verres colorés ont connu un essor exceptionnel dans l'Occident médiéval avec le développement de la technique du vitrail. Sur le plan scientifique, on explique comment les couleurs prennent naissance en traversant un bloc de verre et on analyse les principales propriétés de ces "filtres" qui ont, de nos jours, de nombreuses applications.

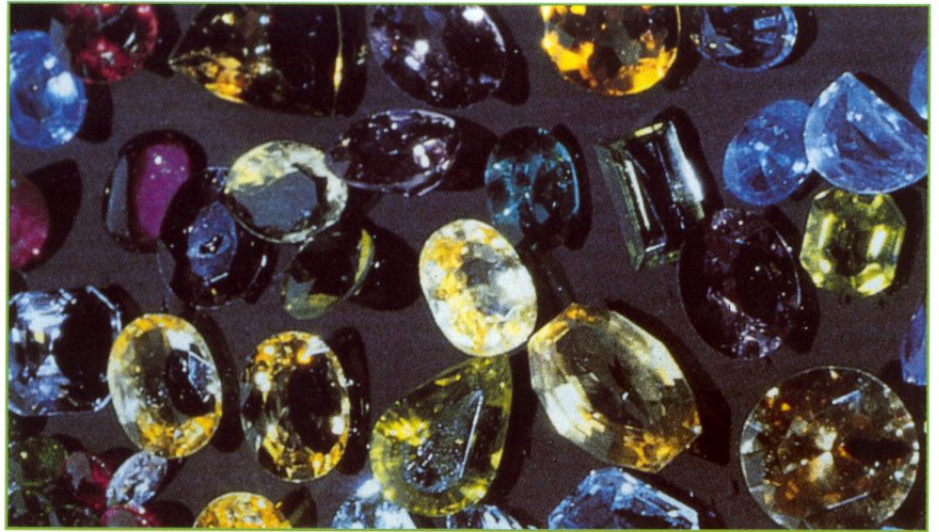
Les origines

Même si nos lointains ancêtres n'ont pas conceptualisé la couleur⁽¹⁾, il ne fait guère de doute qu'ils aient été fascinés par la variété des nuances qu'on rencontre dans la nature. Parmi ces sujets d'émerveillement figurent en bonne place les pierres précieuses.

Contrairement aux fleurs fragiles et éphémères, les minéraux conservent leur couleur et peuvent être taillés, polis et intégrés à la parure des humains ou de leurs œuvres d'art. Ils ont fourni les premiers miroirs et acquis des valeurs symboliques nombreuses et variées dans toutes les civilisations. On trouve dans l'Ancien Testament une description détaillée du pectoral d'Aaron, orné de 12 pierres précieuses⁽²⁾; la Jérusalem céleste de l'Apocalypse est bâtie avec des pierres de couleurs différentes⁽³⁾; la littérature du Moyen Age abonde en descriptions de palais féeriques aux murs en améthystes, topazes, grenats et émeraudes ...

Il n'est donc pas surprenant de constater qu'on ait cherché à reproduire ces merveilles et c'est pourquoi l'invention du verre va prendre une aussi grande importance dans l'histoire des techniques et dans l'histoire de l'art.

Déjà les Egyptiens qui recherchaient les pierres pour faire des bijoux se rendaient dans le lointain Afghanistan pour y chercher le lapis-lazuli, la pierre la plus prisée; la turquoise venait



Les pierres précieuses ont été recherchées de tout temps pour leurs couleurs remarquables.

du Sinaï; sur place on trouvait améthyste, grenat, jaspé et cristal de roche. Mais la rareté de ces minéraux - notamment le lapis-lazuli - incitèrent les Egyptiens à trouver des substituts. On a établi que dès le III^{ème} millénaire les Sumériens et les Egyptiens fabriquaient une sorte de faïence vitrifiée, obtenue à partir d'un mélange de sable et de natron (carbonate de sodium naturel). Les célèbres bleus et verts égyptiens, qui apparaissent à Saqqarah vers la III^{ème} dynastie, ont été vraisemblablement obtenus par chauffage des composants vers 1000°C. Les colorations sont dues à des composés du cuivre (on a pu identifier la présence de cuprorivaïte, silicate de cuivre et de calcium). Il semble que les différences de couleur

dependent des conditions de chauffage et de la granulométrie des pigments.

Toutefois le matériau obtenu par des procédés de ce type n'est pas encore du verre; c'est en fait un mélange hétérogène formant une glaçure.

C'est vers 1500 avant notre ère (à l'époque d'Aménophis I^{er}) qu'apparaît une véritable pâte de verre translucide avec laquelle on fabriquait des objets moulés. De cette époque on a daté avec précision divers objets, dont un œil en verre bleu.

On notera que, dès son apparition, le verre est coloré car, comme on le verra plus loin, la couleur est due à certains éléments à l'état de traces qui sont pratiquement toujours pré-



Vases en verre d'époque romaine soufflés dans un moule.

sents dans les matériaux naturels utilisés (c'est notamment le cas du fer). On trouve dans les textes anciens diverses références concernant le verre. Hérodote, par exemple, signale l'existence à Tyr d'une colonne d'émeraude "qui brille la nuit d'un vif éclat"⁽⁴⁾. Il s'agit, vraisemblablement, de verre coloré. Bien connue est la relation que donne Pliny l'Ancien de l'invention du verre à Sidon (près de l'Akko actuelle) :

«La tradition rapporte que les marchands de nitre qui prirent terre sur cette plage, voulant cuire leurs aliments et ne trouvant pas de pierre sur le rivage pour servir de trépied à leur chaudière, y suppléèrent avec des blocs de nitre de leur vaisseau qui en était chargé. Le nitre entrant en fusion par l'ardeur du feu, on vit couler un liquide nouveau et transparent de ce mélange⁽⁵⁾».

Cette relation relève sans doute de la légende, mais elle confirme qu'à l'époque romaine le verre était bien connu. En fait, jusqu'à l'époque hellénistique, la fabrication par moulage fut la seule technique utilisée. C'est au II^{ème} siècle avant notre ère qu'on voit apparaître le soufflage à l'aide d'une canne métallique creuse. Cette nouvelle technique (encore utilisée de nos jours pour fabriquer des verres à vitrail) suppose une connaissance plus poussée des propriétés du matériau; par exemple pour obtenir un verre transparent il est nécessaire de bien maîtriser le chauffage et le refroidissement.

C'est alors que les baies vitrées, signe de richesse (car le matériau était très cher), font leur apparition à Rome dans les demeures privées et les édifices publics. Les premières églises chrétiennes vont bénéficier de ce développement et sans doute l'accroître. L'Eglise n'est-elle pas, en effet, un lieu de réunion où l'éclairage est nécessaire et où, de plus, il prend une signification spirituelle ?

► Histoire du vitrail

Du verre coloré au vitrail, il semble que l'évolution soit facile à imaginer. En fait, la genèse du vitrail au cours du premier millénaire est mal connue. Les vestiges archéologiques sont peu nombreux. On a signalé des verres colorés à Sainte Sophie de Constantinople, à Ravenne (VI^{ème} siècle), en divers lieux de Syrie et d'Egypte. Il ne faut pas oublier que ces verres étaient rares et fragiles; peut-être ont-ils été réemployés dans les mosaïques dont la technique a précédé (et sans doute inspiré) le vitrail.

C'est l'Occident chrétien qui a assuré, à partir de l'époque romane, le prodigieux développement du vitrail, après

la mise au point du sertissage au plomb qui semble dater du haut Moyen Age.

L'art du vitrail qui consiste à représenter des images porteuses de messages, lisibles par tout le monde, s'est développé à partir du XII^{ème} siècle et a accompagné l'enthousiasme bâtisseur de l'époque.



Imitations de pierres précieuses en verre coloré dans un vitrail.
(Prophètes de la cathédrale d'Augsbourg, 12^e siècle)

Quelques textes significatifs nous renseignent sur les débuts de cet art, comme par exemple les mentions de Sidoine Apollinaire, évêque de Clermont au V^{ème} siècle, concernant les fenêtres d'une église de Lyon. Grégoire de Tours, vers la même époque, raconte l'histoire d'un mécréant qui aurait volé les vitraux de l'église d'Yzeure pour en extraire l'or.

Pour comprendre l'importance du vitrail, à l'époque médiévale notamment, il faut se rappeler ce qu'est la lumière dans la pensée chrétienne. C'est depuis Saint Augustin «l'élément essentiel et indispensable du beau⁽⁶⁾». La lumière symbolise Dieu lui-même. «Les fenêtres vitrées sont les écri-

tures divines, qui versent la clarté du vrai soleil, c'est-à-dire Dieu, dans l'Eglise, c'est-à-dire le cœur des fidèles, tout en les illuminant⁽⁷⁾».

La translucidité du verre est un mystère pour l'homme du Moyen Age. Il pense que la lumière est "matière", comment peut-elle traverser le verre sans le briser ? On comprend dans ces conditions le souci des verriers attachés à rechercher des teintes "lumineuses" susceptibles d'impressionner les fidèles.

Nous possédons sur ce sujet un ouvrage, d'un intérêt exceptionnel, écrit au XII^{ème} siècle par le moine allemand Théophile : **diversarum artium schedula**.

► Fabrication des vitraux au Moyen Age

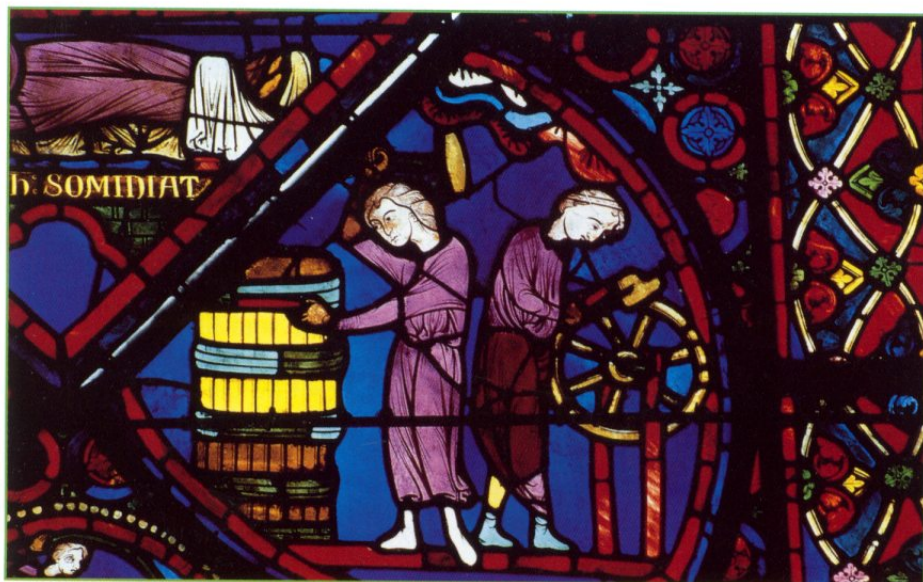
On trouve dans cet ouvrage les techniques utilisées pour fabriquer les vitraux, la structure des fours de cuisson et les moindres détails d'application des peintures sur verre. On apprend ainsi qu'on porte à température élevée (qu'on peut estimer à 1200°C) un mélange de sable de rivière nettoyé (silice) et de cendres végétales, surtout de hêtre et de fougères (riches en potasse). Pendant la fusion on ajoute divers matériaux, comme des cubes de mosaïque ou des débris de verre pilés qu'on appelle la "fritte".

L'analyse des verres anciens a permis de déceler la présence de nombreux sels métalliques provenant des impuretés ou ajoutés en cours de fusion. Dans certains cas, par exemple, quand le bois est rare, la potasse est remplacée par la soude. Cette circonstance a des conséquences appréciables de nos jours : en effet les verres au potassium résistent beaucoup moins bien aux agressions de l'environnement.

Le verre en fusion, prélevé dans le four à l'aide d'une canne creuse est



On réalise encore de nos jours des verres à vitrail selon une méthode ancestrale. (Gravure médiévale)



Tonneliers et charrons donateurs du vitrail. (Histoire de Joseph, Cathédrale de Bourges, 13^e siècle)

soufflé ; à l'aide de gestes précis où on alterne soufflage et mouvement de balancier, on obtient un manchon cylindrique qu'on ouvre et étale sur une surface plane.

La plaque de verre a une épaisseur variable (entre 2 et 5 mm) ; elle peut comporter des inhomogénéités, parfois recherchées.

Il est regrettable que la partie du livre de Théophile concernant la coloration du verre soit perdue. Le peu qui a survécu nous apprend que les procédés de fabrication sont très empiriques et les résultats incertains. Les métaux les plus utilisés sont le fer, le cuivre, le plomb, sous forme d'oxyde. Certains verres nécessitent une composition et un mode opératoire bien précis, comme par exemple les verres bleus au cobalt de Chartres. Le minerai de cobalt ou "saphre" provenait vraisemblablement d'Europe Centrale et coûtait fort cher. Le vitrail, au Moyen Age en particulier, est un produit très cher et très apprécié. Le plus souvent les verrières sont offertes par des corporations de différents métiers qui se placent sous la protection de Saints Patrons. Naturellement ces précurseurs de nos mécènes contemporains n'oublient pas d'apposer leur signature, sous forme d'une image qui symbolise leur métier, au bas de la verrière, à la portée des fidèles.

La coloration du verre

La plupart des vitraux sont réalisés à partir de verre coloré dans la masse. D'autres sont constitués de vitres incolores sur lesquelles on applique des grisailles ou de peintures que divers traitements thermiques permettent de fixer. On trouve également des peintures appliquées sur des verres colorés.

D'une manière générale il existe plusieurs causes pouvant faire naître la couleur dans un cristal mais toutes sont dues à l'interaction lumière-matière, c'est-à-dire entre photons et électrons.

Nous étudions ici le cas des verres colorés dans la masse et dont la coloration est due à des impuretés métalliques. Pour comprendre le mécanisme d'absorption de la lumière par les atomes il faut se souvenir des propriétés fondamentales suivantes :

1. La lumière agit sous forme "corpusculaire" c'est-à-dire qu'elle est constituée de photons transportant de l'énergie quantifiée

$$W = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

avec $\nu = \frac{c}{\lambda}$

h = constante de Planck
 ν = fréquence des radiations
 c = vitesse de la lumière

Les énergies les plus élevées sont transportées par les radiations de courte longueur d'onde.

Les radiations visibles sont comprises entre :

$$\lambda = 400 \text{ nm (violet-bleu)}$$

et $\lambda = 700 \text{ nm (rouge)}$

2. Les énergies des électrons d'un atome ou d'un ion ne peuvent prendre que des valeurs discrètes échelonnées en différents niveaux.

Un électron ne peut passer d'un niveau fondamental à un niveau plus élevé que s'il reçoit une quantité d'énergie égale à la différence des énergies des deux niveaux concernés. On dit alors que l'électron est excité. Cet état n'est pas stable et l'électron va retourner à son état normal en restituant l'énergie reçue. Le plus souvent cette énergie est transformée en chaleur. Si le matériau n'absorbe que certains types de photons correspondant à une longueur d'onde visible la lumière transmise est colorée. Quand on examine le spectre de la lumière transmise, on observe des **bandes d'absorption**.

Si les bandes d'absorption sont situées dans l'ultra-violet et l'infra rouge, la lumière transmise ne subit aucune altération ; la substance est transparente. C'est le cas du verre qui laisse passer les vibrations comprises entre 350 et 2000 nm, et le quartz transparent pour les radiations comprises entre 180 et 4000 nm.

Dans la pratique il existe peu d'ions susceptibles d'absorber les radiations lumineuses visibles. Les plus courants sont les ions Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} ,...

A chacun de ces ions correspondent des énergies, donc des couleurs absorbées bien déterminées.

Les couleurs obtenues dépendent également de la concentration des ions. En général une concentration de quelques % est suffisante et c'est pourquoi il est difficile d'obtenir des verres incolores⁽⁸⁾.

La couleur du verre peut également être obtenue par un précipité de cristaux métalliques ayant des dimensions de l'ordre du nanomètre. Ainsi on réalise des verres rouges à l'or ou au cuivre.

Dans la pratique, surtout pour les verres anciens, on a recours à des procédés empiriques. Avec le même oxyde, il est possible d'obtenir des couleurs très différentes selon la concentration, le degré d'oxydation de l'ion et la durée du traitement thermique. Il ne faut pas s'étonner, dans ces conditions, que les recettes des verriers soient demeurées confidentielles et que des légendes soient nées, comme par exemple à propos du bleu de Chartres.

En fait, les analyses modernes permettent de retrouver la composition chimique des verres anciens qu'il est possible de reproduire quand on s'en donne les moyens. Actuellement les verriers de l'usine Saint Gobain de Saint-Just-Saint-Rambert, utilisant des méthodes ancestrales, proposent des centaines de couleurs référencées.

Origine des couleurs des vitraux

Les **verres rouges** sont obtenus à partir de l'oxyde de cuivre (CuO), quelquefois l'oxyde de fer. Actuellement les verres rouges sont colorés par le sélénium. L'oxyde de cuivre donne une coloration intense qui conduit à rendre le vitrail inutilisable si l'épaisseur est trop grande. On a donc été conduit à utiliser des verres minces doublés de verre "blanc".

On a fabriqué des verres rouges hétérogènes, multicouches, ayant l'aspect feuilleté, flammé ou fouetté et dont les

procédés de fabrication ne sont pas tous parfaitement identifiés. Certains verres (verre rose à l'or) sont obtenus par addition de particules d'or.

Les **verres jaunes** étaient colorés dans la masse par des sulfures alcalins ou par un mélange d'oxyde de fer et d'oxyde de manganèse (présent naturellement dans les cendres). Par suite on a utilisé l'antimoine.

Les **verres verts** de toutes nuances sont colorés par des sels de fer apportés par le sable.

Au XIX^{ème} siècle on a utilisé l'oxyde de nickel et le chlorure de fer.

Les **verres bleus** sont colorés par l'oxyde de cobalt contenu dans les divers composés naturels : on obtient ainsi des verres dits smalt, safre, azur, bleu d'émail, etc... Parfois on rencontre d'autres minéraux comme le cuivre, le fer et le manganèse.

Les **verres violets** apparaissent au XVI^{ème} siècle. Ils sont colorés par l'oxyde de manganèse et souvent formés de couches plaquées de teintes différentes.

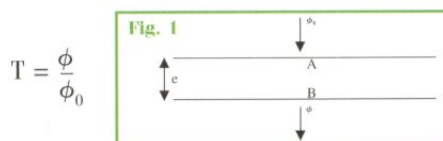
Différentes techniques permettent de modifier l'aspect du verre. Ainsi le verre rouge peut être feuilleté, marbré, etc... Le verre vénitien contient des filets de couleurs obtenus lors du soufflage en étirant des baguettes colorées. Le verre marbré et le verre bariolé contiennent des traînées de couleurs différentes. Le verre aspergé, incolore, est parsemé de petites taches colorées obtenues par projection de gouttes en fusion. Le verre américain (verre Tiffany) est opalescent, légèrement translucide, il contient des marbrures et reliefs.

► Etude des filtres colorés

Nous examinons ici les propriétés des filtres colorés (tels que les verres) qui absorbent la lumière de manière

sélective. Cette étude s'applique notamment aux verres ou gélamines colorées observées par transmission. Dans une certaine mesure cette étude concerne également les objets qui doivent leur couleur à la lumière réfléchie après avoir traversé une certaine épaisseur de matériau.

Un filtre est caractérisé par son facteur de transmission pour une longueur d'onde donnée.



ϕ_0 est le flux lumineux incident et ϕ le flux transmis.

T est toujours inférieur à l'unité, même pour un verre parfaitement transparent. Par exemple, si le filtre est une lame de verre à faces parallèles il y a nécessairement une partie de la lumière qui est réfléchie sur les deux faces (dans le cas du verre, en incidence normale, T est de l'ordre de 0,9). Pour caractériser l'absorption du matériau il faut se référer aux flux juste après la traversée de la face d'entrée et juste avant la traversée de la face de sortie. C'est ce facteur de transmission (dit intrinsèque) que nous considérons dans la suite.

Si l'on superpose plusieurs filtres dont les facteurs de transmission sont $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$, le facteur de transmission de l'ensemble peut se mettre sous la forme :

(1)

$$T = \frac{\phi_n}{\phi_0} = \frac{\phi_1}{\phi_0} \times \frac{\phi_2}{\phi_1} \times \frac{\phi_3}{\phi_2} \times \dots \times \frac{\phi_n}{\phi_{n-1}} = T_1 \times T_2 \times T_3 \times \dots \times T_n$$

Par exemple si l'on suppose deux filtres identiques de coefficient T_1 , l'ensemble a pour coefficient T_1^2 ; avec trois filtres il vaut T_1^3 . Le résultat est le même si au lieu de superposer 2 filtres identiques on les remplace par un filtre dont l'épaisseur est double.

D'autre part l'expérience montre que le flux lumineux monochromatique

décroît de manière exponentielle en fonction de l'épaisseur traversée x.

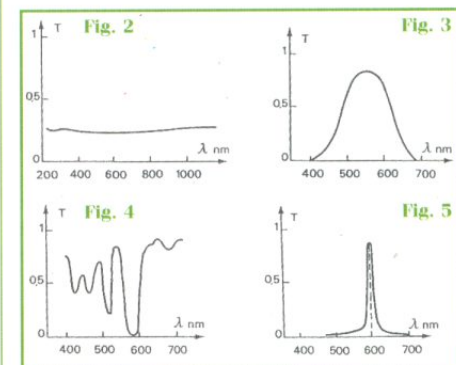
$$(2) \quad \phi = \phi_0 e^{-kx}$$

k est une constante du milieu considéré pour une longueur d'onde donnée. Ainsi pour le verre, et pour des épaisseurs x de l'ordre du cm, le produit kx est très faible : on a pratiquement $\phi = \phi_0$, quelle que soit la longueur d'onde du spectre visible considérée.

Les filtres sont caractérisés par la fonction $T = f(\lambda)$ qui montre comment varie la transmission selon la région du spectre considéré et qui détermine la couleur transmise.

Les courbes $T = f(\lambda)$ sont très variables selon les types de filtres. Dans les exemples suivants on suppose que le filtre est éclairé par une source de lumière blanche émettant le même flux lumineux pour toutes les radiations (spectre d'égale énergie). Les figures 2, 3, 4 et 5 montrent respectivement :

- un filtre neutre incolore (T pratiquement constant)
- un filtre vert à large bande passante
- un filtre à bandes multiples (verre au didyme violet) avec une forte absorption vers 580 nm
- un filtre orange à bande étroite ($\lambda = 600$ nm)



Seuls les filtres du type 5 à bande étroite peuvent donner des couleurs "pures". Ils transportent donc peu d'énergie et sont peu lumineux. En fait, ils sont rarement obtenus directement à l'aide de verres colorés.

Il existe quelques centaines de filtres répertoriés proposés par les différents fabricants (en Europe, l'usine Saint Gobain de Saint-Just-Saint-Rambert) dont les caractéristiques sont apparentées à celles des filtres des schémas ci-dessus le plus souvent.

► Couleurs des filtres par absorption

Toute altération du spectre de lumière blanche provoque l'apparition de couleur mais celle-ci est difficile à prévoir car elle dépend :

- du spectre d'absorption qui détermine la courbe $T = f(\lambda)$



Les vitraux de la Renaissance utilisent une riche gamme de couleurs.
(Martyre de Saint-Laurent et de Saint-Etienne, Cathédrale de Bourges, 16^e siècle)

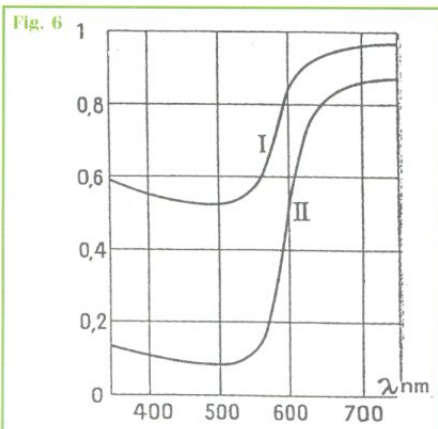
- de la lumière incidente (le spectre d'émission dépend de la source de lumière blanche)
- de l'épaisseur du filtre

D'autres facteurs sont susceptibles d'intervenir, comme la température, pour les verres qui contiennent du sélénium ou du soufre notamment. Ainsi certain verre jaune devient incolore dans l'air liquide (-180°C) et rouge quand on le chauffe. Cependant dans les conditions usuelles ces variations ne sont pas perceptibles. Il n'en est pas de même des altérations que l'on observe à la longue lorsque les verres sont soumis à divers agents atmosphériques.

■ Influence de l'épaisseur sur la couleur transmise

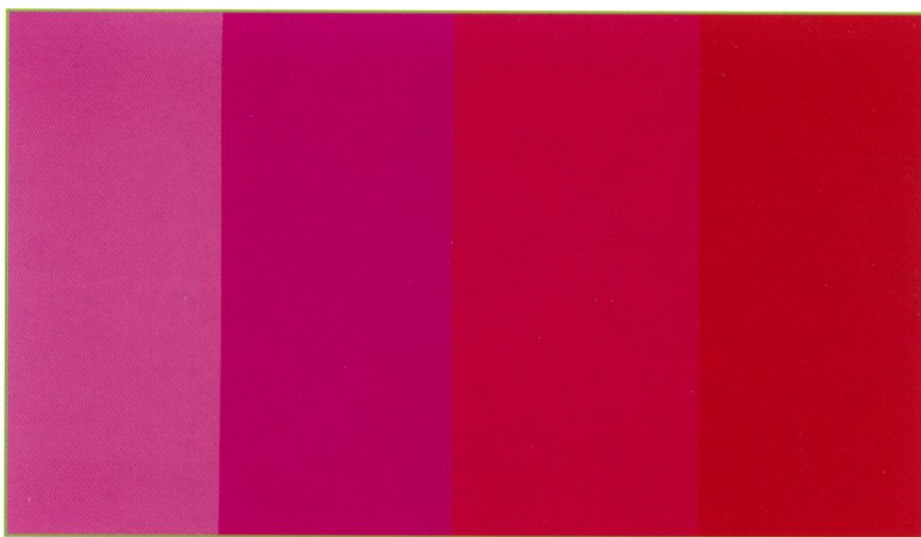
D'après la relation (2) on voit que le coefficient de transmission diminue avec l'épaisseur, mais il ne diminue pas de la même façon pour toutes les radiations. Ainsi la figure 6 permet de comparer le coefficient de transmission d'un filtre pourpre d'épaisseur e (courbe I) à celui d'un filtre de même nature et 4 fois plus épais (courbe II). On obtient la courbe II en calculant les puissances quatrièmes des ordonnées de la courbe (I).

L'examen de cette courbe II montre que la couleur obtenue est plus pure (la bande passante est plus étroite) mais aussi qu'elle est différente de la couleur correspondant à la courbe I. En effet il y a ici déplacement du maximum vers le rouge.



Pour simuler l'expérience précédente on compare la couleur transmise par une gélatine pourpre à la couleur transmise par plusieurs couches superposées.

D'une manière générale les verres minces donnent des teintes moins pures mais plus claires (lavées de blanc). L'examen du spectre d'absorption permet d'expliquer certaines particularités des couleurs; Par exemple, on peut obtenir facilement des jaunes



Evolution de la pureté et de la nuance d'une gélatine pourpre en fonction du nombre de couches traversées par la lumière.

très lumineux car, d'une part, l'œil est très sensible à cette couleur et, d'autre part, il suffit d'éliminer la partie bleue du spectre. En revanche, pour obtenir un bleu profond, couleur pour laquelle l'œil est peu sensible, il faut éliminer la plus grande partie du spectre.

■ Influence de la source

Tout le monde a remarqué que les vitraux n'ont pas la même couleur selon qu'ils sont éclairés par le soleil ou par le ciel (ou les immeubles voisins). L'éclairage solaire est caractérisé par une lumière intense répartie dans toutes les radiations avec un maximum dans le vert-jaune. La lumière du ciel a une composition très différente : elle est proportionnellement plus riche en bleu et plus pauvre en rouge. Ainsi un vitrail rouge exposé au nord est peu lumineux pour deux raisons : il reçoit peu de lumière et cette lumière est surtout riche en bleu. Il suffit pour s'en rendre compte de regarder un ciel nuageux à travers

un filtre rouge : le ciel bleu paraît très sombre par rapport aux nuages. (la photographie en noir et blanc utilise des filtres rouges pour augmenter les contrastes de ce type)

En revanche un vitrail rouge placé au sud ou à l'ouest sera très lumineux lorsqu'il sera éclairé par le soleil. En réalité un vitrail bleu éclairé par le soleil est plus lumineux que s'il est au nord, mais il l'est moins que le rouge par comparaison.

Comme d'autre part la couleur transmise dépend de la composition de la lumière incidente on observe à la fois une variation de luminosité et une variation de couleur. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer, par exemple, la couleur d'un verre pourpre éclairé, soit par une lampe incandescente, soit par la lumière solaire. Dans le premier cas il sera plus rouge.



Vitrail exposé au sud.



Aspect que prendrait le même vitrail s'il était exposé au nord (simulation obtenue à partir d'un filtre bleuté). (N.D. de la Belle Verrière, 12^e siècle, Cathédrale de Chartres)



La splendeur des vitraux gothiques. Remarquer à droite comment sont symbolisés la pluie et l'arc-en ciel inversé.

(Vitrail des Reliques de Saint-Etienne, 13^e siècle, Cathédrale de Bourges)

Certains filtres sont utilisés pour sélectionner une radiation monochromatique dans un spectre qui en contient plusieurs (par exemple le spectre de la vapeur de mercure).

Concurremment avec les verres colorés on utilise des gélatines colorées. Signalons par exemple les filtres Kodak Wratten utilisés pour la reproduction des couleurs, les filtres Schott qui ont la propriété de couper toute une partie du spectre au-dessous d'une certaine longueur d'onde. Tous ces filtres ont des caractéristiques bien définies fournies par le fabricant.

La figure suivante montre le principe de la synthèse soustractive des couleurs à l'aide de trois filtres jaune, cyan et magenta.

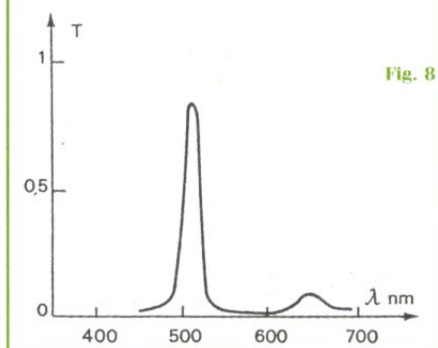
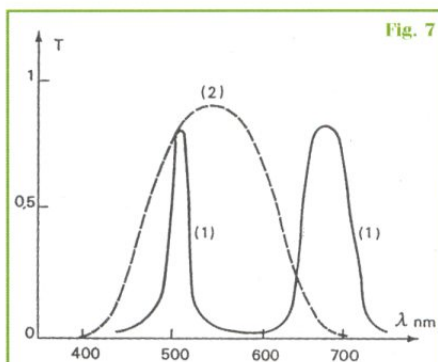
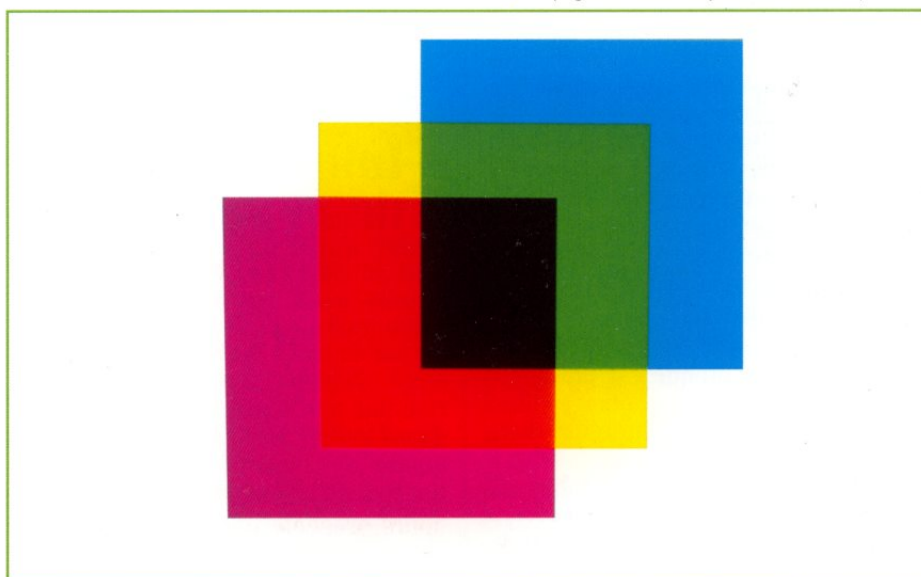
Synthèse soustractive des couleurs par superposition de filtres colorés.
(Logiciel ADASTA : «Synthèses trichromes»)

Les changements de couleur et surtout de luminosité qui interviennent ont pour effet de rendre "vivants" les lieux éclairés par les verres colorés. La science n'est pas en mesure d'en dire beaucoup plus car ce sujet, malgré les efforts des psychologues et des artistes qui, à la suite de Viollet-le-Duc, au siècle dernier ont élaboré diverses théories pour justifier leurs observations ou impressions. Même des poètes comme Paul Claudel n'ont pas échappé au pathos qui anime leur enthousiasme devant des merveilles comme celles que l'on peut admirer dans la cathédrale de Chartres.

Quelques applications scientifiques des verres colorés

Les verres colorés sont utilisés comme filtres dans diverses applications. Par exemple ils permettent d'obtenir des sources colorées pour les spectacles, etc. La SNCF utilise des verres à caractéristiques bien définies comme le verre rouge au sélénium.

Certains verres, ayant de bonnes qualités optiques et une "bande passante" assez étroite sont utilisés pour obtenir une lumière relativement monochromatique. Par exemple en superposant les filtres (1) et (2) du schéma ci-dessous, dont l'un présente des bandes étroites dans les bleu-vert et le rouge et l'autre une large bande dans le vert, on isole la bande bleu-vert (ci-contre).



- (1) Voir dans ce même numéro l'article "la couleur avant Newton".
- (2) Exode, XXVIII, 17 et suivants.
- (3) Apocalypse selon Saint Jean, XXI, li, et suivant.
- (4) HERODOTE, l'Enquête II, 44.
- (5) PLINIE XXXVI, 65
- (6) Cité par Louis GRODECKI, Le vitrail roman, Office du Livre.
- (7) DURAND de Mende, cité par L. GRODECKI, ibid.
- (8) Pour la fabrication des fibres optiques où l'on exige une absorption très faible, il est nécessaire que la concentration en éléments Fe, Co, Ni et terres rares n'excède pas une partie par million.

Composition des verres anciens

Ce n'est que par l'analyse chimique, à partir du XIX^{ème} siècle, que l'on a pu établir la composition des verres anciens et reconstituer, à l'aide des textes disponibles, les procédés de fabrication. Dans ce domaine, comme dans beaucoup d'autres, subsiste une lacune dans nos connaissances entre la fin de l'Empire romain et le X^{ème} siècle. On remarque toutefois pendant cette période un changement dans les procédés de fabrication : les sels de sodium qui proviennent des gîtes minéraux d'Asie mineure ou des plantes méditerranéennes sont progressivement remplacés par des sels de potassium. En effet ceux-ci sont abondants dans les cendres des végétaux comme le hêtre et la fougère, communs en Gaule et en Germanie.

La composition du verre est par nature complexe étant donné qu'on utilise des produits naturels variés et impurs. On savait qu'aucune roche, qu'elle soit siliceuse, calcaire, gypseuse ou argileuse, prise isolément, n'est vitrifiable. Il est toujours nécessaire d'ajouter d'autres substances, notamment des bases telles que la chaux, la potasse ou l'alumine.

Le constituant essentiel du verre est la silice (SiO_2) que l'on cherche à obtenir sous sa forme la plus pure : cristal de roche, quartz dit "amorphe" (pierre blanche), silix et, le plus souvent, sable des rivières et des côtes. En France, les gisements ne sont pas rares mais le matériau doit le plus souvent être purifié : lavage, broyage, attaque par un acide, ... surtout si l'on désire un verre non coloré. Sauf précautions spéciales on obtient généralement une coloration verdâtre due aux oxydes de fer.

Autres constituants importants : **les fondants**. Ils sont nombreux et varient selon le lieu et l'époque mais sont tous à base de sels de sodium ou de potassium.

Les sels de sodium proviennent de minerais naturels ou de dépôts fournis par les eaux minérales. En Egypte, on exploitait le natron qui contient un carbonate de sodium [$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$]. On exploitait également les sels de sodium présents dans certaines plantes telles que la roquette de mer ou la salicorne. Le borax, minéral de bore et de sodium était également utilisé.

Les sels de potassium sont présents dans le tartre du vin, le salpêtre (nitrate de potassium) et surtout les cendres des végétaux (la cendre du bois de hêtre contient 16 % de K_2O , la cendre de fougère 43 %, celle de bruyère 13 %). Les mêmes cendres contiennent également de la chaux, de l'oxyde de magnésium, de l'oxyde de phosphore (P_2O_5) qu'on retrouvera dans la composition des verres.

A ces éléments de base s'ajoutent de nombreux composés introduits intentionnellement ou non. Les textes ne précisent pas qu'on ajoutait de la chaux. En fait, elle est toujours présente car elle provient des matières premières et notamment les sables (certains sables d'Egypte contiennent jusqu'à 35 % de CaO).

Le rôle de la chaux ne fut clairement reconnu qu'au XVIII^{ème} siècle lorsqu'on disposa de produits suffisamment purifiés.

La magnésie est également utile; elle évite que se produise, dans certaines circonstances, la dévitrification. Heureusement, comme on l'a vu plus haut, elle est présente dans les cendres, et même dans certains sables.

L'oxyde de phosphore (P_2O_5) joue un rôle analogue à la silice. Comme il est pratiquement absent des sables et ne peut provenir que des cendres, sa présence renseigne sur la provenance des matières premières utilisées : les verres égyptiens ou romains en contiennent très

peu (de l'ordre de 0,2 %) alors que les verres carolingiens et les vitraux de Moyen Age en contiennent 4 %. On a également remarqué des différences importantes entre la composition des vitraux au sein même d'une verrière, ce qui indique que les différents éléments colorés ne venaient pas des mêmes ateliers : une spécialisation avait certainement lieu.

Le manganèse joue un rôle complexe. A son degré d'oxydation maximum (Mn_2O_7) et même sous la forme de MnO_2 il colore le verre en violet, alors que MnO ne produit pas de coloration. En fait, il peut jouer un rôle en présence d'autres métaux pouvant exister sous divers degrés d'oxydation. Ainsi FeO (Fe^{2+}) donne une coloration bleue; en présence de MnO_2 on obtient une couleur jaune due à Fe^{3+} . Le rôle du manganèse a été reconnu empiriquement. On savait au Moyen Age qu'en continuant à chauffer un verre décoloré obtenu à partir de cendres de hêtre il se recolorait : l'opération avait pour effet d'augmenter le degré d'oxydation du manganèse présent dans les cendres.

Le rôle du plomb est connu depuis le XVII^{ème} siècle. C'est l'anglais Ravenscroft qui eut l'idée en 1675 d'ajouter de l'oxyde (PbO) pour améliorer les verres de Venise. On obtint par la suite de nombreuses variétés car il est possible de faire varier dans de grandes proportions les teneurs en alcalin, en chaux et en oxyde de plomb.

Ainsi le cristal classique a la composition suivante :

SiO_2 : 60,9 % K_2O : 9,5 % PbO : 29,6 %

et le demi cristal :

SiO_2 : 74,9 % Na_2O : 14,8 %

CaO : 4,2 % PbO : 6,1 %

On a trouvé du plomb dans des verres anciens mais rien ne prouve que sa présence était intentionnelle.

Origine et apparences des couleurs

par Roland Jouanisson

La couleur a son origine dans la composition spectrale de la lumière que réfléchissent les objets. Elle contribue ainsi d'une manière importante à l'identification de ces objets, au même titre que la forme ou la texture.

En fait, la couleur est une création du cerveau à partir des informations fournies par les radiations lumineuses, de sorte que nous avons affaire constamment à deux classes de phénomènes : ceux qui sont liés aux effets physiologiques et ceux qui résultent de leurs conséquences psychologiques, nombreuses et parfois surprenantes.

Nous n'aborderons pas ici les mécanismes, qui commencent à être bien connus, permettant de comprendre comment une région du cortex cérébral est capable d'élaborer une représentation colorée à partir des informations fournies par les cellules de la rétine.

En revanche, nous analysons les principales données concernant les apparences des couleurs et certaines de leurs conséquences pratiques dans notre environnement quotidien.

► Couleurs des diverses lumières

La lumière peut être produite de diverses manières : décharge dans les gaz, fluorescence, phosphorescence, effet laser, etc... Le plus souvent on fait appel à l'incandescence de certains matériaux (filament de tungstène des lampes).

Mais la source de lumière la plus importante - et de loin -, celle qui a conditionné l'évolution de notre système visuel, est la lumière solaire.

L'analyse des différentes lumières (qu'elles proviennent des étoiles ou de simples objets) s'effectue avec un spectroscope. Un spectroscope simplifié, à la portée de tous, est constitué d'une fente éclairée qu'on observe à travers un prisme ou un réseau.

L'examen du spectre met en évidence la relation qui existe entre la couleur d'une lumière (notion **physiologique et psychologique**) et la **longueur d'onde** des radiations électromagnétiques (notion **physique**).

Le cas le plus simple est celui d'une lumière monochromatique : par exemple, le spectre de la lampe à vapeur de sodium comprend une radiation visible jaune orangé (en fait, il existe deux radiations très voisines) dont la longueur d'onde peut être mesurée avec une grande précision :

$$\lambda = 589 \text{ nm} (589 \times 10^{-9} \text{ m})$$

A cette radiation monochromatique correspond une couleur pure bien définie.

La lampe à vapeur de mercure donne plusieurs radiations monochromatiques distinctes dont les couleurs sont également bien définies (un doublet jaune, une raie verte intense, plusieurs raies bleues et violettes).

La lumière du soleil ou d'une lampe à incandescence se révèle beaucoup plus complexe : en effet le spectre est continu; la partie visible s'étale du violet ($\lambda \approx 400 \text{ nm}$) au rouge ($\lambda \approx 700 \text{ nm}$) en passant par le vert ($\lambda \approx 550 \text{ nm}$).

Cette partie visible du spectre ne présente qu'une toute petite partie des radiations émises. Avec des détecteurs appropriés il est facile de mettre en évidence les radiations infrarouges et ultra-violettes (par exemple on peut détecter le proche ultra-violet avec une simple feuille de papier à machine blanc car il contient des substances fluorescentes excitable par ce rayonnement)

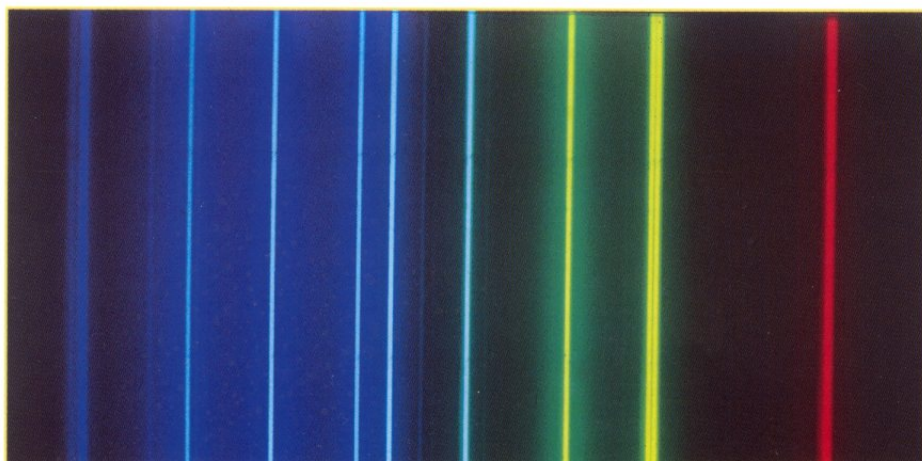
On appelle **lumière blanche** la lumière du jour et toutes les lumières analogues, comme par exemple celles qui sont émises par les lampes à incandescence. Cette définition n'est pas précise mais suffit pour interpréter un grand nombre de phénomènes. En fait, on sait caractériser une lumière blanche de manière précise, en se référant à l'émission d'un corps idéal appelé "corps noir" à une température T . Par exemple, le filament de tungstène d'une lampe se comporte comme un corps noir à 3000 K, le soleil comme un corps noir à 5500K. Dans les deux cas l'énergie émise passe par un maximum. La longueur d'onde λ_m correspondant à ce maximum est donnée la loi de Wien :

$$\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mètre.kelvin}$$

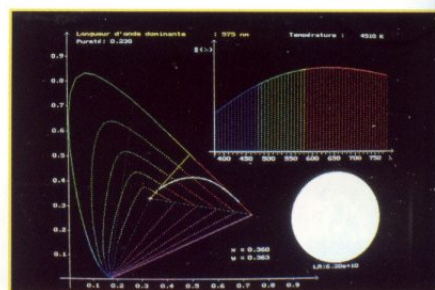
Ainsi ce maximum vaut

$$\lambda_m = 550 \text{ nm pour la lumière solaire (lumière verte)}$$

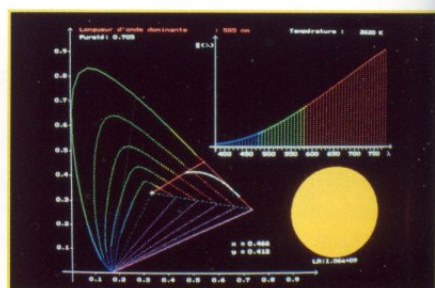
$$\lambda_m = 966 \text{ nm pour la lampe considérée (rayonnement infra-rouge)}$$



Spectre de raies : on remarque le doublet jaune du mercure.

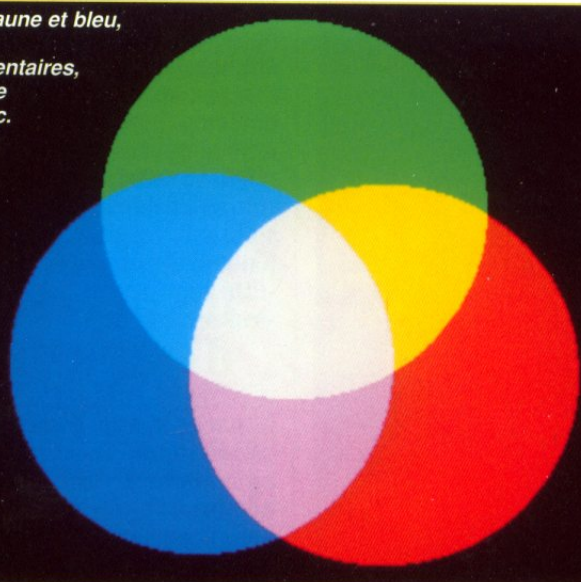


Lumière solaire.



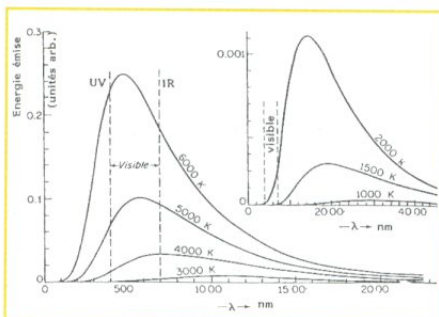
Lumière d'une lampe à incandescence.

Les couleurs jaune et bleu,
par exemple,
sont complémentaires,
car leur somme
donne du blanc.
(Logiciel ADASTA)



La loi de Wien montre que lorsqu'on augmente la température du corps noir le maximum d'énergie émise se déplace vers le bleu. Ainsi une lampe à incandescence est relativement plus riche en radiations rouges que le soleil (ci-dessous). Inversement la lumière du ciel a une composition comparable à celle que donnerait un corps noir porté à 20 000 K. C'est ce qu'on appelle la température de couleur de la source. On peut facilement modifier la température de couleur d'une lumière en utilisant des filtres colorés appropriés.

Pour parvenir jusqu'à notre œil la lumière émise par une source quelconque rencontre divers obstacles. Ainsi la lumière solaire a traversé une importante couche d'atmosphère; elle a pu traverser des liquides ou des solides transparents et subir des réflexions sur diverses surfaces. La plupart de ces opérations s'accompagnent d'une modification du spectre de la lumière et d'une diminution de l'énergie lumineuse transportée qui ont pour conséquence de modifier la couleur et la luminance de la lumière incidente. Ainsi, si par un mécanisme quelconque, on retranche une couleur A du spectre de lumière blanche on obtient une lumière B colorée; cette couleur B est dite **complémentaire** de A par rapport à la lumière blanche. Inversement la somme de deux couleurs complémentaires dont les luminances sont convenablement dosées donne naissance à une lumière blanche. C'est le cas des couples bleu-jaune, vert-pourpre, rouge-indigo,...



Nous verrons par ailleurs divers phénomènes qui permettent de faire naître des couleurs à partir de lumière blanche : réfraction, diffusion, absorption, interférences, etc...

► Caractéristiques d'une couleur

L'expérience montre qu'il est possible de caractériser une couleur quelconque par deux facteurs physiques qui sont :

- la longueur d'onde dominante λ_d
- la pureté colorimétrique p .

1. Toute couleur peut être considérée, pour un œil normal, comme la superposition d'un faisceau de lumière blanche de luminance L_0 à un faisceau de lumière monochromatique, de longueur d'onde λ_d et de luminance L_d (à l'exception des pourpres)

$$L = L_0 + L_d$$

2. Toute sensation colorée, même complexe, peut être caractérisée par une longueur d'onde, dite dominante, qui l'apparente à une radiation monochromatique. L'expérience montre en effet que la même sensation de couleur peut être obtenue avec des lumières de compositions spectrales très différentes. Par exemple deux teintes jaunes très voisines peuvent être obtenues, soit avec une radiation monochromatique, soit à partir d'une lumière blanche dont les composantes bleues ont été atténuées.

Ces ajustements de couleurs ne sont possibles que parce que le système visuel n'est pas capable d'analyser la composition d'une lumière (contrairement à l'oreille qui sait reconnaître les harmoniques d'un son complexe). C'est grâce à cette propriété qu'il est possible de créer du blanc à partir de trois couleurs fondamentales.

$$3. \text{ Le rapport } p = \frac{L_d}{L} = \frac{L - L_0}{L}$$

est appelé **facteur de pureté colorimétrique**.

Si $L_0 = 0$ $p = 1$ la lumière est pure (monochromatique) on dit que la teinte est **saturée**. Quand L_0 augmente, la couleur est de plus en plus lavée de blanc (ainsi un rouge pur se transforme en un rose de plus en plus pâle quand on ajoute du blanc)

Remarque : Un problème se pose à propos de pourpres car il n'existe pas dans le spectre visible de longueur d'onde correspondante (il ne faut pas confondre pourpre et violet). Le pourpre est la couleur obtenue quand le vert manque dans le spectre de lumière blanche. On est alors amené à définir la longueur d'onde complémentaire λ_c , ainsi que la luminance L_c telle que $L_c + L = L_0$

Le facteur de pureté étant défini de manière analogue à partir des pourpres purs. L'ensemble des deux grandeurs λ_d , p caractérise complètement l'aspect coloré d'une lumière. Quand on se place du point de vue de la perception on utilise les termes suivants :

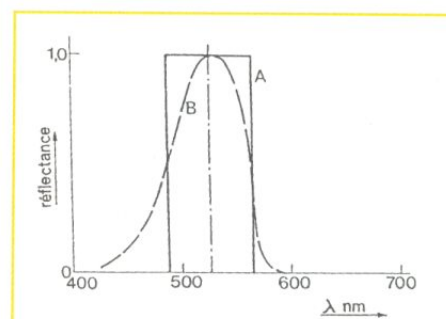
- clarté ou luminosité
- tonalité ou teinte
- saturation

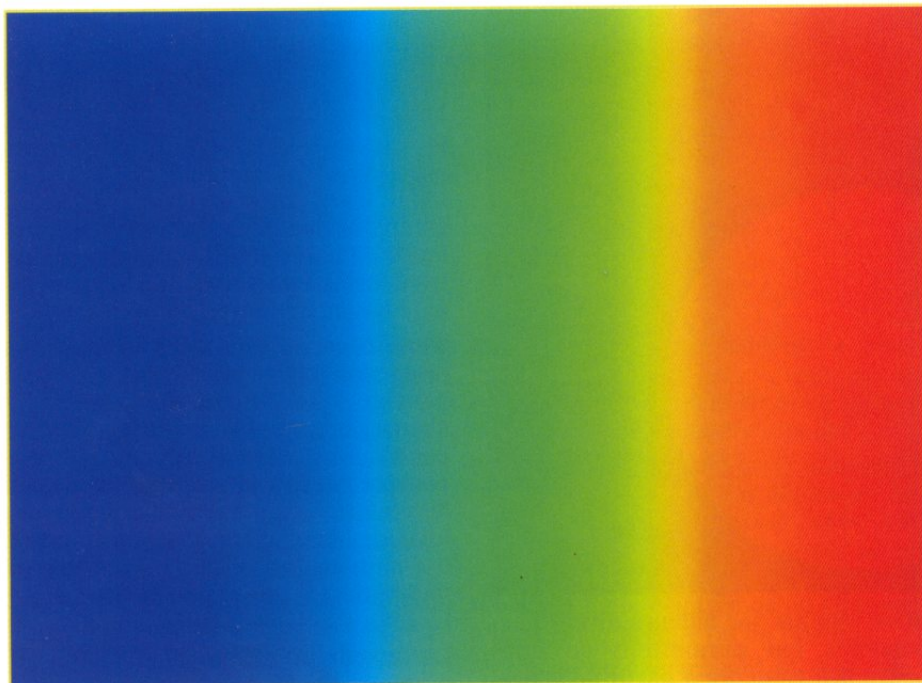
Si une couleur est à la fois claire et saturée, elle est dite **vive**; claire et lavée, elle est dite **pâle**; foncée et saturée, elle est dite **profonde**; foncée et lavée, elle est dite **rabattue**.

► Apparences des couleurs

On a vu que la perception de la couleur d'une lumière est intimement liée à sa composition spectrale. Ainsi la comparaison des documents (page suivante) montre la différence des spectres de lumière blanche et des spectres des lumières colorées bleue, verte, et rouge (on a représenté en ordonnée le pourcentage de lumière transmise en fonction de la longueur d'onde).

D'une manière générale les couleurs résultant d'une bande étroite de longueur d'onde sont les plus colorées car leur facteur de pureté se rapproche de l'unité. De même, les coupures franches dans le spectre génèrent des couleurs plus vives que les variations lentes (schéma ci-dessous).

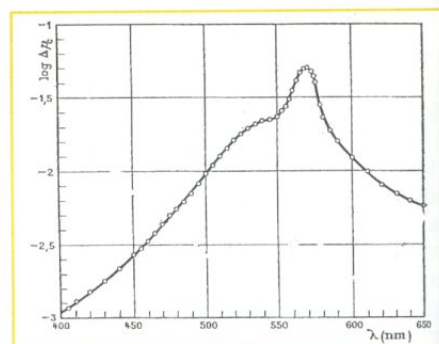




L'apparence visuelle des couleurs ne nous renseigne guère sur leur composition spectrale, c'est pourquoi on ne fait pas appel à l'origine physique des couleurs pour les caractériser, mais uniquement, le plus souvent, à leurs effets visuels.

► Seuil différentiel de pureté d'une couleur

A partir d'une couleur pure (monochromatique) il est possible d'obtenir, en ajoutant du blanc, un grand nombre de puretés différentes. On définit un seuil différentiel de pureté en opérant de la manière suivante :



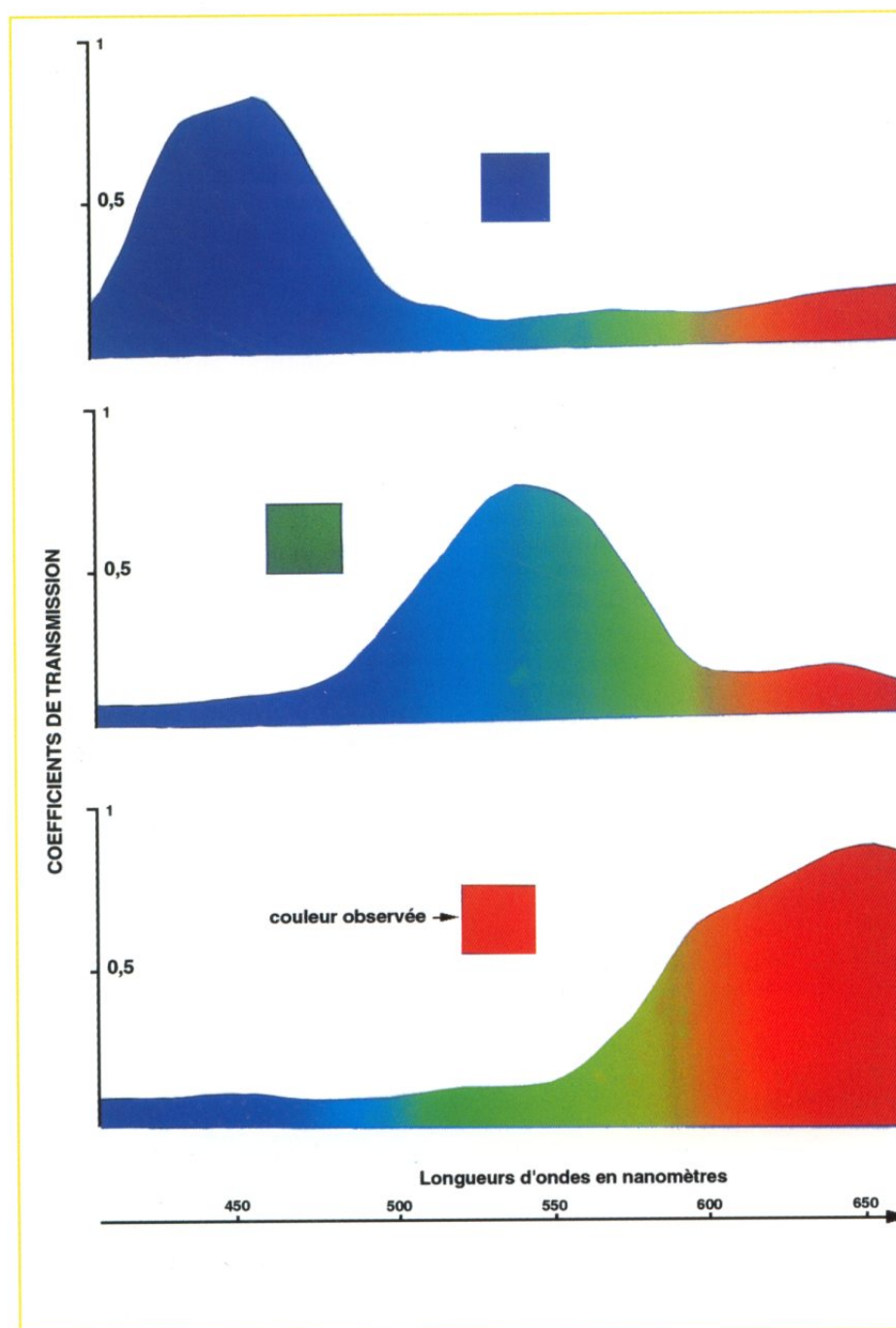
Deux plages sont éclairées en lumière blanche, avec une luminance L_0 . Sur l'une des plages on ajoute la luminance ΔL d'une lumière monochromatique λ , de manière que la différence de couleur entre les deux plages soit tout juste discernable. On en déduit

$$\Delta p = \frac{\Delta L}{L_0}$$

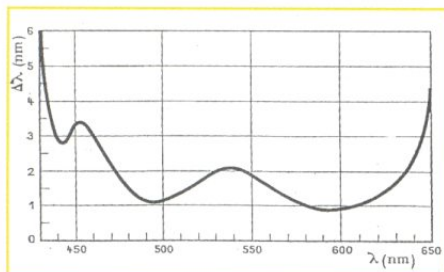
L'expérience montre que ce seuil varie beaucoup avec la longueur d'onde : il présente en particulier un maximum très marqué pour le jaune ($\lambda = 570 \text{ nm}$) (schéma ci-dessus) ce qui prouve que l'œil est peu sensible aux variations de pureté pour cette couleur. ($\Delta p_c = 0,05$). Il est même dans ce cas moins sensible aux variations de pureté qu'aux variations de luminance. En revanche la sensibilité est plus grande pour les courtes longueurs d'onde ($\Delta p_c = 0,001$ pour le bleu), c'est-à-dire que les propriétés colorantes du bleu sont beaucoup plus élevées que celles du jaune.

► Seuil différentiel des teintes

Supposons maintenant qu'on veuille évaluer l'aptitude à distinguer des teintes différentes. Pour cela on doit maintenir la luminance constante et faire varier la longueur d'onde λ qui provoque une sensation juste discernable de changement de teinte.



Les résultats sont reportés sur le schéma ci-dessous. On constate que la courbe présente deux minimums (490 et 590 nm) qui correspondent à une plus grande sensibilité pour le bleu-vert et le jaune. Sur l'ensemble du spectre visible on distingue environ 150 teintes pures différentes. En réalité les teintes qu'on peut identifier sans erreur sont beaucoup moins nombreuses, surtout si l'on veut utiliser les couleurs pour un codage précis.



► Phénomène de Purkinje

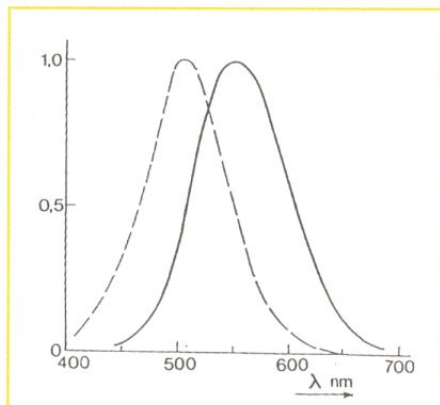
L'apparence des couleurs varie selon le niveau énergétique du rayonnement lumineux perçu. Il y a lieu de distinguer deux domaines de vision bien différenciés :

- la vision diurne (ou photopique) qui fait appel essentiellement aux cônes de la rétine.
- la vision nocturne (ou scotopique) qui fait appel aux bâtonnets

Entre les deux intervient une vision crépusculaire sensible aux variations de l'éclairage d'ambiance. Seule la vision photopique permet une bonne perception des chromaticités. La vision scotopique ne permet que d'apprécier les différences de luminosité.

Il en résulte une différence très marquée entre la vision diurne et la vision nocturne des couleurs.

Le jour, la sensibilité de l'œil est maximale pour $\lambda = 555$ nm et la nuit pour $\lambda = 510$ nm, ce qui explique le phénomène de Purkinje : deux plages, l'une bleue ou verte et l'autre rouge, ayant même luminosité à la lumière ou jour, changent complètement d'aspect en vision nocturne : la seconde paraît beaucoup plus sombre que la première. En fait les couleurs ne sont pas discernables.



► Constance des couleurs

Le système visuel est capable de s'adapter à des variations considérables d'éclairement. Par exemple, entre le jour et la nuit il existe un rapport de l'ordre de 10^{10} . Dans cette adaptation aux différents éclairagements le rétrécissement pupillaire ne joue qu'un rôle secondaire. En réalité cette "constante" de clarté indique que le système visuel analyse les rapports des éclairagements des différents objets, c'est-à-dire les contrastes. Une transposition d'un spectacle naturel sur une toile par un peintre est possible, alors même que le rapport extrême entre les luminances ne dépasse pas 50 sur la toile (davantage dans une diapositive).

Une autre propriété remarquable est la **constance de couleur**. Nous attribuons aux différents objets des couleurs propres qui les caractérisent, alors même que, selon les conditions d'éclairage, le spectre de la lumière qu'ils réfléchissent varie de manière importante, moins toutefois que l'intensité de l'éclairage au cours de la journée.

En réalité cette constance de couleur est perturbée par divers phénomènes, comme le contraste simultané.

► Influence du champ environnant

L'apparence de la couleur d'un objet déterminé est fortement influencée par le champ environnant ainsi que par les phénomènes d'adaptation et de contraste simultané.

Par exemple, une plage colorée vue sur fond blanc paraît plus saturée qu'en l'absence de fond. De même un fond noir désature les couleurs. Avec des champs environnants colorés on a montré que ce sont les teintes voisines ou égales à celles du fond qui paraissent désaturées.

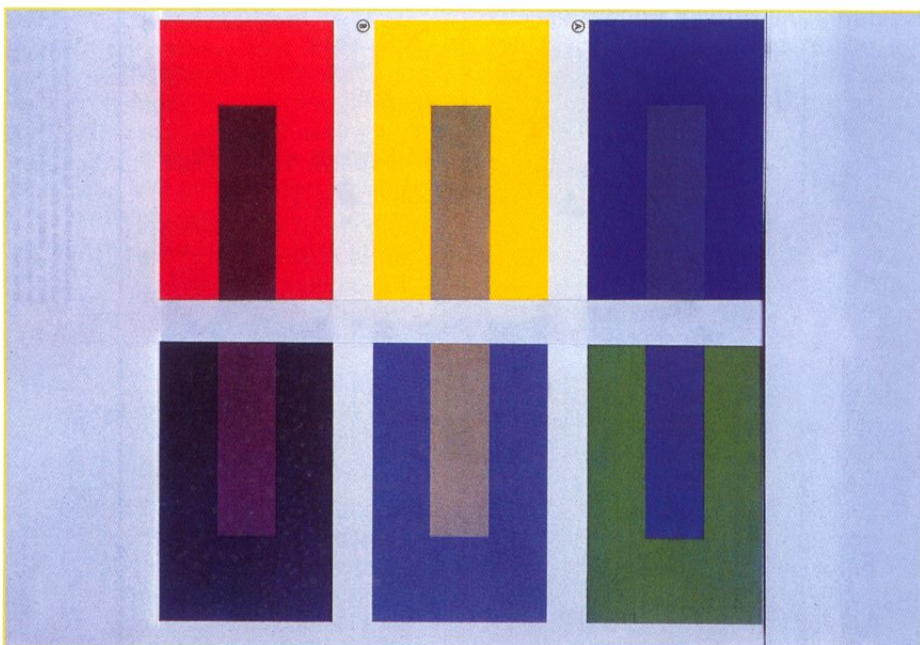
Le champ environnant agit également sur la discrimination des teintes : par exemple un fond de teinte complémentaire à celle observée diminue les seuils différentiels de teinte et de pureté. Avec un fond de teinte voisine ces seuils sont, au contraire, augmentés.

Les peintres ont souvent essayé d'exploiter ces caractéristiques de la vision. De nombreux effets, plus ou moins bien établis, font l'objet de recherches picturales. Par exemple, les ombres colorées ont donné lieu à des créations célèbres.

► Les ombres colorées

Léonard de Vinci est le premier, semble-t-il, à avoir décrit les ombres colorées mais c'est surtout à partir du XIX^{ème} siècle que les peintres ont cherché à tirer parti de ce phénomène, comme on peut le voir en particulier chez Renoir, Sisley et Monet. Dans la série célèbre des Cathédrales de Rouen, Monet a multiplié les effets avec des ombres bleues bordées d'orange. Qu'en est-il en réalité ?

Rumford, à la fin du XVIII^{ème} siècle, a décrit de manière précise un ensemble d'expériences que chacun est en mesure de reproduire. Pour cela, il faut se placer dans une salle obscure, disposer une grande surface blanche sur une table et se procurer deux sources de lumière. L'une de ces



Les bandes verticales sont identiques en haut et en bas.

sources peut être la lumière du jour qui pénètre par une ouverture ménagée dans un volet. L'autre est une lampe à incandescence. Il est intéressant de pouvoir faire varier le spectre de la source en l'alimentant sous tension variable; on peut obtenir des effets comparables en utilisant un filtre (par exemple un filtre jaune) qui a pour effet de modifier la température de couleur.

On place sur la nappe blanche un objet opaque de manière à obtenir deux ombres (S_1' et S_2'). Or, bien que les sources S_1 et S_2 émettent une lumière blanche, on constate que les ombres S_1' et S_2' sont colorées. Ainsi si S_1 est la lumière du jour et S_2 une lampe (ou une bougie) on constate que S_1' est jaune et S_2' nettement bleue.

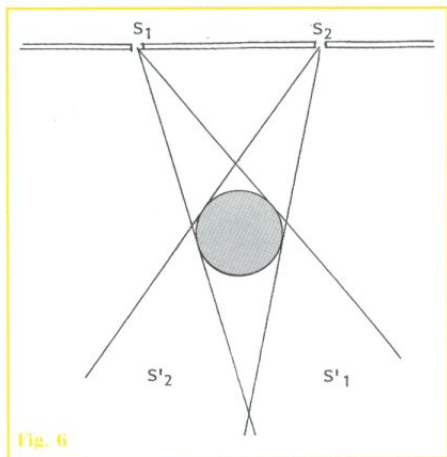


Fig. 6

On peut multiplier les expériences à partir du dispositif précédent. Par exemple, inverser les couleurs en plaçant un filtre jaune devant la source de lumière naturelle; utiliser deux lampes dont on modifie la couleur, etc...

Il apparaît que les couleurs obtenues sont liées à la différence entre les "blancs" de chaque source. Si les sources sont identiques les couleurs disparaissent. On peut ainsi contrôler avec précision l'égalité de deux sources. Il est également nécessaire que le fond sur lequel se détachent les ombres soit suffisamment étendu. On a montré que ces couleurs étaient complémentaires par rapport à ce fond. C'est Chevreul qui fit cette observation en 1839 et cette explication a été confirmée par des travaux récents portant sur les mécanismes de la perception colorée.

Avec le dispositif décrit ci-dessus, on observe en général des couleurs jaunes et bleues, mais il arrive que dans certaines circonstances on voie des couleurs vertes et pourpres. Il ne faut donc pas s'étonner de la couleur des ombres rencontrées chez certains peintres...

Le métamérisme

Deux couleurs ayant même composition spectrale sont toujours semblables, quelles que soient les conditions d'observation : elles sont dites **isomères**.

Nous avons déjà fait remarquer que deux couleurs de même apparence peuvent avoir des compositions spectrales très différentes. Ces couleurs sont dites **métamères** : elles ne sont semblables que dans des conditions d'observation bien définies.

Par exemple, les couleurs A et B représentées par leur spectre sur le schéma suivant ont même apparence bleu-vert lorsqu'elles sont éclairées par une lampe au xénon.

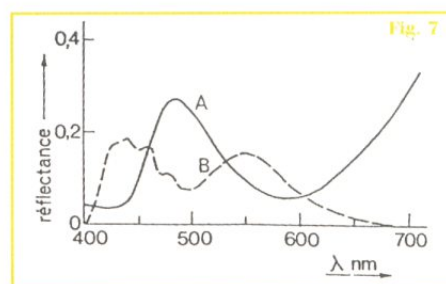


Fig. 7

Les changements d'apparence que peuvent subir les couleurs métamères permettent d'expliquer certaines anomalies dans la vision des peintres. Un exemple bien connu concerne Claude Monet qui fut handicapé pendant un certain temps par la cataracte. Dans un œil atteint de cataracte, tout se passe comme si on avait introduit un filtre jaune. Or, le peintre utilise pour reproduire les couleurs de la nature sur sa toile des pigments colorés qui ont une composition spectrale très différente de celle de la chlorophylle du feuillage, par exemple. En effet, la chlorophylle présente une bande d'absorption dans le rouge, alors que les peintures au chrome ont un spectre qui s'apparente davantage à des radiations monochromatiques.

Si le peintre a une vision normale (c'est-à-dire comparable à celle de tout le monde) les couleurs reproduites sur la toile sont les mêmes que celles du modèle : elles sont métamères, aussi bien pour le peintre que pour les spectateurs. Il n'en est plus de même lorsque le peintre voit à travers un "filtre" jaune, car le filtre n'affecte pas les couleurs observées, modèle et copie, de la même manière. Le peintre cherche naturellement à égaliser les teintes mais pour lui le résultat n'est pas le même que pour un œil normal. Il se trouve que dans le cas envisagé Monet était amené à utiliser plus de jaune qu'il n'est nécessaire pour un œil normal. On connaît ainsi plusieurs tableaux dont les anomalies picturales s'expliquent de cette manière.

D'autres anomalies de la vision ont été étudiées récemment. Signalons en particulier les travaux de Ph. Lanthony (*Daltonisme et peinture*, revue *TECHNE* n° 9-10, 1999).

Bibliographie

■ Ouvrages de base :

1. Yves LE GRAND :
"Optique physiologique"
• tome I, la dioptrique de l'œil et sa correction, 1964, 3^{ème} éd, Masson, Paris
• tome II, Lumière et couleurs, 2^{ème} 1972, Masson
• tome III, L'espace visuel, 1956, Masson
2. P. KOWALISKI :
"Vision et mesure de la couleur"
2^{ème} éd actualisée par F. VIENOT et R. SEVE 1990, Masson
3. R. SEVE :
"Physique de la couleur"
1996, Masson

■ Revues scientifiques

- F. VIENOT :
"La vision des couleurs, de la rétine au cerveau"
Revue du Palais de la Découverte n° spécial 44, octobre 1994
- S. ZEKI :
"La construction des images par le cerveau"
La Recherche n° 222 juin 1990
- Ensemble de la revue *TECHNE* :
"couleur et perception"
Centre de Recherche et de Restauration des musées de France.
CNRS UMR 171 n° 9-10, 1999.

Couleurs de la nature

par Roland Jouanisson

Ce n'est pas un hasard si tous les poètes ont chanté la Nature et si tous les peintres célèbres ou inconnus ont cherché, depuis des siècles, à en fixer les beautés sur leurs toiles. La nature nous offre en effet une extraordinaire gamme de formes et de couleurs qui changent sans arrêt selon les caprices du temps. Que nous soyons à la campagne ou à la ville, au printemps ou en automne, il y a toujours un phénomène intéressant à observer.

Pour cela il n'est pas même nécessaire de se munir d'instruments compliqués : nos yeux suffisent la plupart du temps.

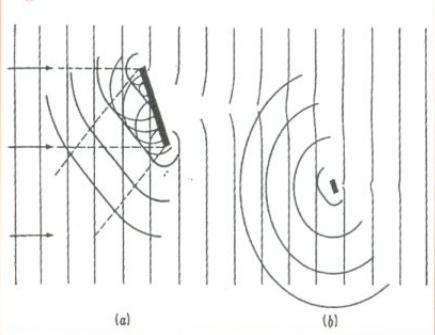
En revanche, il faut avoir l'esprit d'observation, qui ne peut s'acquérir que si l'on consent à faire un minimum d'efforts. Faute de quoi, beaucoup de choses restent inintelligibles et beaucoup de beautés insoupçonnées...

Devant un sujet aussi vaste, il était nécessaire de faire des choix : nous nous sommes limités à un aperçu des phénomènes variés que l'on peut rencontrer, en nous efforçant d'en donner une interprétation scientifique simple. Pour d'autres, bien connus, tels que l'arc-en-ciel, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie.

Diffusion de la lumière

Lorsque la lumière rencontre des particules de très petites dimensions, telles que les poussières de l'atmosphère, on observe des phénomènes qui ne peuvent s'expliquer par les lois de la réflexion. En particulier, si les particules ont des dimensions très inférieures à la longueur d'onde de la lumière elles se comportent comme des sources ponctuelles et elles réémettent des ondes sensiblement sphériques.

Fig. 1



On dit dans ce cas que la lumière est **diffusée**. La diffusion est en fait un cas particulier du phénomène général de la diffraction.

Rayleigh, en 1871, a émis l'hypothèse que la diffusion est à l'origine de la couleur bleue du ciel.

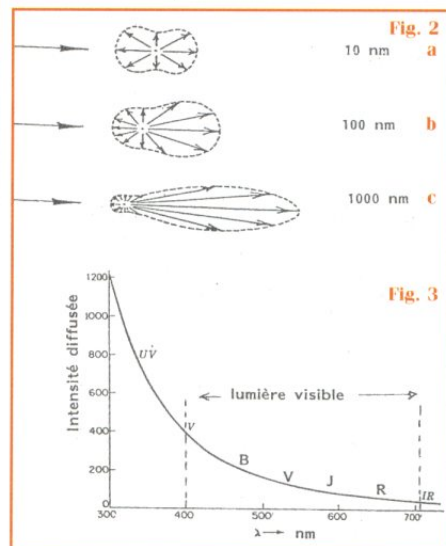
La théorie de Rayleigh s'applique à tout groupe d'atomes (et en particulier aux molécules des gaz) répartis dans un volume dont l'indice de réfraction est différent du milieu ambiant, et dont les dimensions sont petites devant la longueur d'onde de la lumière (par exemple, 20 fois inférieures). Dans ce cas les électrons sont tous soumis à la même excitation et émettent en phase, comme le ferait un électron isolé, à la différence près que l'intensité lumineuse est beaucoup plus grande que pour un électron isolé.

L'expérience montre que la lumière naturelle diffusée présente la symétrie de révolution autour de la direction de propagation. Dans un plan contenant cette direction, l'énergie diffusée est répartie comme l'indique la figure 2a. On notera qu'elle varie peu en fonction de la direction : il y a autant de lumière diffusée vers l'avant que vers l'arrière; toutefois, elle est plus faible dans la direction perpendiculaire à la direction incidente.

En revanche, la théorie de Rayleigh prévoit que la diffusion varie avec la longueur d'onde λ proportionnellement à $\frac{1}{\lambda^4}$ (fig.3).

Par exemple, il y environ 10 fois plus

de photons bleus ($\lambda \approx 400$ nm) diffusés que de photons rouges ($\lambda \approx 700$ nm).



Ainsi, dans une direction différente de la direction de la source, l'observateur reçoit une lumière riche en violet et en bleu et pauvre en jaune et rouge : cette lumière constitue le bleu du ciel. Simultanément la lumière transmise contient moins de photons bleus : elle est donc plus jaune que la source. La lumière transmise dans la direction de la lumière incidente est en fait la somme de deux termes, à savoir :

- la lumière non diffusée, appauvrie en bleu
- la lumière diffusée dans la direction considérée, qui est plus riche en bleu



A l'horizon le bleu du ciel est fortement lavé de blanc.

La somme des deux donne une lumière globalement appauvrie en bleu et cette lumière devient de plus en plus jaune quand le nombre de particules diffusantes rencontrées augmente. (fig.4)

Remarque : Le fait que la diffusion de la lumière soit à peu près la même dans toutes les directions de l'espace permet de comprendre pourquoi le ciel a pratiquement partout la même couleur, quelle que soit la position du soleil, (sauf pour les cas particuliers qui seront étudiés plus loin).

sion est la même dans toutes les directions, mais qu'elle diminue avec l'altitude, c'est-à-dire avec la raréfaction de l'air. (Les flèches représentées sont censées nous informer sur l'intensité lumineuse diffusée par un volume donné de gaz, dans une direction donnée).

La lumière provenant du zénith est diffusée par des rayons qui ont traversé une faible couche d'atmosphère : ils véhiculent une lumière pratiquement blanche et la lumière qu'ils diffusent est bleue ; cette lumière

re jaune voit une lumière blanchâtre (bleue très lavée de blanc).

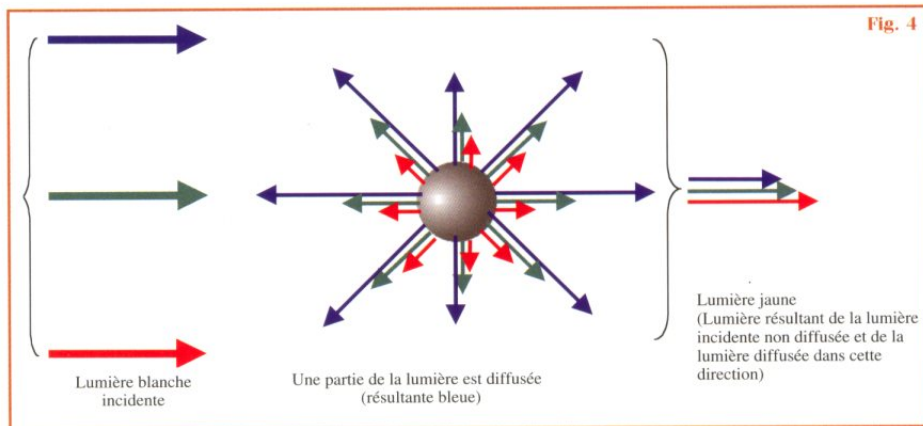


Fig. 4

Si la dimension des particules est comparable à la longueur d'onde, on ne peut plus considérer que tous les électrons d'une particule sont soumis à la même excitation (fig 1a). Leur réponse n'est pas aussi simple. Une théorie beaucoup plus complexe, due à Mie, doit être élaborée. On retiendra seulement de cette théorie, en ce qui nous concerne, que pour les grosses particules la lumière diffusée varie peu avec la longueur d'onde. Par exemple, un nuage formé de gouttelettes d'eau transparentes de $300\ \mu\text{m}$ de diamètre prend la couleur de la lumière qui l'éclaire.

► Couleurs du ciel

Les phénomènes de diffusion sont pour l'essentiel responsables de la couleur du ciel, qu'il s'agisse de la diffusion de Rayleigh sur les molécules des différents gaz de l'atmosphère ou de la diffusion de Mie sur des particules plus ou moins grosses qu'on rencontre à diverses altitudes (poussières d'origine volcanique en particulier). Les autres paramètres à prendre en considération sont l'épaisseur d'atmosphère traversée et la variation de densité avec l'altitude. Nous verrons également qu'il est nécessaire de faire intervenir l'absorption de la couche d'ozone.

A l'aide de la figure 5 on schématise la diffusion de Rayleigh dans deux directions principales, le zénith et l'horizon, pour une hauteur moyenne du soleil. On a supposé que la diffu-

bleue parcourt à son tour une distance faible avant de nous parvenir : en conséquence elle reste bleue. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, les distances considérées sont réduites et on reçoit de moins en moins de lumière : le bleu est plus foncé ; en dehors de l'atmosphère il n'y a plus de lumière diffusée et le ciel est noir.

Considérons maintenant le cas de la lumière provenant de l'horizon : pour les molécules situées près du sol on observe, comme précédemment une lumière diffusée bleue, mais au fur et à mesure qu'on s'éloigne sur la ligne d'horizon, on reçoit de la lumière qui a parcouru des distances de plus en plus grandes et s'est appauvrie considérablement en bleu, jusqu'à devenir jaune : l'observateur qui reçoit à la fois de la lumière bleue et une lumière

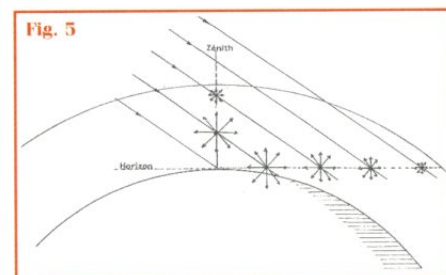


Fig. 5

De plus, dans les basses couches de l'atmosphère se trouvent des particules diverses qui diffusent une lumière plutôt blanche par effet Mie. L'explication précédente ne tient pas compte du fait que la couleur en un point dépend à la fois de la position du soleil et de l'influence du reste du ciel.

Dans la direction du soleil le ciel est très lumineux et la lumière est très blanche au point de devenir éblouissante (prendre des précautions pour faire cette observation). Cela nous suggère que la lumière diffusée par effet Mie est alors prépondérante à cause des grosses particules présentes dans la basse atmosphère.

A défaut d'être capable de prévoir la couleur et la luminosité du ciel en un point donné, on peut faire des mesures. Par exemple, on pourra réaliser une échelle de teintes bleues avec du blanc de zinc et du bleu de Prusse et comparer la couleur en un point donné avec les étalons. Ce type de mesure est indispensable si l'on veut étudier l'effet de divers facteurs comme les poussières, l'humidité, la pression, etc...

Pourquoi le ciel est bleu et non violet ?

La théorie de Rayleigh montre que la couleur la plus diffusée est le violet qui correspond à la longueur d'onde la plus faible. En réalité, il faut tenir compte de deux facteurs : il y a peu de lumière violette dans le spectre solaire et d'autre part le système visuel est



Le soleil est souvent rouge à l'horizon. Remarquer la déformation du disque.