

Colorimétrie

L'homme est sensible aux rayonnements lumineux dans le domaine de longueur d'onde 380 - 780 nm. La rétine possède trois types de cellules appelées cônes présentant des courbes spectrales différentes. Comme il y a trois types de récepteurs sensibles dans des régions différentes du spectre visible il est possible de reproduire les sensations physiologique liées à la couleur à partir d'un mélange de trois couleurs de base selon une pondération respective de ces couleurs de bases. En fait la couleur n'existe pas de façon intrinsèque, c'est le couple œil-cerveau qui la "crée". La "mesure" de la couleur est difficile à quantifier car intervient l'"interprétation" faite par le cerveau des stimuli reçus.

Décomposition-recomposition de la lumière

La lumière solaire est constituée de la superposition d'une infinité d'ondes monochromatiques de différentes longueurs d'onde. Quand la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nm, l'œil perçoit une couleur caractéristique de celle-ci. Un prisme est capable de séparer les différentes couleurs de la lumière blanche, on obtient ainsi un spectre continu¹. C'est le phénomène de dispersion chromatique (figure 1).

Si le premier tiers du spectre est focalisé en un point avec une lentille la teinte perçue par l'œil correspond au bleu. Pour les radiations correspondant au milieu du spectre l'œil perçoit du vert. La superposi-

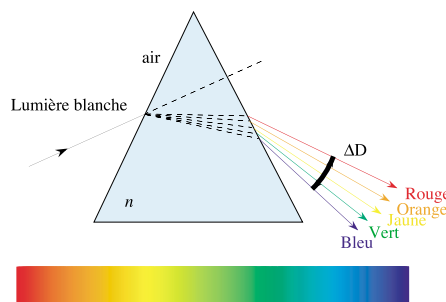


Figure 1. Spectre de la lumière blanche

tion des radiations du troisième tiers donne une sensation de rouge. Ces trois couleurs sont les couleurs primaires de la synthèse additive.

Dans le cas où l'on réalise la superposition des deux tiers du spectre on obtient respectivement la couleur cyan et jaune (figure 2). Ce sont deux couleurs monochromes du spectre. Il est possible aussi de réaliser une autre teinte en faisant superposer le premier tiers d'un spectre d'une source lumineuse blanche avec le troisième tiers d'une autre source lumineuse blanche identique à la première. La couleur obtenue est le magenta non présent dans le spectre obtenu par la décomposition de la lumière solaire par un prisme. Les trois couleurs : cyan, jaune et magenta sont des couleurs secondaires de la synthèse additive ou encore les couleurs primaires de la synthèse soustractive.

Synthèse additive

Un objet blanc éclairé par deux faisceaux lumineux rouge et vert de même intensité va apparaître jaune puisqu'il va réfléchir tout l'ensemble des rayons colorés appartenant au 2/3 du spectre (figure 2). La figure

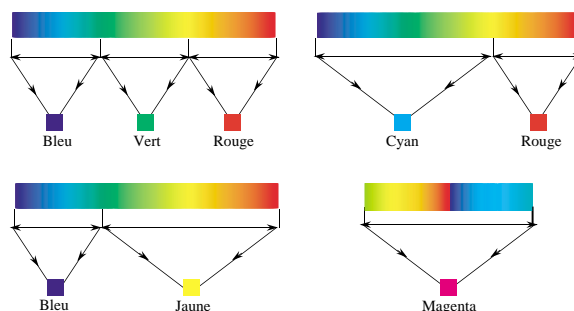


Figure 2. Recombinaison de la lumière

3 indique les couleurs obtenues par synthèse additive de deux ou trois couleurs primaires. Deux couleurs dont la synthèse additive donnent du blanc sont dites complémentaires. Ainsi le jaune est la couleur complémentaire du bleu, le cyan du rouge et le magenta du vert. La synthèse additive donne toujours une couleur plus claire que les couleurs de départ.

Les écrans vidéo, les scanners utilisent le principe de la synthèse additive pour le rendu des couleurs. Chaque pixel est partagé en trois éléments luminescents juxtaposés donnant chacun une des trois couleurs de la synthèse additive.

Synthèse soustractive

Filter neutre

Une feuille de papier blanche éclairée par la lumière solaire apparaît blanche car elle réfléchit toutes les longueurs d'onde dans la même proportion, proche de 100 %. Si un filtre d'absorption neutre est intercalé entre la source de lumière blanche, la surface apparaît moins claire (lumineuse). Elle est d'un gris plus ou moins foncé. Un filtre d'absorption neutre est un filtre qui absorbe toutes les longueurs d'onde dans la même proportion (figure 5).

Synthèse soustractive

Un filtre coloré n'est pas un filtre de densité neutre. Interposé dans un faisceau, il supprime préférentiellement une partie du spectre de la lumière blanche. Ainsi un filtre jaune arrête l'ensemble du spectre qui constitue le bleu (figure 4).

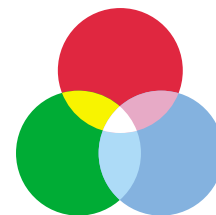


Figure 3. La superposition de deux couleurs primaires donne une couleur secondaire, la superposition des trois couleurs primaires donne du blanc

1. "Systèmes dispersifs", Optique et photonique, n°2, 49-52, 5/99

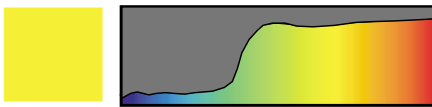


Figure 4. Un filtre coloré arrête les rayons lumineux correspondants à sa couleur complémentaire. Ici le filtre de couleur jaune arrête le bleu

En interposant en cascade deux filtres de couleur secondaire on peut retrouver les trois couleurs primaires de la synthèse additive. Par conséquent à partir des trois couleurs primaires : Cyan, Magenta, Jaune de la synthèse soustractive on retrouve les couleurs primaires Rouge, Vert, Bleu de la synthèse additive. Ces trois couleurs Rouge, Vert, Bleu sont les couleurs secondaires de la synthèse soustractive. Sur la figure 5, à droite des filtres la couleur des flèches indique les radiations qui traversent le filtre correspondant. Après la traversée du filtre la couleur du tronc de cône donne la couleur de la lumière perçue. Ainsi sur l'exemple a) le filtre jaune arrête le bleu et laisse passer le vert et le rouge. Le filtre cyan de son côté laisse passer le bleu et le vert mais arrête le rouge. La couleur bleue étant arrêtée par le premier filtre et le rouge par le second, seule la couleur verte est transmise.

Les couleurs obtenues par synthèse soustractive sont toujours plus foncées que les couleurs de départ.

Avec trois filtres de couleur primaire (C, M, J), il n'est pas possible d'obtenir le noir, on obtient un gris plus ou moins foncé suivant la puissance de la source lumineuse.

Dans la vie de tous les jours, on est beaucoup plus confronté à la synthèse soustractive qu'additive car elle intervient dès que des pigments contenus sur un objet absorbent certaines longueurs d'onde et réfléchissent les autres.

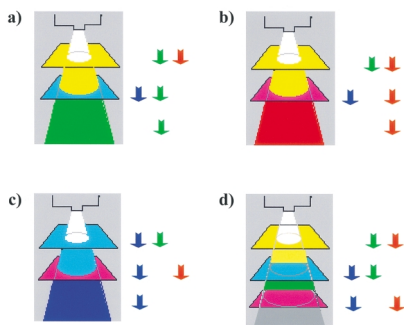


Figure 5. La synthèse soustractive à partir des couleurs primaires Cyan, Magenta, Jaune permet de recomposer les couleurs primaires de la synthèse additive

chissent les autres. C'est la lumière réfléchie que l'on perçoit. Les peintres savent allier avec bonheur ces trois couleurs primaires associées au blanc et au noir pour donner une infinité de rendus de couleur et d'émotion. Le domaine de la colorimétrie qui prend en compte le domaine du "sensible", est appelé la *psychométrie*.

D'un point de vue moins poétique, les impressions faites par les imprimantes, les tireuses, les photocomposeuses sont basées elles aussi sur la synthèse soustractive.

Couleur des objets

La couleur apparente d'un objet dépend des caractéristiques de la source qui l'éclaire. Si la source émet une lumière blanche il n'y a aucune distorsion de la couleur apparente (perçue par l'œil). Ainsi quand une feuille de papier éclairée par de la lumière blanche réfléchit toutes ou presque toutes les longueurs d'onde du spectre, celle-ci apparaît blanche.

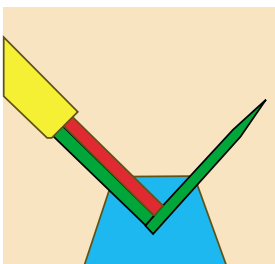


Figure 6. Un objet de couleur cyan éclairé par un faisceau de lumière jaune apparaît de couleur verte

Si la feuille ne réfléchit que les longueurs d'onde correspondant au bleu, celle-ci est dite de couleur bleue. Si la feuille réfléchit les 2/3 du spectre correspondant par exemple au rouge et vert la feuille est jaune. Enfin si elle absorbe de façon identique l'ensemble du spectre lumineux, elle est grise. Le gris est d'autant plus foncé que l'absorption est importante (figure ??).

Dans le cas où la source n'est pas blanche la couleur perçue peut être modifiée. Lorsqu'une feuille de couleur cyan est éclairée par une source cyan il n'y a pas de modification de couleur. Par contre si la source est jaune il y a modification. En effet, le jaune est la résultante de la synthèse additive du vert et du rouge, or la feuille ne réfléchit que le bleu et le vert, le bleu étant absent de l'émission de la source, seul le vert peut être réfléchi. La feuille apparaît donc verte.

Mélange proportionnel

En intercalant des fils bleus avec des fils rouges lors du tissage d'un tissu ce dernier apparaît mauve. C'est sur ce même principe qu'est basée la reproduction des différentes couleurs dans les ouvrages. L'image d'une photographie couleur est ainsi constituée de trois couches colorées. Chacune de ces couches est composée de très petits points de densité variable de couleur cyan, magenta ou jaune. La superposition et (ou) la juxtapositions de ces grains colorés permet la restitution de l'ensemble des les couleurs (figure 7).

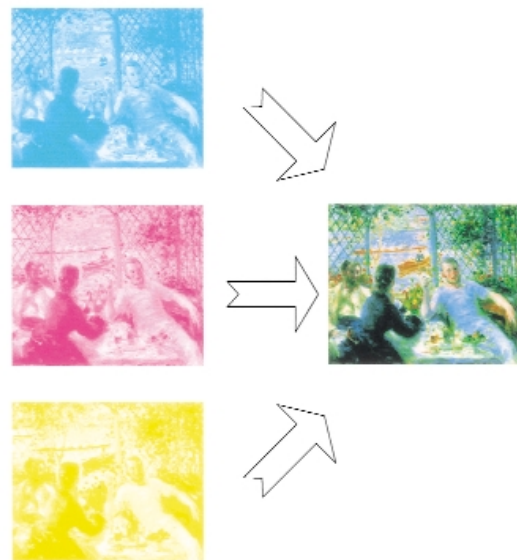


Figure 7. Recomposition d'un tableau *Le déjeuner des canotiers* (1879) de Pierre-Auguste Renoir à partir du mélange optique des trois couleurs primaires Cyan, Magenta et Jaune

Classification des couleurs

Représentation TSL

C'est une représentation qui tient compte de trois paramètres auxquels l'œil est sensible : la teinte, la saturation et la luminosité². La teinte correspond dans le langage courant à la couleur, la saturation mesure la pureté de la couleur, elle permet de déterminer si une couleur est vive ou délavée

2. La représentation TSL s'appelle HLS en anglais de hue (teinte), lightness (luminosité) et saturation

enfin la luminosité indique si une couleur est claire ou sombre. Ce modèle ressemble au système de Munsell qui a été présenté dans le numéro précédent de Photoniques. Les couleurs du spectre sont réparties sur un *cercle chromatique* (figure 8) et repérées par un angle. Ainsi le rouge est repéré par l'angle $\varphi = 0^\circ$; le vert par l'angle 120° et le bleu par l'angle 240° , les couleurs secondaires s'intercalent entre ces valeurs.

Sur le pourtour de ce disque sont représentées les couleurs saturées. En se rapprochant du centre les couleurs sont de plus en plus délavées, elles perdent leur couleur, elles deviennent achromatiques, d'un gris plus ou moins foncé suivant la

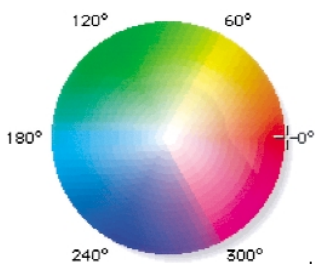


Figure 8. Cercle de chromaticité

luminosité. Cette dernière est représentée sur la droite perpendiculaire au cercle qui passe par son centre.

L'échelle est graduée de 0 % qui représente le noir à 100 % qui correspond au blanc.

Entre le noir et le blanc on trouve toute une échelle de niveau de gris (figure 9).

La figure 10 est une représentation d'une même couleur pure. Toutes les

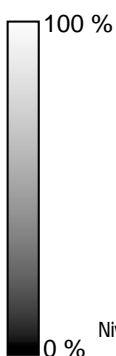


Figure 9. Niveaux de gris

nuances de cette teinte ne varient que par la saturation et la luminosité. La teinte verte est repérée par sa position $T = 120^\circ$. Les trois nuances représentées ont la même saturation $S = 100\%$ mais diffèrent par leur luminosités $L = 100\%, 78\%, 28\%$.

Suivant une verticale toutes les nuances ont la même saturation mais diffèrent par leur luminosité. Suivant une horizontale, les nuances ont même luminosité mais une saturation différente.

Colorimétrie

En colorimétrie, on cherche à caractériser une couleur en tant que mélange de trois couleurs, par exemple rouge, vert, bleu. On ne s'attache pas à la distribution spectrale mais à la sensation physiologique. Des couleurs qui apparaissent identiques sous un éclairage donné sont dites *couleurs métamères*, en fait elles ont des spectres différents. Quand l'éclairage change ces couleurs peuvent se différencier.

Dans un colorimètre, l'utilisateur cherche à avoir la même sensation de couleur en observant deux plages dont l'une est éclairée par la source inconnue et l'autre par les trois sources primaires.

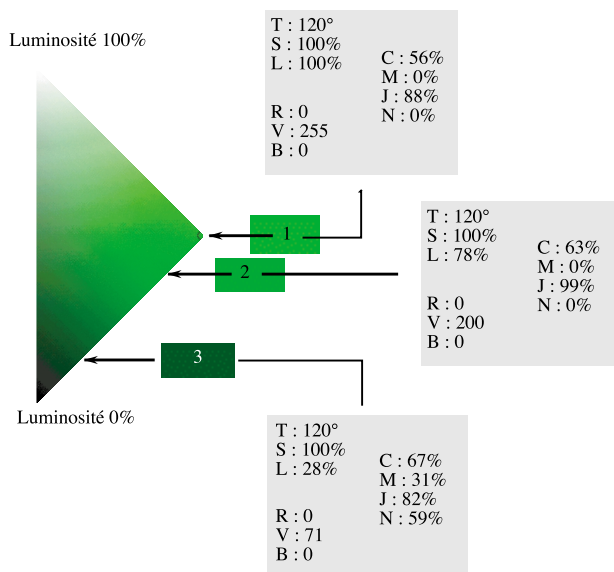


Figure 10. Représentation en 3D du modèle TSL

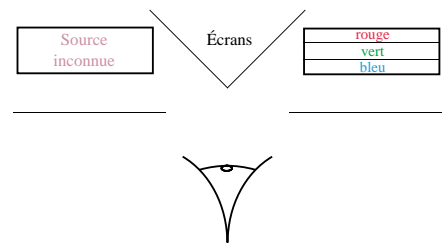


Figure 11. Principe du colorimètre

Système RVB

Une couleur quelconque peut être décrite comme la combinaison linéaire de trois couleurs primaires [R], [V], [B] :

$$C = R[R] + V[V] + B[B]$$

les trois coefficients R, V, B sont appelés les *composantes trichromatiques*. Chaque couleur est caractérisée par ses composantes trichromatiques. Sur la figure 12 sont représentées les trois fonctions $\bar{r}, \bar{v}, \bar{b}$ qui donnent la valeur de ces coefficients (R, V, B) pour reproduire une couleur de longueur d'onde donnée. Ainsi, pour reproduire la couleur correspondant à la longueur d'onde de 580 nm on a sensiblement :

$$C_{580} = 0,24[R] + 0,14[V] + 0[B]$$

les trois fonctions $\bar{r}(\lambda), \bar{v}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ sont appelées les *fonctions colorimétriques*. Cependant ce système présente un inconvénient majeur. On remarque en effet qu'il n'est pas possible de reconstituer par synthèse additive une couleur correspondant à la longueur d'onde 500 nm par exemple, car dans ce cas le coefficient correspondant à la couleur rouge est négatif :

$$C_{500} = -0,07[R] + 0,08[V] + 0,04[B]$$

Ce terme négatif signifie que l'égalité des couleurs des deux plages d'un colorimètre

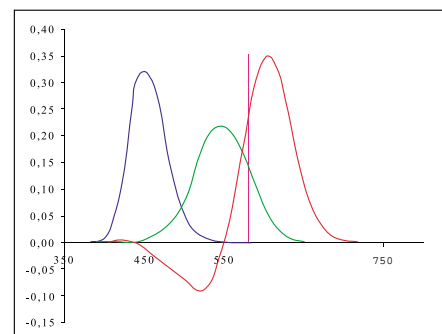


Figure 12. Fonctions colorimétriques du système RVB

éclairé par une source de longueur d'onde 500 nm ne pourra être obtenue que si une source rouge supplémentaire est ajoutée du côté de la source lumineuse étudiée.

$$C_{500} + 0,07[R] = 0,08[V] + 0,04[B]$$

Pour remédier à cet inconvénient, la CIE (Commission Internationale de l'éclairage) a défini en 1931 un autre repère : la base (X, Y, Z).

Base (X, Y, Z)

Cette base permet de décrire toutes les couleurs perçues avec des coefficients positifs.

On passe de la base (R, V, B) à la base (X, Y, Z) par une opération linéaire :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,166 & 0,125 & 0,093 \\ 0,060 & 0,327 & 0,005 \\ 0,000 & 0,004 & 0,460 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

Les trois nouvelles fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ sont représentées sur la figure 13.

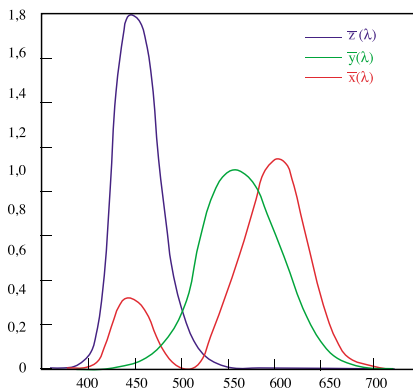


Figure 13. Fonctions colorimétriques du système CIE XYZ

On a l'habitude de considérer les grandeurs relatives :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

appelées *coordonnées trichromatiques*. On a bien entendu :

$$x + y + z = 1$$

Par conséquent la connaissance de deux

grandeurs par exemple (x,y) est suffisante puisque la troisième grandeur s'en déduit immédiatement. La représentation des couleurs dans le plan (x,y) est appelée *diagramme de chromaticité*.

Sur ce diagramme la courbe en forme de fer à cheval s'appelle *spectrum locus*. Sur cette courbe se trouvent l'ensemble des couleurs pures du spectre solaire. Le segment de droite qui joint les deux longueurs

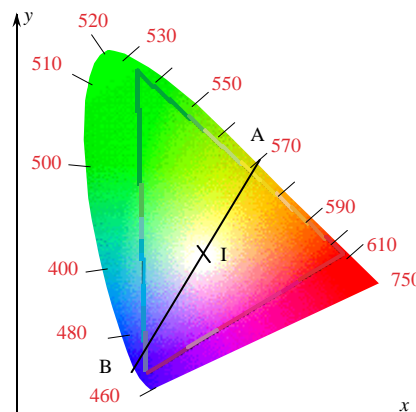


Figure 14. Diagramme de chromaticité

d'onde extrêmes du spectre visible est appelée *droite des pourpres*. Les couleurs situées sur ce segment n'appartiennent pas au spectre solaire, elles ne peuvent être obtenues que par mélange de deux couleurs. Les couleurs sont de moins en moins saturées au fur et à mesure qu'elles se rapprochent du blanc. Toutes couleurs, A et B par exemple, pouvant être réunies par une droite traversant l'illuminant repéré par le point I sont complémentaires.

Ce nouveau choix de couleurs primaires (X, Y, Z) présente trois avantages par rapport à la base (R, V, B) :

- les composantes trichromatiques sont toujours positives ;
- la composante Y correspond à la luminance de la source ce qui permet de faire un lien avec la photométrie puisque la courbe $y(\lambda)$ coïncide avec la courbe de réponse de l'œil ;
- l'illuminant de couleur blanche a sensiblement pour coordonnées trichromatiques (1/3, 1/3, 1/3).

Il a été décrit ici succinctement deux repères : TSL et XYZ, il en existe d'autres. Il est effectivement difficile de tenir compte de tous les facteurs simultanément d'autant plus qu'interviennent des facteurs humains.

De plus, il existe de nombreuses confusions car les mots employés couramment n'ont pas forcément la même signification dans le langage "scientifique" et "psychométrique". Les différents termes employés sont résumés de façon simplifiée dans le tableau suivant.

Langage courant	Scientifique	Psychométrique
Teinte	Longueur d'onde dominante	Teinte
Pureté	Pureté	Saturation
Quantité de lumière	Luminance	Luminosité

Enfin une couleur pure correspond à une onde monochromatique.

Références

- [1] Y. Dordet. Colorimétrie, principes et applications. Eyrolles.
- [2] R. Sève. Physique de la couleur. Masson, 1996.
- [3] <http://www.cst.fr/dtech/07-mai98/>.
- [4] http://www.univ-reims.fr/Labos/LERI/membre/luc/ENSEIGNEMENT/COURS/TR_IMG/node1.html.
- [5] http://www.unimedia.fr/homepage/divirion/cours/web_cou/cou_03.htm.

Joëlle SURREL
 Université Jean-Monnet – IUT
 Département mesures
 physiques et ISTASE –
 Saint-Étienne
 surrel@univ-st-etienne.fr