

# COMPOSITION ET DECOMPOSITION DES COULEURS

La couleur est une composante importante de notre perception visuelle mais il est très difficile de la définir avec précision, toute description étant basée sur des termes subjectifs. Disons simplement que c'est la sensation qui résulte de l'interaction de la lumière visible avec les cellules de notre œil. A chaque longueur d'onde est associée une sensation physiologique différente que l'on qualifie de "couleur" : le violet vers  $0,4 \mu\text{m}$ , le vert vers  $0,5 \mu\text{m}$ , le jaune autour de  $0,55 \mu\text{m}$  et le rouge au-delà de  $0,6 \mu\text{m}$ .

Une couleur est définie par trois paramètres :

- **tonalité chromatique ou teinte** : définissant la nature de la couleur (jaune, vert, rouge...), elle est liée à la longueur d'onde dominante.

- **pureté** : définie par la proportion d'énergie émise à la longueur d'onde de tonalité, par rapport à l'ensemble de l'énergie émise, elle varie de 1 (couleur très pure à spectre pointu) à 0 (blanc) ; entre ces deux extrêmes existe une gamme de couleurs plus ou moins "pastel".

- **intensité ou luminosité** : définie par la quantité totale d'énergie du spectre de la couleur, elle décroît de 1 pour le blanc à 0 pour le noir.

La perception colorée d'un objet est liée à différentes composantes physiques, physiologiques et psychologiques : (illustration sur les spectres de la figure 1) :

- la composition spectrale  $E_S(\lambda)$  de la lumière éclairant le corps coloré (a),

- la réflectance spectrale  $R(\lambda)$  ou communément la couleur de l'objet observé (b),

- la perception physiologique via la courbe  $V(\lambda)$  de visibilité moyenne de l'œil humain (c),

Ainsi la perception spectrale  $p(\lambda)$  d'un objet coloré peut s'exprimer :  $p(\lambda) = V(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot E_S(\lambda)$ , comme le montre la figure 1 (d).

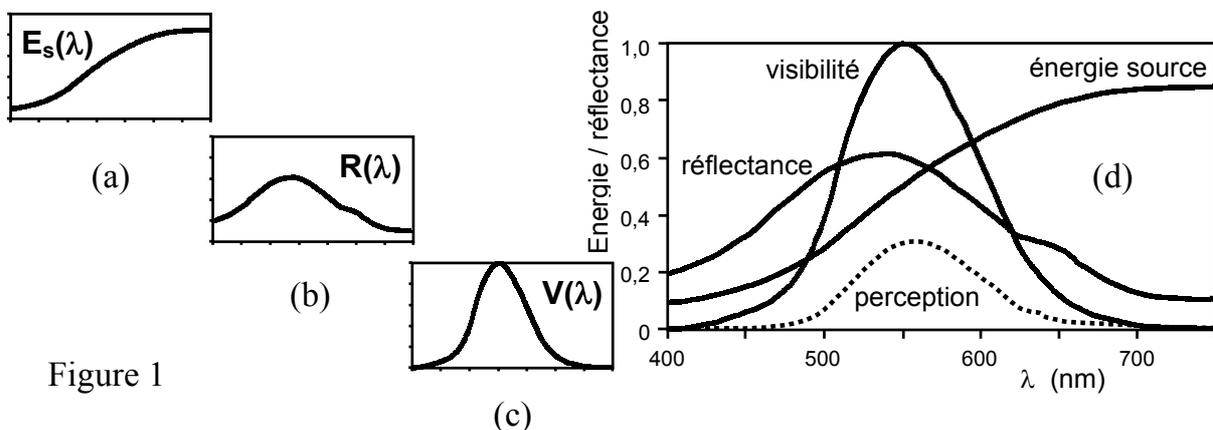


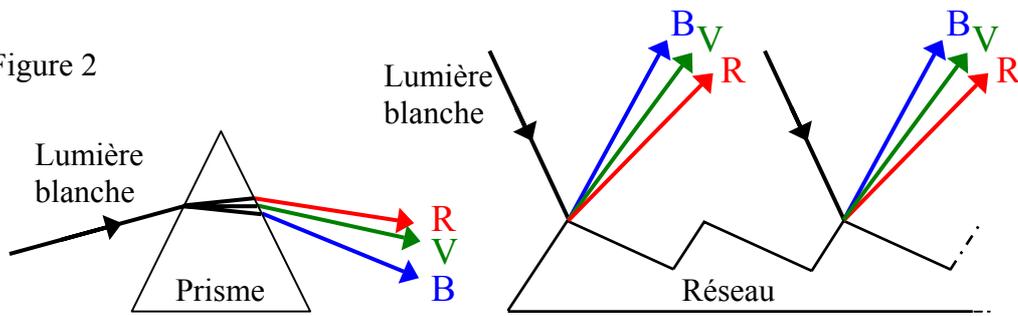
Figure 1

## DECOMPOSITION DE LA LUMIERE

En 1666, I. Newton observa, en éclairant un prisme de verre avec la lumière provenant du soleil, sur un écran placé sur le trajet des rayons réfractés une bande allongée et multicolore reproduisant la répartition colorée de l'arc-en-ciel, avec ses sept couleurs (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé et rouge). Il essaya ensuite de décomposer, suivant le même principe cette bande multicolore, sans succès. Chacune des couleurs de la bande est indivisible.

De nos jours, à l'aide d'un spectrocolorimètre équipé d'un prisme ou d'un réseau gravé, il est aisé d'analyser tout rayonnement qu'il provienne d'une source ou qu'il soit réfléchi ou diffusé par un matériau quelconque (voir schéma ci-après).

Figure 2



## COMPOSITION DE LA LUMIERE

Il était connu depuis longtemps (par les peintres notamment) que les couleurs de surface pouvaient être reproduites par mélange d'un nombre limité de matières colorantes (pigments).  
 35 Newton, dans sa vision de la blancheur de la lumière solaire résultant de toutes les couleurs primitives mêlées dans de justes proportions, ne réussit pas à montrer que l'association de deux couleurs seulement (paires rouge/bleu-vert ou jaune/bleu-violet) permettrait d'obtenir du blanc. Young (au début du 19<sup>ème</sup> siècle) montra que la lumière blanche n'est pas un objet physique unique et pressentit la trivariance de la perception des couleurs due à la présence dans la rétine de trois  
 40 types de détecteurs (voir le document annexe sur "l'œil et la vision des couleurs").

### Synthèse additive des couleurs

C'est à Maxwell (fin du XIX<sup>ème</sup>) que l'on doit la démonstration expérimentale : presque toutes les sensations visuelles créées par des lumières colorées peuvent être obtenues à l'aide d'un montage  
 (voir figure 3a) par superposition de trois lumières (stimulus de couleur de référence) appelées  
 45 primaires additives et dénommées R (rouge), G (vert) et B (bleu). Deux paramètres caractérisent chacun de ces stimulus : leur longueur d'onde ( $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 455,8 \text{ nm}$ ) ainsi que leur luminance (resp.  $L_R$ ,  $L_G$  et  $L_B$ ).

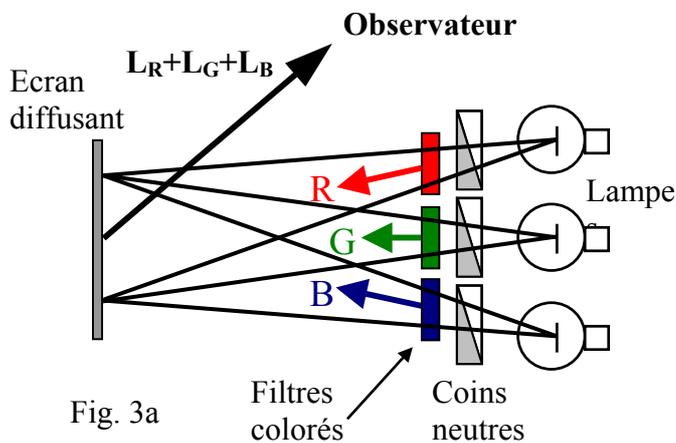


Fig. 3a

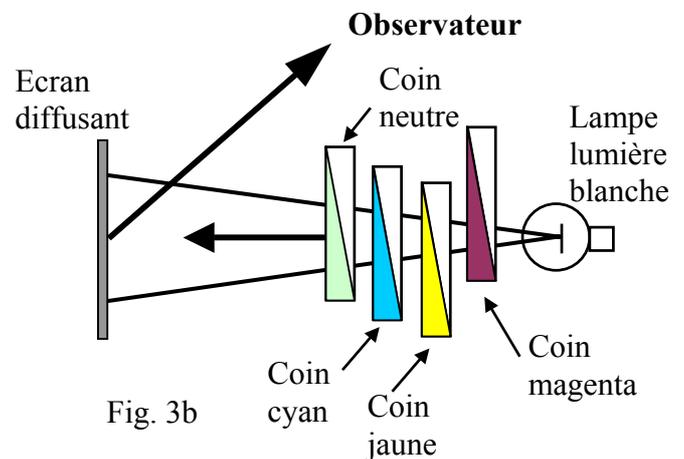


Fig. 3b

A partir de la connaissance des profils spectraux des luminances  $L(\lambda)$  des trois couleurs primaires (qui correspondent d'ailleurs au profils de transmission  $F(\lambda)$  de filtres optiques centrés sur les trois couleurs R, G et B) reproduits sur la figure 4,

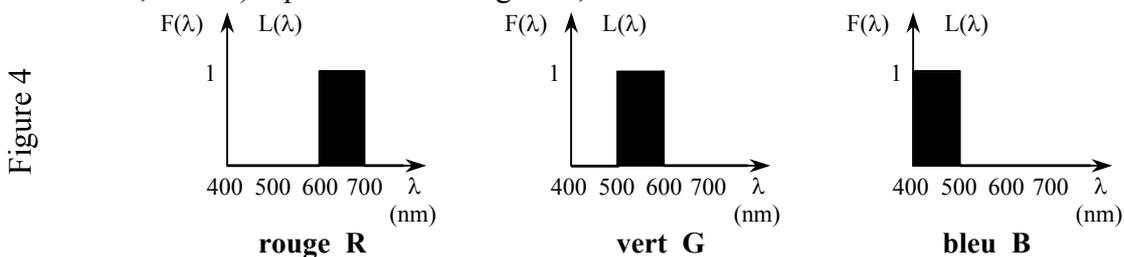
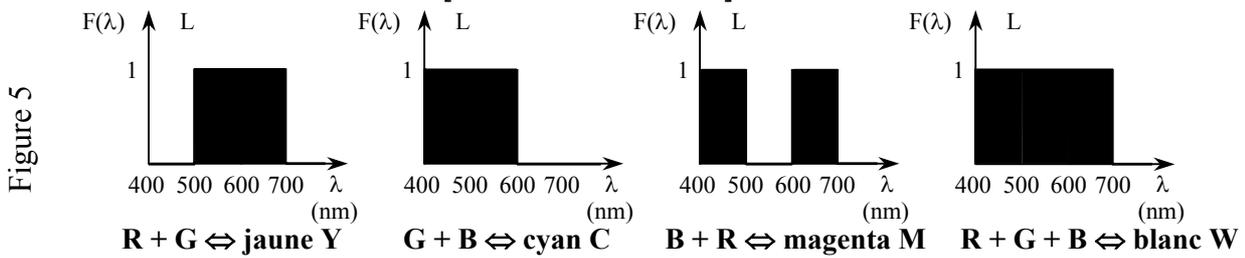


Figure 4

il est alors possible de représenter le résultat des combinaisons de ces couleurs deux à deux puis en ajoutant les trois, du type :  $E(\lambda) = [F_R(\lambda) + F_G(\lambda) + F_B(\lambda)] E_S(\lambda)$  comme le montre la figure 5 :

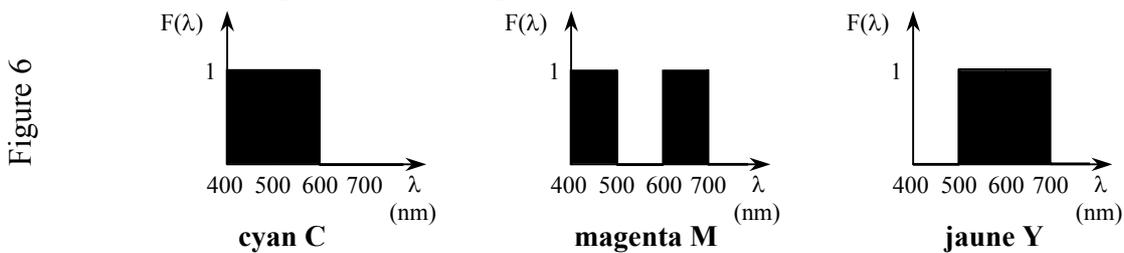


50 Cette technique est utilisée pour la reproduction de la couleur sur les écrans vidéo. Le faisceau électronique excite de petites cellules phosphorescentes (luminophores) rouges, vertes et bleues. L'œil ne peut pas les séparer et ne perçoit que la lumière résultant de la combinaison additive des trois sources (l'image élémentaire est formée de points élémentaires appelés pixels).

### Synthèse soustractive des couleurs

55 Afin d'obtenir une couleur souhaitée, il est également possible de réduire de manière graduée les différentes régions spectrales d'une lumière blanche, par l'interposition de filtres colorés tels que les filtres cyan (C), magenta (M) et jaune (Y) qui constituent le système CMY.

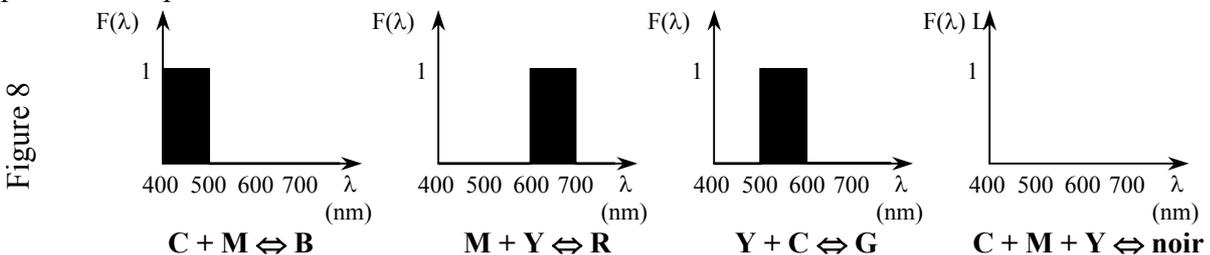
A partir de la connaissance des profils de transmission de filtres optiques centrés sur les trois couleurs C, M et Y reproduits sur la figure 6 ci-dessous :



60 A l'aide d'un montage approprié, comparable au précédent (fig 3b), il est aisé de réaliser cette synthèse soustractive ; il est alors possible d'écrire des relations du type :

$$C = 1 - R \quad M = 1 - G \quad Y = 1 - B$$

L'analyse spectrale de ces combinaisons multiples de deux et même des trois filtres, avec une relation générale du type :  $E(\lambda) = F_C(\lambda) \cdot F_M(\lambda) \cdot F_J(\lambda) \cdot E_S(\lambda)$ , montre (figure 8) l'étendue des possibilités qui sont offertes :



70 Cette technique est utilisée pour produire la couleur en imprimerie. Chacun des trois colorants de base cyan, magenta et jaune (appelés primaires soustractifs) absorbe les ondes d'une primaire additive (R, G ou B) et réfléchit les ondes des deux autres. Dès lors le mélange des trois pigments de base permet d'obtenir la plupart des couleurs. En particulier, pour obtenir une primaire additive, il suffit de combiner les deux pigments qui ne l'absorbent pas.

En fait les primaires soustractives sont en réalité quatre. Devant la difficulté de produire des pigments C, M et Y purs, la combinaison des trois fournit du brun foncé à défaut d'obtenir du noir (figure 8). Il convient alors d'utiliser une quatrième primaire : le noir K pour black (procédé d'impression quadrichromique et système CMYK).

## Métrie des couleurs

Grassman en 1853 énonça une série de lois mettant en évidence le caractère additif de la perception humaine des couleurs. Si on ajoute une même quantité de lumière à deux plages produisant la même impression colorée sur l'œil, l'égalité des teintes perçues par l'œil subsiste (additivité). L'égalité persiste si la luminance des deux plages est multipliée par un même nombre (multiplicativité). L'équilibre colorimétrique ne se modifie pas en remplaçant le mélange de plusieurs couleurs par une couleur de même aspect (associativité). Si deux lumières colorées sont identiques à une troisième, elles sont toutes les trois identiques entre elles (transitivité).

### Hypothèse de proportionnalité (Maxwell)

La vision humaine étant impropre à évaluer quantitativement les couleurs mais étant plus sensible aux différences entre teintes colorées, la mesure de couleur est faisable à condition de procéder par comparaison avec une teinte de référence (égalisation colorimétrique).

Si un observateur reproduit la sensation de luminance et de couleur donnés par un stimulus chromatique  $C(\lambda)$  en additionnant trois stimulus de couleur de référence R, G, B, il réalise une égalité colorimétrique représentée par l'équation chromatique :  $C(\lambda) \Leftrightarrow \alpha_R L_R + \alpha_G L_G + \alpha_B L_B$  où  $L_R, L_G, L_B$  représentent les luminances des stimulus primaires permettant de réaliser l'égalisation et  $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ , les intensités des projecteurs rouge, vert, bleu. Le signe  $\Leftrightarrow$  ne traduit pas une opération de calcul mais une égalisation visuelle de couleur et de luminance. Afin d'éviter toute confusion avec les luminances énergétiques et les problèmes d'unités, il est autorisé d'écrire R pour  $L_R, \dots$  et ainsi :  $C(\lambda) \Leftrightarrow \alpha_R R + \alpha_G G + \alpha_B B$ .

Les composantes trichromatiques R, G, B sont définies à partir des fonctions colorimétriques  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$  des trois sources, avec par exemple pour le rouge [d'intensité spectrale  $S(\lambda) = R(\lambda) \cdot E_s(\lambda)$ ] :  $R = \int S(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$  (intégrale réalisée sur le domaine visible).

Si l'équation chromatique :  $k C(\lambda) \Leftrightarrow k \alpha_R R + k \alpha_G G + k \alpha_B B$  maintient l'égalité de luminance et de couleur,  $k$  étant un facteur quelconque, l'hypothèse de proportionnalité est vérifiée.

Dans le cas où des teintes resteraient inaccessibles, on pourrait superposer la lumière d'un des projecteurs à  $C(\lambda)$ , avant de reprendre la procédure d'égalisation ; alors par exemple :

$$C(\lambda) + |\alpha_B| B \Leftrightarrow \alpha_R R + \alpha_G G, \text{ la composante } \alpha_B \text{ étant négative.}$$

Un blanc qualifié d'"équiénergie" (noté E ou bien W pour white) est obtenu en combinant une unité de chacun des projecteurs :  $R_W = G_W = B_W = 1$ .

### Espace chromatique

Dans l'espace chromatique (R,G,B) décrit par la figure 9a, les points représentatifs de tous les stimulus qui ont une même composition spectrale relative sont sur une droite OC passant par O. Il est alors possible de séparer les variables luminances (longueur du segment OC) et couleur (deux angles définissant la direction OC).

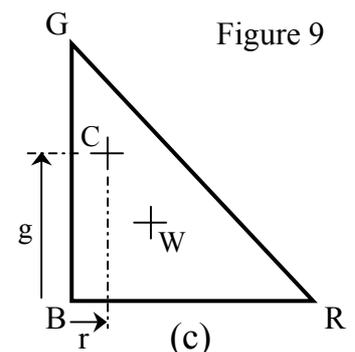
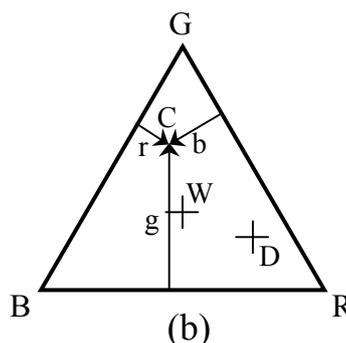
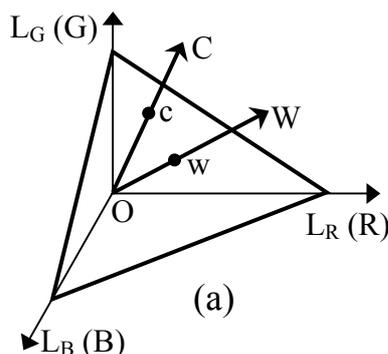


Figure 9

110 **Système métrique RGB**

Afin de quantifier cette mesure de couleur, Maxwell introduisit le triangle des couleurs : triangle dont les sommets sont sur les axes de coordonnées ; la trace de OC dans ce plan est un point c dont les deux coordonnées, indépendantes du niveau de luminance, fournissent l'information de chromaticité. Dans ce triangle les coordonnées trichromatiques (r,g,b) de tout point c peuvent être  
 115 déduites des trois composantes trichromatiques R, G, B par les relations :

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B}, \quad [R1]$$

ces coordonnées étant liées par la relation :  $r + g + b = 1$ . Il suffit donc de deux termes, r et g par exemple, pour localiser le point. Ce triangle peut être choisi équilatéral ou rectangle isocèle (figures 9b et 9c).

120 Ce mode de description des couleurs a été normalisé en 1931 par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage). Les primaires comprennent une lampe rouge ( $\lambda = 700$  nm), une verte ( $\lambda = 546$  nm) , une bleue ( $\lambda = 436$  nm). Les puissances de ces lampes ont été ajustées à un facteur multiplicatif près de telle sorte que la sensation colorée soit, par addition, celle d'un blanc équiénergie de densité spectrale constante. En choisissant une lampe rouge de 1 lumen, la verte doit  
 125 produire une sensation de 4,59 lumen et la bleue de 0,06 lumen (en termes de puissance - en watts - la lampe rouge est 72,1 fois plus puissante que la bleue et la verte 1,38 fois plus puissante que la bleue).

Ces possibilités de représentation des opérations colorimétriques dans le plan du triangle des couleurs ont conduit à la notion de diagramme de chromaticité tel que celui représenté sur la figure  
 130 10, où les trois couleurs de base sont les sommets du triangle rectangle (1,0) pour R, (0,1) pour G et (0,0) pour B. Le blanc "équiénergie" occupe le point (1/3,1/3) du diagramme. Les couleurs spectrales, monochromatiques, de longueur d'onde  $\lambda$  peuvent y être représentées par le contour d'équations paramétriques :  $r = r(\lambda)$  et  $g = g(\lambda)$  (représenté figure 10).

**Diagramme CIE XYZ et diagramme CIE 1931**

135 La CIE en 1931 adopta le système XYZ proposé par F. Judd. La procédure expérimentale reste la même que pour le système RGB précédemment étudié, les coordonnées X,Y,Z étant simplement obtenues par une transformation projective, linéaire, des coordonnées R,G,B précédentes (évolution dictée par le désir d'éliminer les coefficients négatifs).

Les nouvelles coordonnées s'expriment en fonction des anciennes par la relation matricielle :

$$140 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4185 & -0,1587 & -0,0828 \\ -0,0912 & 0,2524 & 0,0157 \\ 0,0009 & -0,0026 & 0,1786 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad [R2]$$

On peut ensuite normaliser les coordonnées X,Y,Z pour définir la seule couleur (abstraction des luminances) dans un diagramme plan à deux coordonnées x,y :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{0,20+0,29 r+0,11 g}{1,201-0,534 r-0,068 g} \quad , \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} = \frac{0,01+0,166 r+0,802 g}{1,201-0,534 r-0,068 g} \quad [R3]$$

145 De la sorte le paramètre y n'est plus directement proportionnel à la luminance, par contre les coordonnées restent toujours positives. Ce diagramme est représenté sur la figure 11. On y retrouve le contour des couleurs spectrales et entre les points représentant les primaires rouge et bleue, la droite dite des pourpres. Le point E de coordonnées (1/3,1/3) y représente le blanc équiénergie ou blanc idéal. La couleur complémentaire de la couleur spectrale A est la couleur A'.

150 Cet espace chromatique est la base scientifique de la colorimétrie moderne, couramment utilisée aujourd'hui pour le repérage et la comparaison des couleurs mais qui demeure un "outil" en adaptation permanente.

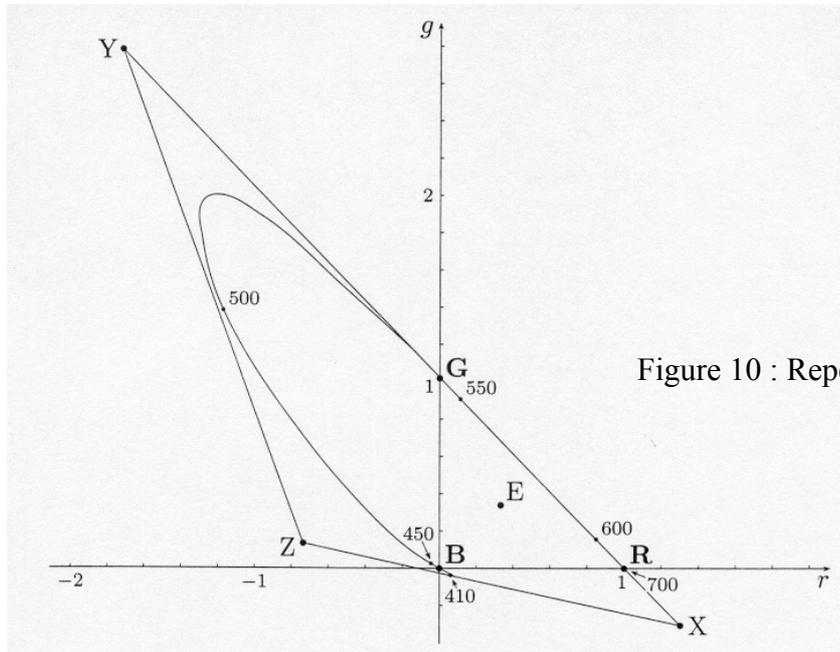


Figure 10 : Repère RGB

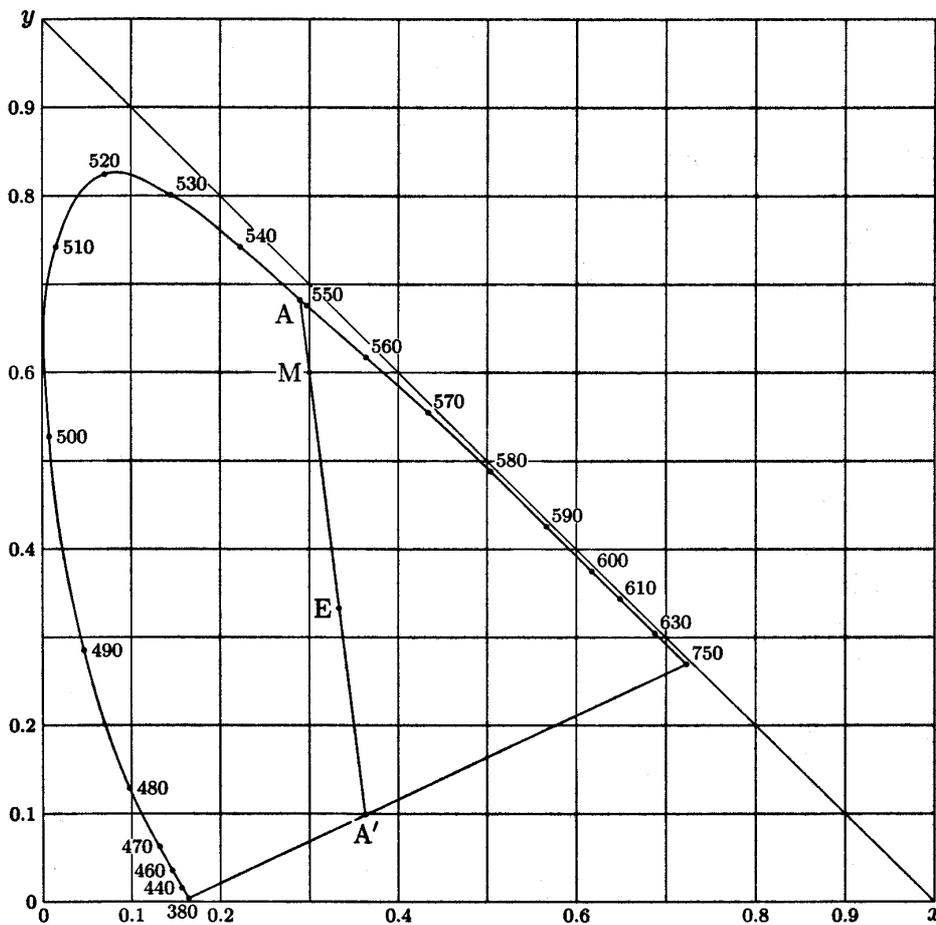


Figure 11 : Repère CIE (1931)

## COULEURS INTERFERENTIELLES (MP)

155 *Cinquante ans avant notre ère, le poète et physicien latin Lucrèce se demandait si les couleurs résidaient dans les corps ou si la lumière seule les portait : "Liée à la lumière, la couleur change avec la lumière, qu'elle renvoie différemment selon qu'elle est frappée de rayons perpendiculaires ou obliques. En 1704, I. Newton étudia les lames minces transparentes, telles les parois minces des bulles de savon ou des films minces d'huile flottant à la surface d'un liquide ainsi que les minces couches d'oxydes recouvrant certains métaux.*

160 *Dans tous ces cas, l'élément essentiel est la minceur de la lame transparente. Celle-ci crée les conditions d'une interférence entre deux faisceaux, réfléchis par les interfaces successives. L'effet est culminant lorsque l'épaisseur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière. Dans le cas d'une lumière blanche, la lame mince renvoie une faible fraction du rayonnement incident, en sélectionnant telle ou telle composante colorée selon l'angle d'observation et l'épaisseur de la lame. Les motifs, souvent complexes, des irisations (du nom de la déesse de l'arc en ciel, Iris) à la surface des couches minces d'huile ou des bulles de savon sont liés à des variations locales de l'épaisseur des lames minces.*

### Lumière réfléchi par une lame mince

170 Considérons comme exemple simple le cas d'une lame mince d'huile (d'indice de réfraction  $n \approx 1,5$ ) flottant sur de l'eau (indice  $n_1 = 1,33$ ), éclairée et observée sous incidence normale. Contrairement à ce qui se passe pour la réfraction ou la réflexion de la lumière à la surface d'un matériau épais, une partie de la lumière incidente est réfléchi en pénétrant le film et une autre partie en le quittant. Le champ électromagnétique qui frappe notre œil est la somme de deux ondes planes déphasées, ce qui donne naissance à des interférences constructives ou destructives.

175 Dans chacun des milieux (air, huile, eau) le champ électrique  $\vec{E}$  est la solution de l'équation de propagation :

$$\Delta \vec{E} + k_i^2 \vec{E} = 0 \quad [R4]$$

où le nombre d'onde  $k_i$  vaut  $k_0 = \omega/c$  dans l'air,  $k = n k_0$  dans l'huile et  $k_1 = n_1 k_0$  dans l'eau.

180 Supposons une onde de pulsation  $\omega$  se propageant dans la direction  $z$  ; le champ électrique au-dessus de la nappe ( $z > h$ ) est polarisé dans la direction  $\vec{e}_y$  :

$$\vec{E}_I = (A e^{-ik_0 z} + C e^{ik_0 z}) e^{-i\omega t} \vec{e}_y \quad [R5]$$

Dans le film ( $-h \leq z \leq h$ ), d'indice  $n$ , le champ s'écrit :

185 
$$\vec{E}_{II} = (F e^{-ink_0 z} + G e^{ink_0 z}) e^{-i\omega t} \vec{e}_y \quad [R6]$$

En supposant que l'eau est assez profonde pour que l'onde transmise ne soit pas réfléchi, le champ électrique dans le milieu III ( $z \leq -h$ ), d'indice  $n_1$ , vaut :

$$\vec{E}_{III} = D e^{-in_1 k_0 z - i\omega t} \vec{e}_y \quad [R7]$$

190 Les amplitudes  $A, C, D, F, G$  sont reliées par les conditions de continuité des champs électriques et magnétiques aux interfaces :

$$[R8] \quad \begin{cases} A e^{-ik_0 h} + C e^{ik_0 h} = F e^{-ink_0 h} + G e^{ink_0 h} \\ F e^{ink_0 h} + G e^{-ink_0 h} = D e^{in_1 k_0 h} \end{cases} \quad \left| \quad \begin{cases} k_0 (A e^{-ik_0 h} - C e^{ik_0 h}) = nk_0 (F e^{-ink_0 h} - G e^{ink_0 h}) \\ nk_0 (F e^{ink_0 h} - G e^{-ink_0 h}) = n_1 k_0 D e^{-in_1 k_0 h} \end{cases} \quad [R9]$$

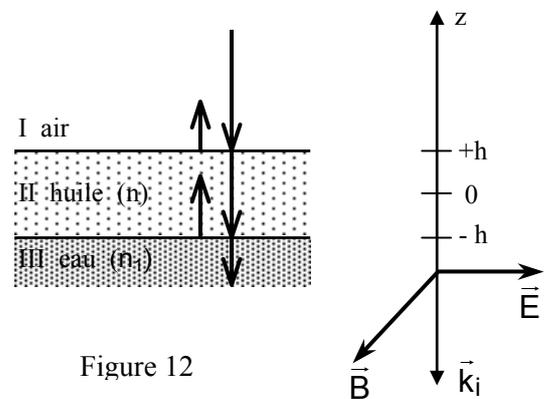


Figure 12

De ces quatre équations, on déduit le facteur de réflexion (énergétique) de la nappe :

$$R = \left| \frac{C}{A} \right|^2 = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{1 + \left( \frac{n-n_1}{n+n_1} \frac{n+1}{n-1} \right)^2 - 2 \left( \frac{n-n_1}{n+n_1} \frac{n+1}{n-1} \right) \cos(4nk_0h)}{1 + \left( \frac{n-n_1}{n+n_1} \frac{n-1}{n+1} \right)^2 - 2 \left( \frac{n-n_1}{n+n_1} \frac{n-1}{n+1} \right) \cos(4nk_0h)} \quad [R10]$$

Le coefficient de réflexion varie avec l'épaisseur optique de la couche. Comme l'indice de l'huile est supérieur à celui de l'eau, le coefficient R est maximum si l'épaisseur de la couche est telle que :

$$4nk_0h = (2p+1)\pi, \text{ où } p = 0, 1, 2, \dots \text{ et vaut : } R_{\max} = \left( \frac{n-n_1}{n+n_1} \right)^2 \quad [R11]$$

condition pouvant également s'écrire :  $2nh = (2p+1) \lambda_0 / 4$ .

Le coefficient de réflexion est minimum si :

$$4nk_0h = 2p\pi, \text{ ou } 2nh = p \lambda_0 / 2, \text{ où } p = 1, 2, \dots \text{ et vaut : } R_{\min} = \left( \frac{n_1-1}{n_1+1} \right)^2 \quad [R12]$$

(si l'indice n du film est inférieur à celui du substrat,  $n < n_1$ , maxima et minima sont inversés).

Les films d'huile qui flottent à la surface de l'eau sont en général très minces, de l'ordre de la longueur d'onde. Si l'épaisseur du film  $2h$  est égale à la longueur d'onde violette, alors ce film ne réfléchit que très peu la lumière violette ; par contre, il réfléchit la lumière rouge de longueur d'onde  $\lambda_R \sim 2\lambda_V$ .

Si l'épaisseur du film est irrégulière, et que l'œil regarde un autre endroit où le film est plus épais, l'effet peut être inversé, le rouge étant plus réfléchi que le bleu.

### Irisation

Ces couleurs changent également si nous regardons le film sous des angles différents : le chemin optique et donc le déphasage varie entre deux ondes réfléchies. Ainsi voyons-nous des couleurs se succéder quand nous regardons une flaque d'huile sous des incidences variables.

Considérons, parmi les rayons qui parviennent à l'observateur regardant le film sous un angle  $i$ , celui réfléchi en C à la surface externe de la lame et celui réfracté en A puis réfléchi en B au contact huile-eau. La différence de marche géométrique  $\ell$  entre ces deux rayons vaut :

$$\ell = (AB + BC) n - A'C = \frac{4nh}{\cos(r)} - 4nh \tan(r) \sin(r).$$

$$\text{soit } \ell = 4nh \cos(r). \quad [R13]$$

- la condition, pour que les interférences soient constructives, s'écrit alors :

$$2nh \cos(r) = (2p+1) \lambda_0 / 4 \quad [R14]$$

- les interférences sont destructives si :  $2nh \cos(r) = p \lambda_0 / 2$ . [R15]

Regardée à la verticale ( $r=0$ ), la couleur du film est celle de la lumière réfléchie  $\lambda_0$  déterminée par [R14] :  $(2p+1) \lambda_0 / 4 = 2hn$ . Plus on s'écarte de la verticale, plus l'angle de réfraction  $r$  augmente, plus la longueur d'onde réfléchie diminue. Dans l'exemple étudié, si le film apparaît rouge quand on le regarde de dessus ( $i=0$ ), il devient bleu dès que l'on penche la tête, puis redevient rouge si on le regarde davantage de côté : la couleur est irisée.

La couleur des bulles de savon a la même origine que celle du film d'huile. La différence vient de ce que le milieu III, l'intérieur de la bulle est aussi de l'air d'indice  $n_1 = 1$ , comme le milieu I. Dans ce cas la valeur minimale du coefficient de réflexion est nulle.

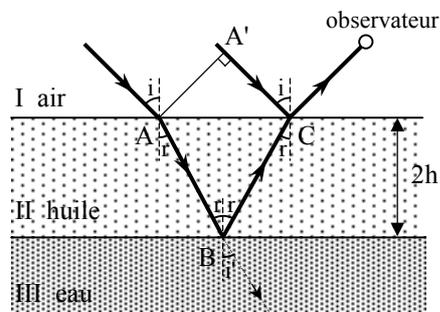


Figure 13

## Traitement antireflet des surfaces

235 Ce traitement a pour but d'éviter les pertes de flux lumineux incident par réflexion ; ainsi dépose-t-on sur le premier verre des lentilles d'un objectif photographique, d'indice  $n$ , une couche d'un matériau transparent d'indice  $N$  et d'épaisseur  $e$  (figure 14).

Afin que l'interférence par réflexion soit totalement destructive (pas de lumière réfléchie), deux conditions doivent être réalisées :

- 240 •  $N$  doit être tel que les facteurs de réflexion sur les deux faces,  $r_1$  et  $r_2$  soient égaux. Lorsque l'amplitude de l'onde incidente vaut l'unité, les amplitudes des deux premiers rayons réfléchis valent respectivement :  $r_1$  et  $t_1 r_2 t_1'$  avec :

245 
$$r_1 = \frac{n_a - N}{n_a + N}, \quad r_2 = \frac{N - n}{N + n}, \quad t_1 = \frac{2}{1 + N}, \quad t_1' = \frac{2N}{1 + N} \quad [R16]$$

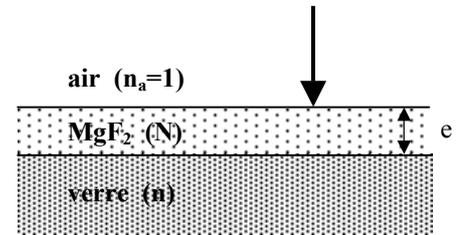


Figure 14

$r_1$ ,  $r_2$  étant les facteurs de réflexion des deux dioptries et  $t_1$ ,  $t_1'$  les facteurs de transmission sur la première face dans les sens incident et réfléchi (en se plaçant dans des conditions d'éclaircissement proche de la normale au dioptré d'entrée). Comme  $N \approx 1$ , la condition  $r_1 = r_2$  se traduit pour  $N$  par la condition :  $N \approx \sqrt{n_a n}$ . Ainsi,  $N$  doit être compris entre  $n_a$  et  $n$  : si  $n_a = 1$  (air) et  $n = 1,52$  (verre crown),  $N = 1,23$ . On s'approche de cet indice grâce à des matériaux naturels comme le fluorure de magnésium,  $MgF_2$  ( $N = 1,35$ ), qui est déposé sur le verre par évaporation sous vide.

- La différence de phase  $\Phi_R$ , qui vaut  $(2\pi/\lambda_0) 2Ne$  doit être égale à  $(2p+1)\pi$ ,  $p$  étant un entier.

L'épaisseur  $e$  de la couche de traitement doit valoir : 
$$e = \left(p + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0}{2N}, \quad [R17]$$

soit une épaisseur minimale de : 
$$e = \frac{\lambda_0}{4N}.$$

255 Lorsque la lumière incidente est blanche, l'épaisseur  $e$  de la couche déposée est uniquement celle relative à la longueur de sensibilité maximale (jaune-vert) . Pour les autres radiations, l'interférence n'est pas totalement destructive ; c'est pourquoi la teinte complémentaire, constituée de reflets bleus et violets, est visible par réflexion sur les verres des objectifs photographiques. Grâce à cette technique, des facteurs de réflexion (en intensité) inférieurs à 1% peuvent être  
260 obtenus.