

Mesure de couleur –  
L'espace colorimétrique CIE

# Mesure colorimétrique – le système CIE 1931

## Introduction

En fait, la mesure d'une couleur n'est qu'une vision des couleurs normalisée, où deux facteurs, la lumière et l'observateur sont normalisés.

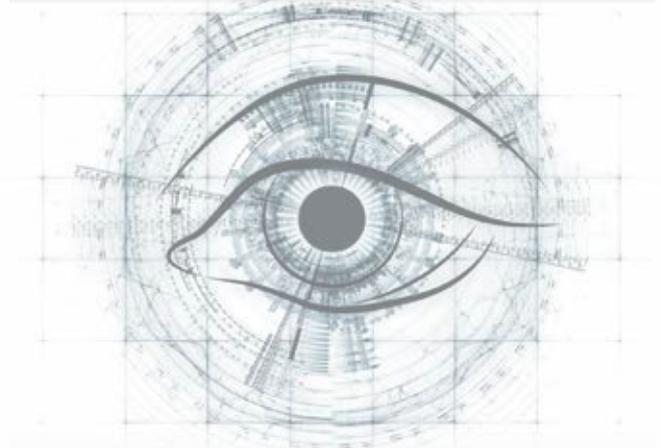
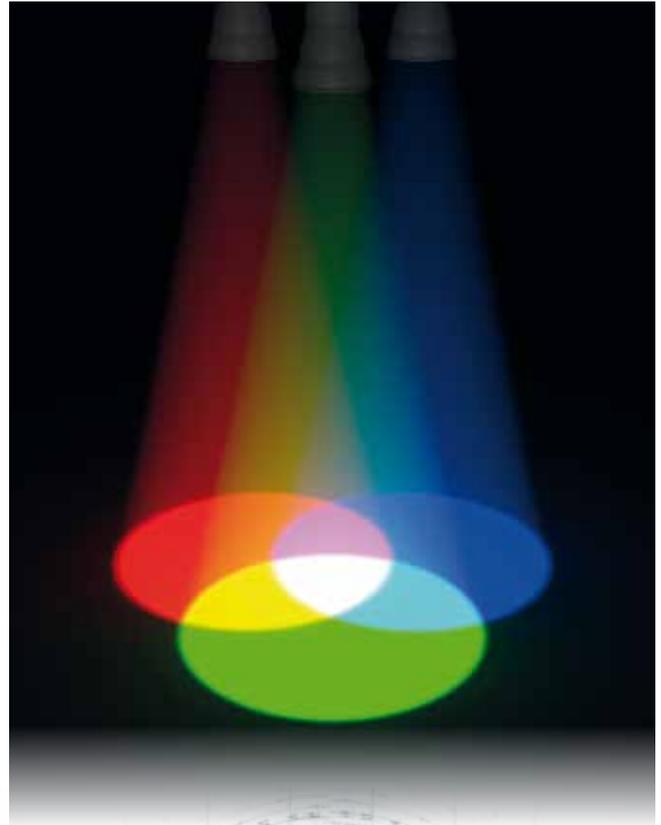
La base scientifique de la mesure colorimétrique est fondée sur l'existence de 3 groupes de signaux différents (stimuli par trois couleurs primaires, le bleu, le vert et le rouge) transmis par l'œil de l'observateur. Ce qui permet avant tout ce transfert dans un système standardisé est le niveau de sensibilité des cônes S, M et L. Aujourd'hui, les sensibilités liées à la longueur d'onde sont bien connues. La CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) a défini en 1931 ce qui allait servir de base à un système colorimétrique international. Elle a déterminé trois couleurs spectrales comme stimuli par couleur primaire : rouge R = 700,0 nm, vert V = 546,1 nm et bleu B = 435,8 nm.

Toutefois, la sensibilité des cônes dépend également de l'angle solide d'observation. La normalisation a été mise en œuvre à l'aide du concept de l'observateur standard CIE. L'observateur standard, comme le type d'illuminant normalisé, consiste en un tableau de valeurs numériques ; il représente un « observateur humain standard moyen », de sorte que les perceptions de couleur ne sont pas spécifiques à un observateur individuel.

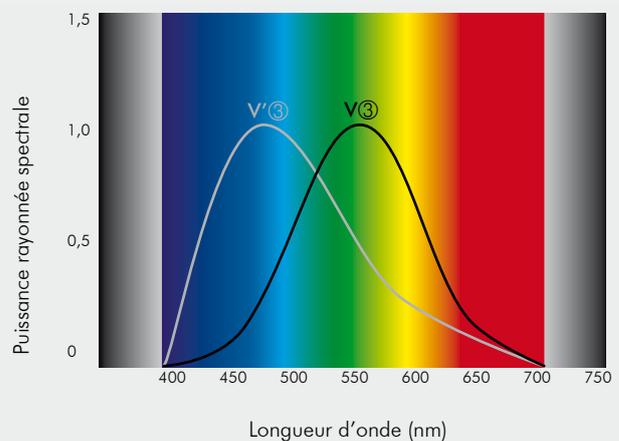
## Efficacité lumineuse de l'œil humain – la clarté

Dans le domaine visible du spectre électromagnétique (400 nm - 700 nm), l'œil humain perçoit les mêmes luminosités énergétiques pour obtenir des clartés différentes à différentes longueurs d'onde. Cette efficacité lumineuse spectrale de l'œil a été mesurée et normalisée par la CIE pour l'observateur standard. La courbe  $V^{(3)}$  s'applique à toute vision photopique, dans laquelle les cônes de la rétine sont actifs. Les valeurs de l'efficacité lumineuse pour la vision photopique ont été déterminées en 1923 par la CIE et adoptées en 1924 pour les calculs colorimétriques.

La courbe  $V'^{(3)}$  s'applique à la vision scotopique, dans laquelle les bâtonnets jouent le rôle de récepteurs actifs. En 1951, la CIE a réuni les valeurs d'efficacité lumineuse de la vision scotopique afin de créer une norme. Dans la plage d'intensité lumineuse comprise entre la vision photopique et la vision scotopique (plage mésopique ou vision crépusculaire), la courbe de sensibilité spectrale se déplace en fonction d'une densité lumineuse adaptative décroissante, même pour des longueurs d'onde plus courtes.



Efficacité lumineuse de l'œil



Efficacité lumineuse de l'œil Courbe  $V^{(3)}$  = vision photopique/de jour = (CIE 1924) Courbe  $V'^{(3)}$  = vision scotopique/de nuit = (CIE 1951)

## La perception chez l'observateur humain du stimulus de couleur

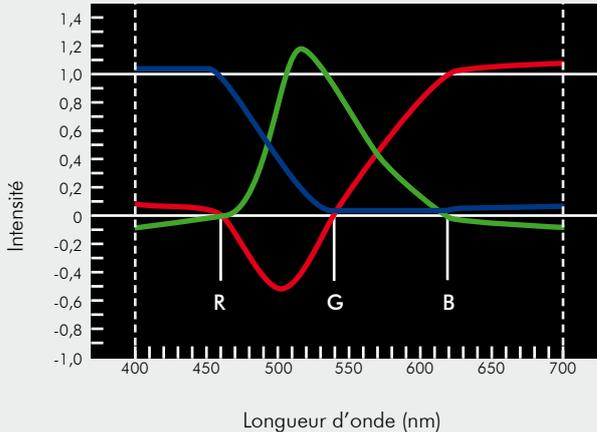
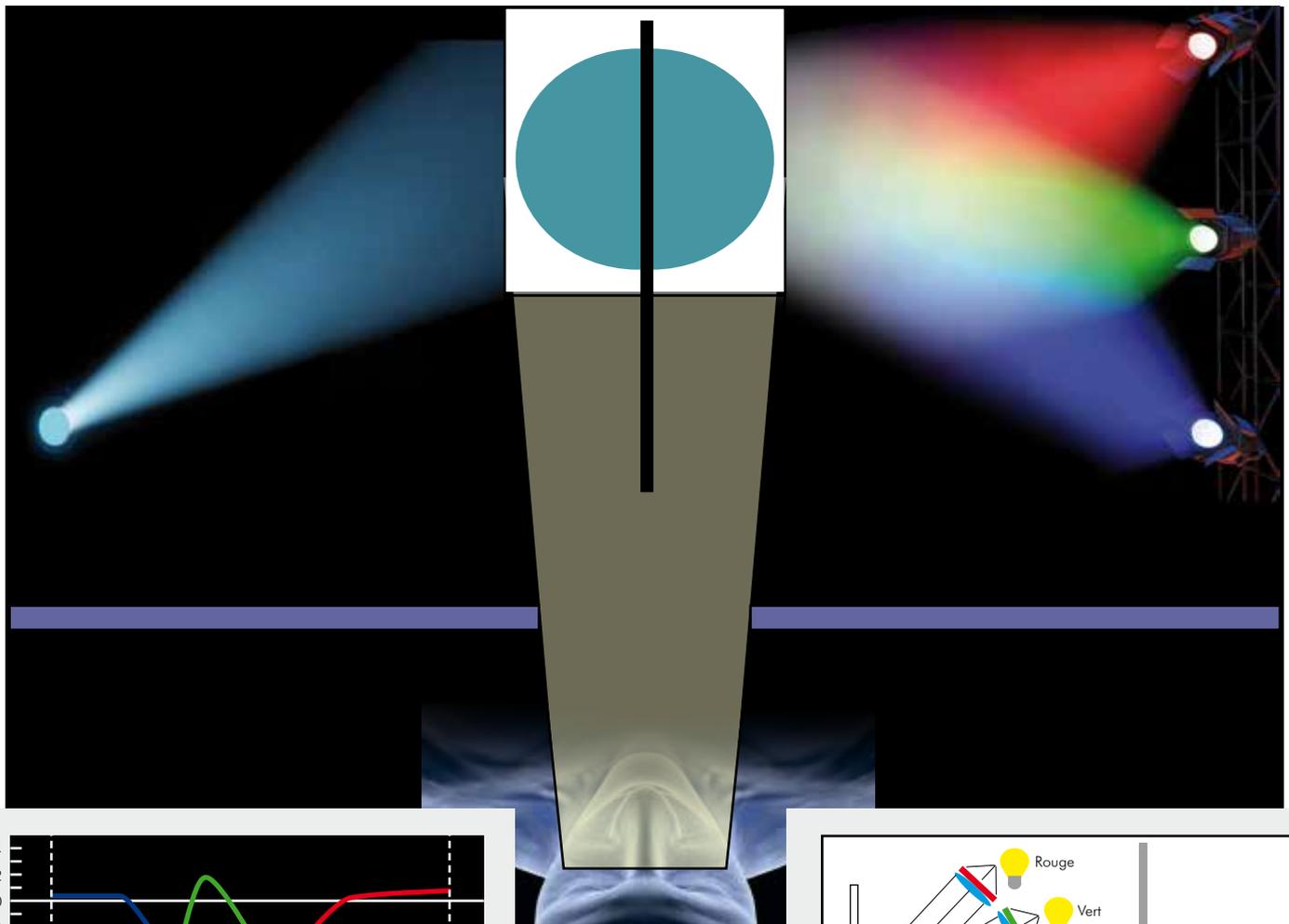
Des expériences ont été menées avec des observateurs humains possédant une vue normale afin d'établir un « observateur standard » qui servira de base pour l'ensemble des mesures et calculs colorimétriques.

Un écran divisé en deux a été utilisé dans ces expériences. Une couleur spécifique a été projetée d'un côté, tandis que de l'autre côté de l'écran trois projecteurs diffusaient des lumières de couleur bleu, vert et rouge. L'observateur devait reproduire la perception de couleur de la première couleur en modifiant l'intensité des trois sources lumineuses (théorie des trois couleurs). La quantité de rayonnement a été indiquée dans un tableau pour chaque modification effectuée aux trois sources lumineuses de couleurs

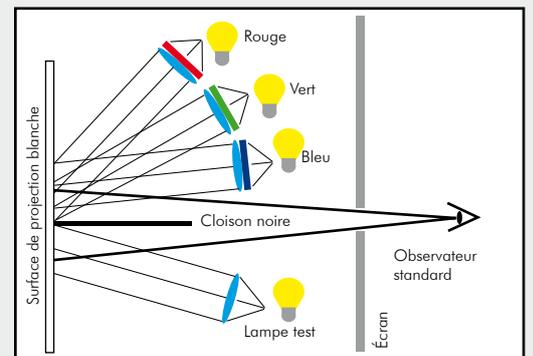
primaires et pour chaque modification apportée à la lumière expérimentale pour chaque longueur d'onde.

La gamme complète des stimuli de couleur perçus par les individus peut être enregistrée de cette manière ; la capacité à percevoir des couleurs a été enregistrée numériquement.

Les expériences les plus significatives dans la détermination de la perception trichromatique du stimulus de couleur de l'œil ont été effectuées en 1928 par W. D. Wright et en 1931 par J. Guild. Les essais réalisés par Wright et Guild ont permis de démontrer que les valeurs numériques différaient sensiblement les unes des autres car les sources lumineuses de couleurs primaires étaient légèrement différentes. Ces expériences sur le mélange additif des couleurs ont confirmé la théorie des trois composants de Young.

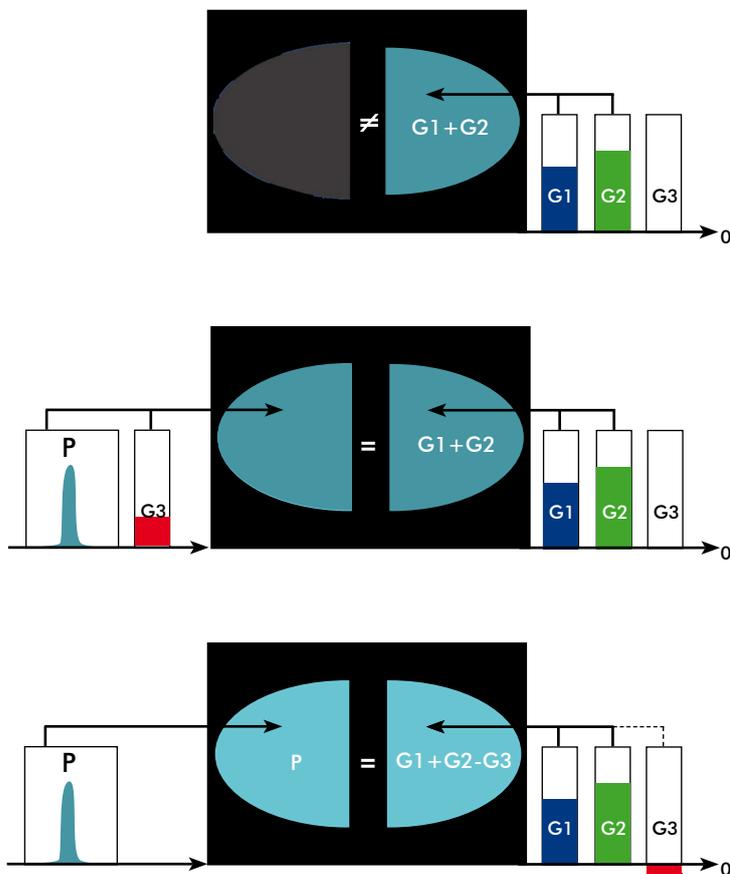


Expérience sur le mélange additif du rayonnement lumineux



## L'observateur de référence CIE31 petit champ ou observateur standard colorimétrique 2°

Les expériences menées sur le mélange additif des couleurs ont démontré que toutes les couleurs réelles ne pouvaient pas être créées avec les trois stimuli de couleurs primaires RVB de la CIE. Il était parfois nécessaire de mélanger l'échantillon de couleur avec l'une des trois couleurs primaires afin d'atteindre un résultat équivalent à celui du mélange des deux couleurs primaires restantes. Certaines couleurs peuvent donc être le résultat du mélange des trois couleurs primaires si une couleur primaire affiche une «



Partie de couleur primaire négative de même couleur après mélange de la couleur primaire avec l'échantillon de couleur.

$$P + G3 = G1 + G2$$

est équivalent à

$$P = G1 + G2 - G3$$

P ... échantillon de couleur, G1, G2, G3 ...  
trois couleurs primaires

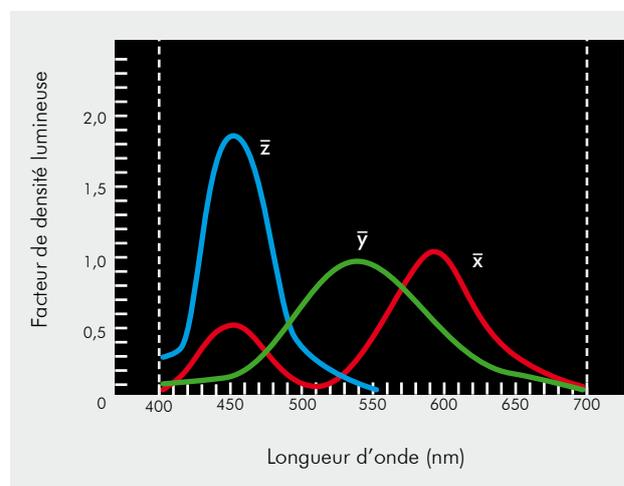
partie négative ». Par conséquent, pour certaines couleurs spectrales, les valeurs colorimétriques doivent être négatives.

Compte tenu de telles restrictions, la CIE a institué en 1931 trois valeurs mesurées « imaginaires » définies de manière arbitraire (X, Y et Z) comme stimuli de couleurs primaires, sélectionnées par méthode d'évaluation colorimétrique simple. Toutes les couleurs réelles peuvent être représentées par un mélange additif à l'aide de ces trois valeurs de mesure. Ces valeurs de mesure sont appelées « composantes trichromatiques de référence CIE », et l'espace colorimétrique est nommé « espace colorimétrique CIE XYZ ».

La transformation des stimuli de couleurs primaires RVB en stimuli de couleurs primaires XYZ a été effectuée avec les caractéristiques suivantes :

- Les valeurs négatives dans les équations ont été supprimées (à cette époque, les valeurs négatives étaient extrêmement difficiles à traiter de manière électronique)
- Définition d'un nouveau système composé de trois stimuli de couleurs primaires « imaginaires » x, y, z, de sorte que le lieu spectral se situe dans un triangle défini par ces trois stimuli de couleurs primaires
- La fonction y a été sélectionnée et calculée pour correspondre à la fonction d'efficacité lumineuse V<sup>(3)</sup> (CIE 1924), visant ainsi à simplifier les calculs
- La fonction z était égale à zéro pour la majeure partie du spectre visible, également à des fins de simplification des calculs
- Les calculs ont été effectués pour une source lumineuse avec une intensité de rayonnement égale ainsi que pour l'ensemble de la plage spectrale, de sorte que les zones des fonctions x, y, z sont les mêmes.

Les fonctions résultantes sont nommées fonctions colorimétriques CIE x, y, z. Ce ne sont pas des fonctions réelles à proprement parler ; elles représentent l'observateur standard moyen.



Fonctions colorimétriques  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  de l'observateur de référence colorimétrique 2° (CIE31)

Le champ visuel de l'observateur de standard 2° correspond à la taille d'une pièce de 1 euro que vous tenez avec votre bras tendu devant vous.

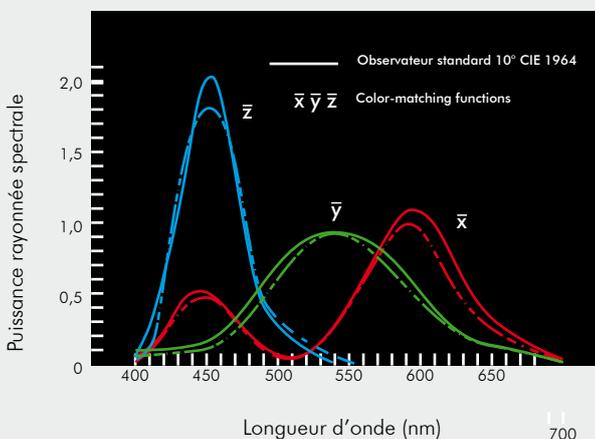
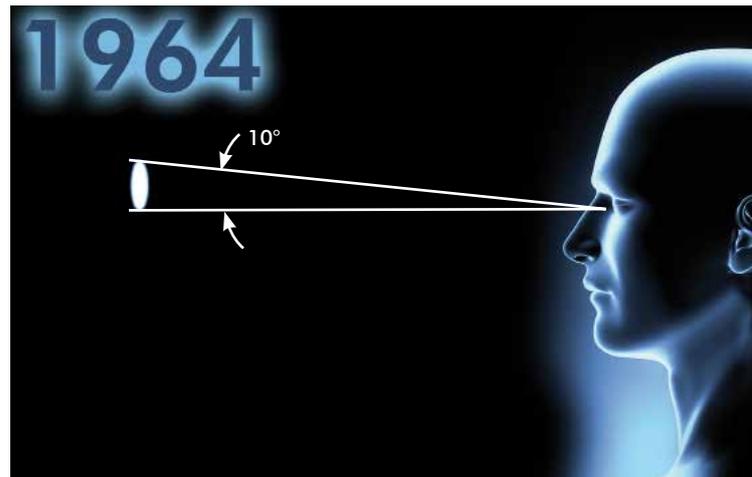
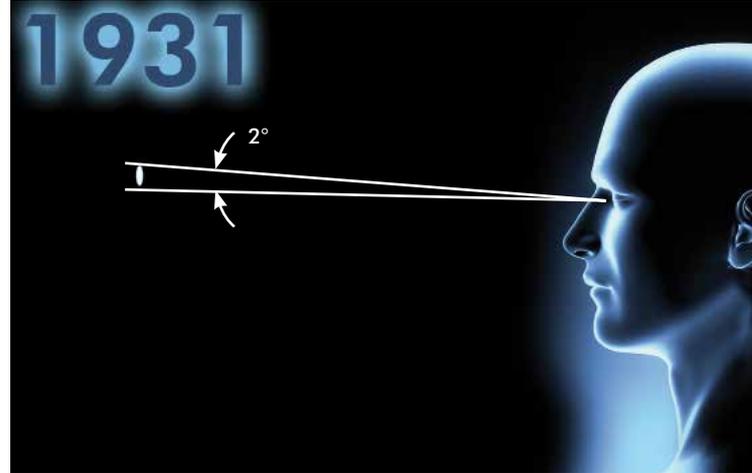
## L'observateur standard CIE64 grand champ ou observateur de référence colorimétrique 10°

Pour intégrer la perception humaine de manière contrôlée dans un résultat de mesure, il a fallu spécifier un standard pour la vision humaine. Les observateurs de référence CIE ont permis de définir cette vision normalisée.

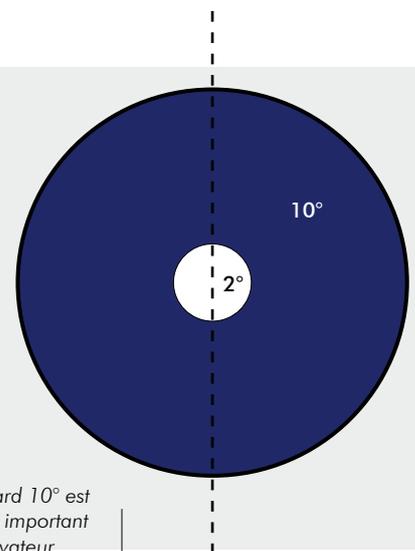
L'observateur de référence CIE31 ou observateur de référence 2° découle d'une expérience visant à déterminer la perception des couleurs moyenne chez l'observateur humain. À cette fin, il a été considéré que les humains perçoivent les couleurs de manière plus précise lorsqu'ils utilisent la zone dans l'œil présentant la plus grande acuité visuelle (fovea ou tache jaune). Lorsqu'un échantillon de couleur est examiné à une distance d'observation normale, cette région s'écarte d'environ 2° de l'axe optique de l'œil. On a donc établi que l'angle à partir duquel l'observateur de référence voit devrait être exactement de 2°. Cet angle correspond à un champ de vision de la taille d'une pièce de 1 euro que vous tenez avec votre bras tendu devant vous.

Toutefois, le champ visuel normal de la perception humaine est supérieur à cette zone de 2°. Jacobsen (1948) et Judd (1949) ont également confirmé que les calculs colorimétriques basés sur l'angle à 2° ne correspondaient pas avec précision aux observations réelles effectuées dans la plage des longueurs d'onde courtes (surtout pour le violet). La CIE a donc proposé en 1960 un autre angle d'observation de référence,

l'observateur de référence 10°. Cet angle correspond à un champ de vision de la taille d'une page A4 à une distance d'observation normale de 30 cm. Les fonctions colorimétriques  $\bar{x}_{10}$ ,  $\bar{y}_{10}$ ,  $\bar{z}_{10}$  de ce nouvel observateur de référence ont finalement été définies par la CIE comme étant la norme en 1964.



Fonctions colorimétriques  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  de l'observateur standard 10° (CIE 1964)



Le champ visuel de l'observateur standard 10° est environ 27 fois plus important que celui de l'observateur standard 2°.

## Le diagramme de chromaticité selon le système colorimétrique de référence CIE31

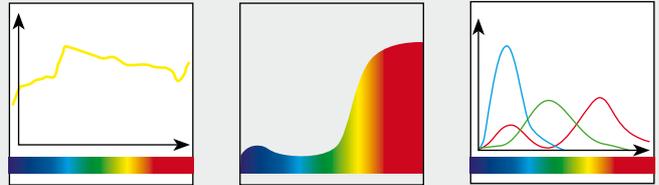
À l'aide des fonctions colorimétriques standard  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  de l'observateur standard, la courbe spectrale peut être convertie en 3 valeurs : les composantes trichromatiques de référence X, Y et Z. Grâce à ces dernières, la couleur d'un objet ou d'une source lumineuse peut être déterminée au moyen de trois valeurs de mesure.

Exemple : Calcul de la composante trichromatique de référence X d'une spécification chromatique.

Pour chaque longueur d'onde du spectre visible, la valeur de la fonction colorimétrique  $x$  est multipliée par la valeur de la puissance rayonnée spectrale  $S$  d'un type d'illuminant normalisé pour la même longueur d'onde. Ce calcul est réalisé pour chaque incrément de longueur d'onde sélectionné ( $d\lambda$ ) dans l'ensemble de la plage spectrale (400 nm – 700 nm). Le total de ces produits calculés pour toutes les longueurs d'onde ( $\Sigma$  de 400 – 700 nm) est ensuite calculé.

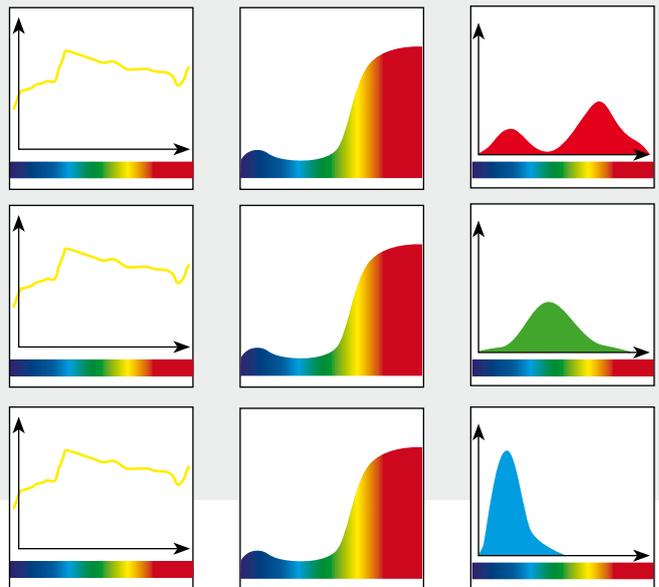


perception des couleurs



= description colorimétrique

$$X = \sum_{400}^{700}$$



Pour classer la couleur avec précision, nous avons besoin des éléments suivants :

1. la répartition du rayonnement pour le type d'illuminant (E)
2. le coefficient de réflexion/réfectance physique dépendant de la longueur d'onde de l'objet (R)
3. les spécifications chromatiques pour l'observateur/la fonction colorimétrique des couleurs de l'observateur standard  $\bar{x}$

Pour calculer la spécification chromatique d'un objet coloré, le rayonnement  $S(\lambda)$  est intégré au produit  $E(\lambda)$

- $R(\lambda)$  pour chaque longueur d'onde ; autrement dit, le rayonnement de la source lumineuse  $E(\lambda)$  qui éclaire un objet est réduit par le pourcentage du coefficient de réflexion de cet objet.

C'est le cas pour chaque incrément de longueur d'onde ( $\Delta\lambda$ ).

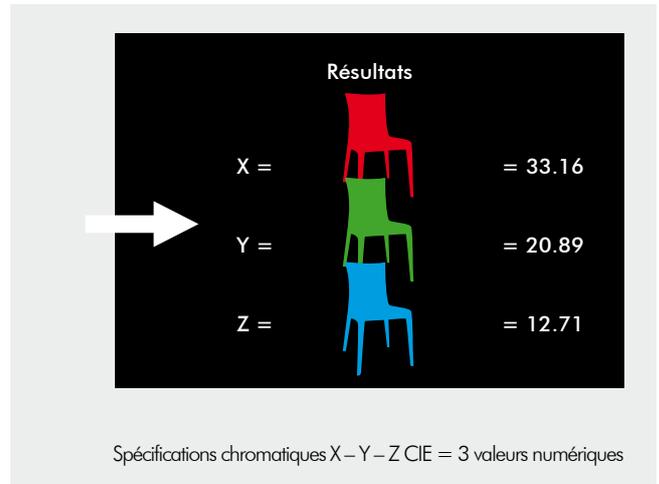
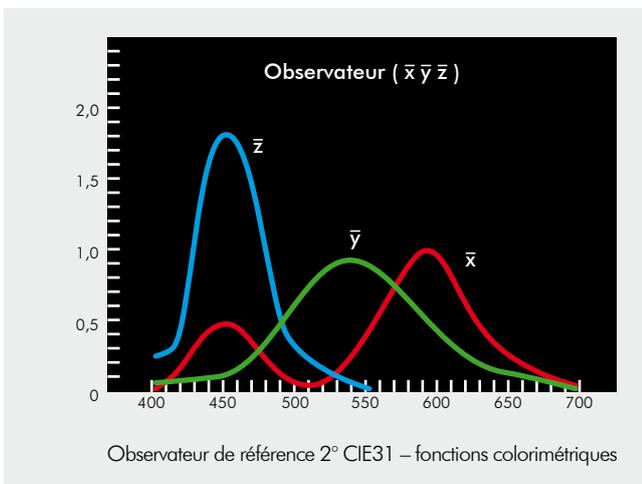
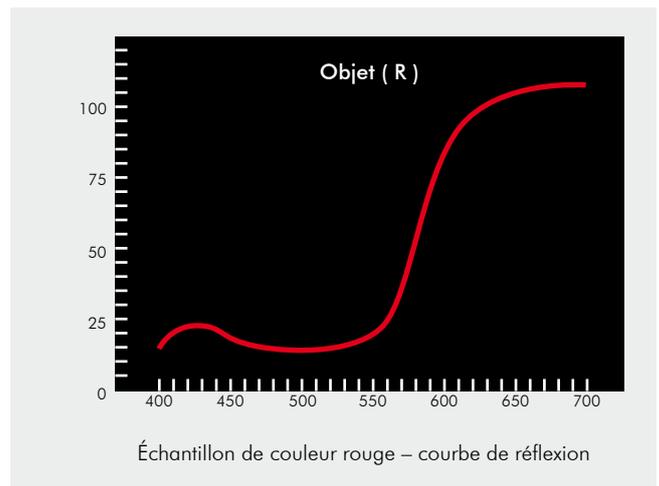
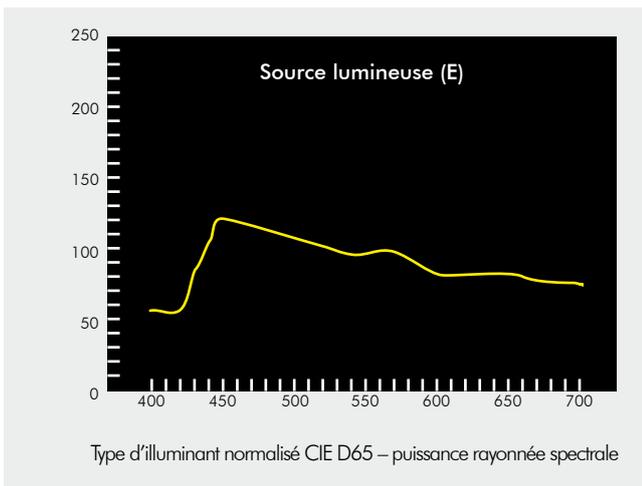
Par conséquent, la formule mathématique de la composante trichromatique de référence X de l'objet coloré est la suivante :

$$X = \sum_{400}^{700} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

où

- $dE$  = le rayonnement de la source lumineuse (type d'illuminant)
- $R$  = coefficient de réflexion
- $\bar{x}$  = la fonction colorimétrique des couleurs de l'observateur de référence
- $\lambda$  = symbole de la longueur d'onde ; si  $(\lambda)$  suit un autre symbole, cela signifie qu'il dépend de la longueur d'onde

Y et Z se calculent de la même manière.



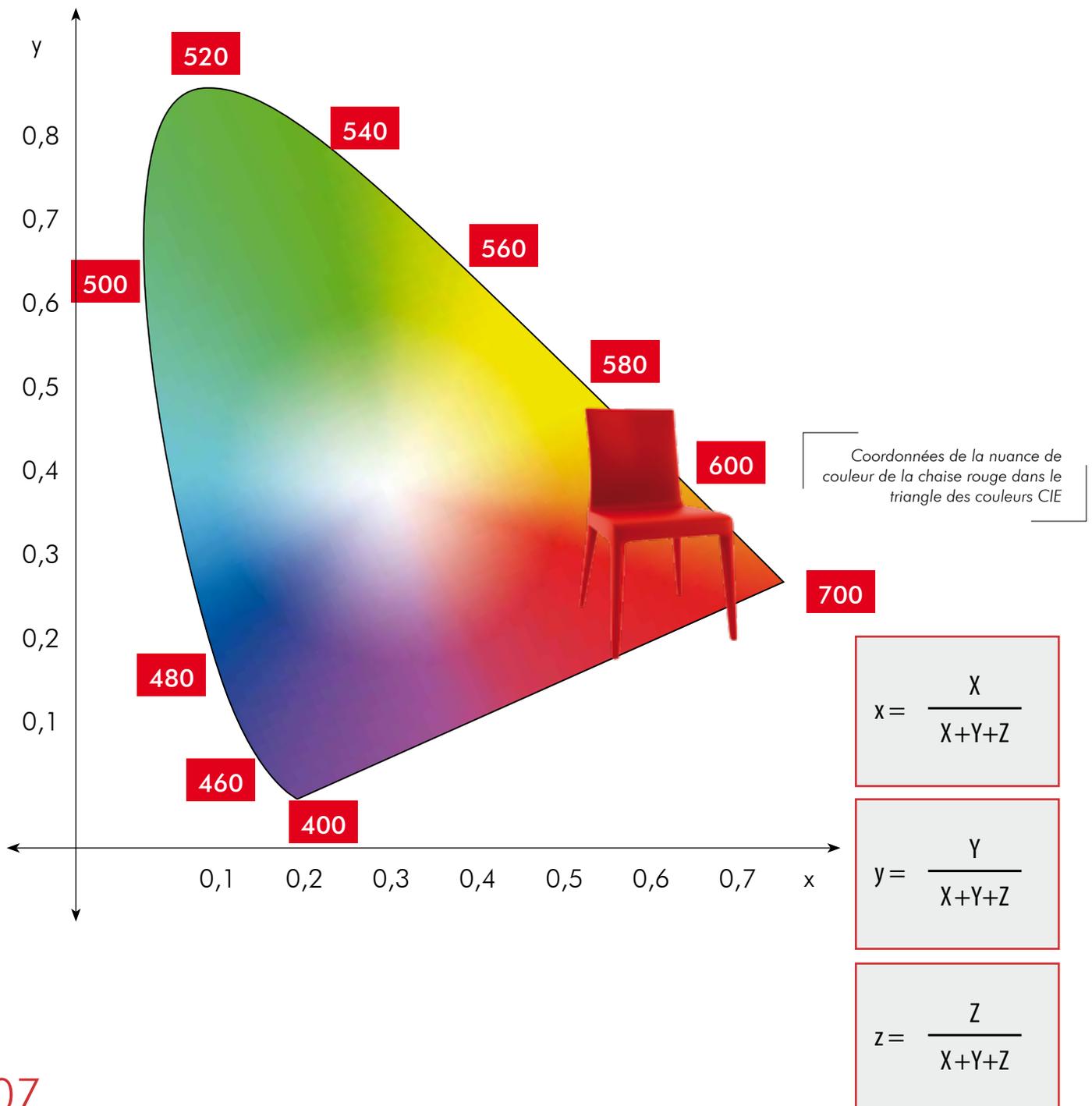
Puissance rayonnée spectrale (E) x coefficients de réflexion (R) x fonctions colorimétriques ( $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ ) = 3 valeurs de couleurs (X, Y, Z)

The calculation principle for the standard color values XYZ

## Le diagramme de chromaticité selon le système colorimétrique de référence CIE31

Une couleur peut être déterminée avec une très grande précision à l'aide des composantes trichromatiques de référence XYZ du système colorimétrique de référence CIE31. Il est toutefois extrêmement complexe d'établir la corrélation avec l'évaluation visuelle. Bien que la composante trichromatique de référence Y corresponde assez bien à la sensation de luminance, il est très difficile de rapprocher les composantes X et Z avec les critères de teinte et de saturation dans la perception visuelle des couleurs.

Afin de représenter l'espace colorimétrique tridimensionnel perçu par l'observateur (sur le plan de la chromaticité) de façon plus claire, la CIE a développé le diagramme de chromaticité standard bidimensionnel. Ce diagramme peut être utilisé pour évaluer les spécifications chromatiques séparément de la luminosité. À cette fin, la CIE a soumis les coordonnées chromatiques standard  $x$ ,  $y$  et  $z$ , où  $x$  et  $y$  sont utilisées pour déterminer la chromaticité. « Petit  $x$  » correspond à la coordonnée relativement rouge et « petit  $y$  » représente donc la coordonnée relativement verte ( $z$  n'est pas utilisé car  $z = 1-x-y$ ). Pour le « fer à cheval » dans notre exemple ci-dessous, les coordonnées chromatiques sont les suivantes :  $x = 0,4967$  et  $y = 0,3129$  pour l'illuminant normalisé D65 et un observateur de référence 2°.



La CIE a soumis un système de coordonnées avec  $x$  comme abscisse et  $y$  comme ordonnée pour la représentation graphique. Les coordonnées chromatiques des couleurs pures dans le spectre visible forment une courbe concave en forme de « semelle de chaussure ». Il s'agit du lieu du spectre. Toutes les lumières de couleurs possibles sont représentées dans la zone intérieure (également appelée triangle des couleurs) de la « semelle de chaussure ». Chaque point de couleur de cette zone possède une chromaticité différente. Les nuances bleues et vertes sont situées dans la partie supérieure du triangle des couleurs, les nuances violettes en bas à gauche et les nuances rouges en bas à droite. La ligne droite qui relie le violet au rouge est appelée ligne des pourpres (le pourpre n'est pas une couleur spectrale !). Cet espace délimité comprend les points de couleur de l'ensemble des chromaticités réelles.

Au centre de cette zone se trouve le point achromatique neutre ( $x = 0,333$ ,  $y = 0,333$ ) d'une source lumineuse avec un rayonnement d'égale énergie, nommé aussi point blanc. Le point blanc diffère en fonction du type d'illuminant utilisé, car chaque type d'illuminant possède une composition spectrale différente. L'illuminant normalisé A (lumière émise par une ampoule) se situe dans une zone beaucoup plus jaune/orange que les autres illuminants normalisés. L'illuminant normalisé D65 (lumière du jour) est plus blanc et proche de la zone centrale.

Afin de simplifier la détermination et la classification d'une couleur dans le diagramme de chromaticité standard CIE31, la longueur d'onde d'égale teinte et la saturation d'une couleur peuvent être définies au lieu des coordonnées chromatiques standard. Cette méthode permet de définir une couleur selon la teinte et la saturation, comme pour la classification visuelle. C'est également l'avantage qu'offre cette méthode. La longueur d'onde d'égale teinte correspond à la longueur d'onde associée au mélange additif des couleurs pour la couleur requise. Elle décrit la teinte du point de couleur pure. La saturation représente la proportion en pourcentage de la couleur pure dans le mélange. Le degré de saturation le plus élevé est égal à 1, ce qui correspond à la couleur pure. Un niveau de saturation égal à 0 correspond à la couleur du type illuminant (lumière blanche). La saturation est à son plus haut niveau sur le lieu du spectre et à son niveau le plus bas au point achromatique central.

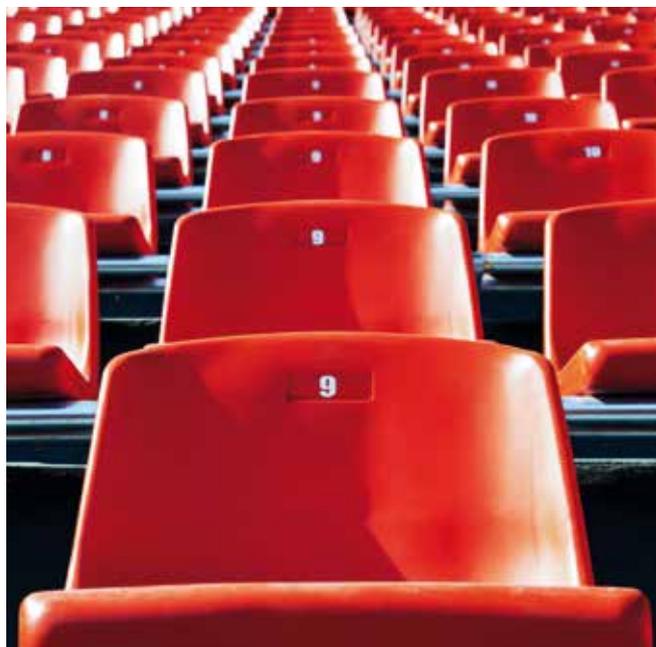
## Conclusion – notes

La saturation représente la proportion en pourcentage de la couleur pure dans le mélange. Le degré de saturation le plus élevé est égal à 1, ce qui correspond à la couleur pure. Un niveau de saturation égal à 0 correspond à la couleur du type illuminant (lumière blanche). La saturation est à son plus haut niveau sur le lieu du spectre et à son niveau le plus bas au point achromatique central.

Jusqu'ici, on peut donc considérer que la couleur d'un objet, par exemple l'échantillon rouge, peut être déterminée avec précision à l'aide du système colorimétrique standard CIE31 et des trois valeurs de mesure  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ , tout en tenant compte du type d'illuminant normalisé et de l'observateur de référence CIE31.

Le système colorimétrique standard CIE31 constitue la base scientifique des systèmes modernes de mesure colorimétrique.

Tous les travaux et recherches effectués depuis 1936 jusqu'à aujourd'hui sur le développement de nouvelles formules colorimétriques ont été basés sur ce système. Bien que ce dernier ait permis de déterminer une couleur avec une très grande précision à l'aide des trois valeurs de mesure, il a fait à plusieurs reprises l'objet de nombreuses études et améliorations. Les chapitres suivants apportent plus de détails sur certaines de ces recherches.



# L'œil – l'observateur

## L'observateur humain – la vision des couleurs

Le troisième composant du triplet est l'observateur ou l'appareil perceptif de la personne (œil et cortex cérébral).

La lumière réfléchie par un objet ou directement rayonnée par une source lumineuse est absorbée par l'œil et convertie par les photorécepteurs situés au fond de la rétine. Les informations sont ensuite traitées par le cerveau pour donner lieu à la sensation colorée.

En fonction de la longueur d'onde, l'œil réagit différemment à l'intensité lumineuse dans le spectre visible (voir chapitre 9). Nous percevons la lumière à différents niveaux de luminance (vision diurne/nocturne), et nous voyons également les caractéristiques de la couleur (teinte et saturation) ; nous organisons ensuite les couleurs dans un système tridimensionnel.

Or, cela exige trois types différents de récepteurs dans l'œil humain, comme la science l'a depuis longtemps démontré. La publication en 1666 des travaux de Newton sur le fractionnement de la lumière blanche traversant un prisme de verre nous a permis de comprendre le processus de perception de la couleur par l'œil humain. Par contre, les résultats et les progrès les plus importants n'ont été réalisés qu'au moment où il a été possible de mesurer la sensibilité des récepteurs de couleur situés au fond de l'œil.

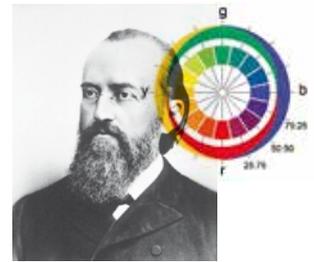
En 1801, Thomas Young, un physicien et médecin anglais spécialisé dans l'ophtalmologie, formula sa théorie de la trivariance visuelle. Selon lui, la perception humaine de la couleur est basée sur trois types différents de récepteurs (perception trichromatique du stimulus de couleur). 50 ans plus tard, le scientifique allemand Hermann von Helmholtz a établi une théorie de la vision des couleurs qui vient s'ajouter à celle proposée par Thomas Young. Il a démontré que trois



Thomas Young



Hermann von Helmholtz



Ewald Hering

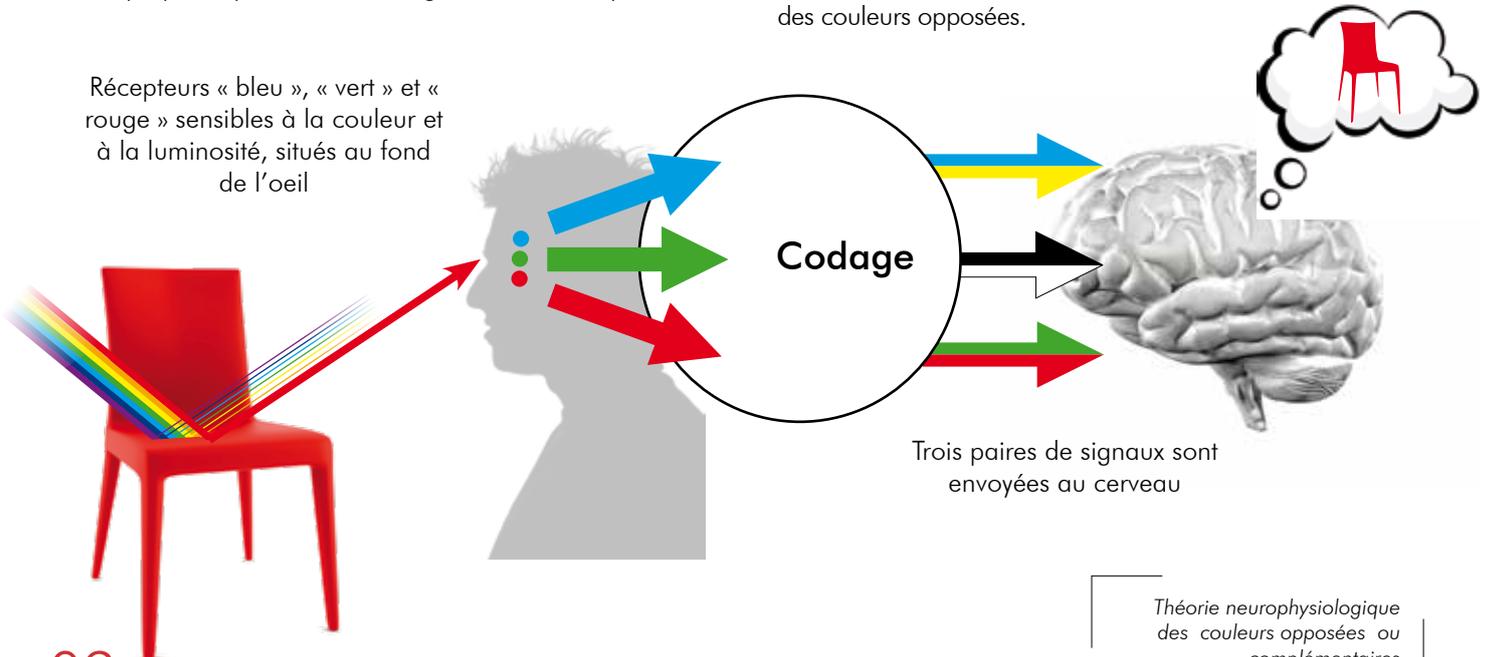
couleurs primaires (le rouge, le vert et le bleu) suffisaient à créer toutes les autres.

En 1878, Ewald Hering a publié une autre théorie des couleurs opposée à celle des des trois composants formulée par Helmholtz et Young. Hering est parti du constat que des sensations de couleur telles que le « bleu jaunâtre » ou le « vert rougeâtre » ne peuvent être discernées (élimination mutuelle du jaune et du bleu ou du vert et du rouge). Il a donc supposé qu'il existait trois processus chimiques distincts dans la rétine avec chacun deux couleurs opposées, chacune essayant de parvenir à un équilibre avec une partie stimulante et une partie inhibitrice. Les paires de couleurs opposées sont : le bleu et le jaune, le rouge et le vert et le noir et le blanc.

De nombreuses expériences ont été effectuées par la suite avec 3 projecteurs de lumière colorée (rouge, bleu et vert) et ont montré qu'une large gamme de couleurs peut être créée en modifiant l'intensité lumineuse de ces 3 projecteurs. Les résultats ont permis d'évaluer les perceptions trichromatiques du stimulus de couleur et les expériences menées par W. D. Wright en 1928 et par J. D. Guild en 1931 sur le mélange additif des couleurs, entre autres.

Jusqu'au début du 20ème siècle, divers scientifiques ont mené de nombreuses expériences visant à étudier notre système de perception des couleurs. Les théories élaborées par Young/Helmholtz et Hering se sont affrontées jusque dans les années 30, lorsqu'E. Müller a finalement confirmé la théorie des couleurs opposées.

Le système des couleurs naturelles (NCS) et le modèle colorimétrique  $L^*a^*b^*$ , par exemple, sont basés sur la théorie des couleurs opposées.



*Théorie neurophysiologique des couleurs opposées ou complémentaires*



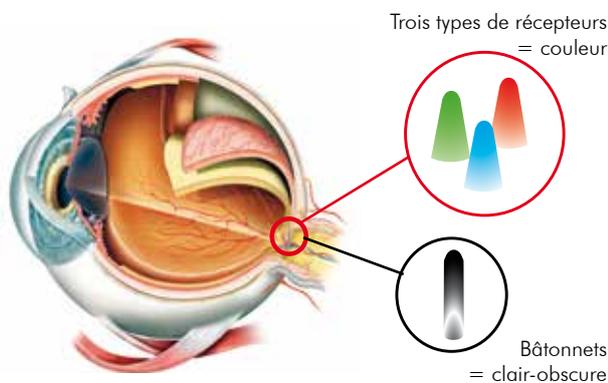
Wilhelm von Bezold

Bezold-Farbtafel 1874

Ernst von Brücke

## L'œil humain

Ce que nous voyons comme couleur sont des ondes lumineuses de longueurs différentes qui pénètrent dans l'œil. La lumière réfléchiée par un objet déclenche un stimulus dans les photorécepteurs de la rétine. Ces photorécepteurs contiennent des cônes et des bâtonnets. Les bâtonnets sont sensibles uniquement à la lumière et l'obscurité et sont responsables de



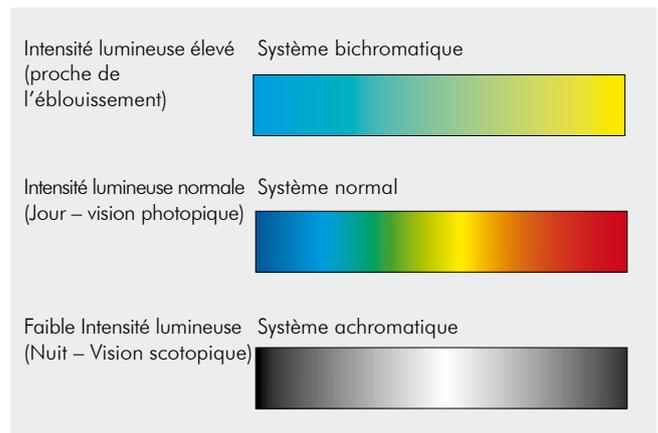
la vision scotopique. Les bâtonnets nous permettent de voir et de distinguer les nuances de gris sous un éclairage faible. Les bâtonnets ne nous permettent cependant pas de distinguer les couleurs (teintes).

À la lumière du jour, les bâtonnets sont complètement saturés et incapables de traiter les données. Sous un bon éclairage, par exemple une lumière du jour normale, nous voyons uniquement à l'aide des cônes (vision photopique), et ce sont précisément eux qui nous permettent de distinguer les couleurs.

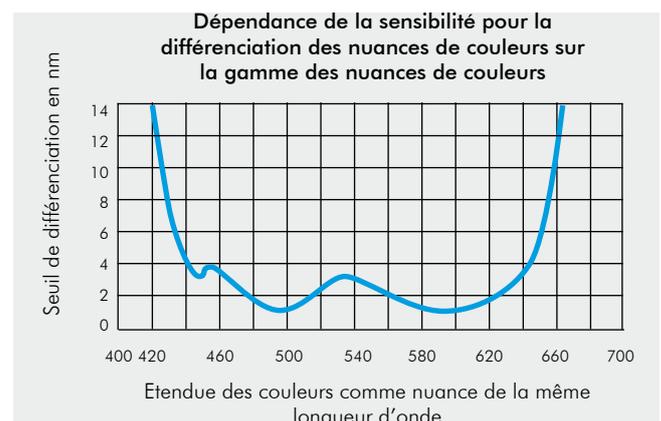
La rétine contient environ 7 millions de cônes et 120 millions de bâtonnets. Tous les photorécepteurs ont un niveau de sensibilité semblable, mais les cônes sont concentrés au niveau des points de sortie communs, ce qui les rend plus sensibles à la vision périphérique. Il existe trois types de récepteurs de couleur dans l'œil (bleu, rouge et vert). Ils se trouvent principalement dans la tache jaune située au milieu de la rétine. Au centre de la fovea (tache jaune), on ne trouve que des cônes. La répartition moyenne pour le vert: rouge : bleu est de 40 : 20 : 1. La sensibilité maximum pour le bleu est de 477 nm, de 540 nm pour le vert et de 577 nm pour le rouge. On qualifie généralement les cônes bleus de cônes S (pour « short » ou longueur d'onde courte), les cônes verts de cônes M (pour « medium » ou longueur d'onde moyenne), et les cônes rouges de cônes L (pour « long » ou longue longueur d'onde).

La différenciation des couleurs, ou plus précisément, la différenciation des nuances de couleur par l'œil humain, dépend de la densité lumineuse. Pour une intensité lumineuse

L'effet BEZOLD-BRÜCKE : modification de la forme de l'apparence et de la couleur selon l'intensité lumineuse



très faible, un stimulus de couleur entre 400 nm et 480 nm génère une spécification chromatique bleu-violet, le vert est perçu entre 480 nm et 570 nm et le rouge entre 570 nm et la limite de visibilité des longueurs d'onde à 700 nm. Cet effet est ce que l'on appelle le phénomène de Bezold-Brücke. Il a été découvert en 1873 et nommé d'après le physicien allemand Wilhelm von Bezold et le physiologiste austro-allemand Ernst Wilhelm von Brücke. La différenciation s'améliore avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, mais elle s'aggrave à nouveau lorsque l'intensité est élevée. Une forte augmentation de l'éclairage entraîne donc une modification des nuances rouge et vert vers le jaune, et des nuances violet et bleu vert vers le bleu. Lorsque l'œil humain est ébloui, il ne perçoit plus qu'un jaune blanchâtre et un bleu violet blanchâtre. On peut donc obtenir un système bichromatique uniquement avec 2 couleurs, le jaune et le bleu. Lors d'une évaluation visuelle et instrumentale de la couleur, les conditions d'éclairage doivent être normales (environ 1 500 lux) ; en d'autres termes, elles doivent remplir les conditions préalables à la vision photopique.



# Les espaces colorimétriques

## Général

La notation des valeurs tristimulus a permis de créer la première carte de l'espace colorimétrique, le diagramme de chromaticité CIE. L'élaboration d'une carte a marqué une étape décisive dans la science de la colorimétrie. Si vous pouvez localiser des objets sur une carte, vous pouvez mesurer la distance entre eux.

Ces distances représentent, bien que de façon imparfaite, les écarts de couleur entre les échantillons. Le diagramme de chromaticité CIE a été le premier outil largement utilisé pour l'expression des différences visuelles à l'aide de chiffres.

Il sert encore aujourd'hui de support aux efforts en cours visant à élaborer et perfectionner les cartes de l'espace colorimétrique et les calculs colorimétriques.

Aujourd'hui, nous utilisons des chiffres pour spécifier les couleurs, décrire les écarts de couleurs, définir les tolérances colorimétriques et évaluer l'uniformité et l'acceptabilité des produits colorés. Surtout, nous observons désormais une meilleure concordance entre la description numérique des écarts de couleurs et ce que nous distinguons visuellement.

## Histoire – développement de 1905 à 1976

Au début du 20ème siècle, Albert Henry Munsell a développé un système colorimétrique en s'appuyant sur des données scientifiques. Il a défini des couleurs en fonction des caractéristiques mesurables de la saturation ainsi que de la clarté et la teinte des couleurs, en les organisant en trois dimensions. Munsell a décrit ce système dans « La notation des couleurs » qui fut publié en 1905. Le premier atlas des couleurs qui montre l'espace colorimétrique tridimensionnel sous différentes perspectives est paru en 1915.

L'atlas des couleurs de MUNSELL était consacré à la perception des couleurs par l'observateur humain et regroupait les éléments suivants :

- un modèle d'équilibre optique (espace colorimétrique uniforme) et
- une méthode pour la détermination réciproque des couleurs, où chaque couleur ne peut occuper qu'un seul emplacement.

La CIE a ainsi été amenée à développer des transformations mathématiques pour l'espace colorimétrique CIE31 afin de maintenir un espace colorimétrique uniforme.

En 1976, deux nouveaux systèmes ont été recommandés par la CIE : les espaces colorimétriques CIELuv et CIELab. Pour permettre de faire une distinction avec d'autres systèmes (notamment le système Hunter), un \* a été ajouté à tous les paramètres utilisés (par exemple,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).

Le système CIELuv est principalement utilisé pour le mélange additif des couleurs, par ex. la mesure colorimétrique de la lumière projetée par les scanners et les moniteurs. Le système CIELab se limite à l'examen des couleurs des objets.

Le système CIELab étant le plus couramment utilisé dans les applications de mesure colorimétrique, c'est celui que nous examinerons de plus près.

David L. MacAdam

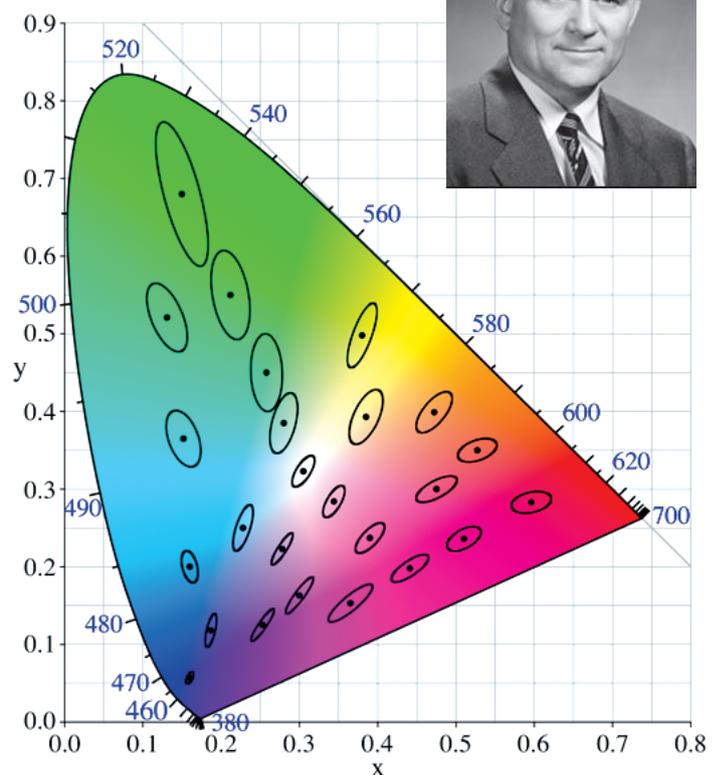


Diagramme des couleurs CIE avec MacAdam-Ellipsen

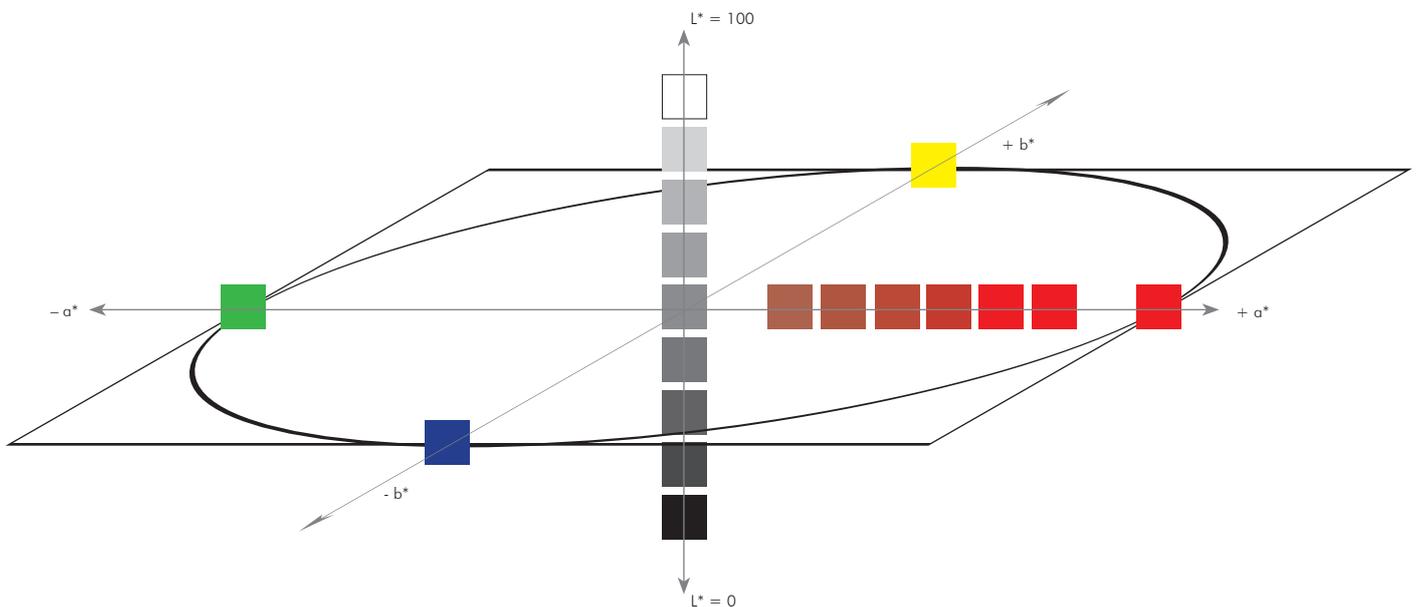
## L'espace couleur CIE Lab – définitions et caractéristiques

L'espace colorimétrique défini par la CIE en 1976, également appelé espace colorimétrique CIELAB, est basé sur une transformation non linéaire des coordonnées tristimulus CIE 1931, X, Y et Z. La création de cet espace colorimétrique visait deux objectifs :

- L'uniformité. Les distances calculées entre les échantillons doivent correspondre de manière uniforme avec les différences visuelles entre les échantillons
- La simplicité. L'utilisateur devait disposer d'un moyen simple pour interpréter les données.

L'espace colorimétrique CIE Lab, selon certaines conditions, est une échelle uniforme et indépendante de l'appareil. Chaque couleur perceptible dans l'espace colorimétrique est déterminée à l'aide du point de couleur possédant des coordonnées  $\{L^*, a^*, b^*\}$ . Ici, conformément à la théorie des couleurs opposées, le vert et le rouge se situent le long de l'axe  $a^*$ . L'axe  $b^*$  correspond aux couleurs opposées bleu et jaune. L'axe  $L^*$  est perpendiculaire à ce plan et représente la clarté. L'axe  $L^*$  est également appelé axe gris neutre : une de ses extrémités est noire ( $L^* = 0$ ) alors que l'autre est blanche ( $L^* = 100$ ), et les valeurs comprises entre ces limites sont des nuances achromatiques de gris.

L'espace couleur CIE Lab : les méthodes de détermination.



La formule pour la transformation et le calcul de l'espace colorimétrique CIE76 (CIELab) basée sur XYZ (CIE31) est la suivante :

Valeurs de :  $L^*$   $a^*$   $b^*$

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{pour } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \quad a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$L^* = 903.3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{pour } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \quad b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

où

■ Si  $\frac{X}{X_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}}$ , autre  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7.787 \left(\frac{X}{X_n}\right)$

■ Si  $\frac{Y}{Y_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}$ , autre  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7.787 \left(\frac{Y}{Y_n}\right)$

■ Si  $\frac{Z}{Z_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}$ , autre  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7.787 \left(\frac{Z}{Z_n}\right)$

Les valeurs  $X_n, Y_n, Z_n$  sont les valeurs de couleur du blanc absolu (de préférence un stimulus de couleur achromatique) de la couleur d'un corps pour le type d'illuminant normalisé CIE donné (D65 ou A, par exemple). Dans les conditions décrites,  $X_n, Y_n, Z_n$  représentent des valeurs de couleur pour le type d'illuminant normalisé, où  $Y_n$  est égal à 100

Par exemple pour D65/10°:

$X_n = 94.81$

$Y_n = 100.00$

$Z_n = 107.304$

Pour décrire les distances entre les couleurs à l'aide des facteurs de corrélation de luminosité, de coloration (saturation) et de teinte, les règles définies suivantes peuvent être utilisées :

◦ **Luminosité CIE76 :  $L^*$**

Le paramètre  $L^*$  est déterminé par la relation:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{pour } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{pour } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856$$

◦ **Saturation – Coloration CIE76 :  $C^*$**

Le paramètre  $C^*$  est déterminé par la relation suivante:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

◦ **Angle de teinte CIE76 :  $h$**

Le paramètre  $h$  est déterminé par la relation suivante :

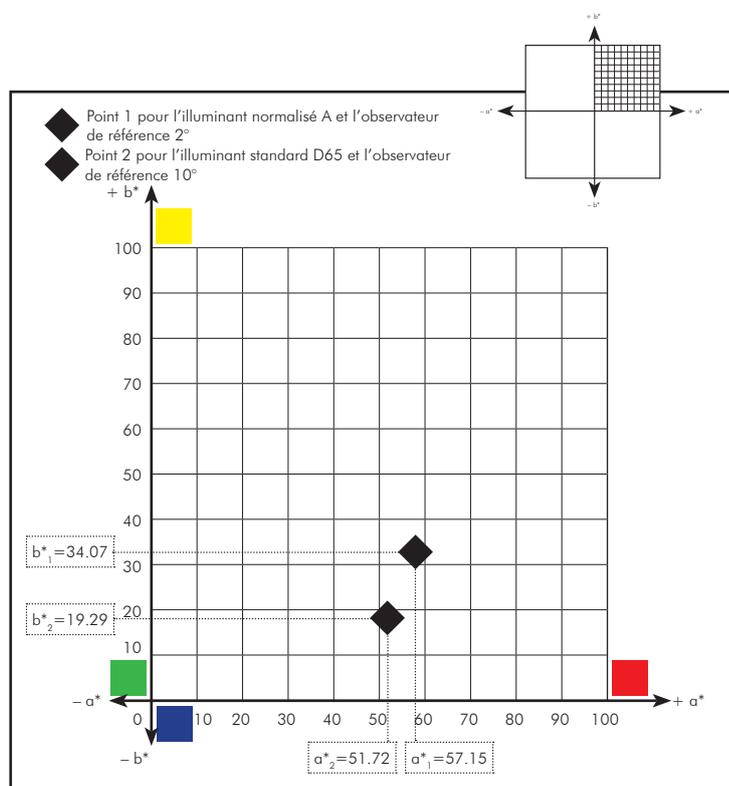
$$h = \text{arc tg} \left( \frac{b^*}{a^*} \right)$$

De plus, l'espace colorimétrique CIE Lab présente les caractéristiques d'un espace euclidien. Chaque point peut être décrit par :

- Ses coordonnées cartésiennes  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$ , où

- $L^*$  représente la clarté
- $a^*$  représente la composante chromatique rouge/vert
- $b^*$  représente la composante chromatique jaune/bleu

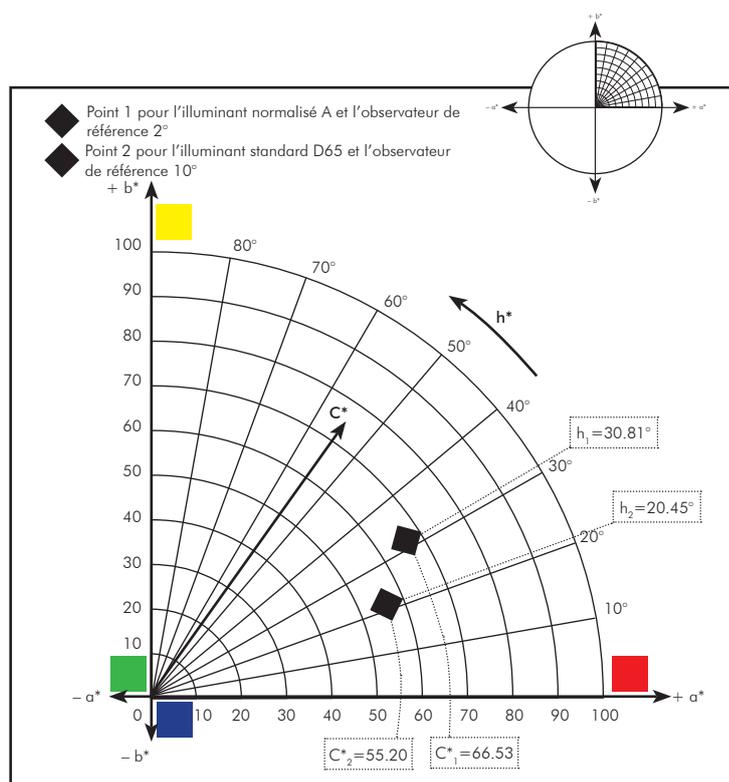
Position des points de couleur dans les coordonnées cartésiennes  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  du système CIE Lab



- Ou par ses coordonnées cylindriques  $L^*$ ,  $C^*$  et  $h$ , où

- $L^*$  représente la clarté
- $C^*$  représente la vivacité (ou saturation)
- $h$  représente l'angle de teinte ou la nuance de couleur.

Position des points de couleur dans les coordonnées cylindriques  $L^*$ ,  $C^*$  et  $h$  du système CIE Lab

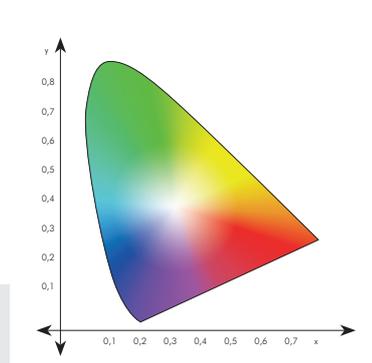
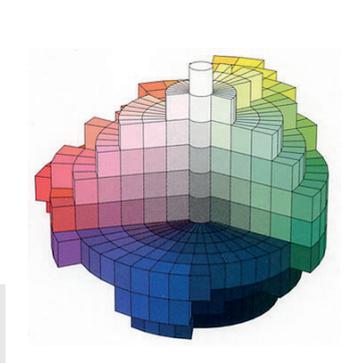
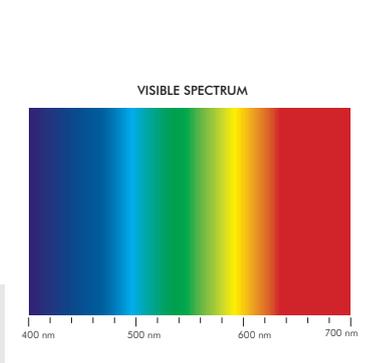


Suite à la transformation, il n'existe pas de diagramme de chromaticité pour l'espace couleur CIE Lab. Dans les plans de couleurs définis par les valeurs  $a^*$ ,  $b^*$  ou  $C^*$  et  $h$ , aucune couleur ne peut plus être ajoutée.

L'espace colorimétrique CIE Lab est à peu près (c.-à-d. pas entièrement) structuré selon la perception ; il correspond, sur le plan statistique, à la perception visuelle humaine des couleurs. Par conséquent, il n'est pas strictement uniforme pour l'évaluation des couleurs en termes de psychologie de la perception, mais il facilite l'interprétation d'un point de couleur et des écarts colorimétriques.

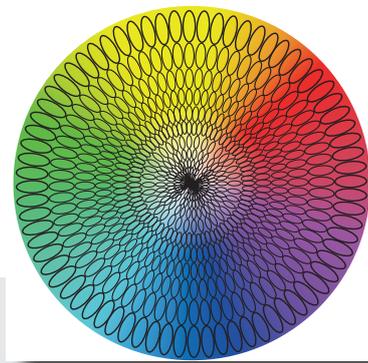
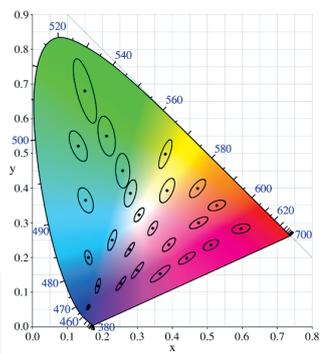
## De la couleur à la mesure colorimétrique

Les chapitres précédents étaient consacrés au développement de la mesure colorimétrique, de l'évaluation visuelle à la détermination d'une couleur à l'aide de systèmes colorimétriques normalisés CIE31 et CIELab 1976, tout en tenant compte des couleurs individuelles ou isolées. Les chapitres suivants traitent de l'évaluation des distances entre deux couleurs ou plus et l'acceptabilité des couleurs.



Avant la mesure de la couleur		
Visuel	1905-1915	
Langues	Atlas de Munsell	CIE31
"red" "vibrant" "light"	Sample 2.5 R 5/12	X = 33.16 Y = 20.89 Z = 12.71  for D65 / 2°
Vocabulaire limité	Détermination pouvant être comparée	Premiers calculs
Déterminés par des individus		
SUBJECTIVITÉ		

De la couleur... à la mesure colorimétrique Du langage technique... à l'espace colorimétrique CIE 1931... et à l'espace colorimétrique CIE Lab 1976 Du sujet... à la mesure via l'objet



### Avec la mesure colorimétrique

1931

1976

Triangle des couleurs

Espace colorimétrique CIE Lab

$x = 0.4967$   
 $y = 0.3129$

$L^* = 52.15$   
 $a^* = +51.72$   
 $b^* = +19.29$

$L^* = 52.15$   
 $C^* = 55.20$   
 $h = 20.45^\circ$

dominante  $L_1 = 628 \text{ nm}$   
Densité lumineuse = 46.9 %

for D65 / 10°

for D65 / 10°

for D65 / 2°

Première détermination objective

Détermination par coordonnées tracées perpendiculairement

Détermination par coordonnées tracées sur le cylindre

Calculs colorimétriques

OBJECTIVITÉ

## Liste de références

- Farbe sehen, Corinna Watschke, 01.2009 [[www.planet-wissen.de](http://www.planet-wissen.de)],
- Farbmanagement in der Digitalfotografie (ISBN 3-8266-1645-6), 2006, Redline GmbH, Heidelberg
- Beschreibung und Ordnung von Farben, Farbmétrie, Farbmodelle, DMA Digital Media for Artists – Archiv 2006-2011, Kunstuniversität Linz, Gerhard Funk
- Messen – Kontrollieren – Rezeptieren, Dr. Ludwig Gall [[www.farbmétrie-gall.de](http://www.farbmétrie-gall.de)]
- Farbabstandsformeln, 2012, Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V. [[www.fogra.org](http://www.fogra.org)]
- Wikipedia, divers articles sur la couleur et la mesure de la couleur [<http://de.wikipedia.org/wiki/Farbe>]
- Diverses représentations de modèles de couleurs et d'espaces de couleurs [[http://www.chemie-schule.de/chemieWiki\\_120](http://www.chemie-schule.de/chemieWiki_120)]
- Praktische Farbmessung, Anni Berger-Schunn, 2. überarbeitete Auflage, 1994, Muster-Schmidt Verlag, Göttingen – Zürich
- Farbabstandsformeln in der Praxis, SIP 01.2011
- Schläpfer, K.: Farbmétrie in der grafischen Industrie, 3. Aufl. St. Gallen; UGRA 2002 (Tabelle S. 48)

Données de publication:

### **Editeur:**

Datacolor, Inc. 5 Princess Road, Lawrenceville, NJ 08648, USA

Téléphone: 1-800-982-6497 | Fax: 609-895-7472 | [marketing@datacolor.com](mailto:marketing@datacolor.com) | [www.datacolor.com](http://www.datacolor.com)

### **Texte:**

Gabriele Hiller, Hiller Direct Marketing, Stühren 41, 27211 Bassum, Allemagne

[www.hiller-direct-marketing.de](http://www.hiller-direct-marketing.de)

© Copyright Datacolor. Tous les droits sont réservés

### **EUROPE**

Datacolor AG Europe

6343 Rotkreuz

Téléphone: +41 44.835.3800

### **AMERICA**

Datacolor Headquarters

Lawrenceville, NJ

Téléphone: +1 609.924.2189

### **ASIA**

Datacolor Asia Pacific Limited

Hong Kong

Téléphone: +852 24208283