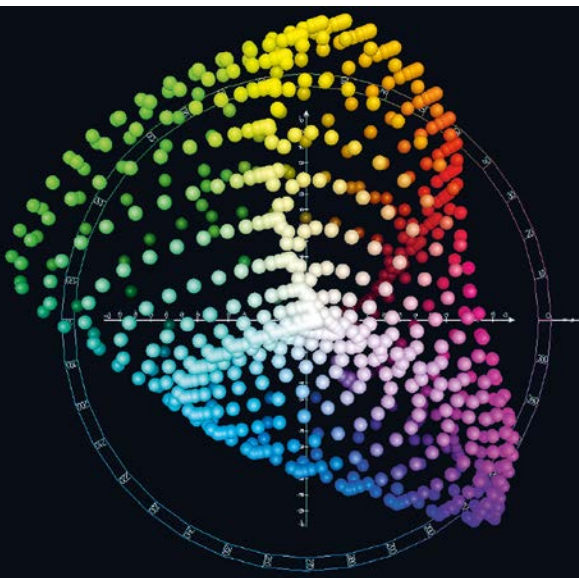


# « MESURER » LES COULEURS

**Mathieu HÉBERT**

Laboratoire Hubert Curien, CNRS, Université Jean Monnet Saint-Étienne et Institut d'Optique Graduate School, 42000 Saint-Étienne  
[mathieu.hebert@univ-st-etienne.fr](mailto:mathieu.hebert@univ-st-etienne.fr)



**L'approche scientifique de la couleur a véritablement commencé au XIX<sup>e</sup> siècle et a conduit tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, sous l'égide de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), à l'établissement d'espaces de représentation normalisés reconnus dans le monde entier et à des recommandations pour la mesure physique. Bien que ces outils ne soient pas encore à même de rendre compte de nos sensations colorées dans les scènes les plus complexes de la vie quotidienne, ils permettent à de nombreux secteurs industriels d'affronter les exigences croissantes de leur marché en matière de gestion de la couleur.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202110644>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**C**omme son nom l'indique, la colorimétrie est la science de la mesure des couleurs. Elle est souvent associée à la photométrie, science de la mesure du rayonnement lumineux, et la connexité de ces deux disciplines n'est pas sans raison : sans lumière, la notion de couleur s'évanouit. Et c'est par la mesure de propriétés de la lumière, en particulier son spectre dans le domaine du visible, que l'évaluation physique de la couleur est réalisée. Il existe cependant une différence fondamentale entre la photométrie et la colorimétrie : contrairement à la lumière (quantité de photons ou onde électromagnétique), la couleur n'est pas une grandeur physique. C'est une sensation, produite par le cerveau

humain. Elle est l'un des attributs sensoriels associés à la vue. Cette sensation se forme à l'issue d'un processus perceptuel complexe et non inné, qui s'acquiert au cours d'une phase d'apprentissage dès notre plus jeune âge, et dont la variabilité d'un individu à l'autre, quoique difficile à évaluer précisément, semble importante. Le terme de colorimétrie semble donc fondé sur un oxymore : la sensation colorée n'est pas une grandeur universelle, ni un phénomène bien reproductible qui se mesure comme un photodétecteur mesure un flux lumineux ; il n'est donc pas acquis d'emblée que ce soit une grandeur mesurable. Pourtant, la perception des couleurs n'est pas non plus une expérience individuelle purement subjective : la plupart des humains perçoivent le ciel comme étant bleu et le soleil couchant comme étant rouge, etc. Il existe donc

un certain degré de reproductibilité, suffisant en tout cas pour que les scientifiques aient entrepris d'en faire une grandeur mesurable, et ce avec une obstination que seule la place primordiale de cet attribut dans l'arsenal sensoriel de l'être humain permette de comprendre.

## UNE PERCEPTION RELATIVE

Une des premières difficultés auquel le scientifique est confronté lorsqu'il aborde la couleur est le fait qu'il n'existe pas de perception absolue. La couleur d'une source lumineuse ou d'un objet dépend de ce qui l'entoure, et plus généralement de la compréhension globale que l'on a de la scène que l'on observe. L'exemple le plus flagrant de cette relativité est le *contraste simultané*, étudié en particulier par le chimiste Chevreul au début du XIX<sup>e</sup> siècle (l'ouvrage original [1] est

bien commenté dans un livre récent de George Roque [2]) : des objets de couleur identiques ne sont pas perçus de la même manière selon la couleur environnante (voir figure 1-a). Les peintres classiques ont abondamment usé de cet effet visuel pour renforcer les teintes jaunes en leur juxtaposant presque systématiquement une teinte bleue, c'est-à-dire sa complémentaire dans le cercle chromatique (figure 1-b).

La raison de ce phénomène se trouve dans le fonctionnement physiologique du système visuel [3]. La première couche cellulaire de la rétine est formée de cellules photosensibles de diverses sensibilités et réponses spectrales, les *cônes* et les *batônnets*. Les cônes, actionnés en vision diurne, sont de trois sortes chez la plupart des individus et sont à l'origine de la vision en couleur.

Cette première couche cellulaire répond de manière analogue à un capteur en couleur avec sa matrice de filtres rouges, verts et bleus. Mais la réponse des cônes n'est pas enregistrée : elle est traitée dès la deuxième couche rétinienne où des cellules spécialisées réalisent des opérations logiques et ne transmettent une information à la couche suivante que lorsque des cellules voisines ont une réponse différente. On peut dire schématiquement que le système neuronal ne transmet que les contours des zones colorées, et l'image en couleur associée au champ visuel n'est qu'une reconstitution, créée dans le cortex visuel à l'arrière du cerveau.

Dans ce processus de reconstitution, le blanc tient une place particulière : le système visuel définit à tout moment une couleur qu'il percevra comme blanche – il s'agit souvent du signal lumineux le plus intense dans le champ visuel – et qui conditionne la perception de toutes les autres couleurs. Ainsi, dans une certaine mesure, la couleur intrinsèque d'un objet est perçue indépendamment du spectre de la lumière qui les éclaire (*constance des couleurs* [4]) : un ballon jaune paraît du même jaune sous un soleil couchant ou sous un tube fluorescent.



**Figure 1.**  
 (a) Contraste simultané : les neuf disques beiges identiques paraissent de couleurs différentes. (b) Détail d'un tableau de Lorenzo Lotto (1536, musée du Louvre), où la couleur jaune est renforcée par juxtaposition d'une zone bleue.

## Le diagramme de chromaticité se révèle très utile pour caractériser la couleur des sources lumineuses

Si nous ne pouvons percevoir des couleurs en absolu – à l'inverse de mélomanes ayant « l'oreille absolue » qui peuvent percevoir la fréquence fondamentale de sons en donnant la hauteur de note exacte – nous avons une très bonne capacité à comparer les couleurs d'aplats juxtaposés. On dit que deux couleurs sont « égalisées » lorsqu'on ne parvient plus à les distinguer. La colorimétrie est entièrement fondée sur cette faculté à égaliser les couleurs.

## MÉLANGE DES COULEURS ET TRICHROMIE

On utilise le terme *mélange* par analogie avec le mélange de pigments ou de peintures qu'utilisent les peintres (synthèse *soustractive* des couleurs), mais le mélange peut aussi être obtenu en superposant des faisceaux lumineux colorés (*mélange additif des couleurs*, figure 2). Ainsi, avec un nombre limité de couleurs dites *primaires*, on peut générer un ensemble de nouvelles couleurs qu'on appelle *gamut* associé à ce jeu de primaires.

Plusieurs espaces de représentation de dimension 3 ont été proposés, notamment ceux associés aux *modèles d'apparence colorée* basés sur trois axes correspondant à la *clarté* ou *valeur* (du noir au blanc), à la *teinte* (bleu, vert, jaune... représentée sur le cercle chromatique et souvent décrite par un angle), et à la *chroma* ou *saturation* (du gris, achromatique, aux couleurs les plus vives). La CIE a proposé d'autres espaces tridimensionnels comme l'espace CIE 1931 RGB et l'espace CIE 1931 XYZ, mentionnés plus loin.

Le principe de trichromie est lié au fait que la rétine contient trois types de cônes. Il convient cependant de préciser que tous les individus ne sont pas trichromates : il existe des dichromates (individus atteints de deutéranopie, une ●●●

**Your Partner for Precision Optics and Optical Systems.**

SPECTROS AG 4107 Ettingen Switzerland Tel.+41 61 726 20 20

[www.spectros.ch](http://www.spectros.ch)

**SPECTROS OPTICAL SYSTEMS**

forme de daltonisme), et probablement aussi des tétrachromates. Pour le trichromate, le mélange de trois couleurs primaires suffit à produire un ensemble continu, mais restreint, d'autres couleurs : il s'agit du gamut. Réciproquement, chaque couleur  $C$ , pourvue qu'elle soit dans le gamut du jeu de primaires employé, peut être obtenue par un mélange unique de ces trois primaires  $P_1, P_2$  et  $P_3$ , avec des proportions uniques  $a_1, a_2, a_3$ . En notant  $\oplus$  le fait de mélanger des couleurs (opérateur de mélange), et  $\equiv$  le fait de percevoir la même couleur (opérateur d'égalisation), on peut écrire :

$$P \equiv a_1 P_1 \oplus a_2 P_2 \oplus a_3 P_3$$

On peut attribuer à la couleur  $P$  les trois coordonnées  $(a_1, a_2, a_3)$  et décrire ainsi la couleur sous forme de vecteur :  $P = (a_1, a_2, a_3)$ .

### MODÈLE DE LA CIE DE 1931

L'espace des couleurs qui s'est imposé dans le monde repose sur des expériences psychophysiques d'égalisation des couleurs à partir de trois primaires monochromatiques : 700 nm (rouge), 546,1 nm (vert), et 435,8 nm (bleu). Le faisceau lumineux est tel qu'il occupe un angle solide d'angle  $2^\circ$  selon l'axe optique de l'œil, frappant ainsi le centre de la rétine dans une région riche en cônes, la fovéa (d'autres expériences basées sur l'exposition d'une aire rétinienne plus large conduiront au modèle de 1964). L'expérience, décrite en détail dans [5], a consisté à reproduire en mélangeant ces trois primaires toutes les autres couleurs monochromatiques  $C_\lambda$  du spectre visible, longueur d'onde par longueur d'onde, et ainsi de déterminer pour chacune son triplet de valeurs  $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ . Les courbes spectrales  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ , et  $\bar{b}(\lambda)$  obtenues sont appelées fonctions d'égalisation (figure 3). Il est cependant à noter que toutes ces couleurs monochromatiques sont en fait en dehors du gamut de ces trois primaires. L'égalisation n'est possible qu'en mélangeant deux primaires d'un côté, et la couleur monochromatique  $C_\lambda$  et la troisième



**Figure 2.** Mélange additif des couleurs par superposition de trois faisceaux lumineux primaires, rouge, vert et bleu.

primaire de l'autre. Par exemple, à  $\lambda = 500$  nm, l'égalisation se fait ainsi :

$$C_\lambda \oplus \bar{r}(\lambda)R \equiv \bar{g}(\lambda)G + \bar{b}(\lambda)B$$

et on considèrera que la valeur de  $\bar{r}(\lambda)$  est négative.

Grâce à la loi d'additivité, on peut facilement calculer la couleur d'une lumière ayant un certain spectre  $S(\lambda)$  : il suffit de sommer les vecteurs colorimétriques de toutes les lumières monochromatiques proportionnellement à leur intensité. Cela conduit aux célèbres équations définissant l'espace CIE 1931 RGB :

$$R = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

où  $k$  est une constante de normalisation.

En même temps que l'espace RGB, la CIE a défini l'espace XYZ, beaucoup plus usité, qui est relié au premier par la transformation linéaire suivante :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4887180 & 0.3106803 & 0.2006017 \\ 0.1762044 & 0.8129847 & 0.0108109 \\ 0 & 0.0102048 & 0.9897952 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Cette opération appliquée à chacune des couleurs monochromatiques donne les fonctions d'égalisation  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  tracées à droite de la figure 3, toujours positives. La fonction

$\bar{y}(\lambda)$  coïncide avec la courbe de sensibilité spectrale du système visuel humain utilisée en photométrie,  $V(\lambda)$ . Les valeurs colorimétriques d'une lumière de spectre  $S(\lambda)$  sont données par les équations suivantes :

$$X = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Pour faciliter la représentation des couleurs dans les documents, une autre transformation est opérée, correspondant à une projection, pour obtenir le diagramme de chromaticité (figure 4). Les valeurs de chromaticité  $(x, y)$  sont définies ainsi à partir des valeurs  $X, Y, Z$  :

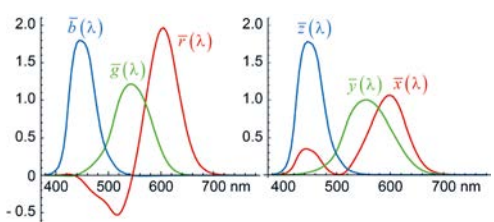
$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1-x-y$$

Le diagramme de chromaticité  $xy$  étant dérivé de spectres grâce à des opérateurs linéaires, il est logique que les valeurs de chromaticité associées aux couleurs obtenues par mélange de deux couleurs primaires forment un segment de droite, ayant pour extrémités les valeurs de chromaticité des deux primaires. Pour des mélanges de trois primaires, les valeurs de chromaticité sont contenues dans un triangle (voir exemple sur la figure 4).

Le diagramme de chromaticité perd l'information de clarté (le noir, le blanc et tous les gris sont confondus en un seul point), mais se révèle très utile pour caractériser la couleur des sources lumineuses auxquelles la notion de clarté ne s'applique pas - il n'existe pas de lumière grise, par exemple.

**Figure 3.**

Fonctions d'égalisation du système CIE 1931 RGB (à gauche) et CIE 1931 XYZ (à droite) [6].





En revanche, ce dont l'espace XYZ et le diagramme de chromaticité  $xy$  ne permettent pas de rendre compte, c'est la mesure d'écart entre couleurs. Un segment de même longueur dans les verts ou dans les bleus ne correspondra pas du tout à la même variation de couleurs perçues (laquelle sera infime dans les verts, très grande dans les bleus). Le phénomène d'adaptation chromatique, nécessitant de définir un blanc de référence, n'est pas pris en compte non plus dans ces espaces. Des modèles d'apparence colorée ont été développés à ces fins.

### MODÈLES D'APPARENCE COLORÉE

Le modèle CIE 1976  $L^*a^*b^*$ , parfois appelé CIELAB, est un système de représentation des couleurs tridimensionnel où les coordonnées  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  sont calculées à partir des valeurs XYZ de la lumière considérée et de celles de la lumière définie comme blanche. L'axe  $L^*$  correspond à la clarté, comprise en 0 et 100. Les deux autres coordonnées permettent de décrire les teintes. Plus on s'éloigne de l'axe  $L^*$ , plus la chroma est élevée (couleurs plus vives) ; au contraire, l'axe  $L^*$  contient les gris, achromatiques. Cet espace est l'un des premiers modèles d'apparence colorée, – et de loin le plus employé – d'autres ont été définis depuis, par exemple les modèles CIECAM [7]. Il convient relativement bien pour caractériser la couleur d'objets (de préférence mats, opaques et sur fond noir).

Le modèle prend en compte l'adaptation chromatique – quoique de façon imparfaite – et permet d'estimer des écarts entre couleurs avec des métriques, notées  $\Delta E$ . La métrique originelle de 1976 correspond simplement à la distance euclidienne entre les points représentant les couleurs à comparer dans l'espace CIELAB. D'autres métriques plus fiables ont été ensuite proposées, parmi lesquelles le  $\Delta E_{1994}$  ou le  $\Delta E_{2000}$  qui tend à s'imposer aujourd'hui, et d'autres définitions plus affinées apparaissent encore régulièrement.

### UNE RECHERCHE ENCORE TRÈS ACTIVE

La représentation mathématique des couleurs proposée par les modèles développés au  $XX^e$  siècle est un progrès formidable pour la caractérisation des couleurs pour les sources lumineuses et de nombreux objets. Elle permet de communiquer ces caractéristiques d'un point à l'autre de la planète de manière bien plus précise que par le langage, sans avoir à envoyer d'échantillons.

Toutefois, les modèles existants ne sont pas encore capables d'embrasser toute la complexité des mécanismes perceptuels. La perception des couleurs dans une scène complexe, comme celle de fleurs dans un jardin par exemple, fait l'objet de recherches actives conduisant à des modèles toujours plus sophistiqués. De plus, la manière dont est perçue la couleur d'un objet montré au travers d'une image numérique reste une question ouverte : l'observateur sait partiellement compenser les artéfacts liés à la photographie et retrouver l'apparence de l'objet réel, sans que l'on sache bien modéliser cette aptitude.

Enfin, il convient de rappeler que tous les modèles colorimétriques sont basés sur un observateur *standard* (c'est-à-dire une moyenne des résultats issus d'expériences psychovisuelles réalisées sur un panel limité d'individus), qui caractérise

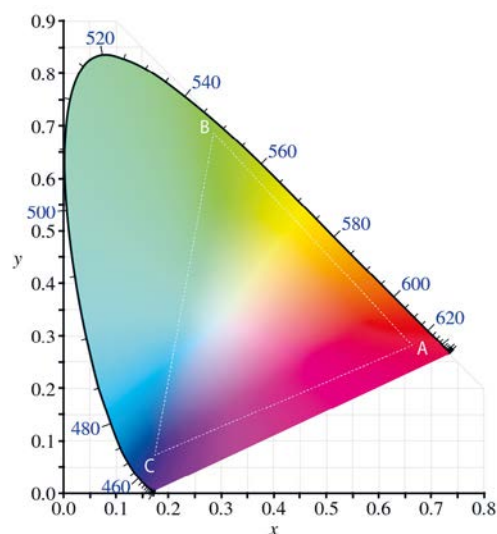


Figure 4.

Diagramme de chromaticité CIE 1931  $xy$ . Les lumières monochromatiques sont situées sur le spectrum locus, la courbe enveloppant le diagramme, et l'échelle des longueurs d'onde est indiquée en bleu. Le triangle représente le gamut généré par un jeu de trois primaires, de points de chromaticité A, B et C.

la perception humaine dans son ensemble, mais n'est pas propre à rendre compte des particularités individuelles de chacun – des études très récentes tendent à montrer que la variabilité inter-individus est assez forte – ni les effets d'entraînement que certains spécialistes peuvent avoir acquis au cours du temps. Autant de défis à relever pour la communauté des sciences de l'apparence. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] Michel-Eugène Chevreul, *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés, considérés d'après cette loi dans ses rapports avec la peinture, les tapisseries...* Pitois-Levrault, 1839
- [2] Georges Roque, *Art est science de la couleur*, Gallimard, 2009
- [3] Michel Imbert, « *Connaissance de la couleur* », dans Mady Elias, Jaques Lafait, *La couleur, Lumière, vision et matériaux*, Belin, 2006
- [4] Marc Ebner, *Color constancy*, John Wiley & Sons, 2007
- [5] Günther Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000
- [6] Commission Internationale de l'Eclairage, *Colorimetry*, technical report CIE 015:2018, 4<sup>th</sup> Edition, 2018
- [7] M.D. Fairchild, *Color Appearance Models*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 2013