
Introduction à la colorimétrie (1^{ère} partie)

La colorimétrie est à la base de tous les systèmes de reproduction d'images existant tels que le film et la vidéo et probablement des systèmes futurs. Elle permet de qualifier d'une manière scientifique et rigoureuse la perception des couleurs. C'est le passage obligé entre le monde artistique de la création des images et le spectateur, dès que celui-ci accède à l'oeuvre par un moyen technique de diffusion ou de reproduction.

La plupart des travaux scientifiques de normalisation ont été menés par la CIE ([Commission Internationale de l'Eclairage](#)). C'est une organisation indépendante dédiée à l'étude de la lumière et de l'éclairage. Ces recommandations font autorité en la matière et la CIE est reconnue par l'ISO ([International Standard Organisation](#)) comme un organisme international de standardisation.

Ce dossier, réalisé avec la collaboration de **François Helt** et **Bernard Tichit**, est la synthèse de la documentation réunie au sein du Groupe de Travail CST "*Sensitométrie et Traitement Numérique*" et notamment des exposés de Jean-Fabien Dupont (Kodak) et Wilfrid Meffre (Theta Scan). Il a pour but de présenter les notions de base de la colorimétrie.

La sensibilité globale de l'oeil

L'oeil est sensible aux radiations lumineuses dont la longueur d'onde est comprise entre 380 nm et 780 nm.

La figure 1 montre la courbe de sensibilité de l'oeil telle qu'elle a été normalisée par la CIE.

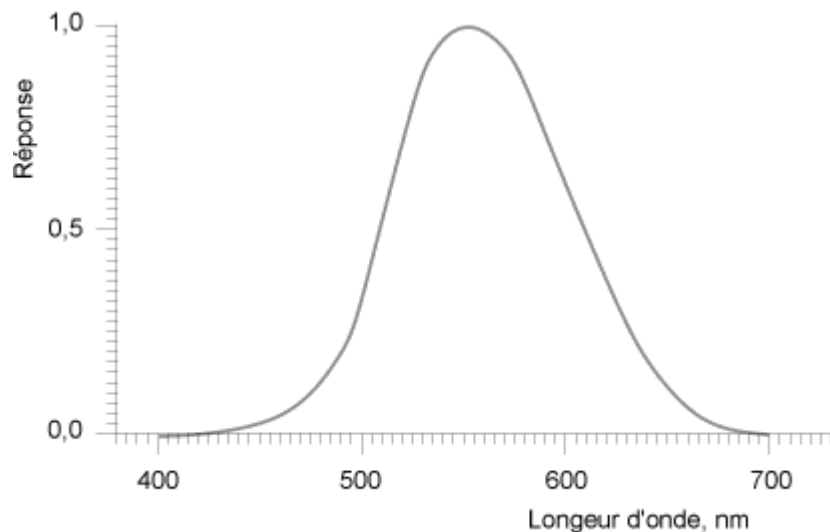


Figure 1

La sensibilité des cellules de la rétine

Physiquement, mesurer une couleur, consiste à déterminer à l'aide d'un spectrophotomètre le niveau d'énergie rayonnée pour chaque longueur d'onde du spectre visible. En pratique, 32 mesures, soit une tous les 10 nm, sont suffisantes pour obtenir le spectre d'un rayonnement lumineux. Toute la difficulté consiste à trouver l'équivalence entre le spectre que l'on a mesuré et la sensation colorée qu'il provoque chez l'observateur. Un calcul rapide montre que l'on peut mesurer 10^{64} spectres différents (32 mesures sur une échelle de 100 niveaux,

soit $100^{32} = 10^{64}$). C'est évidemment bien supérieur au nombre de couleurs que l'oeil peut distinguer. En considérant que l'on peut distinguer un milliard de couleurs (à vérifier), il reste 10^{55} spectres possibles pour produire chacune de ces impressions colorées.

Si on considère la vision, la rétine comporte quatre types de cellule. Les bâtonnets qui sont sensibles aux très faibles lumières et trois types de cônes sensibles principalement au rouge au vert et au bleu, si la quantité de lumière est suffisante.

L'oeil a donc deux fonctionnements différents selon la luminosité.

- La vision dite Scotopique, nocturne, dénuée d'impression colorée puisqu'un seul type de cellule réagit au stimulus.
- La vision Photopique, diurne, où les trois types de cône réagissent au stimulus et sont à l'origine de l'impression colorée.

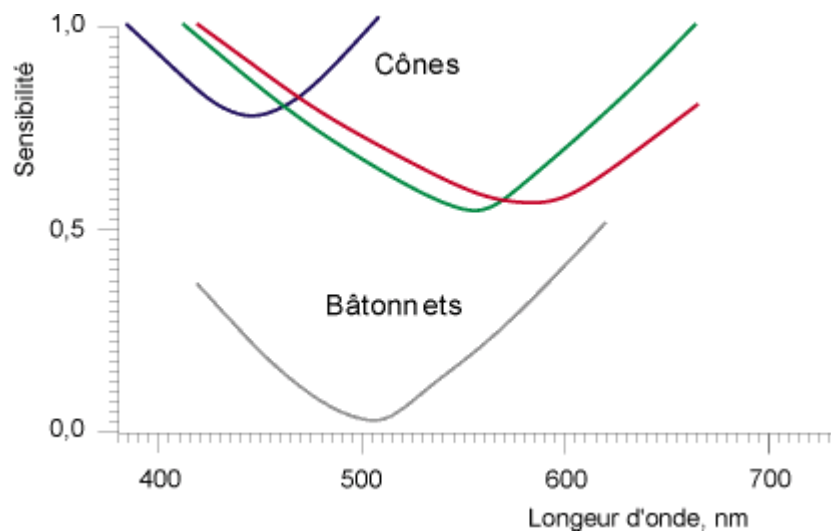


Figure 2 : Sensibilité à l'éclaircissement des cônes et des bâtonnets.

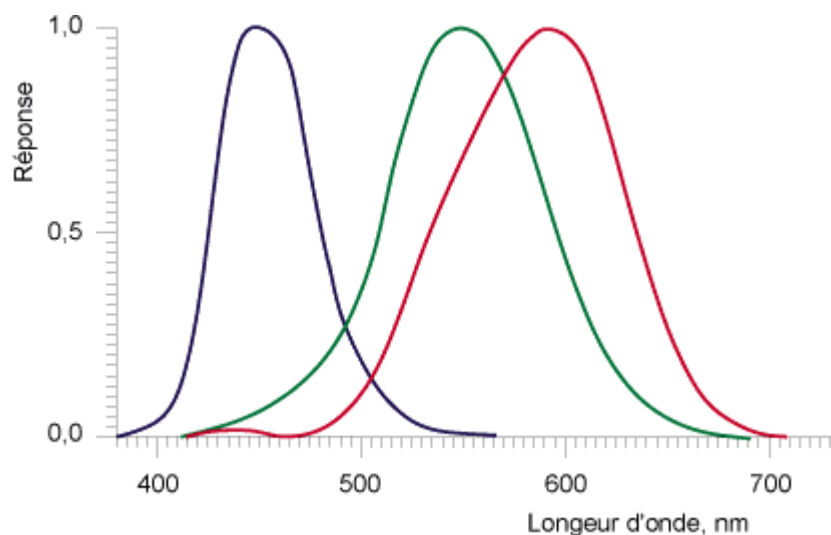


Figure 3 : Sensibilité spectrale des cônes.

Il est intéressant de remarquer que si les cônes sensibles au bleu ont une courbe spectrale bien distincte des autres, pour le rouge et le vert il y a un tel recouvrement qu'il est impossible de les exciter séparément. Ce recouvrement contribue largement à notre sensibilité à la couleur. En effet, à partir du moment où une seule famille de cônes répond aux stimuli, comme c'est le cas aux extrémités du spectre visible, il n'est plus possible de percevoir de différence de couleur.

La nature trichromatique de la sensation colorée et la synthèse additive

Le paragraphe précédent montre que la sensation colorée, qui intuitivement comporte trois caractéristiques, Luminosité, Teinte et Saturation, peut être exprimée mathématiquement par seulement trois valeurs puisque l'oeil ne comporte que trois types de photorécepteurs. La vision colorée est par nature trichromatique.

La reproduction d'une couleur ne va donc pas s'attacher à reproduire un spectre lumineux identique en tous points à celui d'origine mais à utiliser trois sources primaires, en général rouge verte et bleue, qui vont produire sur l'oeil, les trois mêmes stimuli que la couleur d'origine, c'est la synthèse additive, voir la figure 4. La quantité de chaque primaire, nécessaire pour égaliser, c'est à dire obtenir l'équivalent d'une sensation colorée donnée, peut servir de mesure pour la qualifier.

L'ensemble des spectres différents qui sont représentés par les mêmes quantités de primaire sont appelés métamères. Attention, deux métamères qui paraissent identiques sous un éclairage donné apparaîtront différents si les conditions d'observation changent (voir plus loin le § [Température de couleur](#)).

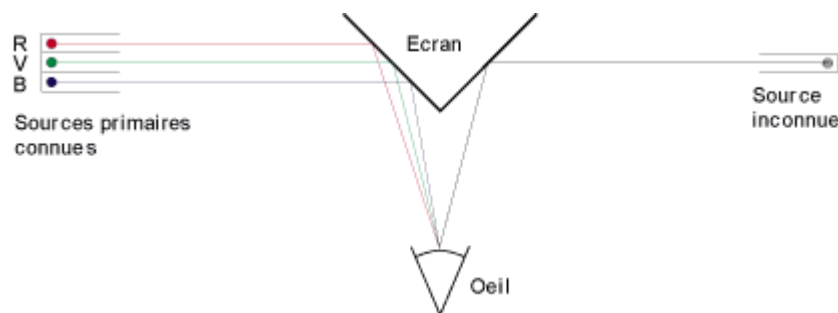


Figure 4 : Equivalence visuelle entre une source lumineuse et le mélange de trois primaires

Les lois de Grassmann

Ces lois fondamentales résument les propriétés de la synthèse additive et permettent de nombreux calculs colorimétriques.

Elles sont les suivantes :

- Trois variables indépendantes sont nécessaires pour spécifier une couleur,
- Pour un mélange additif de stimuli couleurs, seules les valeurs des primaires sont à considérer, pas les compositions spectrales,
- Dans un mélange additif de stimuli, si un ou plusieurs composants sont graduellement changés, les valeurs résultantes des primaires changent aussi graduellement.

Une propriété importante de la vision, décrite par l'expérience suivante, découle de ces lois :

Prenons une couleur C_1 qui a pour équivalent visuel le mélange des trois primaires dans les quantités R_1 , V_1 et B_1 , et une couleur C_2 équivalente à la synthèse R_2 , V_2 et B_2 . La somme des deux flux lumineux $C_1 + C_2$ a pour équivalent visuel la somme des composantes soit $R_1 + R_2$, $V_1 + V_2$ et $B_1 + B_2$. Ce phénomène est connu sous le nom de loi de Grassmann.

La température de couleur d'une source lumineuse

La couleur des objets est fortement influencée par la lumière qui les éclaire. Cela impose de qualifier les sources de lumière utilisées si on veut pouvoir comparer des échantillons colorés. En général, la lumière artificielle est produite en chauffant un filament métallique. Plus la température augmente, plus l'activité moléculaire augmente, produisant une émission électromagnétique de plus en plus puissante. Le physicien allemand, Max Planck, a démontré que le spectre lumineux émis par un corps noir parfait, totalement absorbant, dépend uniquement de sa température. La figure 5 montre les spectres obtenus pour différentes températures du corps noir, exprimées en degré Kelvin.

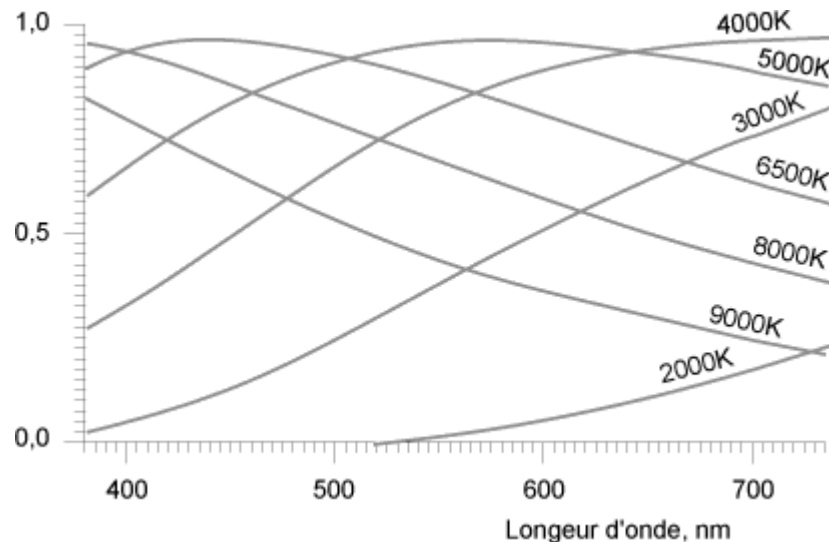


Figure 5

Cela permet de qualifier une source de lumière par la température du corps noir produisant un rayonnement équivalent. Dans le cas des lampes à incandescence, l'équivalence est très facile à trouver, car le spectre d'un filament est très proche de celui du corps noir. Pour les sources qui utilisent une décharge électrique dans un gaz, comme les tubes fluorescents, le spectre comporte des raies importantes et la corrélation avec l'émission du corps noir est presque impossible à trouver. Dans ce cas, on donne une température de couleur indicative qui correspond à une sensation équivalente pour l'oeil.

La lumière du jour constitue un cas particulier, en effet elle varie énormément en fonction de l'heure et des conditions climatiques. La répartition spectrale de la lumière solaire, une fois filtrée par l'atmosphère, est très différente du rayonnement du corps noir

La CIE a normalisé plusieurs illuminants qui ne sont pas des sources de lumière réelles mais des courbes de rayonnement spectral, en voici quelques uns : (voir la figure 6).

- Illuminant A : La lumière du corps noir à 2856 °K.
- Illuminant C : Lumière du jour moyen avec une température de couleur équivalente à 6774 °K environ.
- Illuminant D₆₅ : Représente un état de la lumière du jour avec une température de couleur équivalente à 6504 °K environ. C'est l'illuminant de référence de la vidéo.

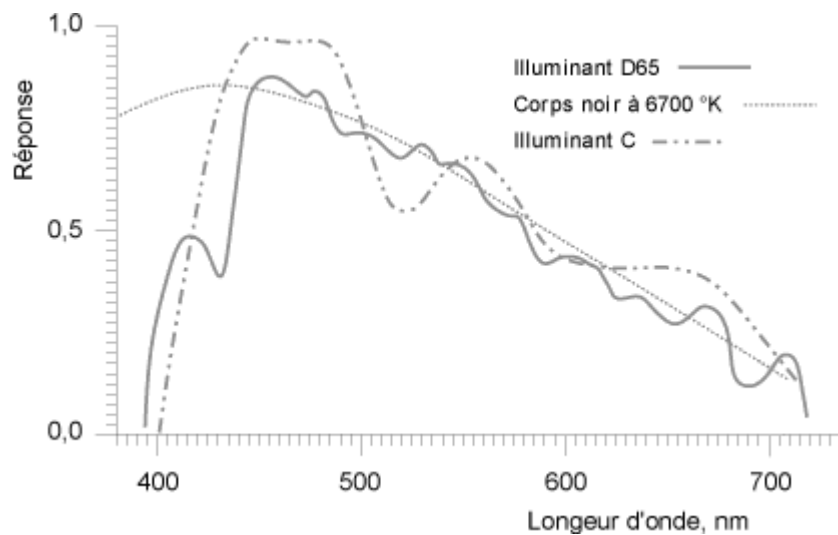


Figure 6

Dans certains cas, on peut utiliser le concept de l'illuminant d'égal énergie E, qui présente un spectre d'émission plat, même niveau à toutes les longueurs d'ondes.

Pour l'illuminant A, il existe une source réelle ayant le spectre normalisé mais pour le D₆₅ la CIE n'a trouvé à ce jour aucune source correspondante.

Dans la 2^{ème} partie nous évoquerons l'Observateur de Référence de la CIE qui définit le comportement moyen de l'oeil, ainsi que les principaux espaces géométriques de représentation des couleurs.

En attendant, ou pour en savoir plus, voici une liste d'ouvrage sur le sujet :

Bibliographie (consultable à la CST) :

- Norme CIE/ISO 10527 : *Observateur de référence colorimétrique CIE*
- CIE : *Technical Report - Colorimetry second edition*
- Charles Poynton :
A Technical Introduction to Digital Video
Wide Gammut Device-Independent Colour Image Interchange
Frequently asked question about Colour
- Siggraph 97 : *Course Notes - Scanning and Recording of motion Picture Film*
- IBA : *Technical Review - Light and Colour Principles*
- NAB 95 : *Pixels, Pictures and Perception*
- A. Pouyferrié : *ORTF, Service des Etudes - Colorimétrie*
- L. Goussot : *Ecole Supérieure d'Electricité - Photométrie et Colorimétrie*

WWW :

- Charles Poynton : [Color technology](#), [Color links](#)

Rédaction : [Matthieu Sintas](#)