II. Bases de colorimétrie

La colorimétrie est la technique de la mesure des couleurs. Nous l'utiliserons pour identifier une couleur afin de la reproduire et aussi pour évaluer une variation par rapport à une couleur donnée. On distingue la colorimétrie visuelle de la colorimétrie instrumentale.

La colorimétrie visuelle

1. Principe

Basée sur la comparaison visuelle, elle utilisera comme outils des atlas de références, une lumière normalisée et des observateurs humains.
Un des atlas de référence est le **Munssel.** Cet atlas est bâti autour d'un système qui permet de définir une couleur à l'aide des trois paramètres suivants :
- **la teinte** H, (hue) : rouge, vert, etc. soit 40 teintes,
par exemple : **2,5 R**
- **la clarté** V, (value) : indique le degré de luminosité de 1 à 9,
par exemple : 2,5 R **7**
- **la saturation** C, (chroma) : quantité de gris suivant une échelle graduée de 0 à 20, par exemple : 2,5 R 7/**5**

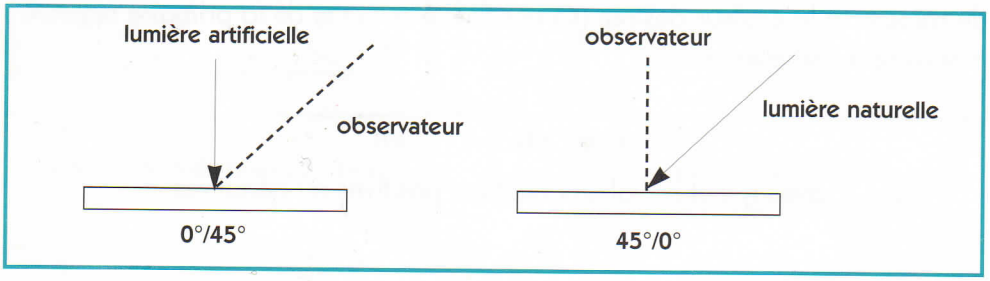
2. Procédure de mesure

2.1. Matériel

- un atlas mat ou brillant en fonction de l'objet ;
- une série de masques ou de fonds gris de facteurs de réflexion différents ;
- une enceinte de visualisation avec un éclairage lumière du jour (6 500 K), ou un appareil d'éclairage lumière du jour 6 500 K suspendu au dessus d'une table à fond neutre et foncé pour éviter toutes réflexions parasites, ou la même table face à une fenêtre côté nord si possible. L'éclairement devra être compris entre 1 500 et 2 000 lux.

2.2. Examen

Choisir ses masques ou fonds gris et s'installer à la table, de manière à ce que notre vision fasse un angle de 45° avec l'échantillon à mesurer, ce dernier étant éclairé à sa normale : 0°/45°; en lumière naturelle se placer au dessus de l'échantillon : 45°/0°.



2.3. Rapport

- préciser les détails de l'installation : atlas, lumière, angle, etc. ;
- indiquer l'identité des observateurs.

La colorimétrie instrumentale

Il faut distinguer deux phases dans ce que nous appelons la colorimétrie instrumentale :
- la première qui résulte de mesures physiques,
- la seconde, qui à la suite des mesures permettra, en fonction de facteurs préalablement choisis (illuminants, observateur de référence, etc.), de définir les couleurs mesurées, leurs écarts, etc..

1. Appareils de mesures

1.1. Le colorimètre

Instrument mesurant le facteur de réflexion d'une surface colorée, qui généralement couplé à un microprocesseur donne directement la mesure en grandeurs colorimétriques. Il se compose d'une partie source, généralement un tube au xénon (flash), et une partie récepteur comprenant trois ou quatre cellules sensibles aux différentes plages du spectre visible.

1.2. Le spectrocolorimètre

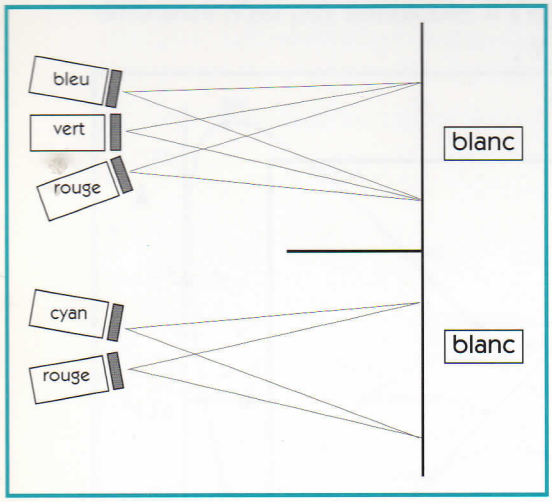
Instrument plus précis, dont il existe de nombreux modèles de technologies différentes (à réseau, à prisme, à simple ou double faisceaux, à barrettes de diodes, etc.). À partir d'une source à spectre continue, on mesure, de longueur d'onde en longueur d'onde, le facteur de réflexion (ou de transmission) de l'objet considéré. Avec les résultats de ces mesures, il sera possible de calculer les valeurs colorimétriques recherchées.

2. Éléments de colorimétrie

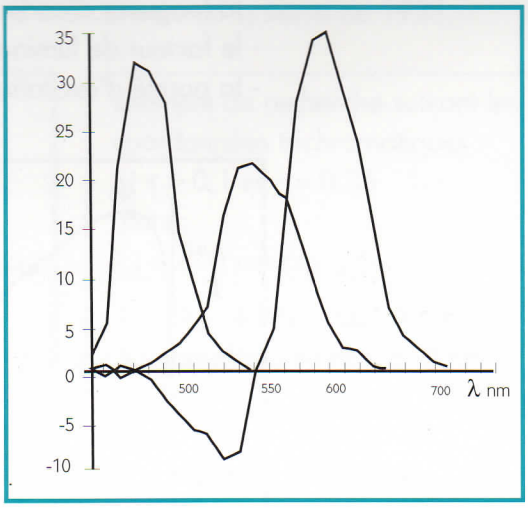
Trois couleurs (les primaires : **R**, **V** et **B**) sont théoriquement suffisantes et nécessaires pour reconstituer toutes les couleurs du spectre. Une primaire est une couleur qui ne contient aucun élément des deux autres. La véritable égalisation d'une couleur avec un mélange trichrome ne peut se réaliser qu'à la condition de rajouter à la couleur désirée (**C**) une faible quantité de la primaire approximativement complémentaire.

$$\mathbf{C} = \pm \mathbf{rR} \pm \mathbf{vV} \pm \mathbf{bB}$$

avec r, v et b, valeurs relatives positives ou négatives



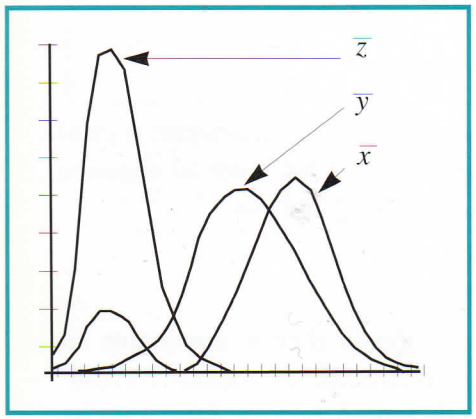
Le mélange trichrome



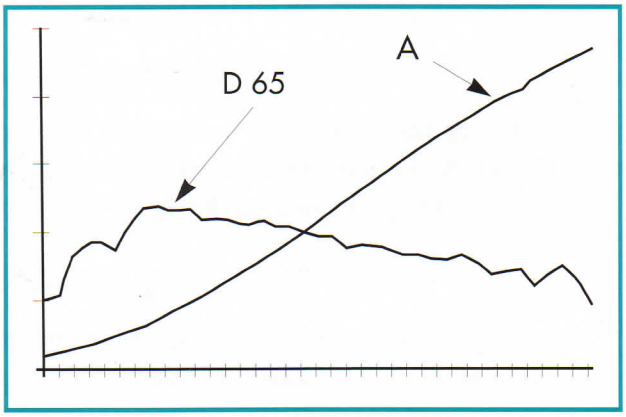
Les fonctions de mélanges réelles

Pour éviter les valeurs négatives présentes dans les fonctions de mélanges réelles, dès 1931 la CIE a proposé un système basé sur trois « couleurs » virtuelles X, Y et Z. Les éléments du système colorimétrique CIE-1931 sont donc les suivants :

- *les illuminants normalisés* A, C, D65 : définis par leurs distributions spectrales ;
- *les composantes trichromatiques* X, Y et Z : permettant de définir une couleur par rapport à ces primaires ;
- *les coordonnées trichromatiques* x et y : déduites des composantes X, Y et Z pour la représentation graphique dans les diagrammes de chromaticité ;
- *l'observateur de référence :* définit les fonctions de mélanges $\bar{x}$, $\bar{y}$ et $\bar{z}$.



Fonctions de mélanges CIE-1931



Distributions spectrales
des illuminants A et D65

La représentation graphique des résultats colorimétriques dans le diagramme de chromaticité permet de retrouver les trois attributs définissant une couleur (teinte, clarté et saturation) qui sous la terminologie de la colorimétrie seront :

- la longueur d'onde λd ;
- le facteur de luminance Y ;
- la pureté d'excitation p_e.

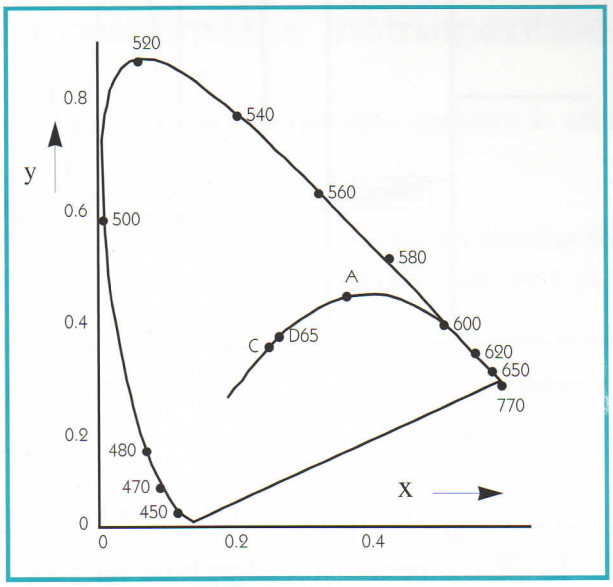


Diagramme de chromaticité CIE-1931

2.1. Propriétés du diagramme de chromaticité

Celui-ci permet la détermination graphique de :

2.1.1. la longueur d'onde dominante λd

à partir des coordonnées xy de l'illuminant de référence, on trace une droite passant par les coordonnées de la couleur mesurée et coupant la courbe des longueurs d'onde du diagramme de chromaticité.

2.1.2. la pureté d'excitation p_e

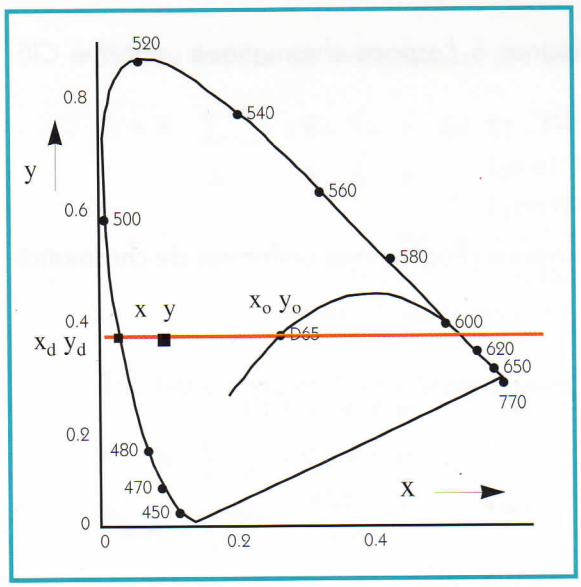
calculée par rapport de la distance séparant le point xy de l'illuminant à celui du point d'intersection sur la courbe des longueurs d'ondes, avec la distance séparant le point xy de l'illuminant à celui de la couleur mesurée.

2.1.3. les couleurs complémentaires

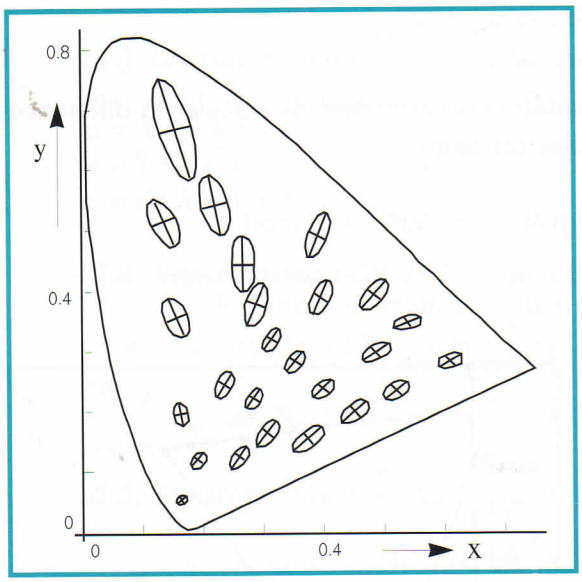
en continuant la droite pour la recherche de la longueur d'onde dominante en sens inverse, on trouve la longueur d'onde dominante de la couleur complémentaire et en se servant des *sections coniques* de Mac Adam, on détermine les coordonnées de la couleur complémentaire.

2.1.4. la mesure des différences entre deux couleurs

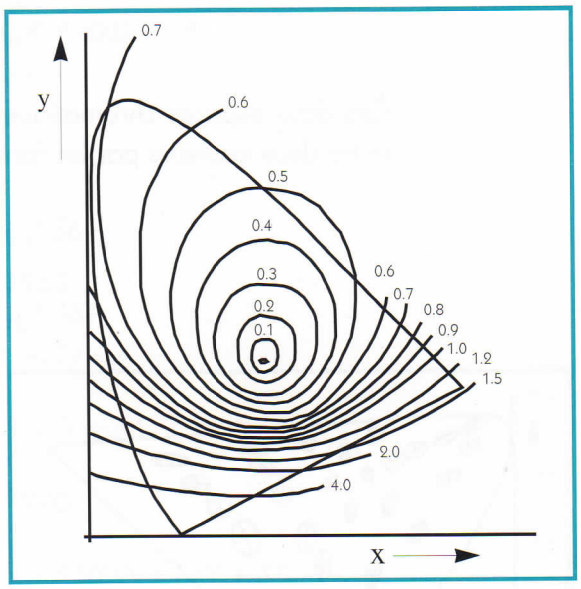
On remarque que pour une même distance séparant deux points, mais à des endroits différents dans le diagramme de chromaticité, l'impression visuelle de différence n'est pas semblable. Il s'agit là d'une carence du système de 1931.



exemple de recherche suivant les coordonnées trichromatiques :
Si x = 0,1 et y = 0,35
alors :
λ_d = 490 nm (x_d, y_d)
$p_e = x_d - x / x_o - x_d = 0{,}75$
λ_d complémentaire = 610 nm



Ellipses de Mac Adam, donnant les différences justes perceptibles (agrandies 10 fois)



Sections coniques donnant les lieux des couleurs complémentaires

2.2. Amélioration du diagramme de 1931

Pour améliorer l'uniformité des aires d'égales couleurs, Mac-Adam a proposé de nouvelles coordonnées trichromatiques, u et v, avec pour valeurs :

$$u = 4x/-2x + 12y + 3 \text{ et } v = 6y/-2x + 12y + 3 \text{ (CIE 1960)}$$

Ces coordonnées ont donné naissance à *l'espace chromatique uniforme CIE-1964 :* W* U* V* avec :

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17$$
$$U^* = 13W^*(u-u_0)$$
$$V^* = 13W^*(v-v_0)$$

En 1976, la CIE propose deux nouveaux diagrammes uniformes de chromaticité :

- L*u*v* avec :

$$L^* = 116\,(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \qquad \text{si } Y/Y_0 > 0{,}01$$
$$u^* = 13L^*(u'-v'_0) \qquad u' = u$$
$$v^* = 13L^*(v'-v'_0) \qquad v' = 1{,}5v$$

- L*a*b* avec :

$$a^* = 500\,[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$
$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]$$

Ces deux espaces chromatiques uniformes permettent de calculer la différence entre deux couleurs par les formules suivantes :

$$- \Delta E^*_{uv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

$$- \Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

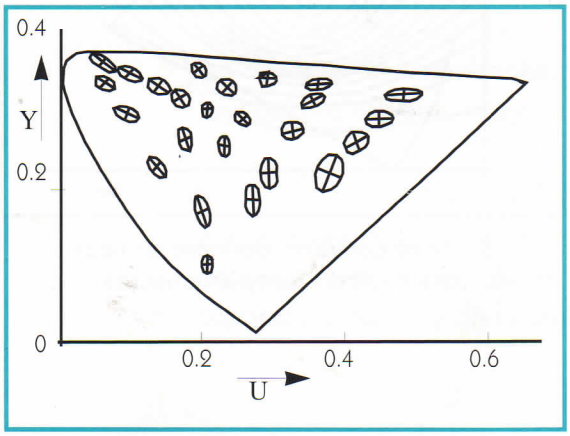


Diagramme de chromaticité CIE 1960 avec les ellipses de Mac Adam, donnant les différences justes perceptibles (agrandies 10 fois)

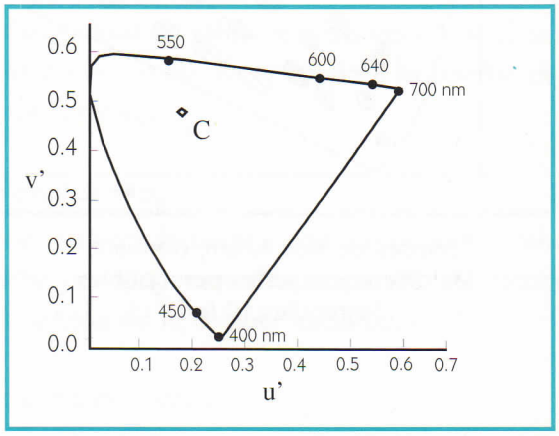


Diagramme de chromaticité CIE 1976

Nota : en 1964, la CIE a adopté un second observateur de référence ayant un champs de 10°. Tous les calculs se basant sur cet observateur en feront mention : X_{10}, Y_{10}, Z_{10} par exemple.

3. Calculs

Depuis les mesures obtenues à partir de l'analyse spectrophotométrique, nous pourrons calculer les différents paramètres nous permettant de définir toutes les grandeurs colorimétriques désirées soit :

3.1. Le facteur de transmission (ou de réflexion) lumineuse

$$T_L = K.\ \sum_{760}^{380}\ .\ T\lambda.\ S\lambda.\ \bar{y}\ .\ \Delta\lambda$$

- $\bar{y}$ — observateur CIE 1931 ou 1964
- $S\lambda$ — source A, C ou D_{65}
- $T\lambda$ — transmission (réflexion) mesurée
- $\sum_{760}^{380}$ — sommation toutes les 5, 10 ou 20 nm des éléments ci-dessus.

3.2. Les composantes trichromatiques X, Y et Z

$$X = K.\ \sum_{760}^{380}\ .\ T\lambda.\ S\lambda.\ \bar{x}\ .\ \Delta\lambda$$

$$Y = K.\ \sum_{760}^{380}\ .\ T\lambda.\ S\lambda.\ \bar{y}\ .\ \Delta\lambda \qquad \text{avec } K = 100/\sum_{760}^{380}\ S\lambda.\ \bar{y}\lambda$$

$$Z = K.\ \sum_{760}^{380}\ .\ T\lambda.\ S\lambda.\ \bar{z}\ .\ \Delta\lambda$$

3.3. Les coordonnées trichromatiques x, y et z

$$x = X / X + Y + Z$$
$$y = Y / X + Y + Z$$
$$z = Z / X + Y + Z$$

3.4. Transformation CIE 1931 ⟶ CIE 1960

$$u = 4x/-2x + 12y + 3 \quad \text{et} \quad v = 6y/-2x + 12y + 3$$

ou

$$u = 4X/X + 15Y + 3Z \quad \text{et} \quad v = 6Y/X + 15Y + 3Z$$

3.5. Transformation CIE 1931 ⟶ CIE 1970

$$u' = u \quad \text{et} \quad v' = 1{,}5v = 9y/-2x + 12y + 3 = 9Y/X + 15Y + 3Z$$

3.6. Passage du diagramme de chromaticité CIE 1970 vers les espaces presque uniformes de chromaticité : CIE 1976 - CIELUV, CIELAB.

- L*u*v* avec

$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16$	$Y/Y_0 > 0{,}01$	$Y_0 = 100$	pour D_{65}
$u^* = 13L^*(u'-u'_0)$	$u' = u$	$u'_0 = 0{,}1978$	idem
$v^* = 13L^*(v'-v'_0)$	$v' = 1{,}5\ v$	$v'_0 = 0{,}4683$	idem

- L*a*b* avec

$$a^* = 500\ [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$

$$b^* = 200\ [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]$$

3.7. Calcul de la différence de couleur entre deux objets

- $\Delta E^*uv = [\ (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2\ ]^{1/2}$
- $\Delta E^*ab = [\ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\ ]^{1/2}$

Nota : d'une manière générale, CIELUV sera dédié à des mesures d'objets transparents et CIELAB pour des mesures sur des objets opaques.

3.8. Système psychométrique L*C*h°

Lorsque nous souhaitons exprimer les différences de couleurs en éléments psychométriques comme la clarté, la teinte et la saturation (chroma), à partir de l'espace CIELAB, on utilise les termes et formules ci-dessous :

- Clarté psychométrique CIE 1976 :

$$L^* = 116\ (Y/Y_0)^{1/3} - 16 = L^* \text{ de CIELab}$$

- Chroma CIE 1976 :

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

- Angle de teinte CIE 1976 :

$$h^\circ = tg^{-1}\ (b^*/a^*) = \arctan\ (b^*/a^*)$$

- Différence de teinte CIE 1976 :

$$\Delta H^*_{ab} = [(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*_{ab})^2 - (\Delta C^*_{ab})^2]^{1/2}$$

3.9. Indice de jaunissement CIE 1931/C et D1925 (1964/D_{65})

$$YI = (127{,}5\ X - 105{,}84\ Z)\ /\ Y \quad \text{et} \quad YI = (130\ X - 115\ Z)\ /\ Y$$

3.10. Indice de blancheur (Ganz 1979, CIE 1931-64/D_{65} et ASTM E313)

$$W = Y - 800\ (\Delta x) - 1\ 700(\Delta y) \quad \text{et} \quad WI = 3(1{,}2422 - Y)$$

Remarques importantes *

- Sélectionner un seul système de calcul et l'utiliser constamment.
- Toujours spécifier exactement la manière dont se sont faits les calculs.
- Ne jamais essayer d'interpréter des différences de couleurs calculées au moyen de systèmes différents par l'utilisation de facteurs moyens.
- Utiliser les résultats des formules de différence de couleur uniquement en tant que première approche, faites en toujours une confirmation visuelle.
- Ne pas oublier que personne n'accepte ou ne rejette une couleur à cause de chiffres ; ce qui compte c'est l'apparence visuelle.

*d'après Billemeyer Fred & Saltzman Max. *Principles of Color Technology*. 1981.