

COMMENT CARACTÉRISER UNE COULEUR ?

Qu'est-ce qu'un bleu profond, un bordeaux moyen, un vert jaune vif ?

S'il est facile de caractériser une couleur du spectre (monochromatique) par sa longueur d'onde, ce n'est pas le cas des couleurs perçues, car elles sont rarement monochromatiques. Elles présentent de nombreuses nuances, comme en témoignent les qualificatifs associés aux teintes. Le nombre de combinaisons possibles montre la nécessité, mais aussi la difficulté, de caractériser les couleurs.

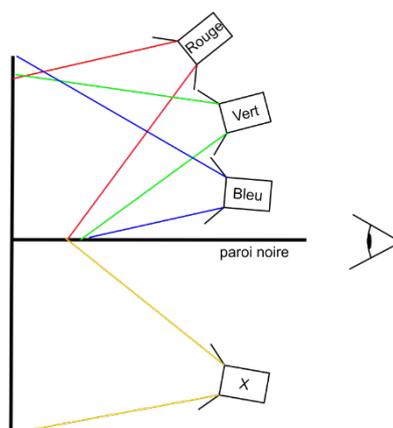
Éléments pour le professeur

Trivariance et mélanges de couleurs

L'analyse de l'apparence de la couleur fait apparaître son caractère tridimensionnel. On peut montrer que l'origine de cette trivariance est liée au mécanisme de la vision. L'intensité de la sensation que donne une source lumineuse de longueur d'onde (λ), s'exprime par la luminance de cette dernière. Celle-ci comprend une partie physique $I(\lambda)$ et un coefficient correctif physiologique $V(\lambda)$. L'intensité physique est une énergie lumineuse. Le facteur correctif $V(\lambda)$, traduit le fait que l'efficacité de la détection oculaire dépend de la longueur d'onde à cause des différences de transmission et d'absorption dans les différentes parties du milieu oculaire et de la courbe de réponse des cônes de la rétine.

L'égalisation colorimétrique peut être considérée comme une démonstration expérimentale du fait que la perception d'une couleur est trivariante.

Dans ce but, on éclaire successivement une moitié du champ par chacune des lumières monochromatiques et l'on effectue leur égalisation en ajustant dans l'autre moitié du champ les quantités des trois lumières primaires.



On trouve ainsi pour chaque lumière monochromatique les fractions des luminances unitaires des trois couleurs primaires nécessaires à sa restitution ; le choix (arbitraire) des luminances unitaires est tel que leur mélange additif donne une lumière achromatique, égale à un blanc de référence préalablement choisi.

$$\text{Pour une couleur } C : Cl_C = Rl_R + Vl_V + Bl_B$$

Pour les couleurs, dont la longueur d'onde dominante est proche d'une des primaires, les fonctions de mélanges obtenues en pratique correspondent dans l'ensemble de façon satisfaisante. Cependant, pour les couleurs exactement ou approximativement complémentaires, le mélange d'égalisation est composé surtout par les deux autres primaires. Pour des couleurs très pures, même l'élimination totale de la première primaire ne permet pas de réaliser l'égalisation. Pour pouvoir établir dans ce cas l'égalité des deux moitiés du champ colorimétrique, l'on se voit donc obligé de désaturer légèrement la couleur que l'on désire restituer par le mélange trichrome, en lui superposant une faible quantité de la primaire approximativement complémentaire. Ce n'est que grâce à cet artifice que son égalisation à l'aide des deux autres couleurs primaires devient possible.

$$\text{L'équation exprimant la couleur } C \text{ devient : } Cl_C = -Rl_R + Vl_V + Bl_B$$

Le terme négatif $-Rl_R$ de cette équation n'a d'autre signification que de représenter l'artifice expérimental de désaturation, utilisé pour permettre l'égalisation de la couleur trop saturée pour pouvoir être restituée par un mélange trichrome.

Du fait de la répartition des teintes dans le spectre visible, et des absorptions spectrales des pigments visuels contenus dans les cônes de la rétine, les primaires sont toujours, un rouge, un vert et un bleu très pur.

Avant la normalisation du système colorimétrique, en 1931, par la Commission Internationale de l'Éclairage, des jeux divers de primaires réelles étaient proposés par les chercheurs. Maxwell, par exemple, utilisait des radiations monochromatiques de 457 nm, 528 nm et 630 nm, de valeurs unitaires ajustées à l'égalisation de la lumière solaire.

L'utilisation de primaires réelles, fondamentales ou non, conduit toutefois à des inconvénients pratiques. Lors de la représentation graphique des systèmes colorimétriques dans des diagrammes de chromaticité, on ne peut représenter par des points, situés à l'intérieur du triangle formé par les primaires, que les couleurs réalisables par des mélanges de ces couleurs primaires réelles ; par contre, les couleurs spectrales et de saturations élevées, donc toute la courbe du spectre visible, se situent à l'extérieur de ce triangle. Pour éviter cette

difficulté d'utilisation et aussi les calculs avec des valeurs négatives, on peut utiliser des primaires virtuelles qui éliminent les parties négatives des fonctions de mélanges.

À présent, depuis la création du système colorimétrique de la CIE, c'est cette méthode qui est généralement utilisée.

Les *couleurs primaires virtuelles* ne constituent ni des rayonnements, ni des sensations, mais simplement des valeurs dérivées par le calcul du système trichrome réel effectivement employé.

Le système RGB

Les primaires définies en 1931 par la Commission internationale de l'éclairage comprennent une lampe rouge de longueur d'onde 700 nm, une verte (546 nm), une bleue (436 nm). Les puissances de ces lampes sont ajustées à un facteur multiplicatif près de telle sorte que la sensation colorée soit celle d'un blanc équiénergie de densité spectrale $I(\lambda) = I_0$ constante.

Ayant fixé ainsi la puissance des lampes, il est alors possible de comparer des couleurs de lampes inconnues avec les combinaisons des trois lampes primaires ainsi définies dans les proportions respectives R, G et B. Lorsque les sensations sont équilibrées, tant en couleur qu'en luminosité, les flux lumineux provenant des lampes, exprimés en unités photométriques (lumen) vérifient alors l'équation :

$$L = RF_R + GF_G + BF_B$$

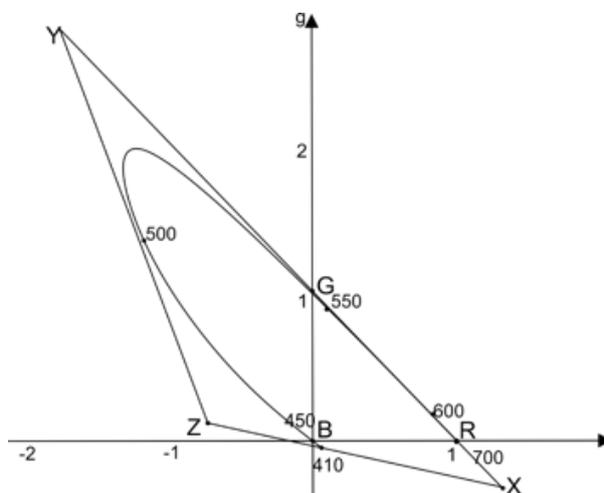
Un blanc équiénergie est obtenu en combinant une unité de chacune des lampes, $R_E = G_E = B_E = 1$.

Si l'on s'intéresse seulement à repérer la couleur sans tenir compte de la luminance absolue du stimulus visuel, alors les intensités absolues n'ont guère d'importance et l'on introduira volontiers les coordonnées réduites r, g, b :

$$r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

Puisque ces coordonnées sont liées par la relation $r + g + b = 1$, deux d'entre elles suffisent à repérer la couleur, r et g par exemple.

On peut alors proposer un diagramme plan où les trois couleurs de base sont les trois sommets du triangle rectangle (1, 0) pour le rouge, (0, 1) pour le vert et (0, 0) pour le bleu.



L'équation photométrique

$$L + RF_R + RF_G + RF_B = GF_G + BF_B$$

Cette équation exprime qu'en mélangeant à la couleur inconnue de luminance L , une quantité R de blanc équivalente, on obtient un bleu vert exprimé par les deux quantités positives G et B . Cette opération peut aussi se traduire sans ambiguïté par la relation formellement équivalente :

$$L = -RF_R + (G - R)F_G + (B - R)F_B$$

Cette nouvelle équation fait apparaître au moins un coefficient négatif. Les coordonnées de la couleur considérée dans le diagramme (r, g) de la figure ci-dessus s'écrivent alors :

$$r = \frac{-R}{G + B - 3R} ; \quad g = \frac{G - R}{G + B - 3R}$$

Même si on est capable de donner à ces coefficients négatifs un sens incontestable, ils sont ressentis, malgré tout, comme l'un des inconvénients majeurs de la représentation R, G, B , l'autre inconvénient étant que l'information sur la luminance absolue de la source que l'on évalue est bien cachée dans les trois quantités R, G et B que l'on doit connaître toutes trois pour pouvoir reconstruire l'équation énergétique. On préférerait une représentation dans laquelle l'une des coordonnées contiendrait toute l'information sur la luminance. Il suffit pour cela que l'un des axes du diagramme soit l'équivalent de la droite de luminance nulle donc l'équation dans la représentation (r, g) s'écrit :

$$rF_R + gF_G + bF_B = 0$$

avec $r + g + b = 1$, c'est-à-dire : $r + 4,59g + 0,06(1 - r - g) = 0$.

Le système trichromatique X Y Z

Le système X Y Z, adopté par la Commission Internationale de l'Éclairage en 1931, est encore aujourd'hui la base de comparaison la plus courante pour les couleurs-lumière. La procédure expérimentale reste la même que pour le système R G B. Les coordonnées X, Y et Z sont simplement obtenues par une transformation des coordonnées R, G et B précédentes.

On demande au niveau système X Y Z d'éliminer les coefficients négatifs, de faire apparaître directement la luminance de la source colorée (ce sera ici la coordonnée Y) et d'attribuer des coordonnées égales $X_E = Y_E = Z_E$ au blanc équivalente ($r = g = b = 1/3$).

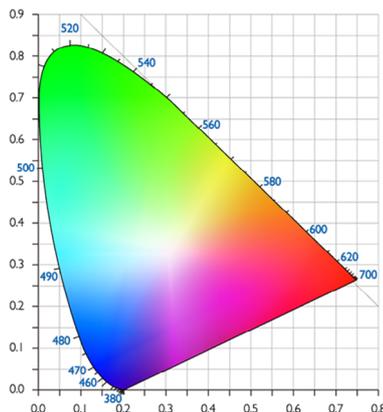
La détermination des relations de transformation passe par la définition de trois nouvelles couleurs primaires imaginaires, virtuelles, c'est-à-dire sans aucun sens physique. Dans le diagramme $r g b$, on les trouve à l'intersection de la droite de luminance nulle d'équation $rl_R + gl_G + bl_B = 0$ et de deux tangentes bien choisies au contour des couleurs spectrales (monochromatiques) qui sont représentées sur la figure ci-dessus.

On peut aussi, comme précédemment, normaliser les coordonnées X, Y, Z pour définir la couleur dans un diagramme plan à deux coordonnées x, y

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{0,12 + 0,29r + 0,11g}{1,201 - 0,531r - 0,068g}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{0,01 + 0,166r + 0,802g}{1,201 - 0,531r - 0,068g}$$

En opérant ainsi, le paramètre y n'est plus directement proportionnel à la luminance, par contre, les coordonnées x, y restent toujours positives.



Le diagramme CIExy-1931

Glossaire

Chromaticité

C'est un couple de grandeurs caractérisant une couleur, en général la teinte et la saturation indépendamment de la luminance ou de la clarté.

Clarté

La clarté correspond au paramètre L^* de l'espace des couleurs CIE $L^*a^*b^*$. Sa valeur est comprise entre 0 et 100, c'est une grandeur sans unité.

Elle caractérise l'intensité relative de la lumière (perçue par l'œil) provenant d'une zone colorée par rapport à celle provenant d'une zone blanche éclairée de la même manière (B. Valeur « lumière et luminescence »).

Il ne faut pas confondre la clarté avec la luminance ou la luminosité. La luminance est une grandeur objective dérivée de l'intensité lumineuse. La luminosité est une grandeur subjective dépendant de la sensibilité de l'œil à l'intensité lumineuse. La clarté est une luminosité relative appliquée à une couleur de surface.

Diagramme de chromaticité

Diagramme plan dans lequel chaque couleur perçue par un œil standard est repérée par des coordonnées.

Espaces de couleur

Cube RGB ou cube des couleurs

Ne pas confondre avec l'espace RGB défini par la CIE où certaines couleurs ont des composantes trichromiques négatives. Dans le cube des couleurs, les composantes sont toujours positives. Dans ce système, une couleur est représentée par trois valeurs correspondant au rouge, au vert et au bleu (voir diaporama). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo.

TSV (HSV ou HSB)

Système colorimétrique utilisant les trois grandeurs : Teinte, Saturation, Valeur (Hue, Saturation, Value (HSV) ou Hue, saturation, Brightness (HSB)). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo.

TSL (HSL)

Système colorimétrique utilisant les trois grandeurs : Teinte, Saturation, Luminance (Hue, Saturation, Lightness (HSL)). Système utilisé par les logiciels de dessin ou de retouche photo. Le plus intuitif des espaces colorimétriques. Il est différent du modèle précédent.

CIE XYZ 1931

C'est un espace de couleur non uniforme sur lequel est construit le diagramme de chromaticité CIE_{xy}.

CIE UVW 1960 CIE U'V'W' 1976

Espace colorimétrique définie par la CIE en 1960. Il est construit à partir du CIE XYZ, il fut introduit pour améliorer l'uniformité de la répartition des couleurs. Il a été supplanté par le système CIE U'V'W' 1976.

CIE LUV ou L*u*v* 1976

C'est un système basé sur le précédent, toujours pour avoir une répartition plus uniforme des couleurs par rapport à la perception humaine.

CIE L*a*b* 1976

C'est un espace qui dérive du modèle Hunter Lab de 1948 (d'où les * pour le distinguer). Il fait intervenir trois paramètres : L*, la clarté ; a* mesure le rapport rouge-vert et b* le rapport jaune-bleu

CIE L*C*h

Ce système correspond au précédent en coordonnées cylindriques. L* définit toujours la clarté ; C* (Chroma) $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ représente la saturation ; h (hue) est défini par les relations : $a^* = C^* \cos(h)$ et $b^* = C^* \sin(h)$ et représente l'angle de teinte, il varie entre 0 et 360°.

Gamut

Le gamut d'un appareil (écran, imprimante, etc.) est l'ensemble des couleurs que peut reproduire cet appareil.

Illuminant

L'application du système colorimétrique de la CIE nécessite la définition d'illuminants de référence. Ces illuminants correspondent, suivant la définition de la CIE, à des répartitions spectrales d'énergie représentatives d'une moyenne de sources de lumière conventionnelles. Parmi ceux-ci les plus importants sont :

- illuminant A : Lumière émise par un corps noir à la température de 2856 K.
- illuminant D₆₅ : représente une des répartitions spectrales relatives d'énergie de la lumière du jour correspondant à une température de couleur proximale sensiblement égale à 6504 K.
- illuminant B : représente la lumière directe du Soleil de température de couleur proximale sensiblement égale à 4874 K.
- illuminant C : représente la lumière moyenne du jour de température de couleur proximale sensiblement égale à 6774 K.

Luminance

C'est le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface. Elle s'exprime en candela par mètre carré (cd/m²). Elle exprime la sensation visuelle que nous avons de la lumière.

On emploie en fait souvent le terme de *clarté* lorsqu'on se contente de valeurs relatives (sur une échelle de 0 (noir) à 100 (blanc)).

Luminosité

Caractère non quantifiable de la sensation selon laquelle une surface apparaît plus ou moins lumineuse. Ce n'est pas un synonyme de luminance. Le terme de luminosité (traduction littérale du mot anglais *lightness*), est souvent employé à tort (dans certains logiciels) à la place de clarté.

Métamères, métamérisme

Deux couleurs peuvent sembler identiques sous un certain éclairage et différentes sous un autre. Elles sont physiquement différentes. Elles sont dites métamères.

Œil standard

Dans les années 30, sous l'égide de la CIE (Compagnie Internationale de l'Éclairage) plusieurs centaines de personnes ont été testées afin de déterminer combien de couleurs percevait l'œil humain. Les personnes ayant l'acuité visuelle la plus fine perçoivent jusqu'à 200 nuances par couleur (rouge, vert, bleu), mais jamais, dans les trois couleurs à la fois. Aussi, ce qu'on appelle un œil standard correspond à un œil qui percevrait 200 nuances par couleur, soit un total de huit millions de couleurs. La moyenne des gens ne perçoit que 100 nuances par couleur, soit un total d'un million de couleurs...

Température de couleur (d'une source de lumière)

Température du corps noir dont le rayonnement possède la même chromaticité que celle de la source considérée. Elle est exprimée en kelvins (K).

Température de couleur proximale (d'une source de lumière)

Température du corps noir dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée. Elle est exprimée en kelvins (K).

Bibliographie et sitographie

- *Traité des couleurs*, Libero Zuppiroli et Bussac, ed. Presses polytechniques et universitaires nomades (niveau L1).
- *Lumière et luminescence*, Bernard Valeur, ed. Belin, p.78 à 80 (niveau lycée).
- *Physique de la couleur*, Robert Seve, ed. Masson (niveau universitaire).
- *La couleur. Lumière, vision et matériaux*, Mady Elias et Jacques Lafait (dir.). Belin 2006. (niveau universitaire).
- *Sujets de BTS DCEV* (Design de Communication Espaces et Volumes).
- L'article intitulé « [Le cube des couleurs](#) » sur le site de l'inspection générale de l'Éducation nationale.
- La présentation intitulée « [Colorimétrie](#) » d'Éric marchand, professeur à l'Université Rennes 1.